

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE

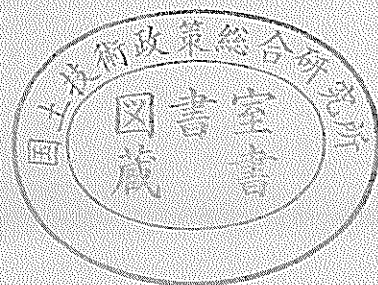
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 19

NO. 3

SEPT. 1980

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第19巻 第3号 (Vol. 19, No. 3), 1980年9月 (Sept. 1980)

目 次 (CONTENTS)

1. Oxygen Uptake by Resuspended Sediments
…Kiyoshi HOSOKAWA, Eiichi MIYOSHI and Tsuyoshi HORIE…… 3
(再浮遊した底泥の酸素消費実験……細川恭史・三好英一・堀江 毅)
2. 波高計群による方向スペクトルを用いた反射波推定法の検討
……合田良実……37
(Examination of the Resolution of Incident and Reflected Wave by
Means of Directional Spectra with a Wave Gauge Array……Yoshimi GODA)
3. 大型く(矩)形浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究(第1報)
—模型実験による検討—……高山知司・永井紀彦・菊地 治・諸石一幸……71
(Motions and Mooring Forces of a Rectangular Floating Body in
Wave (1st report)……Tomotsuka TAKAYAMA, Toshihiko NAGAI
Osamu KIKUCHI and Kazuyuki MOROISHI)
4. 大型く(矩)型浮体の波浪中の動揺と係留力に関する研究(第2報)
—数値シミュレーション手法について—……上田 茂・白石 悟… 105
(Motions and Mooring Forces of a Rectangular Floating Body in
Wave (2nd report)……Shigeru UEDA and Satoru SHIRAIISHI)
5. 繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリートばりの疲労強度(第2報)
……上田 茂・小島 晃… 145
(Study on Fatigue of Reinforced Concrete Beams
……Shigeru UEDA and Akira KOZIMA)
6. 係船岸におけるたわみ性控え工の設計法に関する研究……松並仁茂… 191
(Studies on the Design Method of Flexible Anchorages of the
Quaywall……Hitoshige MATSUNAMI)

6. 係船岸におけるたわみ性控え工の設計法に関する研究

松 並 仁 茂*

要 旨

最近の地震において矢板式係船岸のたわみ性控え工の被災が特に著しかった。これは構造物設計法の問題に起因するものと判断される。これを解決するための有効な方策はまだ示されていない。それで、本報告は従来
の計算方式を改訂し、新たに地震時のたわみ性控え工の設計法を提案するものであるが、その主な内容は次の
3点である。

- (1) 解析が容易で実用的な新しい杭の横抵抗の基本式を導き、式の特徴について解説している。
- (2) 新しい杭の横抵抗式に基づく単杭と連続壁の横方向地盤反力定数を抵抗土圧に関連づけるとともに、具
体的な数値の提案を行っている。
- (3) 地震時抵抗土圧を必要とするため、粘性土の粘着力 および 壁面付着力を含む地震時土圧の一般式を導
き、式の特徴について解説している。

なお、この新しいたわみ性控え工の設計法はそのまま直杭式横さん橋の設計法として適用できるとし、ま
た、壁面付着力を考慮した地震時土圧式を用いて、二重矢板式係船岸の設計を合理的に行うことができると述
べている。

* 設計基準部長

6. Studies on the Design Method of Flexible Anchorages of the Quaywall

Hitoshige MATSUNAMI*

Synopsis

Many flexible anchorages of the sheet pile quaywall were damaged due to the recent earthquakes. It is considered because of lack of the suitable design method, but any effective method solving this problem has not yet been proposed.

In the report the author revises the conventional calculation system, and proposes newly a design method of flexible anchorages during earthquakes, as follows,

(1) Proposes new fundamental equations for the lateral resistance of piles, which are easily analytical and practical.

(2) Correlates the resisting earth pressure and the coefficient of lateral soil reaction both for single piles and continuous walls on the basis of the new equations for the lateral resistance of piles, and proposes practical values of the coefficient.

(3) Proposes a general equation of the lateral earth pressure during earthquakes, taking into account the cohesion and the adhesion between the clayey soil and the wall, for the purpose of calculating the above earth pressure for the coefficient of soil reaction.

The new design method of flexible anchorages is applicable not only for the sheet pile quaywall but also directly for the piled wharf with vertical piles and for the quaywall built with two rows of sheet piles, with the aid of the earth pressure equation during earthquakes taking the adhesion of the wall into account.

* Director, Design Standard Division

目 次

要 旨	191
1. ま え が き	195
2. 係船岸におけるたわみ性控え工の設計上の諸問題	195
2.1 最近の地震被災にみる係船岸のたわみ性控え工	195
2.2 係船岸における杭の横抵抗の設計上の諸問題	198
2.3 係船岸におけるたわみ性控え工の設計について	199
3. 杭の横抵抗の研究と設計への対応	200
3.1 杭の横抵抗の研究の概況	200
3.2 久保らの港研グループの研究と港研方式	202
3.3 杭の横抵抗の研究と設計への対応	203
4. 杭の横抵抗の新しい基本式	204
4.1 杭の横抵抗の新しい基本式	204
4.2 $y''''+by=0$ の解析	206
4.3 $y''''+axy=0$ の解析	210
4.4 $y''''+(ax+b)y=0$ の解析	213
5. 抵抗土圧の諸問題とその解明	215
5.1 地盤反力と抵抗土圧	215
5.2 地震時土圧の研究の概況	216
5.3 新しい地震時土圧式	218
6. 横方向地盤反力定数の諸問題とその解明	228
6.1 横方向地盤反力定数	228
6.2 杭幅と横方向地盤反力定数	230
6.3 単杭の横方向地盤反力定数	232
6.4 連続壁の横方向地盤反力定数	234
7. 新しいたわみ性控え工の設計法の適用	237
8. 結 論	240
9. あとがき	240
参考文献	241
記号一覧表	243
付 録	245
A 付 函	245
B 杭の横抵抗の基本式の誘導	246
C 杭の横抵抗の計算表	254
D 地震時土圧式	258

1. まえがき

港湾構造物の控え杭や控え壁の安定に関する問題は、設計上きわめて重要であるが、現在もまだ多くの課題をかかえたまま、実地に設計され、構造物の建設が行われている。これらの控え杭や控え壁は、矢板式係船岸の控え工、横さん橋の直杭、上屋や倉庫および荷役機械の基礎杭に用いられているほか、構造的に、矢板式係船岸の根入部、自立矢板、二重矢板、セル式構造物などの抵抗機構にまで及ぶものとみることができる。

直杭控え工を用いた比較的新しい大型の矢板式係船岸の標準事例を図-1に示すが、ここに用いられる控え工は図-2にみられるように比較的単純なものである。港湾に矢板式構造物が取り入れられたのは1926年、大阪港尻無川¹⁾であるので、同時に用いられてきた控え工は、今日まで約50数年の経験をもっていることになる。一方、これに対して、直杭や連続矢板壁でできているたわみ性控え工が本格的に用いられたのは1959年²⁾頃からであるので、経験年数は20年程度と比較的短期間といえる。それゆえ、剛度の高い控え版などは、多くの経験から構造設計上、ほぼ完成の域に達していると判断されるのに対し、たわみ性控え工の方は、経験が浅いうえ、地震時の設計法が殆んど整っていないことなどがあって、問題視されることが多い。

港湾では、杭の横抵抗による設計法は久保の研究³⁾による、いわゆる、港研方式^{3),4)}とよばれているものと、チャンの方法⁵⁾とよばれるものとの2つの方法があるが、これらは、道路⁶⁾、国鉄⁷⁾および建築⁸⁾などの分野におけると同様、地盤条件は常時・地震時とも常時扱いのままとなっている。しかし、矢板式係船岸等の控え版の設計では、耐震設計が行われている現状からすると、この場合だけ常時の設計で済ますのは不十分であると思われる。さらに、現行設計では、最終的チェックともいえる杭の地盤反力と地盤の抵抗土圧の対比を行わなくてもよい仕組になっているなど、重要な課題が残されたままになっている。

本報告は、このことに着目し、地震時のたわみ性控え工の合理的設計法を提案するものであるが、その主な内容は次の3点である。

- (1) 解析が容易で実用的な新しい杭の横抵抗の基本式を導き、式の特徴について解説する。
- (2) 新しい杭の横抵抗式に基づく単杭と連続壁の横方向地盤反力定数を抵抗土圧に関連づけるとともに具体的な数値の提案を行う。
- (3) 地震時抵抗土圧を必要とするため、粘性土の粘着

力および壁面付着力を含む地震時土圧の一般式を導き、式の特徴について解説する。

本報告の要約はつぎのようである。まず、第2章では、係船岸のたわみ性控え工の現行設計法の問題をは握するため、最近の地震におけるたわみ性控え工の被災の特徴を知るとともに、杭の横抵抗についての現行設計法を実地の立場から批判し、設計法の改良点とその方策について述べる。第3章では、杭の横抵抗の現在の設計法にいたる過去の数多くの研究から、特に、たわみ性控え工の設計に関係すると思われるものを年代順に系統立てて述べるとともに、今後の設計法の改良点をさぐる。第4章では、杭の横抵抗の新しい基本式を導くとともに、その式の特徴についてふれ、さらに、境界条件と積分定数について解説する。第5章では、常時および地震時の横方向地盤反力定数を、それに対応する抵抗土圧(受働土圧—主働土圧)を介して関連づけようという試みのため、地震時の粘性土を含む土圧式を必要とすることになった。そのため、粘性土の粘着力のみならず付着力をも考慮した地震時土圧の一般式を導いたが、この土圧式の特徴について解説する。第6章では、現在、各方面で問題視されている横抵抗地盤反力定数の杭幅との関係について、仮説を立てるとともに、既存の野外実験の資料を用いて、考え方の妥当性について述べる。さらに、第4章で解析した杭の横抵抗の基本式に基づく新しい横方向地盤反力定数を、過去の野外実験の資料を用いて整理し、これを図化し、解説する。続いて、これらの単杭の横方向地盤反力定数を、杭幅との関係から、連続壁の場合についても整理し図示し、解説する。第7章では、これまで述べてきたたわみ性控え工の設計法の適用例についてふれる。まず、従来のチャンの方式との比較を極端な事例について検討を行ない、相違について考察する。次に、直杭式さん橋のように偏荷重をうけている斜面の直杭の設計に対する新しい提案式の適用についてふれる。さらに、二重矢板構造物への適用についての方法を述べ、いずれの場合についても十分適用できることを確認する。

2. 係船岸におけるたわみ性控え工の設計上の諸問題

2.1 最近の地震被災にみる係船岸のたわみ性控え工

港湾の係船岸および護岸(以下これを係船岸という)の構造設計では常時および地震時について検討するのを常態としている。重力式、矢板式、セル式およびさん橋式が代表的な構造様式であるが、これらは、ともに、多

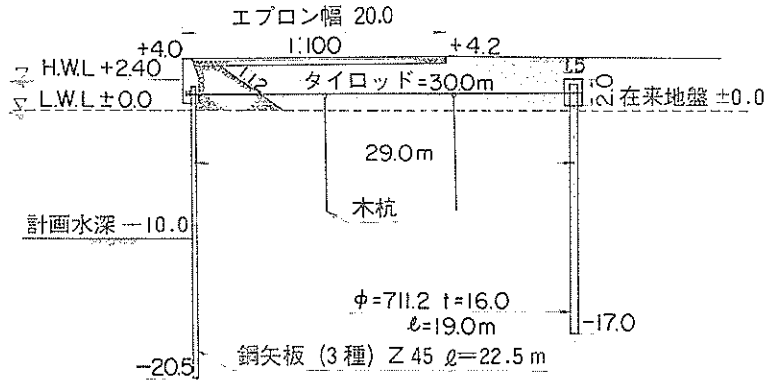


図-1 矢板式係船岸

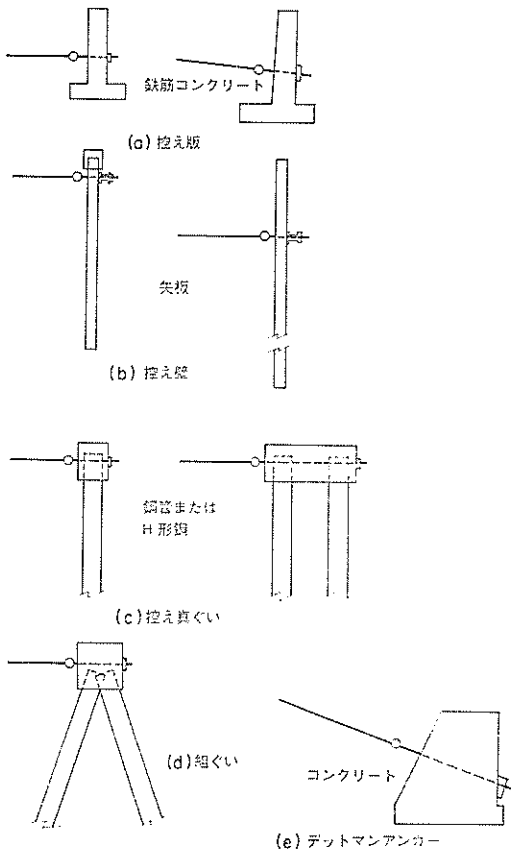


図-2 控え工の種類

くの経験を経て、今日の設計法を持つに至ったのである。なかでも、大型地震による被災は構造設計上貴重な多くの教訓を与えてくれた。こうしたことは、今後も同様に続けられるであろう。港湾の施設が大型になるほど水中に没する部分が多くなるが、このこと自体、耐震設

計上重要なのである。これらの水中部の構造物の地震力および背後地盤の地震時土圧を合理的に評価するため、いわゆる、みかけの震度法⁷⁾を用いて補正を行う。このため、係船岸は水深の増大に伴って、構造的に大型化の傾向にあることが一般に認めるところとなっている。

矢板式係船岸の控え工は図-2にあるように、控え版、控え壁、控え直杭、組杭およびデットマンアンカーに分類することができる。これら控え工は、例えば図-1に示すような矢板式係船岸の控え工の部分に設置されるのであるが、設置位置は背後の残留水位下になることが多い。このことは水中における地盤の状態を常に設計の対象としなければならないことを意味するものであり、とくに、地震時の水中地盤を取り扱わなければならない点が問題解決を一層困難なものにしている。

戦後の大地震で、港湾施設に大きな被害を与えたものとしては、東南海地震(1944.12.7)、三河地震(1945.1.13)、南海地震(1946.12.21)、新潟地震(1964.6.16)、1968年日向灘地震(1968.4.1)、1968年十勝沖地震(1968.5.16)、1970年日向灘地震(1970.7.26)、1973年根室沖地震(1973.6.17)、1974年伊豆半島沖地震(1974.5.9)、1978年宮城県沖地震(1978.6.12)などがあるが、なかでも、被災の大きい新潟地震、十勝沖地震および宮城県沖地震は、記録も整っているうえ、かなりな程度で設計上の分析を行い報告されている。

新潟地震⁸⁾は港湾を含め多くの施設に大被害をもたらした。新潟市を中心に細砂の単一粒度からなる砂地盤は、地震によって地盤の液状化現象が生じたとして、この問題が大きく取りあげられ、現象の解明と対策の方法について検討されたが、かなり有効な成果を得ることができた。港湾では土田⁹⁾は、港湾技術研究所において行った砂の振動実験と地震による現地地盤の液状化の事例から液状化に対する限界N値(標準貫入試験値)と地震

最大加速度の関係を解析しこれを取りまとめた。この成果は地盤の液状化の可能性について容易に判断を下せるほか、地盤改良の目安を立てるのにも有効に利用できる。しかし、地盤の抵抗支持力とか杭の横抵抗などに対しては、それ以上期待することはできない。新潟地震港湾被害報告⁹⁾は災害の状況を詳細に述べているほか、被災についての構造物の設計分析を行っている。このなかで、矢板式係船岸の控え版の安全率について、詳細な検討を行い、タイロッドを通じ作用する外力と地震時抵抗土圧の間での安全率を2.0とすれば、現行設計法で、控え版控え工の機能がはたせると述べている。その後、この結果をもとに、全国的規模で見直しを行った結果、地震時安全率を2.0に引き上げることになった。

十勝沖地震の被災報告¹⁰⁾からは、例によって、設計震度の小さい小規模な係船岸や護岸の被害が多いことのほか、直杭式控え工を有する矢板式係船岸の被害が、他の構造物に比較して著しいことをうかがい知ることができる。また、片山¹¹⁾らは被災例による現行設計法の検討を詳細に行っている。この地震は、被災港湾では200Galの地震動を受けたものと予想されているが、当該港湾では0.05~0.15の設計震度で設計されていた。それにもかかわらず、被害の程度は全般的に軽微であったと述べており、さらに、矢板式係船岸の控え版について安全率が0.8~1.1のものは移動を生じ岸壁法線のはりみ出しが生じたが、1.5以上のものについては移動は全くなかった。しかし、新潟地震の例から2.0とするのが適当であると

述べている。控え版の位置についても検討しており、現行設計では図-3(a)に示すように、主働崩壊面と受働崩壊面とが地表面で交差するような受働崩壊面の後方に設置する方法が適当であることについて、控え版の変位の実例をあげ立証している。これに対し、直杭控え工の被害がきわめて特異であったことから、「現行の控え直ぐいの設計法(港研方式)は地震時に対して現象を説明することができず、とくに、杭頭変位の計算については著しく危険な設計法である。そのさしあたっての対策としては、地盤の横抵抗定数を地震時に下げて用いるという方法も考えられないこともないが、根本的な設計法の改良のためには、実験にもとづく本格的な研究が行われることを期待したい。……従来矢板(控え)壁のような連続壁の横抵抗に対しては、実験的な研究が行われていなかったために、矢板壁の横抵抗常数は現行の設計法では杭と同じものを用いているが、テルツァーの指摘のように、矢板壁では杭に比して地盤の横抵抗常数を低くとる必要があるかも知れない。」と控え目ではあるが厳しく批判している。しかし、この件については、その後、何らの変更も行われることなく、そのまま現在に引き継がれている。

宮城県沖地震¹²⁾で被害が大きかったのは、宮城県の港湾の係船岸および護岸であった。なお、最大水平成分加速度の最大値は336Galであり、これまでの港湾地域強震観測で記録されたものの中で最大であった。被災の特徴は他の場合と同様に小型施設の方が著しい。矢板式係船岸では石巻港の被害が裏埋土の液状化現象に大きく影響していること。他の矢板式係船岸では控え工が組杭のものは被害がなかったが、控え工が控え版、控え矢板および控え直ぐいを用いたものでは、前方に変位したため、控え工直上の基盤を補装工とともに押し上げ、き裂破損を起こしたと報告している。すなわち、矢板式係船岸で液状化現象の生じたところは被害が大きかった。また、液状化現象の認められない地区において、控え工が組杭の岸壁では全く被害をうけなかったのに対し、隣接しているたわみ性控え工の岸壁のほとんどが前方に変位する被害をうけた。この事実は重要であり注目すべきことがらである。

一方、北島・上部¹³⁾は矢板式岸壁の地震時被災の分析を行っている。それによると、①控え鋼矢板構造物の設計に用いる地震震度は、既に提案されている野田・上部¹⁴⁾等の重力式岸壁の震度と地盤加速度の関係をそのまま用いることができる。②たわみ性控え工の現行の設計法は十分実用的であるが、改良の検討をする必要がある。③実際の矢板構造物のたわみ性控え工は剛性の高い控え版

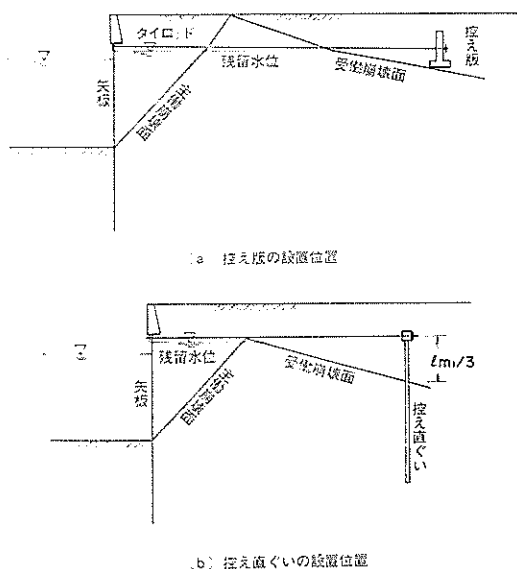


図-3 控え工の設置位置

より被害が大きいことを再確認した。④模型実験によると、控え版の振動による抵抗支持力の低下は1～2割程度であるものが、たわみ性控え工では5割程度まで急激に低下し、地震に対して弱いことをしめしている。⑤設計法の改良の方向としては、振動により支持力低下を設計に折り込むことであり、具体的には横方向地盤反力係数に関する振動による減少係数と最大地盤加速度との関係を利用できると報告している。

以上のことから、たわみ性控え工の地震時の設計において、地盤の液状化の判断は、土田の提案する方法で行うことができるが、地震時のたわみ性控え工の地盤評価については、まだ有効な方法がない状況にあることがわかった。

2.2 係船岸における杭の横抵抗の設計上の諸問題

港湾における杭の横抵抗の設計法は、久保⁹⁾の研究をそのまま取り入れた、いわゆる、港研方式と呼ばれる方法と、横山¹⁰⁾が提案する横方向地盤反力定数を用いて、よく知られるチャンの方法で計算する2つの方法がある。一応、変位を重要視する構造の場合は、港研方式を必ず用いることとし、その他の場合は、いずれの方法でもよいといった使い分けをしている。久保は実験的研究のみならず、多くの野外実験の結果をとり入れた成果を発表したが、横山も野外実験の値を整理して設計に便利な横方向地盤反力定数図を作った。これらはいずれも現場の資料によるものであるから、現地への適用には問題はないと考えるべきで、むしろ、これらの成果を実地に取り入れる際の配慮不足が指摘される。すなわち、これらは、いずれも、常時の単杭にのみ利用できるものであって、その他の場合に用いるときは、適切な方法によって係数の補正を行なう必要があるが、それについての方策が全く講じられていない。

つぎに、杭の間隔の問題であるが、港湾の施設の技術上の基準・同解説⁹⁾（以下、港湾の技術基準という。）によると表-1のように示している。表中の砂質土の縦方向については宮本・沢口¹⁶⁾の港湾技術研究所における模型実験の結果によるものであるが、他の数値については、他分野における各種の技術基準や設計指針などを参考に定めたものであると述べている。

表-1 杭の中心間隔

砂 質 土	横 方 向	杭径の 1.5 倍
	縦 方 向	杭径の 2.5 倍
粘 性 土	横 方 向	杭径の 3.0 倍
	縦 方 向	杭径の 4.0 倍

例えば、図-1の矢板式係船岸の直杭控え工の場合、杭は鋼矢板4枚毎に1本配置されているので、杭間隔は1.6mとなる。杭径が71.1cmであるので、杭間隔は杭径の約2.3倍であるから、砂地盤のこの控え工は、港湾の技術基準では単杭として取り扱ってよいことになる。一方、道路橋下部構造設計指針・同解説⁹⁾（以下、道路杭指針という。）によれば、横抵抗の群杭の影響は、杭の中心間隔が杭径の5倍以下になると現われるとしながら実用上、杭径の2.5倍あれば単杭と考えてよいとしている。また、間隔がそれ以下の場合は横方向地盤反力係数の補正係数として、 $\mu=1-0.2(2.5-L/D)$ を与えている。ここで、 L は杭間隔、 D は杭径である。また、玉置・三橋・今井¹⁷⁾らは縦横等間隔の群杭を研究しこれを取りまとめた。これによると、群杭効果が現われ始める間隔は頭部自由杭では5.5倍、頭部固定では7.8倍からであり、 L/D が2.5付近で、杭のバネ係数が、それぞれ0.8～0.55程度の値に低下することになる。これらの基準によると、さきの直杭控え工は、道路杭指針ではほぼ単杭、玉置らの基準では群杭となる。以上から、港湾での砂質土の横方向の単杭の基準値が、過少評価の傾向にあるが、これが設計上危険側の数値を与えるので、群杭の横抵抗について、その解明を急ぐ必要があると考える。

さらに、控え工の設置位置については、港湾の技術基準の改訂に伴って一部修正されたが、それでも問題がないではない。剛体のように考えられている控え版の剛度は、同様に使用される鋼矢板より若干大きい程度で、あまり変わらないのに、控え工の位置の決定法については、図-3で明らかなように、両者で非常に異なる。控え版の場合、常時と地震時について、受働土圧—主働土圧の抵抗土圧を用いることによって、極限地盤反力を仮定し、外力との間で極限平衡計算を行う。その際に算出される主働崩壊面と受働崩壊面を図-3(a)のように、地表面で交差させ、控え工はこれによって描かれる受働崩壊面の外側に設置することとした。この一連の簡易な設計法は、すでに述べたように、地震などの多くの経験から得た貴重な港湾技術の1つである。

たわみ性控え工の場合は横方向地盤反力定数を導入して、実際には非線形性の地盤について、弾性変形計算を行う。この際、計算される曲げモーメント第1ゼロ点 l_{m1} （頭部固定杭では曲げモーメント第2ゼロ点）の1/3を長さとする杭の主要抵抗部分が、図-3(b)のように、受働崩壊面の外側になるよう位置を定めている。これは久保・三枝¹⁸⁾の実験的研究をそのまま設計に取り入れたので問題がある。その1つは、これまで指摘してきたように、地震時の設計に何らの補正を行わずに、そのまま

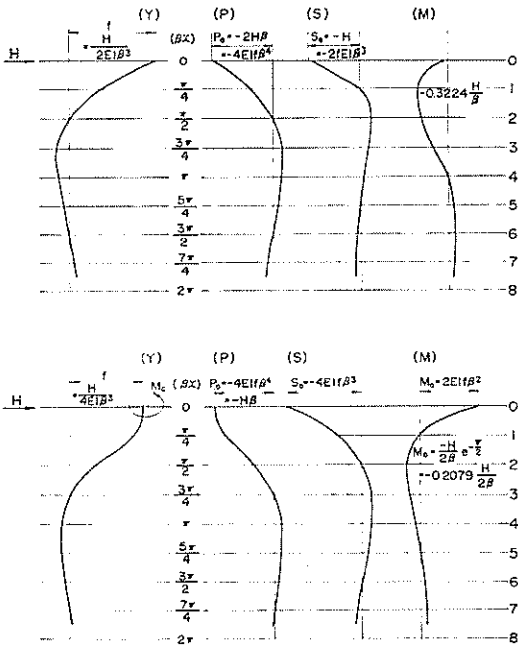


図-4 杭の挙動 (チャン方式)

用いることは危険であるということである。他の1つは、この研究では地表面にタイロッドを置いて実験を行ったが、一般にタイロッドは地表面下2~4mに設置されることが多いが、この研究の結果を状態の異なる実地にそのままとり入れたことである。すなわち、図-3(b)にあるように、主働崩壊面と受働崩壊面を地表面ではなく、地盤中のタイロッドの位置で交差させ、それより上にある地盤を、上載荷重として取り扱っているが、現象的には、主働領域と受働領域とが地盤内で互いに干渉しあっているし、他との関連でこの手法は問題がある。

杭の横抵抗の設計では、杭に作用する地盤反力と地盤の抵抗土圧との比較検討を省略しているが、これはやはり最終チェックとして設計に必要な手順の1つであると考えられるので、設計に組み込むべきである。この土圧チェック法を省略しているのは港湾以外の他の分野においても行われているようである。これは、計算が容易なことから、最も広く用いられているチャンの方法による場合、計算結果は図-4のようになるが、この図でわかるように、頭部自由杭の場合も、頭部固定杭の場合も、地表面で最大反力強度を有する分布を示す。一般に粘性土の場合地表面では抵抗土圧はゼロではないが、砂質土の場合はゼロとなる。したがって、チャンの方法を用いる限り、地表面付近の地盤反力は抵抗土圧より大きくなり、現象的には地表面の地盤が抵抗力不足から破壊していることを示すので、設計法としては、双方の土圧が均

衡する仮想地表面での横抵抗問題を取り扱うよう改める必要があると考える。

最後に、これは港湾特有の問題かも知れないが、いわゆる控え工がたわみ性の連続壁または連続柱列でできている場合の横抵抗についての取り扱い方である。港湾の技術基準では控え矢板が長杭とみなし得るか否かを基準に従って判別し、長杭ならば杭の横抵抗の設計法に準じて設計することになる。問題はこの場合に用いる横方向地盤反力定数であるが、同基準では、久保²³や沢口¹⁹らの杭幅と定数に関する研究成果を取り入れ、杭幅が20~30cm 以上の場合は定数の値が一定になるとして、連続壁の場合も杭幅30cm 以上の杭の横方向地盤反力定数をそのまま用いることにしている。テルツァギ²⁰(Terzaghi, K.) は、結局は杭幅に関係しない横方向地盤反力定数を発表したのが、同時に鉛直連続壁についても提案した。これらは砂地盤を対象とした定数でMN/m³の単位をもつものであるが、杭の方が連続壁の方よりも大きく、その値は、いずれも2.5~2.8倍である。これは杭では側面のせん断力の効果を期待できるのに対し、連続壁の場合はそれが全くなく、壁面前後の地盤の状態によって定められることから容易に理解できる。こうしたことから、横方向地盤反力定数は単杭と連続壁で同一の値を用いることは、過大であり、設計上危険側の値を与えるので、現行設計法を見直す必要があると考える。

2.3 係船岸におけるたわみ性控え工の設計について

これまで述べてきたように、係船岸におけるたわみ性控え工は、地震に対して、弱い構造であることが確認された。それは設計のうえで、地震時の地盤の評価を全く行っていないところに主な原因があるようであり、その他の問題点も含めて再検討し、設計法の改訂を行わなければならない。地盤の地震時評価としては、液状化の判定法がよく知られている。これによって、地盤の液状化の可能性と、液状化を防ぐための地盤改良の工法の目安をつけることが可能となった。しかし、横抵抗に関する地盤の地震時評価は、さらに、独自の問題として解決しなければならないが、これらは、すべて難解であり、短期間にかつ容易に解答を得るとは考えられない。したがって、当分の間、他の簡易な方法によって対処するしか方法はないと思われる。

一方、たわみ性控え工の個々の設計手法において、直ちに改訂すべき諸点がある。まず、杭の間隔に対する、抵抗機能の低下問題であるが、港湾の技術基準では、砂地盤の横方向の群杭効果が他分野における値と比較して過少に評価されていると思われるので、再度見直す必要があろう。つぎに、たわみ性控え工の位置の設定法であ

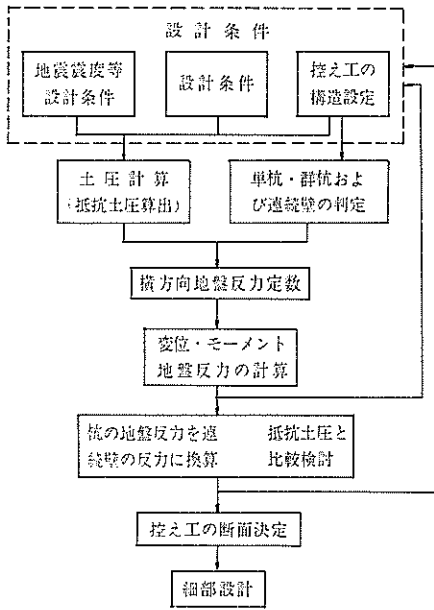


図-5 設計フロー図

るが、その方法自体に問題があるほか、長い経験から一応完成の域にまで達していると考えられる控え版の位置の設定を参考に検討を行い改良すべきである。

さらに、杭の横抵抗の設計では、一般に、杭の地盤反力と地盤の抵抗土圧との最終チェックを行っていないようであるが、直ちに、両者のチェックを行うよう改めるべきである。もう1つ、矢板式係船岸でよく用いられるたわみ性連続壁の控え工の横方向地盤反力定数は、現行設計法では単杭の値をそのまま用いているが、これは過大であり、危険側の設計となるので、早急に見直す必要がある。

最も重要で早急に対処すべきものに、地震時の地盤評価の件があった。これには従来から行われてきた地震時土圧を仲介に処理するのが、当面の問題解決法として、有効適切な手段であると考えられる。すなわち、たわみ性控え工の設計のための横方向地盤反力定数を、抵抗土圧の大きさによって一義的に決める、という方法が考えられるが、このように取り扱うことによって、常時、地震時を問わず、偏荷重地盤にも対応できるうえ、従来より複雑な互層地盤のほか、港湾のように、控え工の途中から浸水地盤になる地盤にも適宜弾力的に対応できるものとする。

最後に、たわみ性控え工の設計フロー図を 図-5 に示す。地震震度を含むその他一般の設計条件と地盤条件および控え工の構造を予め定めて設計が開始されるが、この段階で、地盤の液状化問題をクリアしておく、そ

の後の設計をよりスムーズに進めることができる。土圧計算によって抵抗土圧を求めると同時に、群杭効果の確認を行っておく。この両者によって、適切な横方向地盤反力定数を求め、水平変位、曲げモーメントおよび地盤反力を計算する。最後に、地盤反力を比較しやすいように、連続壁の場合に換算し、抵抗土圧と対比検討して基本設計は終了する。

3. 杭の横抵抗の研究と設計の対応

ここでは、杭の横抵抗についての数多くの研究のなかから、特に、係船岸のたわみ性控え工の設計に関係ある研究についてふれる。そして同時に、これらの研究に基づいて作られた現行設計法の経緯や背景などを確かめるとともに、含まれている諸問題をは握し、設計法改訂の新しい資料とするものである。

3.1 杭の横抵抗の研究の概況

杭の横抵抗の源泉は、ウインクラー²¹⁾ (Winkler, E. 1868)の「基礎の反力はたわみ量に比例する。」という概念を導入したことをもって最初とされている。続いて、ツィンメルマン²²⁾ (Zimmerman, 1888)は鉄道の道床の設計法を発表した。エンゲッサー^{19), 20)} (Engesser, 1893)は地盤反力係数を $k=a+b/B$ とおき、梁の幅の増加に伴ない地盤反力係数が減少することをすでに述べている。1911年テルツァギーは構造物の基礎の設計に、はじめて弾性支承上の梁の理論を用いたといっている。わが国の林桂一^{22), 23)} 1912年に「弾性基礎上の梁について (欧文)」によって学位を得ており、1921年ドイツのスプリングァー社から「弾性基礎上の梁の理論」を出版した。チモシェンコ²⁴⁾ (Timoshenko, S.) は1915年に鉄道のレールの強度に関連して、地盤反力係数 k を荷重 P 、枕木間隔 l 、沈下量 s のとき $k=P/(s \cdot l)$ とおくとよく一致するのとべている。

これらは、地盤に鉛直荷重を行う場合である。これを杭の横抵抗に利用しようとし、その動きが活発化したのは、フィジン²⁵⁾ (Feagin, L.B.) のミシシッピ川アルトン付近のこう門基礎杭についての水平力による現地実験の報告に対する、討論の内容が公刊されたが、その頃をもって最初とされている。この討論で、特に、きわだったのは、カミングス²⁶⁾ (Cummings, A.E.) とチャン²⁰⁾ (Chang, Y.L.) であろう。以下これら杭の横抵抗に関する研究について、年次順に、系統立てて述べることにする。

① カミングスは杭頭固定の杭について、式(1)のように仮定した。すなわち、たわみ曲線を4次のべき級数とし、地盤の弾性係数 E_s は地表面でゼロ、深さ方向に直

線増加するものとした。

$$\left. \begin{aligned} P &= E_s y, \quad E_s = \frac{U(L-x)}{\omega} \cdot B \\ y &= a_1 \left(\frac{x}{L}\right)^2 + a_2 \left(\frac{x}{L}\right)^3 + a_3 \left(\frac{x}{L}\right)^4 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、 x は深さ L を原点とし、鉛直上方に正とする。 U は土の単位体積重量、 ω は土の弾性的特性によって定まる無次元の定数、 L は杭の水平変位によってなされる仕事量最少の長さで、 $L = \sqrt[3]{(216EI\omega)/U}$ である。

これに対し、南²⁷⁾は地盤の弾性係数を深さ方向に平方根に比例するものとし、式(2)のようにおいて、カミング

$$P = E_s \sqrt{\frac{1-x}{L}} y \quad (2)$$

スに準じて式を解いた。

② チャンは、杭の横抵抗の場合の地盤反力を鉛直載荷の場合と同様に考え、水平変位に比例し深さに関係なく一定であるとした。これを、チモンエンコの材料力学に従って、式(3)のようにおき、半無限長の頭部固定杭として解き、フィジンの実測値と比較検討した。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = P = -E_s y, \quad E_s = \frac{Ul}{3\omega} \cdot B \quad (3)$$

当時、ピクトリア大学の研究生であった彼は、カミングスらと事前に討議したようであり、地盤の弾性係数の与えかたについては、カミングスと同一であるほか、地盤反力と水平変位によってなされる仕事量最少の長さ l を導入していることも同様である。チャンは数式から導かれた水平変位は、 $f = H/a$ であるが、 $f = H/a - b$ の方が実際の場合によく一致すると述べている。

③ パーマー(Palmer, L.A.)とトムソン²⁸⁾(Thompson, J.B.)は式(4)のようにおいて、これを階差法で解いた。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + K \left(\frac{x}{L}\right)^n y = 0 \quad (4)$$

ここで、 K は地盤の弾性係数であるが、 $K = k \cdot B$ であり指数 n とともに実測によって定める定数である。ただし n は $1 \sim 1/3$ であり、この値によって、結果は大きく左右すると述べている。実例としてフィジンの調査報告の資料を用い対比している。これによると、 $10 \sim 13\text{m}$ の杭を8等分し、計算したが、分割が粗い割には、結果が適当であると思われる。

④ テルツァギー²⁹⁾は、梁の鉛直載荷に対する地盤反力定数と連続壁や矢板および杭に対する横方向地盤反力定数について、おのおの考え方と実数の提案を行った。杭の場合、式(5)のようにおいているので、粘性土および、砂質土の、土の弾性係数は、ともに、杭幅に関係なく一定値となる。これに対して、砂質土における連続控

$$\left. \begin{aligned} EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k_n \cdot B \cdot y &= 0 \\ \text{(粘性土)} \quad k_n &= \frac{30}{B} k_{n1} = \frac{20}{B} k_{n1} \\ \text{(砂質土)} \quad k_n &= n_n \frac{\bar{z}}{B} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

え壁や矢板の場合は $k_n = l_n \cdot z/D$ とおいている。ここで D は根入長である。

⑤ 谷本³⁰⁾は地震時の杭について、式(6)のようにお

$$\left. \begin{aligned} EI \frac{\partial^4 y(x, t)}{\partial x^4} + \frac{\gamma A \partial^2 y(x, t)}{g \partial t^2} \\ + 2ay(x, t)k(x) - f(x, t) &= 0 \\ y(x, t) &= u(x) \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

て、これを階差法で解く方法を示した。ここで、地盤反力定数 k は深さの n 乗($n=0 \sim 1$)に比例するとし、その値は動的な実験によって定めることとするが、それができないときは、物部の方法などの耐震設計に頼らざるをえないと述べている。

⑥ ロー³⁰⁾(Rowe, P.W.)は矢板壁でよく知られているが、杭の横抵抗についても報告している。解法は矢板

$$\left. \begin{aligned} EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P(x, y) &= 0 \\ P(x, y) &= \frac{\bar{m}xy}{D}, \quad \bar{m} = \frac{H}{y_0 BD} K(\alpha, \rho) \\ y &= \sum_{n=0}^{\infty} a_n x^n, \quad \alpha = l - \frac{D}{H}, \quad \rho = \frac{BH^3}{IE} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

の場合と同様である。ここで、 L は矢板の全長、 D は矢板の根入長、 H は水平力、 B は杭幅である。 \bar{m} は実験によって定める定数である。

⑦ マクレランド(McClelland, B.)とフォシム³¹⁾(Focht, J.A.)は径61cm、長さ33.5mの鋼管杭を水深10.1mの海底に打ち込んで、水平荷重を静的と動的にわけて実験した。その結果、土の弾性係数は、深さに比例して増加し、水平変位の増加にもなって減少する、一方、静的荷重と動的荷重ではあまり差はなかったと報告している。さらに、海底土の土の弾性係数 E_s と一軸圧縮試験との相関関係について、両者の間に比例関係がなりたつと説明している。

⑧ ゴール³²⁾(Gaul, R.D.)は波浪による動的交番荷重の鉛直杭について、静的荷重との対比を行ったが、両者の最大曲げモーメントの値はほとんど同様であり、その位置については、静的荷重の場合は動的荷重の場合より若干下の方に生ずる程度であったと述べている。

以上のように杭の横抵抗についての古典的ともいえる諸研究は、そのほとんどが現在問題とされている事項に深く係わるものであることがわかる。

ウィングラーの地盤反力がたわみ量に比例するという

概念は今日も不滅の原則である。エンゲッサーは載荷幅の地盤反力係数に与える影響について既に論じた。この中にあって、わが国の林の活躍は外国の方でよく知られているようである。杭の横抵抗の研究で、チャンの論文がもたらした反響は大きいものがあつた。チャンは地盤が砂質土である場合、地盤反力係数が一定ではなく、深さに比例することを考慮して、深さ方向に一定の係数の値を低目に用いている。さらに、鉛直杭の杭頭変位が、実際には原点を通る直線とは異なることも記述している。カミングスの実用的設計法は計算が簡易なうえ、地盤反力係数が深さとともに直線増加することを考慮していることから、もっと多用されてよい方法であると思われる。同じ意味でパーマーとトムソンの階差法による解法は、今日的であるので再検討してみる価値は十分あるものと思われる。

一方、設計に用いる地盤反力定数に対して、テルツァギーは、地盤が粘性土と砂質土についての考え方と実用値を示したが、結局はこれらは杭幅に関係なく一定値を示すものであるとした。谷本は杭打基礎の耐震性について、杭の振動性状の計算法を示した。ローは、杭の横抵抗を、矢板壁の根入部の設計の仕方と同様な方法でできると提案した。さらに、マクレランドとフォッシュェヤールらによって、同一地盤においては静的荷重と動的荷重とでは最大曲げモーメントの大きさと、それが生ずる位置については、ほぼ同様でありきわ立った差は認められないことが確かめられた。さらに、マクレランドとフォッシュェは土の弾性係数は深さ方向に直線増加し、水平変位の増加に対して減少すると述べるのと同時に、一軸または三軸圧縮試験と土の弾性係数が比例関係にあることを見出し、室内実験で土の弾性係数が推定できることを指摘した。

3.2 久保らの港研グループの研究と港研方式

石井をはじめとする篠原・久保および林らは、杭の横抵抗について、数多くの野外実験と室内実験を行い、研究を促進して設計法の確立を図った。ことに、港湾技術研究所と八幡製鉄株式会社（現・新日本製鉄株式会社）との共同研究³³⁾については、これを詳細にまとめ報告している。

一方、久保は港湾技術研究所において杭の横抵抗を専ら研究し、数多くの有益な成果を発表した。すなわち、鉛直自由端の単杭³⁴⁾、横方向地盤反力定数³⁵⁾、頭部固定杭と斜杭³⁶⁾、鉛直控え杭³⁷⁾、短杭³⁷⁾、および斜面における鉛直単杭³⁸⁾などがある。これらの成果の主要事項については次のようである。

① 横抵抗の杭が置かれているあらゆる状態では、お

よそ式(8)のようである。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -P = -p \cdot B = -k x^m y^{0.5} \cdot B \quad (8)$$

ただし、 $0 \leq m \leq 1$ である。

② 地盤はS型地盤とC型地盤に分けることができる。S型地盤は、例えば、一様な密度の砂地盤や正規圧密の粘性地盤などで、標準貫入試験値(N値)が深さとともに直線的に増加する地盤であり、 $p = k_x x y^{0.5}$ と表わすことができる。

③ C型地盤は、例えば、地表面の締った砂地盤や大きな先行圧密をうけた粘性土地盤で、標準貫入試験値が一定であるような地盤であり、 $p = k_y y^{0.5}$ と表わすことができる。

④ 杭幅がおよそ20cmをこえる場合、横方向地盤反力定数に対して幅の影響を考える必要はない。幅が20cmより小さいときは横方向地盤反力定数は杭幅に逆比例する関係がある。杭が横方向力を受けるときに生ずる土の抵抗は、杭の前面における土のせん断および圧縮に対する抵抗と杭および土塊の側面における土のせん断抵抗の2つに分けることができる。前者は杭幅に比例して増加するが、後者は杭幅に無関係に一定の値をとると考えられる。

⑤ 横方向力に対して有効な抵抗力を発揮するために必要な杭の根入長を有効長というが、その有効長は曲げモーメント第1ゼロ点の深さ l_m (頭部固定杭では曲げモーメント第2ゼロ点)の1.5倍とればよい。

⑥ 砂質土の土30度までの斜面における鉛直単杭の横抵抗は基本式(式(8))にあてはまるものであり、山側または谷側に外力が作用するときの補正係数と、崩壊による地表面の仮想低下量について、これを量的に示した。

⑦ 式(8)にあるように、この基本式が非線型であるため、解を得ることはきわめてむずかしい。そこで、設計計算を容易にするため、相似則を用いて解析し、地表面変位、最大曲げモーメントおよび有効長などに対する計算図表を作成した³⁹⁾。

この久保の方式に従って設計計算する方法を、一般に、港研方式といっている。この基本式にみられるように、非線形のため、数値計算によらなければ個々の外的条件に対する解を得ることができない。そのうえ、計算の重ね合せの原理が適用できないため、複雑な条件に対する応用が容易にできない。このような大きな欠点はあるが、一般に、杭の挙動をより忠実に示すものであるといわれている。

この港研方式の計算法をより容易に行えるよう考案し

たのは山下^{39),40)}・福富および奥山³⁾ら、港湾の設計グループである。彼等はS型地盤・C型地盤の両者に共通した一定の基準杭についてもとめた基準曲線から換算係数を用いて原型杭に換算する方法をとっている。これによって作成された基準曲線は36種類にも及んでいる。

久保は1967年にこの世を去った。残された研究は沢口・高橋らによって続けられている。沢口¹⁰⁾は横方向地盤反力定数を地盤の土質力学諸定数との関連について研究し、次のような結果を得た。

砂地盤について、①杭幅が30cm以上になると、杭頭変位1cmに対する単位幅当りの横方向力は一定となる。幅30cm以下では、杭幅が増加すると横方向力は減少する。②杭のみかけの横方向地盤反力定数は、杭前面の受働土圧と杭側面のせん断力などによって表わすことができる。③横方向地盤反力定数と受働土圧との間で、次の

$$k_s = 2K_p \gamma \quad (9)$$

関係があることがわかった。ここで k_s は $g \cdot f/cm^{0.5}$ の単位をもつ、S型の横方向地盤反力定数、 K_p は受働土圧係数、 γ は土の単位体積重量である。

一方、粘性土地盤では、次の式(10)のような関係があることがわかった。ここで、 c_u は粘性土の非排水強さ、 α

$$k_s = \alpha \sqrt{\frac{2\pi}{\epsilon_{50} \cdot B}}, \quad k_c = c_u \sqrt{\frac{2\pi}{\epsilon_{50} \cdot B}} \quad (10)$$

は c_u の深さ方向の増加率、 ϵ_{50} は一軸圧縮試験の最大強さの50%におけるひずみである。

このように、砂地盤での横方向地盤反力定数は受働土圧強度の増加率との関係で表わすことは、きわめて自然であり、理解しやすい処置法といえる。これに対して粘性土については、式(10)にみられるように、粘性土の強度とひずみとの関連で表わしたことは、前に述べたマクレランドらの指摘事項を一步前進させたこととして評価される。

沢口はさらに、組杭、縦列の群杭¹⁰⁾、二重矢板¹¹⁾およびウエルに及んでいる。ウエル¹²⁾でも久保の短杭の結果を用いて十分説明できるといっている。

港湾では、杭の横抵抗の設計に港研方式のほかに、横山が作成した横方向地盤反力係数の図表¹³⁾を用いてチャンの方法で計算することもある(付録-A.1参照)。横山は、野外実験の例から横方向地盤反力定数と標準貫入試験値の間で比例関係を見いだした。さらに、設計の便宜を図るため、数多くの構造設計的解析を行い、同時に、便利な設計図表を作成^{13),14)}している。

石黒¹⁵⁾は矢板壁について、チェボタリオフ(Tschebotarioff, G.D.)やローらの研究成果を用いて、これを地震時にまで拡張することを試みた。しかし、矢板の控え

工についてはたわみ性控え工にはふれず、従来の地震時土圧を計算対象とする控え版工法のみを取り扱った。

三橋¹⁶⁾は矢板の根入部や沈埋トンネルの設計に必要な二次元の横方向地盤反力定数の推定を試みた、それは、ルイ・メナールの式から横方向地盤反力定数と地盤のレオロジー特性との関係を導く。一方、有限要素法による弾性解を得ておき、この両者を用いて、まず、三次元の杭の横方向地盤反力定数を確認のうへ、同様な方法で二次元の横方向地盤反力定数を推定するのである。その結果、粘土、シルトおよび砂の各地盤について求めることができる。それらの値は、例えば、砂質土の場合、 $N=10$ のとき、二次元 k 値は、杭の場合の約3/4となり、一方、粘性土の場合は $c_u=10kN/m^2$ のとき、前と同様に約3/4に低下するとのべている。

以上のように、港研方式には、地震時の設計への対応が考えられていないことのほか、重ね合せの原理が適用できないこと、二次元の横方向地盤反力定数を検討する必要があることなど、主要な問題点として残されていることが明確になった。

3.3 杭の横抵抗の研究と設計への対応

最近のわが国における、港湾以外の分野での、杭の横抵抗の研究については、若干、年数を経てはいるが、「土と基礎のタイの水平抵抗小特集」にそのあらましが記載されており、全容をは握することができる。

駒田¹⁷⁾が解説している土木構造物の杭の横抵抗は、道路¹⁸⁾と河川構造物に限ると前置きして、これらの設計法は弾性床上の梁の理論を踏襲している。その理由として、10数年間の実績と豊富な現場試験の資料が得られていること、この設計法で十分な精度が得られること、取り扱いが簡単で、多様な構造物に対応できることをあげている。港湾の施設設計と比較するため、主要事項を追加すると、 $\beta = \sqrt[3]{E_s/AET}$ とすると、杭長 l との間で、弾性体で無限長杭として扱う限界は $\beta l > 3$ とする。横方向地盤反力係数は地盤調査に基づいて推定するか、水平載荷試験によって求める。地盤調査によって推定する場合、変位量1.0cmのときの k 値を基準 k 値 k_0 として設定し、設計で基準変位量が1.0cm以外の場合は、 $k = k_0 \gamma^{-1/2}$ の式によって補正する。基準変位量は各実施機関で定めるが、杭頭固定の条件で常時1.0cm、地震時1.5cmを標準としている。最大の問題点としては、偏荷重を受ける構造物の取り扱いが十分でないことであり、早急に検討して対処すると述べている。

一方、山肩¹⁸⁾は建築構造物の杭の横抵抗¹⁹⁾の設計法と研究の概要を述べている。建築では、従来の弾性地盤反力方法よりも、地盤反力の全塑性あるいは弾塑性的な見方

に立った極限設計法を採用しており、したがって、水平変位よりも、杭材の応力の検討に主眼を置いている。すなわち、設計法としては、ブロムス(Broms, B.B.)^{49), 50)}の方法を積極的に用いることにしたが、これでは、杭の水平変位量を得ることはできないため、弾性床上梁法を併記した。一方、群杭⁵¹⁾と地震時⁵²⁾の杭について問題視しており、これに関する研究が盛んに行われているようである。

以上は概説的な報告であるが、そのほかに、当時の杭の横抵抗について、関心度の高い課題として数点の報告がある。主な研究はやはり、横方向地盤反力定数の推定^{53), 54), 55), 56)}に関するものとそれに関連のある群杭効果の問題⁵⁷⁾が中心となっているようである。その中で、本報告に特に係わりの深い金谷⁵⁸⁾らの壁杭の水平抵抗についてふれてみる。対象とする杭は連続地中壁であり、これらの横方向地盤反力定数の推定法についての研究である。彼らは地盤反力を杭前面の受働抵抗と側面の摩擦抵抗に分離し、横方向地盤反力定数もこれに対応させて k_p と k_f に分けて、式(11)のようにおいた。

$$k = k_p + \frac{2k_f B_2}{B_1} \quad (11)$$

ここで、 k は単杭の横方向地盤反力定数、 B_1 は壁杭の幅、 B_2 は壁杭の側面の厚さである。野外試験の結果、 k_f/k_p はローム層で0.8~0.4、軟弱砂層で1.1~0.6となったが、これは連続壁に対する横方向地盤反力定数が単杭の場合の1/2~1/3であることを示すものであり、危険側の設計となることを意味するものである。

横方向地盤反力定数の推定の方法では、港湾の久保や横山は標準貫入試験値をその指標としたが、福岡・宇都⁵⁹⁾および矢作ら土木研究所グループも標準貫入試験値との関係について研究し報告している。この標準貫入試験値は原位置試験として、地盤の性質をしめす優れた指標であることは多くの知るところであるが、実際には、相当なバラツキがあるうえ、礫などが混入すると、かなり高目の数値を示し、地盤の正当な評価が不可能になることもしばしばある。本報告で対象とする係船岸のたわみ性控え工の場合、その多くは、横抵抗の殆んどを負担する上部を、捨石や砂礫で被覆し、補強するが、このような場合、標準貫入試験値の測定は不可能であるうえ、推定さえできない。元来、この試験は、粘性土であれば一軸圧縮強度や粘着力、砂質土であれば内部摩擦角など、どちらかといえば地盤の土性的特性との係わりが深く、横方向地盤反力定数のような力学的平衡の場での指標には適さないのではないかと思われる。その点、載荷試験などは定数予測に適当な方法と考える。これに関してはポ

ーリング孔を利用した孔内水平載荷試験法がある。この方法についてはケーグラー⁶⁰⁾(Kögler, F.)によって考案された側方載荷装置が最初といわれている。これを改良して、現在、実地に利用されているものに、土研式 K 値測定器^{61), 62)}、メナールのプレシオメータ、応用地質のLLT⁶³⁾などがある。この孔内試験についても批判があるが、この試験法は杭の横方向地盤反力定数を原位置で測定するので、有効な方法であると考えられる。

杭の横抵抗の研究や、港湾以外の各分野における現行設計法を通じて、次のことが確認された。

① 杭の横抵抗の挙動は、久保が示した $p = kx^m y^{0.5}$ が最もよく一致する。ここで x の指数 m は $0 \leq m \leq 1$ である。ただ、これは非線形形で取り扱いが容易でないという一面を持っている。

② 杭の横抵抗の設計法には、港研方式のほか、土木構造物の $p = k_0 y^{0.5} \cdot y$ の弾性床上梁法、杭の緑維応力を一定の範囲に定めて作成された横方向地盤反力定数図表を利用する弾性床上梁法および建築構造物で用いられている極限設計法などがあるが、杭の利用目的や杭の材質などによって、設計法を適宜選択することができる。

③ 地盤の地震時の評価法を早急に明確にする必要がある。これについては、港湾以外の他分野でも検討の段階にある。

④ 杭の有効長について、土木構造物や横山は $\beta l > 3$ を主張しているが、久保は $1.5l_{m1}$ であり、 $\beta l = 4.5 \sim 5$ 程度となるので若干異なる。これについては、用いる設計計算式に関係するので、画一的に定めることはできないが、実用上 $\beta l \geq 3$ が適切なものと思われる。

⑤ 横方向地盤反力定数の推定法は、原位置試験では孔内水平載荷試験法が適当な方法である。これを地盤の抵抗土圧によって推定する方法も研究されているが、これが確立されると、地震時の対応も十分に行えるし、偏荷重地盤にも対処できる。

⑥ 杭幅が横方向地盤反力に与える影響は重要であり、早急に明確化すべき問題であると考えられる。これと、連続控え壁および矢板の根入部とは密接な関係がある。

⑦ 港湾の矢板式係船岸に用いられる、たわみ性控え壁は、いわゆる、地中埋設壁であり、従来の砂質土型と粘性土型の地盤を組合せた地盤反力特性をもつと考えられるが、この種の研究はほとんど行われていない。

4. 杭の横抵抗の新しい基本式

4.1 杭の横抵抗の新しい基本式

矢板式係船岸のたわみ性控え工の設計のためには、現行の設計法では相当問題があることが明らかになった。

それは、たわみ性控え工が、地表面からある深さで深の地盤の中に埋設されているため、これに適切な設計法がないということである。次に、地震時の地盤評価が全く行われていない現在、地震時の設計は事実上行われているとはいえない。さらに、港湾における杭の横抵抗の群杭効果の判定に一部問題があり、見直す必要がある。これと関連して、たわみ性控え工に用いられる連続壁の横方向地盤反力定数は現在は単杭のものを用いているが、既に指摘したように、これは検討のうえ改めなければならない。こうした、状況のもとにあって、矢板式係船岸のたわみ性控え工を特に意識した設計法を可能な限り十分なものにするため、まず、解析の容易な杭の横抵抗の基本式を得るため、久保の非線形方式を線形方式におきかえる。そのうえで矢板式係船岸のたわみ性控え工に最も適切な地盤反力として、式(2)を考えることにする。この式の横方向地盤反力定数を $(n_h x + k_c)$ と台形分布を仮定したが、これは、地盤の特性により、深さに比例して増加する場合と深さに関係なく一定の場合およびこれらを組み合わせた台形の場合を簡潔に表わしたものである。具体的には、第1項目は砂質土地盤、第2項目は粘性土地盤に適用される。また、砂質土地盤中に杭が埋設されているような場合は台形分布が適当である。

$$\left. \begin{aligned} P &= (n_h x + k_c) B y \\ k_h &= n_h x + k_c, E_s = k_h \cdot B \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、 P は地盤反力 (MN/m, または kN/m), n_h は深さに係わる横方向地盤反力定数 (MN/m⁴), k_c は深さ

$$\begin{aligned} y'''' &= c_1(ax+b) \left(-\frac{x^3}{3!} + \frac{4a}{8!}x^5 + \frac{b}{7!}x^7 - \frac{9 \cdot 4}{13!}a^2x^{13} - \frac{12}{12!}abx^{12} - \frac{b}{11!}x^{11} + \frac{14 \cdot 9 \cdot 4}{18!}a^3x^{18} + \frac{192}{17!}a^2bx^{17} + \frac{24}{16!}ab^2x^{16} \right. \\ &\quad \left. + \frac{b^3}{15!}x^{15} - \frac{19 \cdot 14 \cdot 9 \cdot 4}{23!}a^4x^{23} - \frac{3960}{22!}a^3bx^{22} - \frac{600}{21!}a^2b^2x^{21} - \frac{40}{20!}ab^3x^{20} - \frac{b^4}{19!}x^{19} \dots \right) \\ &+ c_2(ax+b) \left(-\frac{x^2}{2} + \frac{3a}{7!}x^7 + \frac{b}{6!}x^6 - \frac{8 \cdot 3}{12!}a^2x^{12} - \frac{10}{11!}abx^{11} - \frac{b}{10!}x^{10} + \frac{13 \cdot 8 \cdot 3}{17!}a^3x^{17} + \frac{144}{16!}a^2bx^{16} + \frac{21}{15!}ab^2x^{15} \right. \\ &\quad \left. + \frac{b^3}{14!}x^{14} - \frac{18 \cdot 13 \cdot 8 \cdot 3}{22!}a^4x^{22} - \frac{2760}{21!}a^3bx^{21} - \frac{480}{20!}a^2b^2x^{20} - \frac{36}{19!}ab^3x^{19} - \frac{b^4}{18!}x^{18} \dots \right) \\ &+ c_3(ax+b) \left(-x + \frac{2a}{6!}x^6 + \frac{b}{5!}x^5 - \frac{7 \cdot 2}{11!}a^2x^{11} - \frac{8}{10!}abx^{10} - \frac{b}{9!}x^9 + \frac{12 \cdot 7 \cdot 2}{16!}a^3x^{16} + \frac{102}{15!}a^2bx^{15} + \frac{18}{14!}ab^2x^{14} \right. \\ &\quad \left. + \frac{b^3}{13!}x^{13} - \frac{17 \cdot 12 \cdot 7 \cdot 2}{21!}a^4x^{21} - \frac{1800}{20!}a^3bx^{20} - \frac{372}{19!}a^2b^2x^{19} - \frac{32}{18!}ab^3x^{18} - \frac{b^4}{17!}x^{17} \dots \right) \\ &+ c_4(ax+b) \left(-1 + \frac{a}{5!}x^5 + \frac{b}{4!}x^4 - \frac{6 \cdot 1}{10!}a^2x^{10} - \frac{6}{9!}abx^9 - \frac{b}{8!}x^8 + \frac{11 \cdot 6 \cdot 1}{15!}a^3x^{15} + \frac{66}{14!}a^2bx^{14} + \frac{15}{13!}ab^2x^{13} + \frac{b^3}{12!}x^{12} \right. \\ &\quad \left. - \frac{16 \cdot 11 \cdot 6 \cdot 1}{20!}a^4x^{20} - \frac{1056}{19!}a^3bx^{19} - \frac{276}{18!}a^2b^2x^{18} - \frac{28}{17!}ab^3x^{17} - \frac{b^4}{16!}x^{16} \dots \right) \end{aligned} \quad (5)$$

次に、式(4)の b をゼロとし、式(6)のようにおくと、簡潔にまとめられた式(7)を得る。

$$y'''' = \sum_{n=0}^{\infty} (-a)^{n+1} \left\{ \frac{(5n-1)!!}{(5n+3)!} c_1 x^{5n+4} + \frac{(5n-2)!!}{(5n+2)!} c_2 x^{5n+3} + \frac{(5n-3)!!}{(5n+1)!} c_3 x^{5n+2} + \frac{(5n-4)!!}{(5n)!} c_4 x^{5n+1} \right\} \quad (7)$$

ここで、!! は 5 とびの階乗を表わす記号で、例えば、

方向に関係なく一定の横方向地盤反力定数 (MN/m³) k_h は横方向地盤反力定数 (MN/m³), E_s は地盤の弾性係数 (MN/m²), B は杭幅 (m), x は深さ方向に正付号をとる深さ (m), y は x 軸に直角な杭の水平変位量 (m) である。

また、横方向地盤反力定数について、単に k 値, k_h 値, k_c 値, n_h 値とよぶことがある。横方向地盤反力定数は弾性床土梁法を用いるところでは、横方向地盤反力係数といっているようであるし、久保は横方向地盤反力定数と呼んでいたが、ここでは、すべて横方向地盤反力定数と呼ぶことにした。さらに、式(2)にあるような台形型の横方向地盤反力定数を用いる地盤を単に台形型地盤という。同様な意味で、 k_c 値で表わすことが適当な地盤については、一定型地盤といい、 n_h 値で表わすことに適する地盤を、増加型地盤という。

式(2)を弾性床土の梁の式に代入すると、次の微分方程式を得る。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + (n_h x + k_c) B y = 0 \quad (3)$$

これを、整理して式(4)とおく。

$$y'''' + (ax+b)y = 0 \quad (4)$$

式(4)は無級数による解法によって解を得ることができるが、ここでは、積分方程式による解法によって式(5)のような一般解を得た。この式はこれ以上簡潔にすることはできないようである (付録 B.1 参照)。

$$y'''' + axy = 0 \quad (6)$$

ゼロまたは負の場合はすべて1とする。

逆に、 a をゼロとし、式(18)のようにおくと、その解は

$$y'''' = \sum_{n=0}^{\infty} (-a)^{n+1} \left\{ \frac{C_1}{(4n+3)!} x^{4n+3} + \frac{C_2}{(4n+2)!} x^{4n+2} + \frac{C_3}{(4n+1)!} x^{4n+1} + \frac{C_4}{(4n)!} x^{4n} \right\} \quad (19)$$

ここで、式(19)から、 y は容易に得ることができ、式(20)のような関係を用いて上式(19)を整理すると、よく知られている式(21)を得ることができる。

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{E_s}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{k_c B}{4EI}} = \sqrt[4]{\frac{b}{4}} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} w(x) = y'''' = & -a x^m \left(\frac{C_1}{3!} x^3 + \frac{C_2}{2!} x^2 + C_3 x + C_4 \right) + \sum (-a)^{n+1} x^{(n+1)m} \left\{ \frac{C_1(3+m)! (7+2m)! \dots (1-4n+nm)!}{3! (7+m)! (11+2m)! \dots (3+4m+nm)!} x^{3+4n} \right. \\ & + \frac{C_2(2+m)! (6+2m)! \dots (2-4n+nm)!}{2(6+m)! (10+2m)! \dots (2+4n+nm)!} x^{2+4n} + \frac{C_3(1+m)! (5+2m)! \dots (3-4n+nm)!}{2(5+m)! (9+2m)! \dots (1+4n+nm)!} x^{1+4n} \\ & \left. + \frac{C_4 m! (4+2m)! \dots (4-4n+nm)!}{(4+m)! (8+2m)! \dots (4n+nm)!} x^{4n} \right\} \quad (23) \end{aligned}$$

以上のように、おのおのの地盤状態に対応できるよう基本式の解を得ることができた。これらの式はいずれも取れん半径が無量大であるので、任意の実数について成立する。そのうえ、各式の形から予想されるように、取れんの度合が著しいので、簡単な実用式を得ることができると考えられる。

4.2 $y'''' + by = 0$ の解析

台形型地盤は一定型地盤と増加型地盤の組み合わせられたものと考えられる。ここでは、各種の地盤の杭の横抵抗式について解析を容易に行なうため、最初に最も簡易

$$y'''' = \sum (-b)^{n+1} \left\{ \frac{C_1}{(4n+3)!} x^{4n+3} + \frac{C_2}{(4n+2)!} x^{4n+2} + \frac{C_3}{(4n+1)!} x^{4n+1} + \frac{C_4}{(4n)!} x^{4n} \right\} \quad (24)$$

$$y'''' = \sum (-b)^n \frac{C_1}{(4n)!} x^{4n} + \sum (-b)^{n+1} \left\{ \frac{C_2}{(4n+3)!} x^{4n+3} + \frac{C_3}{(4n+2)!} x^{4n+2} + \frac{C_4}{(4n+1)!} x^{4n+1} \right\} \quad (25)$$

$$y'' = \sum (-b)^n \left\{ \frac{C_1}{(4n+1)!} x^{4n+1} + \frac{C_2}{(4n)!} x^{4n} \right\} + \sum (-b)^{n+1} \left\{ \frac{C_3}{(4n+3)!} x^{4n+3} + \frac{C_4}{(4n+2)!} x^{4n+2} \right\} \quad (26)$$

$$y' = \sum (-b)^n \left\{ \frac{C_1}{(4n+2)!} x^{4n+2} + \frac{C_2}{(4n+1)!} x^{4n+1} + \frac{C_3}{(4n)!} x^{4n} \right\} + \sum (-b)^{n+1} \frac{C_4}{(4n+3)!} x^{4n+3} \quad (27)$$

$$y = \sum (-b)^n \left\{ \frac{C_1}{(4n+3)!} x^{4n+3} + \frac{C_2}{(4n+2)!} x^{4n+2} + \frac{C_3}{(4n+1)!} x^{4n+1} + \frac{C_4}{(4n)!} x^{4n} \right\} = -\frac{y''''}{b} \quad (28)$$

夫する必要がある。式(28)と式(21)は同一の値を与えるが、式(21)は杭長が無限量で、 y およびその微分がゼロでなければならないという境界条件から、発散項に含まれる積分定数 A, B をゼロとおいて取れん項のみの式を用いている。これに対し、式(28)はこれと同様に処理することはできない。それゆえ、杭の有効長の深さをもって、杭頭部に対する他方の境界点であると考えられる。これに関して、久保²⁾ は有効長を曲げモーメント第1ゼロ点(頭部固定杭では曲げモーメント第2ゼロ点)の1.5倍とれば十分であることを実験によって明らかにした。一方この問題について、横山¹⁵⁾ は2層系の問題で検討した結果、 $\beta L \geq 2$ の場合でも、無限長の杭として取り扱うことによる誤差は10%程度であり、実用的には $2 \leq \beta L \leq \pi$ の範囲を限界

式(19)のようになる。

$$y'''' + by = 0 \quad (18)$$

$$\begin{aligned} y = & e^{\beta x} (A \cos \beta x + B \sin \beta x) \\ & + e^{-\beta x} (C \cos \beta x + D \sin \beta x) \quad (21) \end{aligned}$$

また、式(22)のような状況での解を式(22)に示す。

$$y'''' + ax^m y = 0 \quad (22)$$

よく知られている一定型地盤の基本式について解析する。この式は地盤が粘性土などからできている場合に用いられるが、前節で既に述べたように、弾性床土梁法の典型的な数式である。式(19)を、ここでは積分して、 y'''' 、 y'' 、 y' 、 y を求めたが、それらをまとめて以下に示す。式(23)の y 式が結局 $y = -y''''/b$ であるように、原始基本式(18)を満足するので、これら一連の基本式は、すべて、式(18)の正解であるということができる。

杭の挙動については、以上の各基本式によって得ることができるが、4個の積分定数を求めるためには若干工

とすればよいとのべている。ここで L は有効長である。一方、道路杭指針¹²⁾ や建築基礎構造設計基準⁷⁾ などでも $\beta L \geq 3$ を採用している。

ここでは、以上の事情を参考に $\beta L = 3$ を採用することにし、式(29)の関係から、次のように整理した。

$$\left. \begin{aligned} L = \frac{3}{\beta} &= 3 \sqrt[4]{\frac{4EI}{E_s}} = 3 \sqrt[4]{\frac{4}{b}} \\ b = \frac{324}{L^4}, \quad b^n &= \frac{324^n}{L^{4n}} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

これによって、杭の挙動に関する一連の計算方法の簡易化が可能となる。表-2は式(30)から式(34)の $x=L$ における無限級数の和と指数 n との関係を示すものである。表の合計欄に3個の数字が並んでいるが、このうちの上位

係船岸におけるたわみ性控え工の設計法に関する研究

$$y'''' = \sum (-1)^{n+1} \left\{ \frac{c_1}{(4n+3)!} x^3 + \frac{c_2}{(4n+2)!} x^2 + \frac{c_3}{(4n+1)!} x + \frac{c_4}{(4n)!} \right\} \frac{324^{n+1}}{L^4} \left(\frac{x}{L} \right)^{4n} \quad (30)$$

$$y'''' = \sum (-1)^n \frac{c_1}{(4n)!} 324^n \left(\frac{x}{L} \right)^{4n} + \sum (-1)^{n+1} \left\{ \frac{c_2}{(4n+3)!} x^3 + \frac{c_3}{(4n+2)!} x^2 + \frac{c_4}{(4n+1)!} x \right\} \frac{324^{n+1}}{L^4} \left(\frac{x}{L} \right)^{4n} \quad (31)$$

$$y'' = \sum (-1)^n \frac{c_1}{(4n+1)!} x + \frac{c_2}{(4n)!} \left\{ 324^n \left(\frac{x}{L} \right)^{4n} + \sum (-1)^{n+1} \left\{ \frac{c_3}{(4n+3)!} x^3 + \frac{c_4}{(4n+2)!} x^2 \right\} \frac{324^{n+1}}{L^4} \left(\frac{x}{L} \right)^{4n} \right. \quad (32)$$

$$y' = \sum (-1)^n \left\{ \frac{c_1}{(4n+2)!} x^2 + \frac{c_2}{(4n+1)!} x + \frac{c_3}{(4n)!} \right\} 324^n \left(\frac{x}{L} \right)^{4n} + \sum (-1)^{n+1} \frac{c_4}{(4n+3)!} x^3 \frac{324^{n+1}}{L^4} \left(\frac{x}{L} \right)^{4n} \quad (33)$$

$$y = \sum (-1)^n \left\{ \frac{c_1}{(4n+3)!} x^3 + \frac{c_2}{(4n+2)!} x^2 + \frac{c_3}{(4n+1)!} x + \frac{c_4}{(4n)!} \right\} 324^n \left(\frac{x}{L} \right)^{4n} \quad (34)$$

表-2 $\sum (-1)^n \frac{324^n}{(4n+m)!}$

	n=0	n=1	n=2	n=3	n=4	n=5	計
$\sum (-1)^n \frac{324^n}{(4n+4)!}$	4.1666667 -02	-8.0357143 -03	2.1915584 -04	-1.6256066 -06	4.5295540 -09	-5.7546562 -12	0.033848483 0.033848488 0.033848488
$\sum (-1)^n \frac{324^n}{(4n+3)!}$	1.6666667 -01	-6.4285714 -02	2.6298701 -03	-2.6009706 -05	9.0591080 -08	-1.3811175 -10	0.10498482 0.10498491 0.10498491
$\sum (-1)^n \frac{324^n}{(4n+2)!}$	5.0000000 -01	-4.5000000 -01	2.8928571 -02	-3.9014557 -04	1.7212305 -06	-3.1765703 -09	0.078538425 0.078540146 0.078540143
$\sum (-1)^n \frac{324^n}{(4n+1)!}$	1.0000000 00	-2.7000000 00	2.8928571 -01	-5.4620380 -03	3.0982150 -05	-6.9884544 -08	-1.4161766 -1.4161456 -1.4161457
$\sum (-1)^n \frac{324^n}{(4n)!}$	1.0000000 00	-1.3500000 01	2.6035714 00	-7.1006494 -02	5.2669656 -04	-1.4675754 -06	-9.9674351 -9.9669084 -9.9669099
$\sum (-1)^{n+1} \frac{324^{n+1}}{(4n+4)!}$	-1.3500000 01	2.6035714 00	-7.1006494 -02	5.2669656 -04	-1.4675754 -06	1.8645087 -09	-10.966908 -10.966909 -10.966909
$\sum (-1)^{n+1} \frac{324^{n+1}}{(4n+3)!}$	-5.4000000 01	2.0828571 01	-8.5207792 -01	8.4271450 -03	-2.9351509 -05	4.4748208 -08	-34.015080 -34.015109 -34.015109
$\sum (-1)^{n+1} \frac{324^{n+1}}{(4n+2)!}$	-1.6200000 02	1.4580000 02	-9.3728571 00	1.2640717 -01	-5.5767866 -04	1.0292030 -06	-25.446450 -25.447008 -25.447007
$\sum (-1)^{n+1} \frac{324^{n+1}}{(4n+1)!}$	-3.2400000 02	8.7480000 02	-9.3728571 01	1.7697004 00	-1.0038216 -02	2.2642593 -05	458.84113 458.83109 458.83111
$\sum (-1)^{n+1} \frac{324^{n+1}}{(4n)!}$	-3.2400000 02	4.3740000 03	-8.4355714 02	2.3006105 01	-1.7064968 -01	4.7549445 -04	3229.4490 3229.2784 3229.2789

註) 下段の数字は $\times 10^{(\alpha)}$ の (α) の値である。

表-3 一定型地盤の積分定数
 ——方式①——
 ——方式②——

1. 頭部地表面杭

1) 頭部自由

$$c_1 = \frac{H}{EI}, c_2 = 0$$

$$c_3 = -0.05448 \frac{HL^2}{EI} = \theta_0$$

$$c_4 = 0.01827 \frac{HL^3}{EI} = y_0$$

2) 頭部固定

$$c_1 = \frac{H}{EI}, c_3 = 0$$

$$c_2 = -0.1661 \frac{HL}{EI} = y_0''$$

$$c_4 = 0.009225 \frac{HL^3}{EI} = y_0$$

2. 地上突出杭

1) 頭部自由

$$6a_1 = c_1 = \frac{H}{EI}, 2a_2 = c_2 = \frac{Hh}{EI}$$

$$a_3 = c_3 = -(0.05448L + 0.3280h) \frac{HL^2}{EI} = \theta_0$$

$$a_4 = c_4 = (0.01827L + 0.05448h) \frac{HL^3}{EI} = y_0$$

2) 頭部固定

$$6a_1 = c_1 = \frac{H}{EI}$$

$$2a_2 = c_2 = -\frac{0.05448L^2 - 0.5h^2}{0.3280L + h} = y_0''$$

$$a_3 = c_3 = -\frac{0.05448L + 0.1640h}{0.3280L + h} \frac{HLh}{EI} = \theta_0$$

$$a_4 = c_4 = \frac{0.003025L^2 + 0.01827Lh + 0.02724h^2}{0.3280L + h} \frac{HL^3}{EI} = y_0$$

$$c_1 = \frac{H}{EI}, c_2 = 0$$

$$c_3 = -0.05664 \frac{HL^2}{EI} = \theta_0$$

$$c_4 = 0.01858 \frac{HL^3}{EI} = y_0$$

$$c_1 = \frac{H}{EI}, c_3 = 0$$

$$c_2 = -0.1689 \frac{HL}{EI} = y_0''$$

$$c_4 = 0.009204 \frac{HL^3}{EI} = y_0$$

$$c_1 = \frac{H}{EI}, c_2 = \frac{Hh}{EI}$$

$$c_3 = -(0.05664L + 0.3354h) \frac{HL^2}{EI} = \theta_0$$

$$c_4 = (0.01858L + 0.05554h) \frac{HL^3}{EI} = y_0$$

$$c_1 = \frac{H}{EI}$$

$$c_2 = -\frac{0.05664L^2 - 0.5h^2}{0.3354L + h} \frac{H}{EI} = y_0''$$

$$c_3 = -\frac{0.05664L + 0.1677h}{0.3354L + h} \frac{HLh}{EI} = \theta_0$$

$$c_4 = \frac{0.003086L^2 + 0.01858Lh + 0.02777h^2}{0.3354L + h} \frac{HL^3}{EI} = y_0$$

$$\theta_0 = -\frac{1}{2\beta^3} \frac{H}{EI} = -0.05556 \frac{HL^2}{EI}$$

$$y_0 = \frac{1}{2\beta^3} \frac{H}{EI} = 0.01852 \frac{HL^3}{EI}$$

$$y_0'' = -\frac{H}{2\beta EI} = 0.1667 \frac{HL}{EI}$$

$$y_0 = \frac{1}{4\beta^3} \frac{H}{EI} = 0.009259 \frac{HL^3}{EI}$$

$$\theta_0 = -\frac{1+2\beta h}{2\beta^3} \frac{H}{EI} = -\left(\frac{L^2 + Lh}{18} + \frac{h}{3}\right) \frac{H}{EI}$$

$$y_0 = \frac{1+\beta h}{2\beta^3} \frac{H}{EI} = \left(\frac{L^3 + L^2h}{54} + \frac{Lh}{18}\right) \frac{H}{EI}$$

$$y_0'' = -\frac{1-\beta h}{2\beta} \frac{H}{EI} = -\left(\frac{L}{6} - \frac{h}{2}\right) \frac{H}{EI}$$

$$\theta_0 = \frac{h}{2\beta} \frac{H}{EI} = \frac{HLh}{6EI}$$

$$y_0 = \frac{1+\beta h}{4\beta^3} \frac{H}{EI} = \left(\frac{L^3 + L^2h}{108} + \frac{Lh}{36}\right) \frac{H}{EI}$$

の数字は $n=0$ から $n=3$ までの総和を示すものであり、中段の数字は同様に $n=4$ までの総和であり、下段の数字は $n=5$ までの総和である。これらの数字から下段の数字と上段および中段の数字を比較すると、誤差の最大で、おのおの、2万分の1, 1億分の1を示している。この種の計算では最終の精度は $1/50 \sim 1/10$ であるとする、 $n=3$ まで採れば十分であると考えられる。しかし、ここでは、深さ x/L に対する無限級数の和を、 $n=5$ までとり5桁の数字で表し、付録C.2に掲載した。

さらに、表-2の数値を利用して、境界条件に対応する4個の積分定数を定めることができる。杭の横抵抗はよく知られている境界条件を用いることにする。すなわち、杭の頭部がちょうど地表面にあって、この状態で杭の頭部が自由な場合と固定の場合がある。また、杭が地表面から突き出ている状態で、頭部が自由な場合と固定の場合がある。ここではこれらを、単に、頭部地表面杭および地上突出杭といい、杭頭部の固定状態を頭部自由および頭部固定と呼ぶことにする。

この地上突出部は式(3)の弾性方程式が与えられ、これによって、式(3)のような一般解を得る。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = 0 \quad (0 \leq x \leq -h) \quad (35)$$

$$y = a_1 x^3 + a_2 x^2 + a_3 x + a_4 \quad (36)$$

以上によって、得ることができた各々の積分定数を表-3に一括して示す。表の中の θ_0, y_0 はおのおの地表面における、杭のたわみ角と、水平変位である。方式①の方法は、杭の根入部 $x=L$ において、 $y=0, y'=0$ において求め得た積分定数であり、方式②は $x=L$ において、 $y=0, y'''=0$ とおいたときに求めたものである。さらに、チャン方式についても比較のため一覧表に示したが、これら三者はおのおの僅かではあるが数値を異にする。チャン方式が方式①と方式②の中間的な数値を示しているようであるが、これだけで断定することはできない。一方、方式①と方式②の差は、 L を特性長の3倍にしたことによる結果と考えられる。したがって、これを4倍、5倍と長くすれば、その差は縮小するものと思われる。しかし、無限級数の計算は有効数字が多くなると、計算が煩雑になるばかりでなく、計算誤差の入る余地も多くなるので、有効長の採り方に、若干の工夫を要するのである。これは必要とする計算の精度に深く係わることで、港湾のたわみ性控え工に要求される計算精度であれば $\beta L=3$ で十分であるといえる。ここで、新しい提案式が実用上どの程度の結果を示すかについて、従来のチャンの方式とともに、野外実験で用いられたH形鋼杭について比較計算してみた。この杭は曲げ剛度 $EI=44.1 \text{ MN}\cdot\text{m}^2$ 、杭幅 0.305 m であり、地表面から 0.5 m 突き出ている頭部自由杭である。さらに、水平外力 $H=147 \text{ kN}$

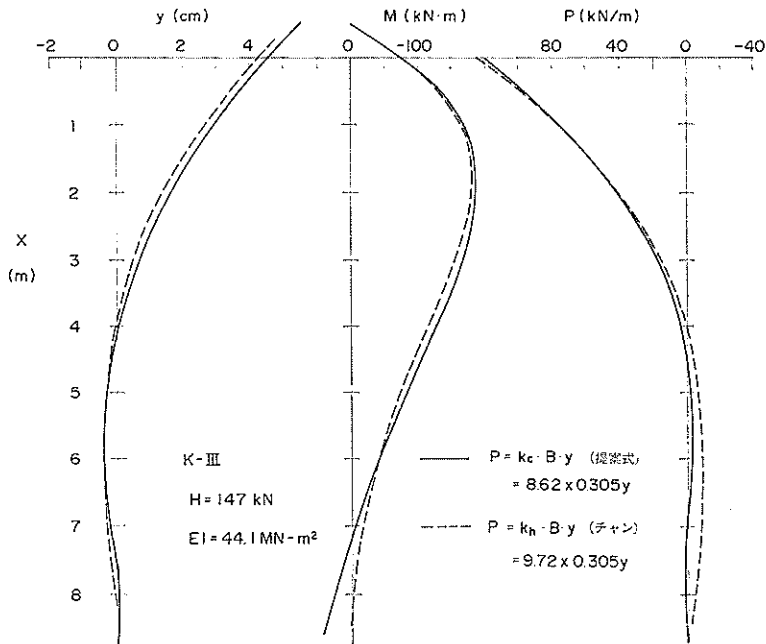


図-6 提案式とチャン方式

表-4 提案式とチャンの方式の比較

	k_h 値 (MN/m ³)	特性長 $1/\beta$ (m)	地表面変位 y_0 (m)	最大曲げモーメント		地表面の 地盤反力 P_0 (kN/m)
				M_{\max} (kN·m)	位 置 (m)	
提 案 式	8.62	2.87	4.56	189	1.72	112
チャンの方式	9.72	2.78	4.22	183	1.67	125

を杭頭に作用させたときの杭頭変位 5.5cm を共通の計算条件とする。計算は、先ず、横方向地盤反力定数 (k_e または k_h) を求め、おのおの特性長 $1/\beta$ を算出し、杭の水平変位、曲げモーメントおよび地盤反力を求めることとした。それらの結果は表-4と図-6に示す。

提案式とチャンの方法による結果は、 $x=L$ 付近において、両者の間に若干の相違が見られるほかは、きわめて、よく一致しているといえる。したがって、当初に想定した有効長 (L) は特性長 ($1/\beta$) の3倍の値で十分であることが確かめられた。

$$y = \sum (-a)^n \left\{ \frac{(5n-1)!!}{(5n+3)!} c_1 x^{5n+3} + \frac{(5n-2)!!}{(5n+2)!} c_2 x^{5n+2} + \frac{(5n-3)!!}{(5n+1)!} c_3 x^{5n+1} + \frac{(5n-4)!!}{(5n)!} c_4 x^{5n} \right\} \quad (37)$$

$$y' = \sum (-a)^n \left\{ \frac{(5n-1)!!}{(5n+2)!} c_1 x^{5n+2} + \frac{(5n-2)!!}{(5n+1)!} c_2 x^{5n+1} + \frac{(5n-3)!!}{(5n)!} c_3 x^{5n} \right\} + \sum (-a)^{n+1} \frac{(5n+1)!!}{(5n+4)!} c_4 x^{5n+4} \quad (38)$$

$$y'' = \sum (-a)^n \left\{ \frac{(5n-1)!!}{(5n+1)!} c_1 x^{5n+1} + \frac{(5n-2)!!}{(5n)!} c_2 x^{5n} \right\} + \sum (-a)^{n+1} \left\{ \frac{(5n+2)!!}{(5n+4)!} c_3 x^{5n+4} + \frac{(5n+1)!!}{(5n+3)!} c_4 x^{5n+3} \right\} \quad (39)$$

$$y''' = \sum (-a)^n \frac{(5n-1)!!}{(5n)!} c_1 x^{5n} + \sum (-a)^{n+1} \left\{ \frac{(5n+3)!!}{(5n+4)!} c_2 x^{5n+4} + \frac{(5n+2)!!}{(5n+3)!} c_3 x^{5n+3} + \frac{(5n+1)!!}{(5n+2)!} c_4 x^{5n+2} \right\} \quad (40)$$

$$y'''' = \sum (-a)^{n+1} \left\{ \frac{(5n+4)!!}{(5n+4)!} c_1 x^{5n+4} + \frac{(5n+3)!!}{(5n+3)!} c_2 x^{5n+3} + \frac{(5n+2)!!}{(5n+2)!} c_3 x^{5n+2} + \frac{(5n+1)!!}{(5n+1)!} c_4 x^{5n+1} \right\} \\ = \sum (-a)^{n+1} \left\{ \frac{(5n-1)!!}{(5n+3)!} c_1 x^{5n+4} + \frac{(5n-2)!!}{(5n+2)!} c_2 x^{5n+3} + \frac{(5n-3)!!}{(5n+1)!} c_3 x^{5n+2} + \frac{(5n-4)!!}{(5n)!} c_4 x^{5n+1} \right\} \quad (41)$$

を行わなければならないが、増加型の地盤に適した有効長をいかにするかが重要である。前節の方法を参考に、特性長の3倍を有効長とすることにし、式(2)の関係を using、 y および y の微分式を整理する。

4.3 $y'''' + axy = 0$ の解析

ここで述べる方式は砂質地盤で杭頭が地表面にあるような場合に用いられる。この一般解は式(7)に示されているが、ここでは、まず、原始基本式(6)から y をもとめ、これを微分して、 y', y'', y''' および y'''' を導いた。これらは、式(37)から(41)までとなる。式(4)の y'''' は式(7)のそれと全く等しいので、原始基本式(6)を満足するとともに、これら一連の基本式は、すべて、式(6)の正解であるといえることができる。

ここで、前節と同様に、計算の簡易化のため式の整理

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{3}{\lambda} = 3\sqrt[5]{\frac{5EI}{E_s}} = 3\sqrt[5]{\frac{5EI}{n_h \cdot B}} = 3\sqrt[5]{\frac{5}{a}} \\ a &= \frac{1215}{L^5}, \quad a^n = \frac{1215^n}{L^{5n}} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

表-5は、式(3)から式(7)までの $x=L$ における無限級数

$$y = \sum (-1)^n \left\{ \frac{(5n-1)!!}{(5n+3)!} c_1 x^3 + \frac{(5n-2)!!}{(5n+2)!} c_2 x^2 + \frac{(5n-3)!!}{(5n+1)!} c_3 x + \frac{(5n-4)!!}{(5n)!} c_4 \right\} 1215^n \left(\frac{x}{L} \right)^{5n} \quad (43)$$

$$y' = \sum (-1)^n \left\{ \frac{(5n-1)!!}{(5n+2)!} c_1 x^2 + \frac{(5n-2)!!}{(5n+1)!} c_2 x + \frac{(5n-3)!!}{(5n)!} c_3 \right\} 1215^n \left(\frac{x}{L} \right)^{5n} \\ + a \sum (-1)^{n+1} \frac{(5n+1)!!}{(5n+4)!} c_4 x^4 1215^n \left(\frac{x}{L} \right)^{5n} \quad (44)$$

$$y'' = \sum (-1)^n \left\{ \frac{(5n-1)!!}{(5n+1)!} c_1 x + \frac{(5n-2)!!}{(5n)!} c_2 \right\} 1215^n \left(\frac{x}{L} \right)^{5n} + a \sum (-1)^{n+1} \left\{ \frac{(5n+2)!!}{(5n+4)!} c_3 x^3 \right. \\ \left. + \frac{(5n+1)!!}{(5n+3)!} c_4 x^2 \right\} 1215^n \left(\frac{x}{L} \right)^{5n} \quad (45)$$

$$y''' = \sum (-1)^n \frac{(5n-1)!!}{(5n)!} c_1 1215^n \left(\frac{x}{L} \right)^{5n} + a \sum (-1)^{n+1} \left\{ \frac{(5n+3)!!}{(5n+4)!} c_2 x^4 + \frac{(5n+2)!!}{(5n+3)!} c_3 x^3 \right. \\ \left. + \frac{(5n+1)!!}{(5n+2)!} c_4 x^2 \right\} 1215^n \left(\frac{x}{L} \right)^{5n} \quad (46)$$

$$y'''' = a \sum (-1)^{n+1} \left\{ \frac{(5n-1)!!}{(5n+3)!} c_1 x^4 + \frac{(5n-2)!!}{(5n+2)!} c_2 x^3 + \frac{(5n-3)!!}{(5n+1)!} c_3 x^2 + \frac{(5n-4)!!}{(5n)!} c_4 x \right\} 1215^n \left(\frac{x}{L} \right)^{5n} \quad (47)$$

係船岸におけるたわみ性控え工の設計法に関する研究

表-5 x の係数と n の関数

	$n=0$	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$	計
$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-1)!!1215^n}{(5n+3)!}$	1.6666687 -01	-1.2053571 -01	8.5344343 -03	-1.4119469 -04	8.0722540 -07	-1.9958871 -09	0.054524199 0.054525006 0.054525004
$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-2)!!1215^n}{(5n+2)!}$	5.0000000 -01	-7.2321429 -01	7.3965097 -02	-1.5733123 -03	1.0888439 -05	-3.1408960 -08	-0.15082250 -0.15081161 -0.15081164
$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-3)!!1215^n}{(5n+1)!}$	1.0000000 00	-3.3750000 00	5.1775568 -01	-1.4401859 -02	1.2182022 -04	-4.1251833 -07	-1.8716462 -1.8715244 -1.8715248
$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-4)!!1215^n}{(5n)!}$	1.0000000 00	-1.0125000 01	2.4408482 00	-9.0526029 -02	9.4589823 -04	-3.7854621 -06	-6.7746779 -6.7737319 -6.7737357
$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-1)!!1215^n}{(5n+2)!}$	5.0000000 -01	-9.6428571 -01	1.1094765 -01	-2.5415044 -03	1.8566184 -05	-5.5884838 -08	-0.35587956 -0.35586099 -0.35586105
$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-2)!!1215^n}{(5n+1)!}$	1.0000000 00	-5.0625000 00	8.8758117 -01	-2.6746309 -02	2.3954565 -04	-8.4804189 -07	-3.2016651 -8.2014256 -3.2014264
$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-3)!!1215^n}{(5n)!}$	1.0000000 00	-2.0250000 01	5.6953125 00	-2.3042974 -01	2.5582247 -03	-1.0725477 -05	-13.785118 -13.782560 -13.782571
$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{(5n+1)!!1215^n}{(5n+4)!}$	-4.1666667 -02	2.0089286 -02	-1.1176045 -03	1.5570342 -05	-7.7890171 -08	1.7266295 -10	-0.022679416 -0.022679494 -0.022679494
$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-1)!!1215^n}{(5n+1)!}$	1.0000000 00	-6.7500000 00	1.3313718 00	-4.3205576 -02	4.0845604 -04	-1.5088906 -06	-4.4618338 -4.4614253 -4.4614268
$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-2)!!1215^n}{(5n)!}$	1.0000000 00	-3.0375000 01	9.7633929 00	-4.2794095 -01	5.0304587 -03	-2.2049089 -05	-20.039548 -20.034518 -20.034540
$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{(5n+2)!!1215^n}{(5n+4)!}$	-8.3333333 -02	4.6875000 -02	-2.8448114 -03	4.2110697 -05	-2.2068882 -07	5.0802752 -10	-0.039261033 -0.039261254 -0.039261253
$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{(5n+1)!!1215^n}{(5n+3)!}$	-1.6666667 -01	1.8080357 -01	-1.5646465 -02	2.9583650 -04	-1.8693641 -06	5.0072254 -09	-0.0012137285 -0.0012155979 -0.0012155929
$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-1)!!1215^n}{(5n)!}$	1.0000000 00	-4.0500000 01	1.4645089 01	-6.9128922 -01	8.5775769 -03	-3.9231155 -05	-25.546200 -25.537622 -25.537661
$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{(5n+3)!!1215^n}{(5n+4)!}$	-1.2500000 -01	8.0357143 -02	-5.2832213 -03	8.2805908 -05	-4.5368496 -07	1.0830676 -09	-0.049843272 -0.049843726 -0.049843725
$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{(5n+2)!!1215^n}{(5n+3)!}$	-3.3333333 -01	4.2187500 -01	-3.9827360 -02	8.0010323 -04	-5.2965316 -06	1.4732798 -08	0.049514413 0.049509116 0.049509131
$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{(5n+1)!!1215^n}{(5n+2)!}$	-5.0000000 -01	1.4464286 00	-2.0340402 -01	5.3250573 -03	-4.2995374 -05	1.4020231 -07	0.74834964 0.74830664 0.74830678

註) 下段の数字は $\times 10^{(\alpha)}$ の (α) の値である。

表-6 増加型地盤の積分定数

1. 頭部地表面杭

1) 頭部自由

$$c_1 = \frac{H}{EI}, \quad c_2 = 0$$

$$c_3 = -0.09363 \frac{HL^2}{EI} = \theta_0$$

$$c_4 = 0.03392 \frac{HL^3}{EI} = y_0$$

2) 頭部固定

$$c_1 = \frac{H}{EI}, \quad c_2 = 0$$

$$c_3 = -0.2232 \frac{HL}{EI} = y_0''$$

$$c_4 = 0.013019 \frac{HL^3}{EI} = y_0$$

2. 地上突出杭

1) 頭部自由

$$6a_1 = c_1 = \frac{H}{EI}, \quad 2a_2 = c_2 = \frac{Hh}{EI}$$

$$a_3 = c_3 = -(0.09363L + 0.4195h) \frac{HL}{EI} = \theta_0$$

$$a_4 = c_4 = (0.03392L + 0.09363h) \frac{HL^2}{EI} = y_0$$

2) 頭部固定

$$6a_1 = c_1 = \frac{H}{EI}$$

$$2a_2 = c_2 = -\frac{0.09363L^2 - 0.5h^2}{0.4195L + h} \cdot \frac{H}{EI} = y_0''$$

$$a_3 = c_3 = -\frac{0.09363L + 0.2097h}{0.4195L + h} \cdot \frac{HLh}{EI} = \theta_0$$

$$a_4 = c_4 = \frac{0.005461L^2 + 0.03392Lh + 0.04681h^2}{0.4195L + h} \cdot \frac{HL^2}{EI} = y_0$$

の和と指数 n との関係を示すものである。合計欄の 3 個の数字は前節で説明したのと同様に上段の数字は $n=0$ から $n=3$ までの総和であり、中段は $n=4$ まで、下段は $n=5$ までの総和である。 $n=3$ までと $n=5$ までの総和の誤差は最大で 2,800 分の 1、 $n=4$ までと $n=5$ までの総和の誤差は最大で 24 万分の 1 となり、前節の場合より相当大きくなっているが、実用式としては $n=3$ までとれば十分であると考え。また、設計計算のため深さ x/L に対する無限級数の和を、5 桁の数字で表示し、これを付録 C.1 に掲載した。

さらに、杭の置かれている状態に対応する 4 個の積分定数は、これを取りまとめ表-6 に示した。一定型地盤と増加型地盤では地盤の特性が本質的に異なるので、表に示されている数値だけではその差異について明確にはいえないが、増加型地盤の方が、同一外力に対して、水平

変位が大きくなり、杭の曲げモーメントも大きくなることを示しているといえる。

さらに、前節で検討したと同様に、新しい提案式が杭の挙動に対して、どの程度表現できるのか、また、杭の有効長を特性長の 3 倍 ($\lambda L=3$) にしたことの是非についての検討も含めて、砂質地盤の野外実験³³⁾の結果と比較してみた。この杭は前節で説明した H 形鋼杭 (K-III) であり、外力条件も全く等しい。結果を図-7 に示す。新しく提案する増加型地盤の計算値は実線で示されているが、実測値との間で、水平変位、曲げモーメントおよび地盤反力のいずれも、一致の程度はよいといえる。図中に示した他の 2 つの曲線は、野外実験の研究報告に記載されていたものを SI 単位に換算したものである。実測値にきわめて近い値を示す曲線は、トライアルによって求めた実測式であり、 $p=k_s y^{0.62}$ と記されている。他の

係船岸におけるたわみ性控え工の設計法に関する研究

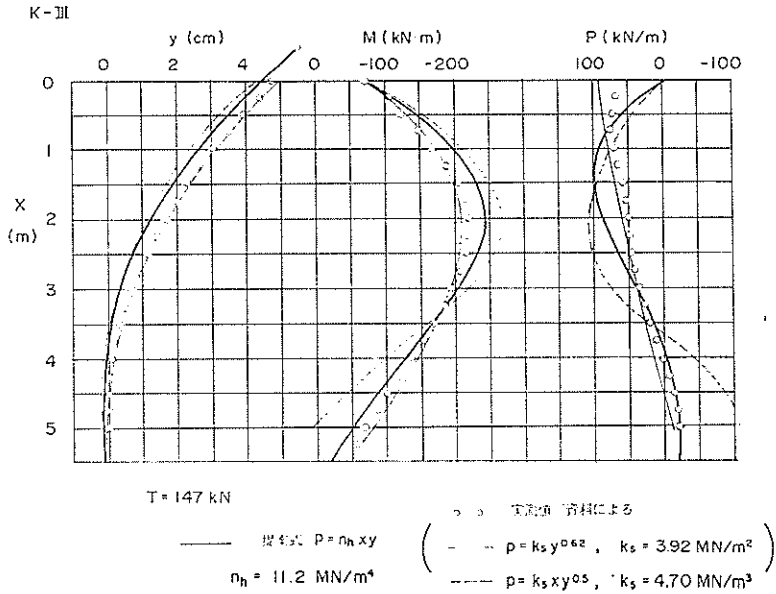


図-7 提案式と実測値

1つは、いわゆる、久保のS型地盤の方式であるが、その結果は破線の通りである。(図中の資料によった k_s および \bar{k}_s の単位は、おのおの $\text{MN/m}^{2.62}$ および $\text{MN/m}^{3.5}$ と改める必要がある。) 以上によって、提案式の内容および、 $\lambda L=3$ については、実用上問題はないといえる。

4.4 $y'''' + (ax+b)y = 0$ の解析

地盤反力が台形型のような場合については、従来、あまり研究されていなかった。これは、一定型地盤や増加型地盤と較べて、その取り扱いがかなり複雑になることが主要な要因であると考えられる。しかし、港湾の矢板式係船岸のたわみ性控え工などの場合は、従来の設計法ではあまりにも差が大きく、その結果、種々の問題を起すことになると思われる。

この台形型地盤の一般解は既に述べたように、式(4)で与えられている。この式は一定型地盤と増加型地盤の方式の組み合わせであるが、計算式はこれ以上簡潔にはならないようである。この台形型の式の $a=0$ および $b=0$

の場合については上述のようにその式の妥当性や実用性についてある程度が解明されている。前節に準じて、まず、式(4)の基本式が正解であるか否かの検討を行う。式の項数が多く煩雑になるため、付録を参照することになるが、積分方程式の解法で得た付録B.1式(4)を原始基本式(4)に代入することによって、付録B.1の式(4)のような y を直ちに得ることができる。これを逐次微分したものが、付録B.1の式(4)の y' 、式(4)の y'' 、式(4)の y''' 、そして式(4)の y'''' である。この y'''' を $(ax+b)$ に着目して整理すると、残査皆無の基本式(4)と同一の式を得る。すなわち、付録B.1の式(4)の y'''' は原始基本式(4)を満足した。このことは、同時に解析の途中に得た y 式および y の微分式も含め、すべて式(4)の正解であることが証明されたことになる。これら付録B.1に記載した各式を、4個の積分定数によって組み換えると、次のような、式(4)~式(7)を得る。

$$\begin{aligned}
 y = & c_1 \left(\frac{x^3}{3!} - \frac{4a}{8!} x^5 - \frac{b}{7!} x^7 + \frac{36a^2}{13!} x^{13} + \frac{12ab}{12!} x^{12} + \frac{b^2}{11!} x^{11} - \frac{504a^3}{18!} x^{18} - \frac{192a^2b}{17!} x^{17} - \frac{24ab^2}{16!} x^{16} - \frac{b^3}{15!} x^{15} \right. \\
 & \left. + \frac{9576a^4}{23!} x^{23} + \frac{3960a^3b}{22!} x^{22} + \frac{600a^2b^2}{21!} x^{21} + \frac{40ab^3}{20!} x^{20} + \frac{b^4}{19!} x^{19} \dots \right) \\
 & + c_2 \left(\frac{x^2}{2} - \frac{3a}{7!} x^7 - \frac{b}{6!} x^6 + \frac{24a^2}{12!} x^{12} + \frac{10ab}{11!} x^{11} + \frac{b^2}{10!} x^{10} - \frac{312a^3}{17!} x^{17} - \frac{144a^2b}{16!} x^{16} - \frac{21ab^2}{15!} x^{15} - \frac{b^3}{14!} x^{14} + \frac{5616a^4}{22!} x^{22} \right. \\
 & \left. + \frac{2760a^3b}{21!} x^{21} + \frac{480a^2b^2}{20!} x^{20} + \frac{36ab^3}{19!} x^{19} + \frac{b^4}{18!} x^{18} \dots \right) \\
 & + c_3 \left(x - \frac{2a}{6!} x^6 - \frac{b}{5!} x^5 + \frac{14a^2}{11!} x^{11} + \frac{8ab}{10!} x^{10} + \frac{b^2}{9!} x^9 - \frac{168a^3}{16!} x^{16} - \frac{102a^2b}{15!} x^{15} - \frac{18ab^2}{14!} x^{14} - \frac{b^3}{13!} x^{13} + \frac{2856a^4}{21!} x^{21} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1800a^3b}{20!}x^{20} + \frac{372a^2b^2}{19!}x^{19} + \frac{32ab^3}{18!}x^{18} + \frac{b^4}{17!}x^{17}\dots \\
 & + c_4\left(1 - \frac{a}{5!}x^5 - \frac{b}{4!}x^4 + \frac{6a^2}{10!}x^{10} + \frac{6ab}{9!}x^9 + \frac{b^2}{8!}x^8 - \frac{66a^3}{15!}x^{15} - \frac{66a^2b}{14!}x^{14} - \frac{15ab^2}{13!}x^{13} - \frac{b^3}{12!}x^{12} + \frac{1056a^4}{20!}x^{20} \right. \\
 & \left. + \frac{1056a^3b}{19!}x^{19} + \frac{276a^2b^2}{18!}x^{18} + \frac{28ab^3}{17!}x^{17} + \frac{b^4}{16!}x^{16}\dots\right)
 \end{aligned} \tag{48}$$

$$\begin{aligned}
 y' = & c_1\left(\frac{x^2}{2} - \frac{4a}{7!}x^7 - \frac{b}{6!}x^6 + \frac{36a^2}{12!}x^{12} + \frac{12ab}{11!}x^{11} + \frac{b^2}{10!}x^{10} - \frac{504a^3}{17!}x^{17} - \frac{192a^2b}{16!}x^{16} - \frac{24ab^2}{15!}x^{15} - \frac{b^3}{14!}x^{14} \right. \\
 & \left. + \frac{9576a^4}{22!}x^{22} + \frac{3960a^3b}{21!}x^{21} + \frac{600a^2b^2}{20!}x^{20} + \frac{40ab^3}{19!}x^{19} + \frac{b^4}{18!}x^{18}\dots\right) \\
 & + c_2\left(x - \frac{3a}{6!}x^6 - \frac{b}{5!}x^5 + \frac{24a^2}{11!}x^{11} + \frac{10ab}{10!}x^{10} + \frac{b^2}{9!}x^9 - \frac{312a^3}{16!}x^{16} - \frac{144a^2b}{15!}x^{15} - \frac{21ab^2}{14!}x^{14} - \frac{b^3}{13!}x^{13} + \frac{5616a^4}{21!}x^{21} \right. \\
 & \left. + \frac{2760a^3b}{20!}x^{20} + \frac{480a^2b^2}{19!}x^{19} + \frac{36ab^3}{18!}x^{18} + \frac{b^4}{17!}x^{17}\dots\right) \\
 & + c_3\left(1 - \frac{2a}{5!}x^5 - \frac{b}{4!}x^4 + \frac{14a^2}{10!}x^{10} + \frac{8ab}{9!}x^9 + \frac{b^2}{8!}x^8 - \frac{168a^3}{15!}x^{15} - \frac{102a^2b}{14!}x^{14} - \frac{18ab^2}{13!}x^{13} - \frac{b^3}{12!}x^{12} + \frac{2856a^4}{20!}x^{20} \right. \\
 & \left. + \frac{1800a^3b}{19!}x^{19} + \frac{372a^2b^2}{18!}x^{18} + \frac{32ab^3}{17!}x^{17} + \frac{b^4}{16!}x^{16}\dots\right) \\
 & + c_4\left(-\frac{a}{4!}x^4 - \frac{b}{3!}x^3 + \frac{6a^2}{9!}x^9 + \frac{6ab}{8!}x^8 + \frac{b^2}{7!}x^7 - \frac{66a^3}{14!}x^{14} - \frac{66a^2b}{13!}x^{13} - \frac{15ab^2}{12!}x^{12} - \frac{b^3}{11!}x^{11} + \frac{1056a^4}{19!}x^{19} \right. \\
 & \left. + \frac{1056a^3b}{18!}x^{18} + \frac{276a^2b^2}{17!}x^{17} + \frac{28ab^3}{16!}x^{16} + \frac{b^4}{15!}x^{15}\dots\right)
 \end{aligned} \tag{49}$$

$$\begin{aligned}
 y'' = & c_1\left(x - \frac{4a}{6!}x^6 - \frac{b}{5!}x^5 + \frac{36a^2}{11!}x^{11} + \frac{12ab}{10!}x^{10} + \frac{b^2}{9!}x^9 - \frac{504a^3}{16!}x^{16} - \frac{192a^2b}{15!}x^{15} - \frac{24ab^2}{14!}x^{14} - \frac{b^3}{13!}x^{13} + \frac{9576a^4}{21!}x^{21} \right. \\
 & \left. + \frac{3960a^3b}{20!}x^{20} + \frac{600a^2b^2}{19!}x^{19} + \frac{40ab^3}{18!}x^{18} + \frac{b^4}{17!}x^{17}\dots\right) \\
 & + c_2\left(1 - \frac{3a}{5!}x^5 - \frac{b}{4!}x^4 + \frac{24a^2}{10!}x^{10} + \frac{10ab}{9!}x^9 + \frac{b^2}{8!}x^8 - \frac{312a^3}{15!}x^{15} - \frac{144a^2b}{14!}x^{14} - \frac{21ab^2}{13!}x^{13} - \frac{b^3}{12!}x^{12} + \frac{5616a^4}{20!}x^{20} \right. \\
 & \left. + \frac{2760a^3b}{19!}x^{19} + \frac{480a^2b^2}{18!}x^{18} + \frac{36ab^3}{17!}x^{17} + \frac{b^4}{16!}x^{16}\dots\right) \\
 & + c_3\left(-\frac{2a}{4!}x^4 - \frac{b}{3!}x^3 + \frac{14a^2}{9!}x^9 + \frac{8ab}{8!}x^8 + \frac{b^2}{7!}x^7 - \frac{168a^3}{14!}x^{14} - \frac{102a^2b}{13!}x^{13} - \frac{18ab^2}{12!}x^{12} - \frac{b^3}{11!}x^{11} + \frac{2856a^4}{19!}x^{19} \right. \\
 & \left. + \frac{1800a^3b}{18!}x^{18} + \frac{372a^2b^2}{17!}x^{17} + \frac{32ab^3}{16!}x^{16} + \frac{b^4}{15!}x^{15}\dots\right) \\
 & + c_4\left(-\frac{a}{3!}x^3 - \frac{b}{2!}x^2 + \frac{6a^2}{8!}x^8 + \frac{6ab}{7!}x^7 + \frac{b^2}{6!}x^6 - \frac{66a^3}{13!}x^{13} - \frac{66a^2b}{12!}x^{12} - \frac{15ab^2}{11!}x^{11} - \frac{b^3}{10!}x^{10} + \frac{1056a^4}{18!}x^{18} \right. \\
 & \left. + \frac{1056a^3b}{17!}x^{17} + \frac{276a^2b^2}{16!}x^{16} + \frac{28ab^3}{15!}x^{15} + \frac{b^4}{14!}x^{14}\dots\right)
 \end{aligned} \tag{50}$$

$$\begin{aligned}
 y''' = & c_1\left(1 - \frac{4a}{5!}x^5 - \frac{b}{4!}x^4 + \frac{36a^2}{10!}x^{10} + \frac{12ab}{9!}x^9 + \frac{b^2}{8!}x^8 - \frac{504a^3}{15!}x^{15} - \frac{192a^2b}{14!}x^{14} - \frac{24ab^2}{13!}x^{13} - \frac{b^3}{12!}x^{12} + \frac{9576a^4}{20!}x^{20} \right. \\
 & \left. + \frac{3960a^3b}{19!}x^{19} + \frac{600a^2b^2}{18!}x^{18} + \frac{40ab^3}{17!}x^{17} + \frac{b^4}{16!}x^{16}\dots\right) \\
 & + c_2\left(-\frac{3a}{4!}x^4 - \frac{b}{3!}x^3 + \frac{24a^2}{9!}x^9 + \frac{10ab}{8!}x^8 + \frac{b^2}{7!}x^7 - \frac{312a^3}{14!}x^{14} - \frac{144a^2b}{13!}x^{13} - \frac{21ab^2}{12!}x^{12} - \frac{b^3}{11!}x^{11} + \frac{5616a^4}{19!}x^{19} \right. \\
 & \left. + \frac{2760a^3b}{18!}x^{18} + \frac{480a^2b^2}{17!}x^{17} + \frac{36ab^3}{16!}x^{16} + \frac{b^4}{15!}x^{15}\dots\right) \\
 & + c_3\left(-\frac{2a}{3!}x^3 - \frac{b}{2!}x^2 + \frac{14a^2}{8!}x^8 + \frac{8ab}{7!}x^7 + \frac{b^2}{6!}x^6 - \frac{168a^3}{13!}x^{13} - \frac{102a^2b}{12!}x^{12} - \frac{18ab^2}{11!}x^{11} - \frac{b^3}{10!}x^{10} + \frac{2856a^4}{18!}x^{18} \right. \\
 & \left. + \frac{1800a^3b}{17!}x^{17} + \frac{372a^2b^2}{16!}x^{16} + \frac{32ab^3}{15!}x^{15} + \frac{b^4}{14!}x^{14}\dots\right) \\
 & + c_4\left(-\frac{a}{2!}x^2 - bx + \frac{6a^2}{7!}x^7 + \frac{6ab}{6!}x^6 + \frac{b^2}{5!}x^5 - \frac{66a^3}{12!}x^{12} - \frac{66a^2b}{11!}x^{11} - \frac{15ab^2}{10!}x^{10} - \frac{b^3}{9!}x^9 + \frac{1056a^4}{17!}x^{17} + \frac{1056a^3b}{16!}x^{16} \right. \\
 & \left. + \frac{276a^2b^2}{15!}x^{15} + \frac{28ab^3}{14!}x^{14} + \frac{b^4}{13!}x^{13}\dots\right)
 \end{aligned} \tag{51}$$

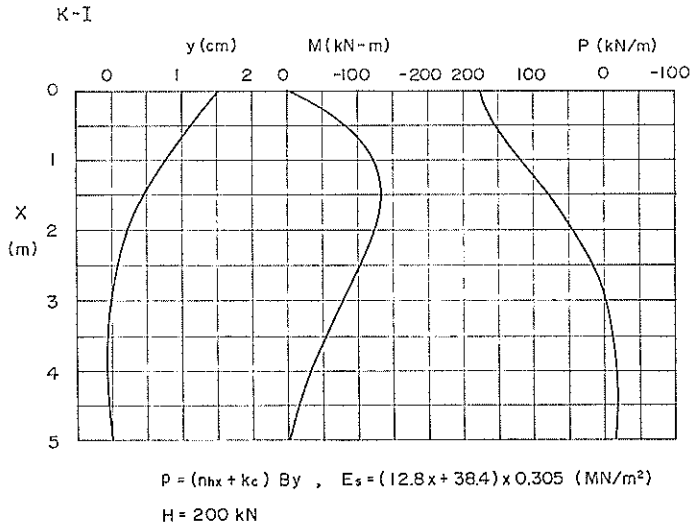


図-8 台形型地盤の杭の挙動

ここでは、前節と同様に杭の有効長を用いて、簡潔な数式にまとめることができないので、計算精度の検討とか、積分定数の算定は容易に行うことができない。これについて、本式が一定型地盤と増加型地盤の組合せであることから、これらの解析結果を参考に検討することは有効な方法であると考え。特に、計算精度の問題では、増加型地盤の場合、 $x=L$ において、 $n=0$ から $n=3$ までと $n=5$ までの級数和の誤差は、最大で2,800分の1であるのに対し、一定型地盤の場合は2万分の1であるので、台形型地盤の場合は増加型地盤に従って取り扱わなければならないことがわかる。また、港湾の矢板式係船岸のたわみ性控え工の設計の最終精度からすれば、 $n=4$ までの計算式で十分であると考えられる。これは x の指数にして20から23程度であるので、実用算定式はこれらを考慮して表わすことになる。

次に、積分定数を定めるために、有効長をあらかじめ定めておく必要がある。上述の方法に準じて、 $1/\gamma = \sqrt{4(a/\gamma + b)}$ 、 $\gamma L \geq 3$ と置くことができる。この方式の適応性を確かめる必要があるが、ここでは、実際に使用されると考えられる杭や連続壁について検討した。一般に、特性長が大きく算出されるのは一定型地盤の場合であるので、それによることとし、 $\beta L = 3$ を目安とした。杭としては、木杭、RC杭、H形鋼杭および鋼管杭とし、このほか、鋼矢板およびRC控え版をも対象として計算した結果、有効長として10mをこえるのは特別な場合であり、実用上、6~8mまで考えれば十分であることがわかった。これらを用いて検討した結果、この方式が実用の範囲において利用できることが明らかになった。な

お、 $x=10\text{m}$ における y 式およびその微分の計算式を付録C.3に示しておいた。これらの例題として計算した結果を図-8に示した。この図からわかるように、地盤反力が杭頭部でゼロでなく一定の値を示していることや、変形曲線が増加型の影響をうけて、深さ方向にやや固く表われていることなどは両方の地盤の組み合わせの特徴がよく出ていると思われる。

5. 抵抗土圧の諸問題とその解明

5.1 地盤反力と抵抗土圧

杭またはたわみ性の連続壁の地盤反力は、抵抗土圧をこえる量であってはならない。しかし、この単純で重要なこれら両者のチェックは現行設計法では取り扱われていないようである。これは、やはり、他の通常の構造物の設計の場合と同様に、設計の流れの一つとして組み込まれておらなければならない。

横方向地盤反力定数を、杭の前面の受働土圧と杭側面のせん断力によって表わすことができると久保²⁾や沢口¹⁹⁾が述べているが、この種の考え方は基本的には多くの研究者の認めるところとなっている。沢口は特にこれについて、杭の何がしかの上部地盤は塑性領域で受働土圧に深くかかわりをもつ部分と、その下の弾性領域によって抵抗しており、杭の側面せん断力もこれに加わっていると述べている。この側面せん断力は、たわみ性の連続控え工の場合はゼロである。したがって、連続壁に対する横方向地盤反力定数は単杭の場合より小さい値になることは容易に想像できる。

研究者のなかには受働土圧を非常に大きいものと考え

抵抗土圧に受働土圧のみを用いている場合をしばしば見
うけるが、地震時を扱うとき、設計地震震度の増大にと
もなう受働土圧の減少と主働土圧の増加は著しいもの
があるので、ここはやはり、抵抗土圧は受働土圧—主働土
圧として、明確に定義するとともに設計上、主働土圧を
無視する取り扱いを行ってはならないと考える。

矢板式係船岸のたわみ性 控え工 の場合は、その多く
は、砂質土というより、砕石とか割石で被覆された地盤
を取り扱うが、ときには粘性土の在来地盤に杭などを打
ち込んで控え工を設けることもある。一般に、前者の場
合は増加型地盤として、また、後者の場合は一定型地盤
として設計することになるが、その際、地震時土圧とし
て、砂質土のほか、粘性土の場合も取り扱わなければな
らない。

5.2 地震時土圧の研究の概説

港湾の技術基準⁴⁾では、砂質土の常時および地震時の
土圧を算定するのに物部式⁶⁾を採用している。これは、
クーロン(Coulomb)の土圧式でミュラー・ブレスロー
(Müller-Breslau, 1906) によって導かれた式に、壁

体の外側および内側に地震合成角(参考文献4, 64)お
よび72)を参照のこと)だけ傾けた状態を加えて、誘導
したものであり、物部の地震時の主働土圧および受働土
圧とよんでいる。この土圧式は砂質土のみであり、粘性
土には使用できない。

これに対して、岡部⁶⁵⁾は砂質土と粘性土の土質力学的
特性を合わせ持った地盤について、図-9に示すように、
地震時の状態で、壁体が下端を中心に外側に傾くとき、
三角土けい(が下に落ち込むようになる状態を想定し、こ
れらの力の三角形によって、地震時土圧式を誘導した。
しかし、岡部は地震時の主働土圧しか導かなかつた。な
お、岡部の論文によって、土圧の具体的な算出手順を推
察すると、まず、土圧力の式によって、主働の直線崩壊
角 α を求め、この崩壊角を、土圧強度の式に代入して、
所定の位置の土圧強度を得る。ただ、この場合崩壊角は
考える深さ全区間にわたって一定であるとするので、算
出された土圧は直線分布となる。式52は岡部の地震時主
働土圧力の式であり、式53は、地震時主働崩壊角を求め
る式で、地震時主働土圧強度を求める式は式54である。

$$P_a = \frac{h}{\sin \beta} \left\{ \frac{\gamma_e h \sin(\beta - \omega)}{2 \sin \beta} + q_e \right\} \frac{\sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) - c \sin(\beta - \omega) \cos \phi}{\sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)} \quad (52)$$

$$A = \sin(\delta + \omega + \varepsilon)$$

$$B = \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) \cos \varepsilon - \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \cos(\delta + \omega) - \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \cos(\delta + \omega)}{\frac{\gamma_e h \sin(\beta - \omega)}{2 \sin \beta} + q_e}$$

$$C = \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) \sin \varepsilon + \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \sin(\delta + \omega) + \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\delta + \omega)}{\frac{\gamma_e h \sin(\beta - \omega)}{2 \sin \beta} + q_e} \quad (53)$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC + A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}$$

$$2\alpha = \beta + \phi - \mu$$

$$p_a = \left\{ \frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \frac{\sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - \alpha)}{\sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)} - \frac{c \sin(\beta - \omega) \cos \phi}{\sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)} \quad (54)$$

ここに用いた記号およびその単位は次のとおりであ
る。

- c : 粘着強度 (kN/m²)
- h : 壁面の高さ (m)
- P_a : 主働土圧力 (kN/m)
- p_a : 主働土圧強度 (kN/m²)
- Q, Q_e : 上載荷重および地震時上載荷重 (kN/m)
- q, q_e : 単位面積当りの上載荷重および地震時上載荷重 (kN/m²)
- W, W_e : 土の重量および地震時の土の重量 (kN/m)
- y : 壁の天端から鉛直下方に測る深さ (m)
- α : 崩壊角 (度)

- β : 壁面の水平となす角 (度)
- γ, γ_e : 土の常時および地震時の単位体積重量(kN/m³)
- δ : 土の壁面摩擦角 (度)
- ε : 地震合成角 (度)
- μ : $= \beta + \phi - 2\alpha$, 崩壊角の補正 (度)
- τ : 土の粘着合力 (kN/m)
- ϕ : 土の内部摩擦角 (度)
- ω : 地表面の傾斜角 (度)

なお、符号については、図-9に示す場合を正とする。

筆者は、岡部の地震時の主働土圧式を補うため、地震
時の受働土圧式を導いた。これを砂質土と粘性土に大別
し、砂質土については、地震時の土圧係数と地震時の崩

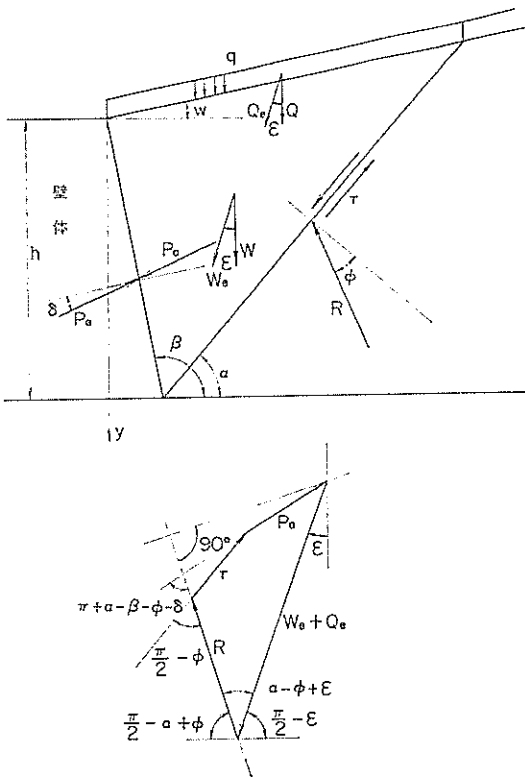


図-9 地震時主働土圧

壊角、粘性土については、地震時の土圧強度と地震時の崩壊角を一括とりまとめ、1959年に設計図書⁶⁶⁾として刊行した。これらの図表は、当時、建設中の横浜港山下ふ頭の設計⁶⁷⁾に使用されたのを始めとし、全国的に広く用いられた⁶⁸⁾。その後、粘性土の付着力が土圧に有効に働くことに着目し、壁面鉛直、地表面水平の場合について地震時土圧式を導き、これを図表化し設計資料⁶⁹⁾ (1964年)を刊行した。

沢田⁷⁰⁾は前面に斜面をもった矢板式係船岸の根入部の地震時の受働土圧分布をもとめる計算法を発表したが、抵抗する地震時受働土圧に、砂質土の物部土圧を用いている。

一方、土圧に関する実験的研究は石井・林・荒井⁷¹⁾らによって、相当以前から乾燥砂の振動実験が行われていた。その後、この研究は荒井^{72), 73), 74), 75)}を中心として続けられたが1978年をもって一応終了することにした。これらの研究成果は直ちに、実地の設計法に取り入れられた。そのなかで、地震時の主働土圧については壁面摩擦角を零度とし、受働土圧については $2/3 \cdot \phi$ とするとき、物部の地震時土圧と実験結果とがよく一致すると述べて

いる。しかし、壁面摩擦角については、港湾の技術基準では15度までとしている。さらにまた、荒井⁷²⁾は物部の地震時主働土圧と、岡部のそれとが数式的に同一のものであることを明らかにした。物部の砂質土の地震時土圧式が広く物部・岡部の土圧式といわれているのは、この辺に原因があるのかも知れない。

また、高橋⁷⁶⁾らは砂質土の受働土圧に係わる実験を行わない報告している。まず、前面傾斜の受働土圧は完全浸水の状態で行なわれたが、結果は物部・岡部の砂質土の土圧と沢田の前面に傾斜地盤をもつ受働土圧とが計算値と実験値がほぼ同程度のもとなったことを確認している。また自立矢板の実験では、砂地盤における、港研方式とチャンの方式によって比較しているが、最大曲げモーメントと変位のいずれもよい一致を示しているとはいえない。デッドマンアンカーの抵抗力については、現在もまだ、解明されないまま設計を行なっているが、この実験によってデッドマンアンカーの抵抗力の実験式を得ることができた。このように、港湾では港湾特有の構造物についての土圧問題を逐次解明してきたが、それらは主に砂質土についてであり、粘性土についての研究は現在継続中の段階にあるといえる。

港湾以外の分野での地震時土圧の研究は、市原^{77), 78), 79), 80), 81), 82)}松沢らによって専ら行われている。砂質土の主働土圧については、平面すべり面(崩壊面と同一)の仮定は実用上大きな誤差を与えないことが一般に認められている。しかし、受働土圧の場合壁面摩擦角の土圧に与える影響は大きいがこれについてはまだ十分わかっていない。最近、ソコロフスキー (Sokolovski, V.V. 1964) の塑性論によって土圧を求めることが行われるようになった。この方法によっても主働土圧はクローン土圧とほとんど変らない数値を示す。これに対し、受働土圧の場合は平面すべりでは無理があり、曲面すべりによって計算する必要があるとされている。そこで、市原は対数線法とソコロフスキーの方法に震度法を加えて、地震時土圧を求めるようにした。そして現在までに、砂質土の地震時土圧係数⁷⁷⁾、粘性土の地震時土圧⁷⁹⁾および内部摩擦角をもつ粘性土の地震時受働土圧⁷⁸⁾の算定についての研究を行った。ただ、これらの計算は一般の電子計算機では無理があり、大容量の計算機によって計算を行わなければならない。それで、計算の簡易化の研究⁸³⁾も行われている。砂質土の地震時受働土圧について、壁面摩擦角が零度の場合、対数線法と物部法では、ほとんど同様の結果を示すが、それは壁面が鉛直で、地表面が水平の場合に限られる。例えば、壁面が内側に傾斜するとき、10度までは実用上ほぼ等しい値を与えるが、そ

れ以上傾斜するとき、加速的に物部法が大きな値となり、対数線法との差が大きくなる。また、地表面のこう勾の増加にともない10度を境に、両者の差が大きくなる。一方、壁面摩擦角が $\delta=1/2\cdot\phi$ のとき、内部摩擦角 $\phi=30$ 度を境に、その差は角度とともに大きくなる。対数線法とソコロフスキー法との計算がほぼ等しいので、このことは物部法とソコロフスキー法の間においても同様にいうことができる。ただ、これらの差の増加傾向は、地震震度が大きくなるに従い、両者の差は少なくなり、地震合成角が30度付近ではほとんど等しくなる。これは、地震震度が大きくなるに従い、両者のすべり面が接近するからであると説明されている。

港湾構造物を設計する場合、地盤を砂質土と粘性土に大きく分けて取り扱うことが通常行われる。倉田⁸⁴⁾らの土砂の土質力学的な分類研究の結果、粒度分析によって砂の含有量が80%以上のものを砂とし、粘土およびシルトの含有量が40%以上のものを粘土としている。そして、これらの区分に入らない砂含有量が60~80%の中間領域のものについては、砂と粘土の性質をあわせもつものであるが、これらを粘性土として取り扱うことにしている。そのために、構造物を設計する際、この区分の粘性土は、強度的に過少評価される傾向にあって、結果として設計される構造物は過大なものになりがちである。これらの中間土について、中瀬・小林⁸⁵⁾らは強度補正や有効応力に基づく設計法を提案したが、一部で実地にこれを用いて設計を行うなど、一般化されつつある。

以上によって、港湾および、その周辺における、地震時土圧の研究に関係する研究の概要がはげ握された。このうち、港湾技術研究所等において行われた調査・研究は、そのほとんどが設計法にとり入れられている。一方市原・松沢らの研究成果は高く評価されるべきものと考えられる。とくに、地震時の受働土圧については、有益な資料が多くある。ただ、実地に設計する場合、例えば単一の砂質地盤はほとんどなく、多くは互層成層をなしてい

るが、このような場合にも、柔軟に対応できるものでなければならぬが、市原らの方式がそうであるかどうか不明である。

港湾では矢板式係船岸はかなりな数になっている。これらの耐震設計は、地震による被災や研究開発などによって設計法の改良を積み重ねてきた。本報告のたわみ性控え工の設計法は反省材料の一つであるが、他の1つに矢板の根入の設計法があげられる。それは、多くの地震被害の中で、かなり厳しい条件下におかれながら、矢板根入部の地盤の抵抗不足による被害が今日まで全くなかったという事実である。これは、矢板根入部の設計法の過大設計を示唆するものと考えられるが、今後検討すべき重要課題といえる。

5.3 新しい地震時土圧式

岡部の地震時土圧式は式52, 53, 54で表わされる。彼は既に述べたように、地震時の主働崩壊角は、主働土圧力の式を通じて、全体の平均的な値を算出し、次いで、この主働崩壊角を用いて、地震時の主働土圧強度を求めるという計算手順を考えていたと想定される。一見、合理的と思われるこの方法は、砂質土においては問題が表面化しなかったが、粘性土土圧で問題が生ずることとなる。すなわち、崩壊角 α を求めるための式53のBおよびCの各第3項が粘着強度と三角土けいの重量および上載荷重を含む項からなっている。式53の内容から、これらによって算出される崩壊角は地震時主働土圧力に対応する平均的崩壊角であって、これが、所定の深さでの地震時主働土圧強度に対応する崩壊角であるかどうかは不明であり、確認する必要がある。この疑問を解明するため、筆者が既に提案している計算方式⁸⁶⁾を式54と式55に示す。これは土圧強度とこれに対応する崩壊角の算定式であるが、直線崩壊面を前提に導いた地震時主働土圧式が内在する崩壊角に係わる数式的特性を用いて、岡部の方式よりは現象的により近い状態のもとで、合理的な崩壊角を求めるものである。

$$p_a = \left\{ \frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \frac{\sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - \alpha)}{\sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)} - \frac{c \sin(\beta - \omega) \cos \phi}{\sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)} \quad (54)$$

$$A = \sin(\delta + \omega + \varepsilon)$$

$$B = \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) \cos \varepsilon - \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \cos(\delta + \omega) - \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \cos(\delta + \omega)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e}$$

$$C = \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) \sin \varepsilon - \cos(\beta - \phi - \varepsilon) \sin(\delta + \omega) + \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\delta + \omega)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e} \quad (55)$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC + A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}$$

$$2\alpha = \beta + \phi - \mu$$

ここに用いる記号や符号はすべて前節におけるものと同一である。式(5)は土圧強度式から導いたので、 B および C の各第3項の分母が土柱の重量と上載荷重によって表わされている。より具体的に述べるならば、前節の式(3)の分母の地盤重量の項に $1/2$ の係数があるのに対し、式(5)ではこれが 1 となっており、これが両者の相違するところとなる。これらの相違点の取り扱いについては、現在まで何らの説明もないままになっているので、この際、明確にしておく必要があると考える。

実際に設計する場合の土圧計算では単一土層成層を対象にすることはあまりなく、互層成層の場合が非常に多い。したがって、これに対する土圧計算は必然的にまず土圧分布を求めることから始めなければならないが、そのためには土圧力の式より土圧強度の式の方が扱いやすい。

次に、地震時の崩壊角を求める式(5)および式(5)のいずれも、地盤特性と地震震度のほか、地盤の重量および上載荷重などの鉛直荷重によって崩壊角が定められるようになってきている。すなわち、砂質土の場合は、地盤特性と地震震度によって一義的に定められた崩壊角が、粘性土ではこのほか鉛直荷重によっても影響されることになり、具体的には、深さが深くなるにしたがって崩壊角がより水平に近くなり、結果として、崩壊角は深さとともに変ることになる。これらをより明確にするために具体例によるのが便利であるが、図-10がそれである。壁面鉛直、地表面水平の場合の粘性土の崩壊角が深さによって変化する様子を示した。計算条件は、粘着強度 $c=50\text{kN/m}^2$

m^2 、水平地震震度 $k_h=0.40$ 、地盤の単位体積重量は、計算を容易にするため仮に、 $\gamma=10\text{kN/m}^3$ とした。この図の深さ 10m の位置から斜め上方に描かれている直線 $c-c'$ および曲線 $d-d'$ は、それぞれ、岡部の方式および筆者の方式を示すものである。なお、この場合、地震時主働崩壊角も受働崩壊角も同一の値を示すので、以後、単に崩壊角および崩壊面ということにする。さて、岡部の場合、深さ 10m での崩壊面以外の $0\sim 10\text{m}$ の崩壊面について2通りの考え方があ。1つは各深さごとに求められる角度をもって、その深さの崩壊面とする場合と、他の1つは 10m の深さにおける崩壊面と同一角度の崩壊面であるべきであるとする場合が考えられる。筆者の場合、土圧強度によって得た崩壊角は所定の深さにおける崩壊角であるので、これらを連絡して下に凸のゆるく曲った崩壊面を得るが、これを深さ 10m における地震時の全体的崩壊面であるとする。それゆえ当初仮定した地震時主働土圧力に対する直線崩壊面は、平均的仮想崩壊面であって、究極的に得ようとする地震時主働土圧強度に対する崩壊角の算式を導くための仮定条件であったと考える。

さらに、これらのおおのこの考え方に基づく、粘性土の地震時土圧について比較を容易にするため、受働土圧の場合を例に示したのが表-7と図-11である。これらの算式の一部は付録D.2の2・3に掲載してある。計算方式は4通りあるがこれらは表に略記してある。まず、計算方式①は、土圧方式によって導かれた崩壊角の算式によって崩壊角を求め、これを原式の土圧方式に入れ、相隣

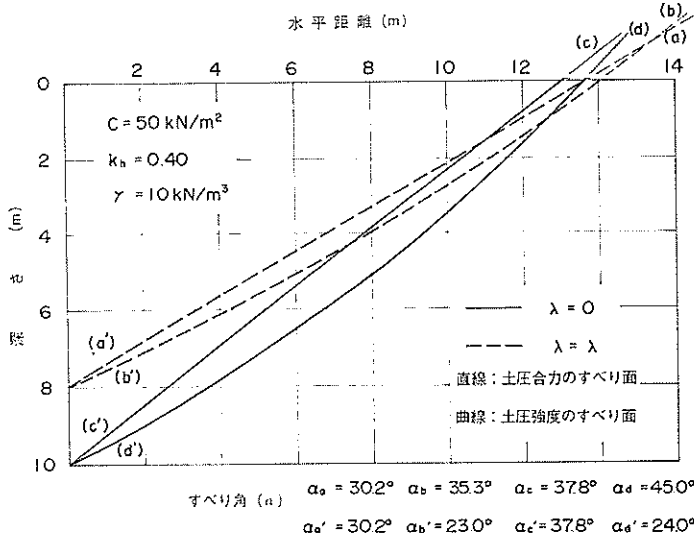


図-10 粘性土の地震時崩壊面

表-7 土圧計算方式による土圧強度と土圧力(粘性土, 受働土圧の例)

深 さ (m)	土 圧 強 度 (kN/m ²)				土 圧 力 (kN/m)			
	計算方式①	計算方式②	計算方式③	提案方式	計算方式①	計算方式②	計算方式③	提案方式
0		100.0	103.3	100.0	0	0	0	0
1	103.0	105.9	108.1	105.9	103.0	103.0	105.7	103.0
2	108.9	111.7	113.0	111.7	211.8	211.8	216.2	211.8
3	114.6	117.4	117.8	117.2	326.4	326.3	331.6	326.2
4	120.2	122.9	122.6	122.5	446.6	446.5	451.8	446.1
5	125.6	128.3	127.5	127.5	572.2	572.1	576.9	571.1
6	130.9	133.4	132.3	132.1	703.1	702.9	706.7	700.9
7	135.9	138.4	137.1	136.3	839.0	838.8	841.4	835.1
8	140.7	143.1	142.0	140.0	979.7	979.6	981.0	973.2
9	145.3	147.5	146.8	142.9	1125.0	1124.9	1125.4	1114.7
10	149.6	151.6	151.6	144.7	1274.6	1274.4	1274.6	1258.5

註-1) 計算条件

鉛直壁, 地表面水平, 上載荷重なし
 粘着力 $c=50\text{kN/m}^2$, 壁面付着力 $c_a=0$
 単位体積重量 $\gamma=10\text{kN/m}^3$
 水平地震震度 $k_h=0$

註-2) 計算方式

計算方式①: P_i による $\alpha_i \rightarrow P_i \rightarrow p_i = \frac{P_i - P_{i-1}}{\Delta h}$
 計算方式②: P_i による $\alpha_i \rightarrow p_i \rightarrow P_i = \sum p_i$
 計算方式③: P_{10} による $\alpha_{10} \rightarrow p_i \rightarrow P_i = \sum p_i$
 提案方式 : p_i による $\alpha_i \rightarrow p_i \rightarrow P_i = \sum p_i$

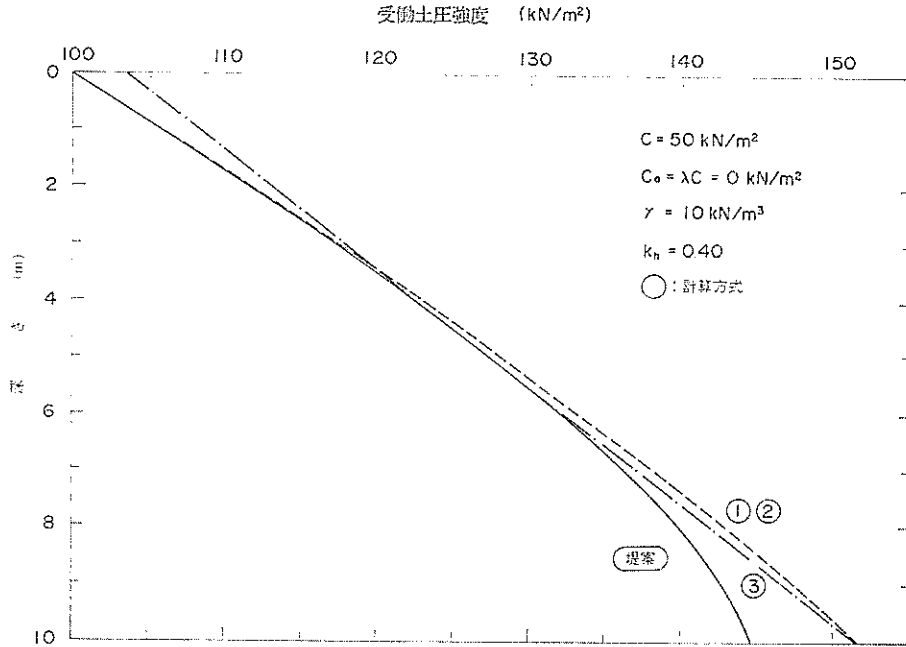


図-11 粘性土地震時受働土圧強度

る深さで土圧力の差を算出し, これをその区間の土圧強度とする方法である。次の計算方式②は既に述べたように, 土圧力式から導かれた崩壊角の算式によって崩壊角を求め, これを土圧強度式に入れて, 土圧強度を求め

る方法。計算方式③は岡部が示した方法であるが, 最深部における土圧力に対応する崩壊角を求め, この崩壊角が考える全区間にわたって一定であるとして, これを用いて土圧強度を求める方法, 計算方式④は筆者が提案す

る計算方式で既に述べたように、各深さにおける土圧強度に対応する崩壊角を求め、これによって土圧強度を得ようとするものである。計算方式①と②は全く同一の値を示すと考えてよい。詳細には計算方式①の方が計算方式②より全体的に僅かに大きく、10mにおける土圧力の差は約6500分の1となった。なお、これらは、ともに上に凸の極くゆるい曲線である。計算方式③は崩壊角が一定であるので直線分布となる。深さ10mにおける土圧力は計算方式①と同一になるはずであるから地表面における土圧強度は $2c=100\text{kN/m}^2$ より大きくなり、計算の結果は 103.3kN/m^2 となる。この計算方式では最深部の深さが変化するに従い、地表面の土圧強度が変化することとなり、不合理な計算方式と考えられる。最後の計算方式④は地表面では計算方式①②と同様 $2c=100\text{kN/m}^2$ であり、深さが浅い間は①②と全く同一であるが、深さが増すに従い、僅かに差が生じ、ここでは7mを越すとともにその差は大きくなる。この例題では鉛直荷重約 125kN/m^2 が計算限界点であり、10m以深では急激にゼロに変化するので、特に8~10mにおいて差が目立つのは当然のことといえる。いいかえれば、この土圧式においては、深さ10mの地盤が地震によって組織破壊を起す前の状態にあることを示しているといえる。岡部方式はこうした極所破壊的な現象に対しては十分な対応ができず、このような危険な状態も取り込んで、混然一体化し平均化した地盤に対する土圧を算定していると考えられる。これはやはり合理性に欠けるもので好ましいとはいえない。これに対し、筆者の方式は土圧として成り立つものなのか否かの判定が直接できるので、以上の中で最も適切な計算方式といえる。なお、設計実務的には、上層（または地表面）と下層の2か所だけを計算し、その中間部は直線分布とみなして取り扱うのが一般に行われている方法である。粘性土の地震時の受働土圧分布は上に凸のゆるい曲線であるのに対し、主働土圧分布は下

に凸のゆるい曲線であるので、直線分布とみなして計算しても、設計上では安全側となるので問題はない。

地震時受働土圧は主働土圧の場合と同様に、土圧強度方式によることとし、式⑤、式⑥に示す。

ここに用いる記号はすべて前節におけるものと同一であるほか、符号は図-12に示すものをすべて正とする。なお、筆者の方式による地震時の土圧強度と崩壊角についての計算結果の1例を図-13、図-14に示す。これらは粘着強度 $c=50\text{kN/m}^2$ のものであるが、崩壊角が、鉛直

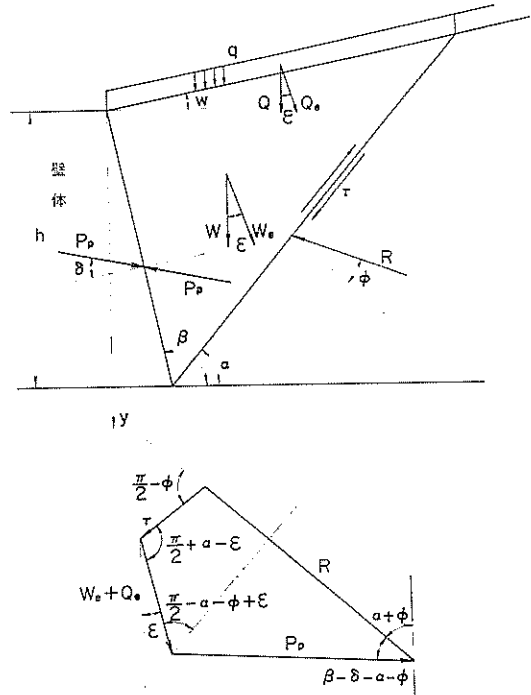


図-12 地震時受働土圧

$$p_p = \left\{ \frac{\gamma c y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \frac{\sin(\alpha + \phi - \epsilon) \sin(\beta - \alpha) + c \sin(\beta - \omega) \cos \phi}{\sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega)} \quad (66)$$

$$A = -\sin(\delta - \omega + \epsilon)$$

$$B = \cos(\beta - \phi - \delta - \omega) \cos \epsilon - \cos(\beta + \phi - \epsilon) \cos(\delta - \omega) + \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \cos(\delta - \omega)}{\frac{\gamma c y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e}$$

$$C = \cos(\beta - \phi - \delta - \omega) \sin \epsilon + \cos(\beta + \phi - \epsilon) \sin(\delta - \omega) - \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\delta - \omega)}{\frac{\gamma c y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e} \quad (67)$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC - A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}$$

$$2\alpha = \beta - \phi - \mu$$

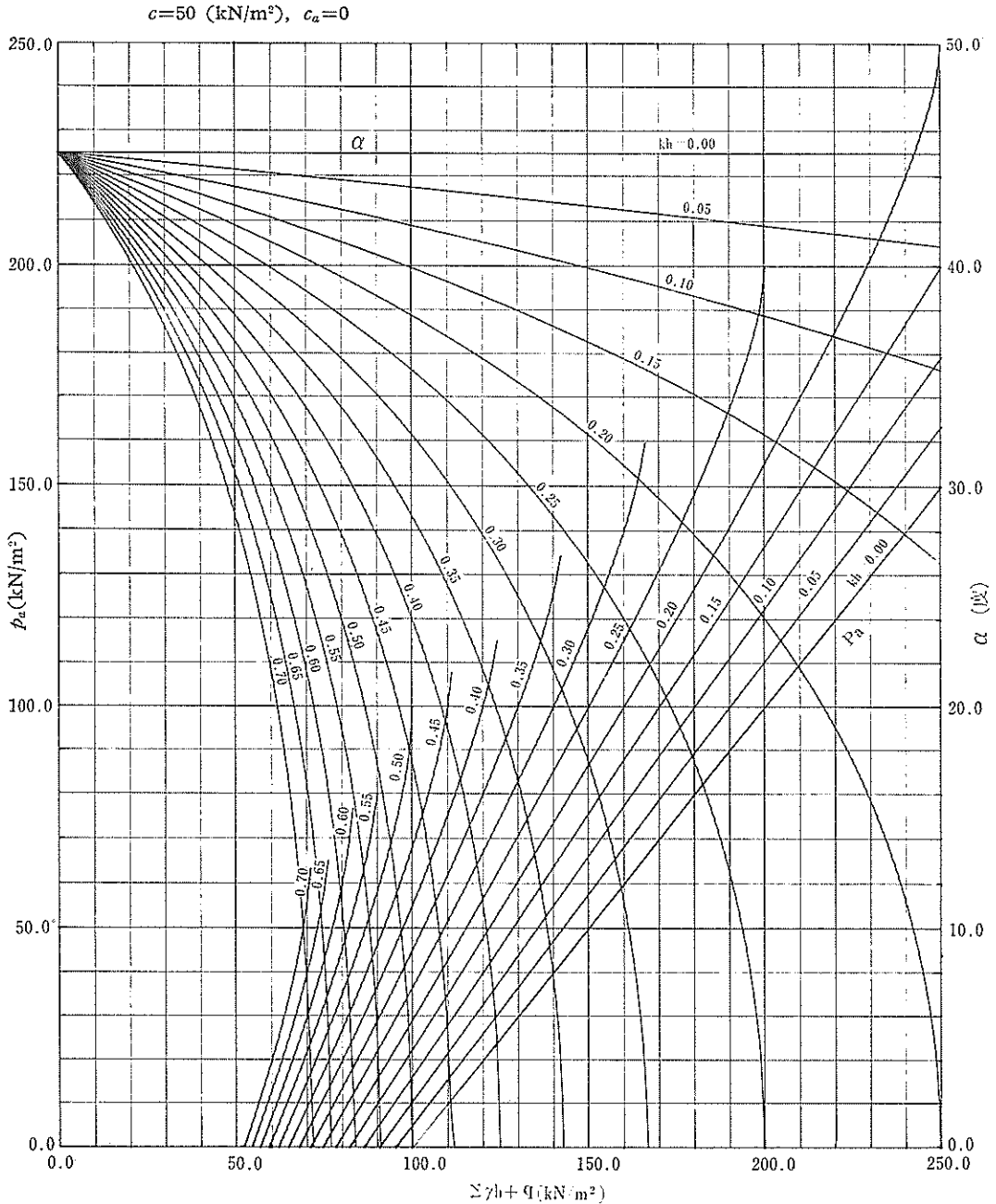


図-13 粘性土の地震時主働土圧強度と崩壊角

荷重の増加にともなって減少する様子がよくわかる。図中、主働土圧強度や受働土圧強度の曲線が途中で中断しているのは、既に述べたように、土圧強度に対する崩壊角が零度になり、地盤が破壊に近づく状態を示すものとして、ここで取り扱う土圧としては成り立たなくなる周

辺であると判断し計算を取り止めたためである。

これらの地震時土圧式については、煩雑のため、誘導式や主要な土圧式などを取りまとめ、付録D.1、D.2に一括記載しておいた。地震時主働土圧はD.1に、そして、地震時受働土圧はD.2に、おのおのの一般式の誘導

$c=50$ (kN/m²), $c_a=0$

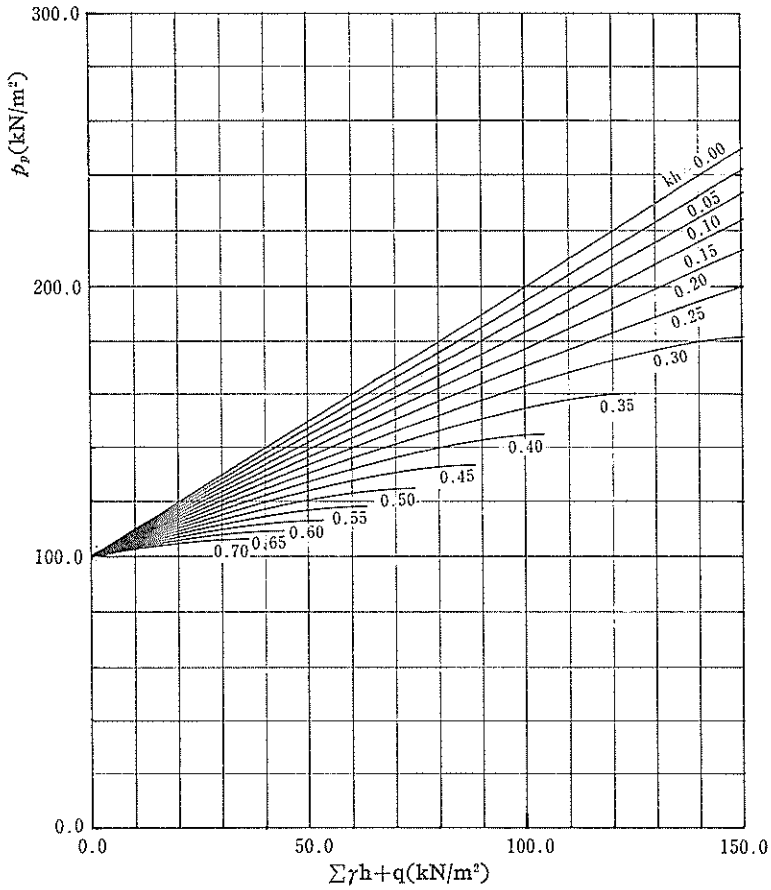


図-14 粘性土の地震時受働土圧強度

$$p_a = \left\{ \frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \frac{\sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - \alpha)}{\sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)} - \frac{\lambda c \cos(\beta - \alpha + \phi) \sin(\alpha - \omega) + c \sin(\beta - \omega) \cos \phi}{\sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)} \quad (58)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= \sin(\delta + \omega + \varepsilon) + \frac{\lambda c}{A} \cos \delta \\ B &= \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) \cos \varepsilon - \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \cos(\delta + \omega) \\ &\quad - \frac{c}{A} \{ \lambda \sin(\beta + \phi - 2\omega) \cos \delta + 2 \sin(\beta - \omega) \cos \phi \cos(\delta + \omega) \} \\ C &= \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) \sin \varepsilon + \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \sin(\delta + \omega) \\ &\quad + \frac{c}{A} \{ \lambda \cos(\beta + \phi - 2\omega) \cos \delta + 2 \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\delta + \omega) \} \\ \mu &= \tan^{-1} \frac{BC + A\sqrt{B^2 - A^2} + C^2}{B^2 - A^2} \\ 2\alpha &= \beta + \phi - \mu, \end{aligned} \right\} \quad (59)$$

$$\bar{A} = \frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e = \left\{ \frac{\gamma y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q \right\} \frac{1}{\cos \varepsilon}$$

$$p_r = \left\{ \frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \frac{\sin(\alpha + \phi - \varepsilon) \sin(\beta - \alpha)}{\sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega)} + \frac{\lambda c \cos(\beta - \alpha - \phi) \sin(\alpha - \omega) + c \sin(\beta - \omega) \cos \phi}{\sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega)} \quad (60)$$

$$A = -\sin(\delta - \omega + \varepsilon) - \frac{\lambda c}{A} \cos \delta$$

$$B = \cos(\beta - \phi - \delta - \omega) \cos \varepsilon - \cos(\beta + \phi - \varepsilon) \cos(\delta - \omega) + \frac{c}{A} \{ \lambda \sin(\beta - \phi - 2\omega) \cos \delta + 2 \sin(\beta - \omega) \cos \phi \cos(\delta - \omega) \}$$

$$C = \cos(\beta - \phi - \delta - \omega) \sin \varepsilon + \cos(\beta + \phi - \varepsilon) \sin(\delta - \omega) + \frac{c}{A} \{ \lambda \cos(\beta - \phi - 2\omega) \cos \delta - 2 \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\delta - \omega) \}$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC - A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}$$

$$2\alpha = \beta - \phi - \mu$$

内容のほか、壁面が鉛直で地表面が傾斜している場合と壁面が鉛直で地表面が水平の場合の一般式を求め、さらに、砂質土と粘性土についての算式をまとめてある。

粘性土には粘着力のほかには付着力があり、粘性土地盤における杭の支持力について、重要な役割をはたしている。これが壁面に働く土圧にも当然影響を及ぼしているはずであり、これを積極的に土圧に取り入れるべきであ

ると考える。これについて、筆者は壁面が鉛直で、地表面が水平な最も単純で一般的な粘性土地盤の地震時土圧式を導き、この設計計算図表⁶⁰⁾を作った。さらに、これを一般式に拡張したが、これら壁面付着力を考慮した地震時の主働土圧式は式58、崩壊角は式59、受働土圧式は式60、その崩壊角は式61に示す。

ここで、これらの式の記号は前節によるもののほか、 λ は粘性土の粘着力に対する付着力の比で、ここでは付

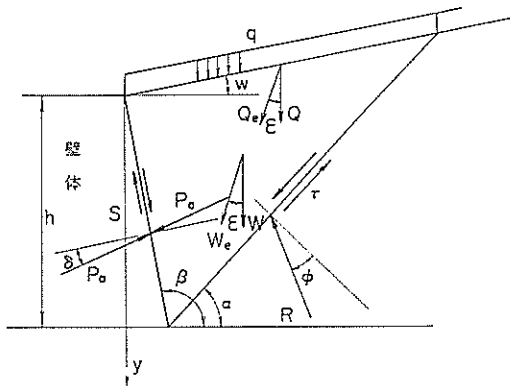


図-15 付着力考慮の地震時主働土圧

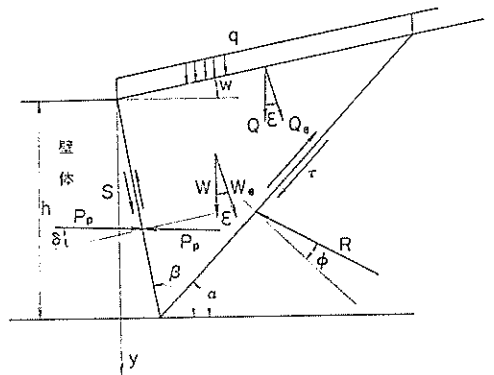
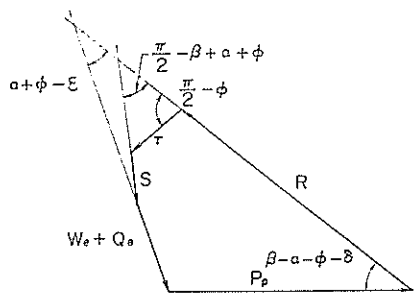
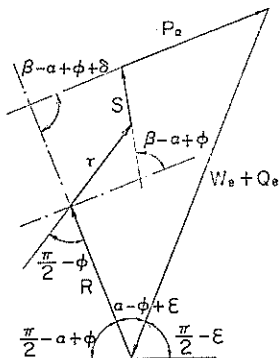


図-16 付着力考慮の地震時受働土圧



着比という。また、符号についてはおのおの図-15、図-16に示す場合を正とする。

これら、壁面付着力を考慮した地震時土圧式の誘導と主な土圧式などについては、煩雑のため、付録D.3、D.4に一括記載した。壁面付着考慮の地震時主働土圧はD.3に同じく受働土圧はD.4に一般式誘導の過程のほか、壁面が鉛直で地表面が傾斜している場合と壁面が鉛直で地表面が水平の場合についての一般式をまとめ、さらに、

粘性土について算式をまとめてある。

壁面付着力の実態については、杭の支持力の分野で研究・調査されている。港湾の技術基準⁴⁾ではトムリンソン (Tomlinson M.J. 1959) の研究に石下⁸⁾らが行った野外実験の結果を参考にあげている。この値を表-8に示すが、粘着力が 35~40kN/m² までは付着力はほぼ粘着力と同様な値を示すが、粘着力が 40kN/m² より大きくなると付着力の減少にともない、付着力比は減少する。

表-8 表粘着力と付着比

粘着力 (kN/m ²)	10.0	20.0	40.0	60.0	80.0	100	200	300	400	500
付着力 (kN/m ²)	10.0	19.6	36.8	41.4	46.4	51.0	72.0	87.0	92.0	10.5
付着比入	1.00	0.98	0.92	0.69	0.58	0.51	0.36	0.29	0.23	0.21

現状ではこれに優る資料が見当たらないので、この値を用いることにするが、硬質粘土地盤はともかく、中程度の強度から軟弱粘土といわれる範囲の粘土地盤の土圧への影響はかなり大きいと思われる。

壁面が鉛直で地表面が水平の場合の地震時土圧式は主働土圧については式(5)と式(6), 受働土圧については式(1)と式(2)に示す。

$$p_c = \frac{(\gamma y + q) \sin(\alpha + \epsilon)}{\cos \epsilon \sin \alpha} - \frac{\lambda c \sin^2 \alpha + c}{\cos \alpha \sin \alpha} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} 2\alpha &= 90^\circ - \tan^{-1} \sqrt{\frac{A^2}{B^2 - A^2}} \\ A &= \sin \epsilon + \frac{\lambda c \cos \epsilon}{\gamma y + q} \\ B &= -\sin \epsilon + \frac{(2 + \lambda)c \cos \epsilon}{\gamma y + q} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

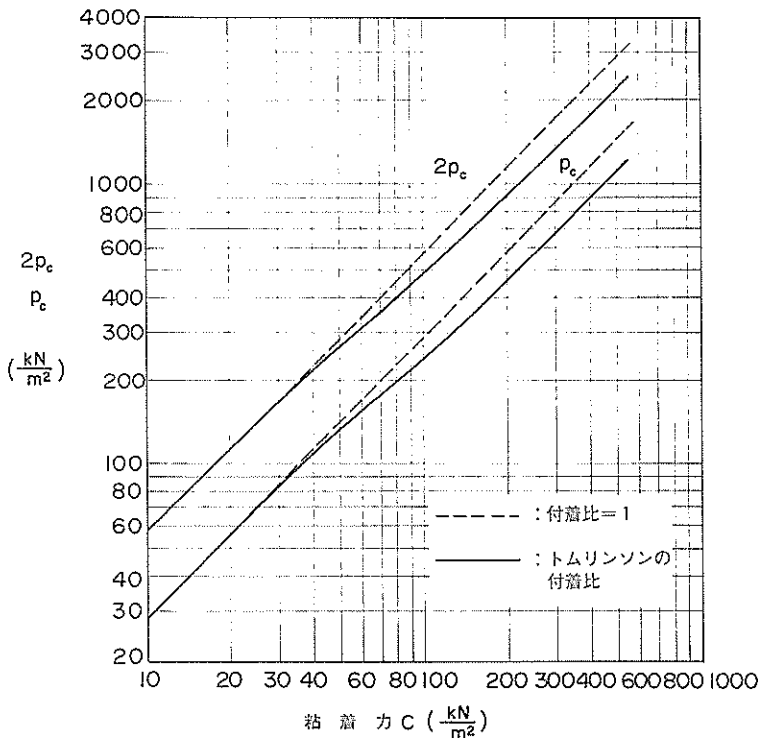


図-17 壁面付着力の土圧への影響

$$p_p = \frac{(\gamma y + q) \sin(\alpha - \varepsilon)}{\cos \varepsilon \sin \alpha} + \frac{\lambda c \sin^2 \alpha + c}{\cos \alpha \sin \alpha} \quad (61)$$

これらの4式からわかるように、ここでは、崩壊角は主働の場合も受働の場合も結果的に等しくなる。そのうえ、付着力のため崩壊角は付着力を考慮しない場合より水平に近いものになることがわかる。实例としての 図-

$$\left. \begin{aligned} 2\alpha &= 90^\circ - \tan^{-1} \sqrt{\frac{A^2}{B^2 - A^2}} \\ A &= -\sin \varepsilon - \frac{\lambda c \cos \varepsilon}{\gamma y + q} \\ B &= +\sin \varepsilon - \frac{(2 + \lambda)c \cos \varepsilon}{\gamma y + q} \end{aligned} \right\} \quad (62)$$

$c = 50 \text{ (kN/m}^2\text{)}, c_a = c$

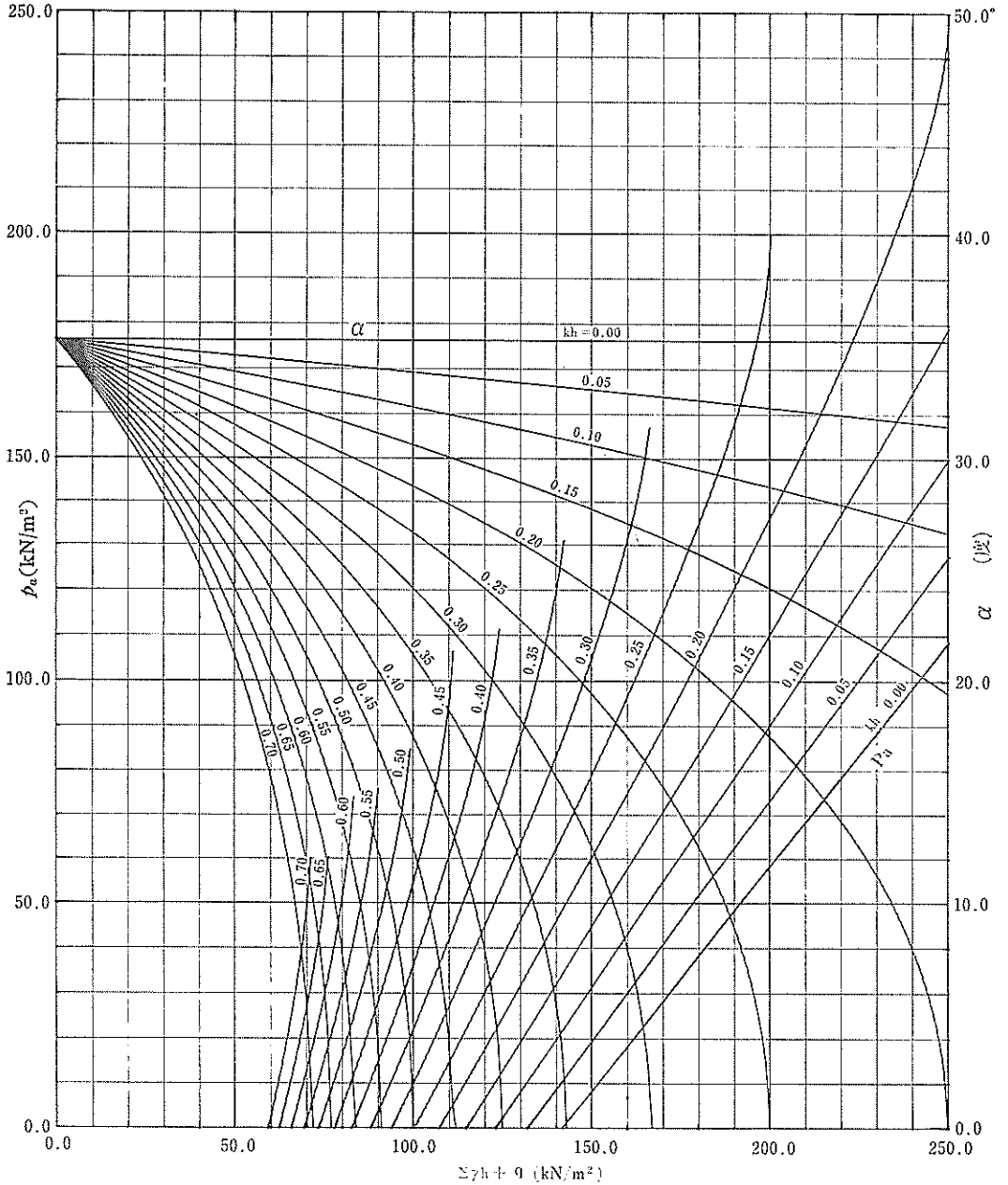


図-18 付着力考慮の地震時主働土圧と崩壊角 ($c_a = c$)

10直線 a—a', 曲線 b—b' を示す。これらと他の付着力を考慮しない崩壊面と比較して、付着力を考慮する方が水平に近い。また、直線と曲線とは、既に述べたように、岡部の計算方式による場合と筆者が提案している方式による場合の相違を示すもので、壁面の付着力を考慮する

場合においても、これまでと全く同様なことがいえる。

付着力を考慮することによる土圧への影響を知るため、図-17を作った。図中の ρ_c は土圧式(9)および式(10)の第2項を表わすものであるが、常時の付着力を考慮しない場合は $\rho_c = 2c$ であるので、それとの比は、附着比が1

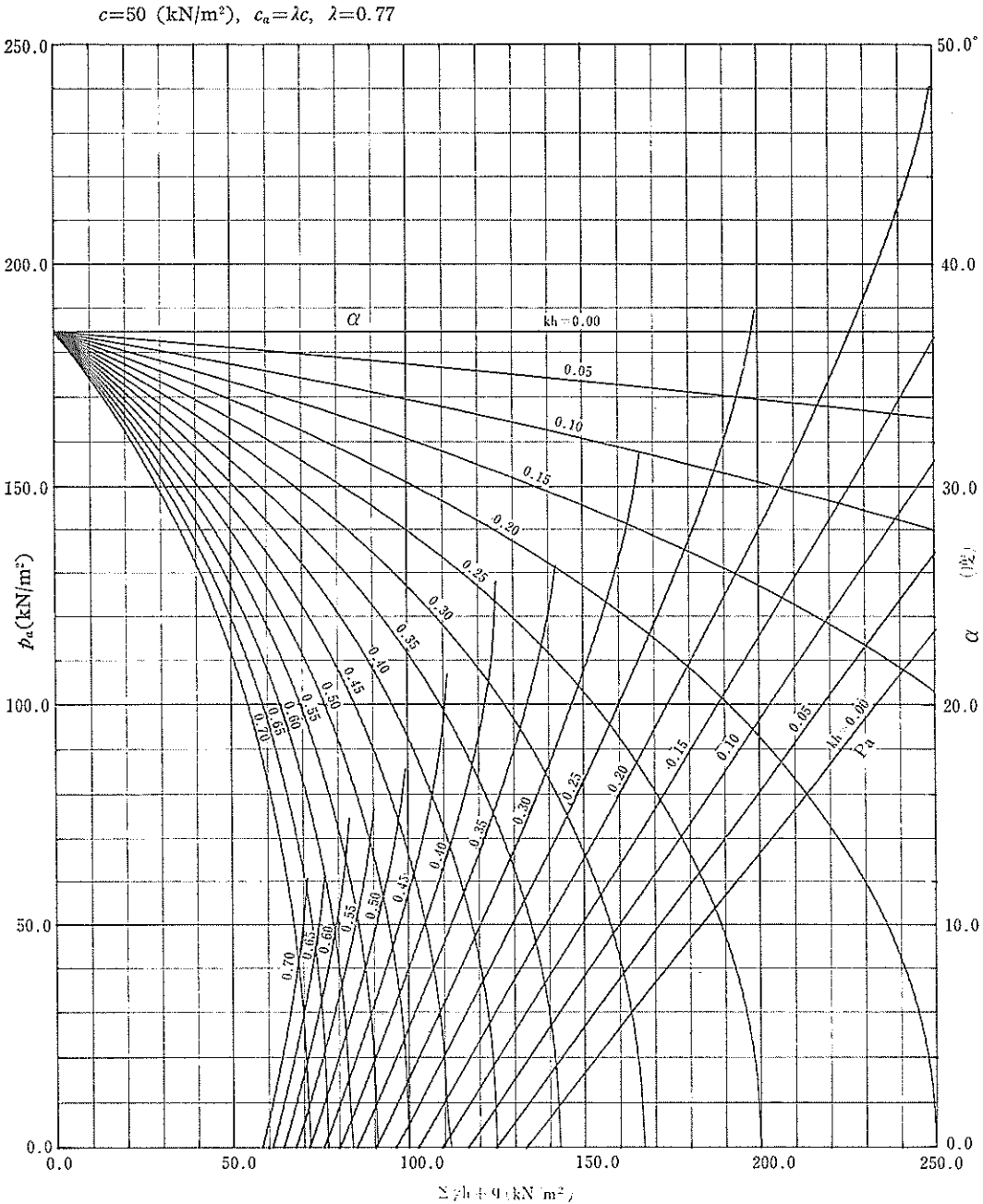


図-19 付着力考慮の地震時主働土圧と崩壊角 ($c_a = \lambda c$)

の場合は 1.41 倍となる。実際には 付着比は 1 ではないので、例えば、表-8の値を用いて示したのが図の実線であるが、 $c_a=2c$ の場合よりかなり大きい値を示していることがわかる。これが、地盤中の抵抗土圧の場合は、常時の 2 倍が考えられるので、付着力の影響はかなり大きいといえる。さらに付着力の効果を検討するため、図-18、図-19を示す。計算条件は付着力以外は図-13の場合と同様である。図-18は付着力が粘着力と等しい場合の主働土圧強度を示すものであるのに対し、図-19は、表-8から $c=50\text{kN/m}^2$ に対する付着比として $\lambda=0.77$ が与えられているときの主働土圧強度図である。図からわかるように崩壊角は鉛直荷重がゼロのときの崩壊角の起点ともいえる常時の値が45度ではなく、付着力 (c_a) が粘着力 (c) と等しいときは35度16分であり、付着比 $\lambda=0.77$ のときは36度56分与えられる。このように、崩壊角は付着力が大きいほど低くなるにもかかわらず、主働土圧の場合は低い値を示している。例えば、地震震度=

0.4、鉛直荷重 100kN/m^2 のときの付着比 $\lambda=0$ 、 $\lambda=0.77$ 、 $\lambda=1$ のときの p_a はそれぞれ 55kN/m^2 、 40kN/m^2 および 32kN/m^2 と読み取ることができる。受働土圧の場合は付着力の影響により逆に大きな値となる。また、崩壊角が零度になる条件は式(6)と式(6)から式(6)を得ることができる。

$$k_h = \tan \varepsilon = \frac{c}{\gamma y + q} \quad (6)$$

ここで k_h は水平地震震度である。すなわち、ここでいう地盤の破壊を示す限界は、付着力に関係なく、粘着力と鉛直荷重の比が水平地震震度に達したときである。

地震時土圧式については以上のように説明したが、この種のもは、設計に便利のように図表化するのがよい。それで、内田、岩崎および筆者⁹⁷⁾により、従来の計算図表を補う意味も含めて、表-9に示す範囲で、表と図を作成した。ここでは、壁面はすべて鉛直の場合のみを扱っている。

表-9 地震時土圧の計算図表

1. 砂質土	
地表面傾斜角、土の内部摩擦角および壁面摩擦角をパラメーターに、地震震度に対する地震時の主働・受働土圧係数および崩壊角を求める。	
◦地表面傾斜角 (ω)	主働土圧 0~30度 間隔5度 受働土圧 0~-30度 間隔5度
◦土の内部摩擦角 (ϕ)	20~45度 間隔5度
◦壁面摩擦角 (δ)	主働土圧 0度, 15度, $1/3\phi$, $2/3\phi$, ϕ 受働土圧 -15度, 0度, 15度, $1/3\phi$, $2/3\phi$, ϕ
◦水平地震震度 (k_h)	0~0.50
2. 粘性土	
壁面が鉛直で地表面が水平の場合について、粘着力・付着力および地震震度をパラメータに鉛直荷重に対する地震時の主働・受働土圧強度および崩壊角を求める。	
◦粘着力 (c)	10~100kN/m ² 間隔10kN/m ²
◦付着力 (c_a)	$c_a=0$, $c_a=c$, $c_a=\lambda c$
◦水平地震震度 (k_h)	0~0.7 間隔0.05

6. 横方向地盤反力定数の諸問題とその解明

6.1 横方向地盤反力定数

最近の係船岸のたわみ性控え工は、地形が穏かで地盤が均質な場所に設置されていることもあるが、大部分は複雑で、かつ、堅固とはいえない地盤に設置されているようである。そのうえ、重要な近隣施設の影響をうけて

いることもしばしばあって、設計上の取り扱いに苦慮することが多い。さらに、地震時の杭の横抵抗の設計が要請されている現在、これらに柔軟に対処できる設計法を持つ必要があると考える。

以上、述べてきたように、係船岸のたわみ性控え工の係わりのある問題点は、まず、地震時の地盤の具体的評価の問題、次に、単杭から連続壁にいたる横方向地盤

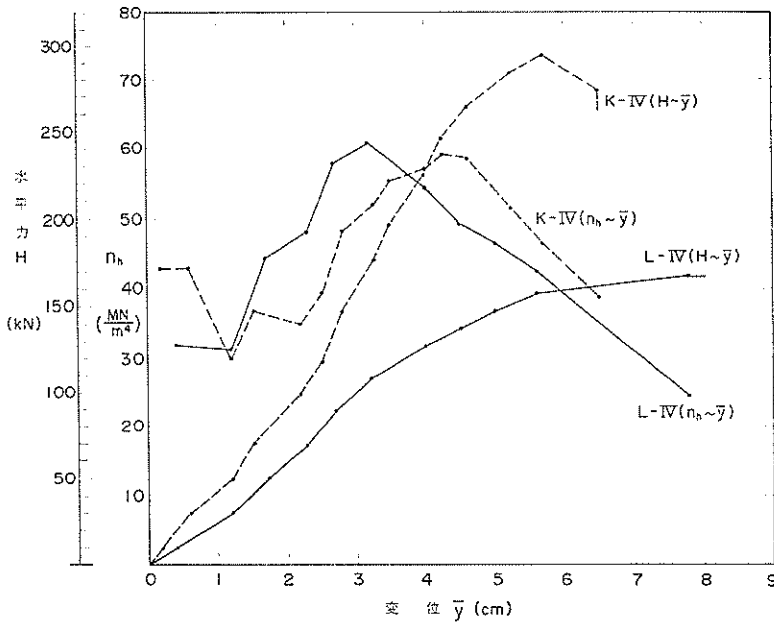


図-20 杭の挙動

反力定数の問題、さらに、横方向地盤反力定数の調査法の問題の3点にしばることができる。この問題を解決するためには解析が容易に行える数式をもつことが必要であると考えられる。ここでは、多少問題を残すにしろ、久保の非線形方式をあえて線形方式に改めることにする。その代り、その周辺事項を十分に整えることによって、全体として合理的な設計法を得ることとしている。まず第4章の各基本式はそれに適切な横方向地盤反力定数を持つ必要があるが、それには単杭の場合と連続壁の場合に分けて検討する必要がある。その中間の、いわゆる群杭効果については、研究実績が少ないので、ここでは一時的な措置を講ずるほかない。一方、これらに共通する問題としては杭幅と横方向地盤反力定数の関係がある。そして、最も重要な地盤の地震時の評価問題があるが、これについては多くの研究や調査のほか、経験による補正が繰り返して行われて、はじめて解決されるものであり、それには相当な時間を要するものと思われる。それゆえ、ここでは地震時の設計に関係の深い地震時土圧を介して横方向地盤反力定数を整理する方法を提案するが、時宜を得た適切な措置であると考えられる。

横方向地盤反力定数の実例を図-20に示す。これは既に述べたように、港湾技術研究所と新日本製鉄株式会社との共同研究の際に行った数多くのH形鋼杭の野外実験の1例で、最終破壊試験の結果である。この図は水平力と水平変位およびこの関係から求められる横方向地盤反

力定数を水平変位に対応させてプロットしたものである。この杭はともに破壊試験杭であるのですが第1回載荷ではなく、K-IV杭は約240kN、L-IV杭は約90kNまでは既に載荷されている。したがって、この区間は荷重と変位の関係が下に凸のほぼ直線とみなせるゆるい曲線となっている。これを履歴効果ということがあるが、この区間の横方向地盤反力定数は、ともに30~60MN/m²の間で、変位の大きさとともに上昇している。それ以後の第1回載荷区間は久保の非線形方式に従っていると思われる。第1回載荷区間の横方向地盤反力定数はともに一方減少の傾向にあるが、この傾向は他の多くの杭の実験においても同様であり、このパターンは第1回載荷杭の特性の1つであると考えてよい。このように横方向地盤反力定数は数値的にかなり大幅な範囲にわたって変化するが、これがまた問題を大きくする要因ともなっている。図では最低値から約2倍の範囲に広がっているが、これは履歴効果を含めてのことであるので、第1回載荷だけであれば、変位の小さい初期の値を除くとしても約3倍の広まりがあると思われる。その他の場合についても同様の傾向がみられ、なかには10倍近く分布している例もある。

横山^{15), 16)}はこれに対して、鋼杭の曲げ応力 $\sigma=980\sim 1,470\text{MN/m}^2$ ($\sigma=1,000\sim 1,500\text{kgf/cm}^2$) に対応する横方向地盤反力定数をもって定義づけたのに対し、道路杭指針¹⁷⁾では水平変位1cmの場合の水平方向地盤反力係

数を標準としている。この両者の間には何らの関連もないのであるが、数値的にはほぼ同様な結果を与えるといわれている。このように幅のある横方向地盤反力定数の取り扱い方としては、設計のために適切な方法を選ぶべきものであると考える。ここでは曲げモーメントで定義づける方が理解しやすく、かつ、便利であるので、横山と同様に取り扱いことにする。

6.2 杭幅と横方向地盤反力定数

杭の横方向地盤反力定数を杭の前後面に生ずる抵抗土圧と側面のせん断力によって表わすことができるといわれて^{22),19)}いるが、ここではかなり大胆な仮定を設けることにより問題の整理を行うことにする。

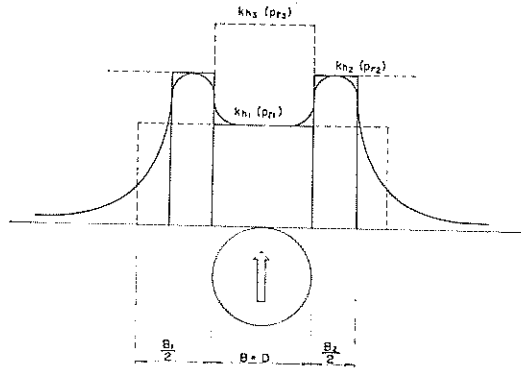


図-21 杭と地盤反力

単杭による地盤反力の地中のある深さにおける地盤反力強度分布を模式的に描いたのが図-21である。図の k_{h3} は単杭の横方向地盤反力定数である。これに対して

杭の幅員内に限られる区間ではこの前後の地盤の特性表面および杭の水平変位量によってのみ定められる地盤反力強度がある。これは、連続壁や柱列の場合でも同様な値を示すものと考えられるが、この地盤反力強度は抵抗土圧強度 p_{r1} にのみ関係するものと考えられる。それゆえ、この深さの横方向地盤反力定数 k_{h1} は式(64)のように表わすことができる。

$$k_{h1} = f(p_{r1}) \tag{64}$$

次に、杭の側面のせん断力によって表わすことができるといわれている地盤反力については、現象的には杭側面で最大の反力を示し、杭からはなれるに従い、指数法則的に減少すると思われる。ここでは簡単のため、杭の側面に付着して、あたかも杭の一部のように機能する仮想上の付加杭を考える。(以下、ここでは仮想付加杭という。) この仮想付加杭の土質力学的特性として地盤と同程度のものを考えたが、それは、テルツァギー²⁰⁾が提案する単杭と連続壁の横方向地盤反力定数の比が2.5~2.8倍であったし、一方、金谷²²⁾らの壁杭についての報告などから類推すると2~3倍となることから、 k_{h1} より $k_{h2} = g(p_{r2})$ の方が大きくなければ、仮想付加杭の幅がかなり大きくなり、現象的に想像をはるかに超えるものになると予想されたからである。ここでは、 k_{h2} を大きく表わすことができると思われる地盤と同質の土の杭を考えることにした。ここで、 k_{h3} を k_{h1} と k_{h2} によって表わすと式(65)のようにおくことができる。

$$\left. \begin{aligned} k_{h3} &= k_{h1}(p_{r1}) + k_{h2}(p_{r2}) \frac{B_2}{B} \\ &= k_{h1} \left(1 + \frac{B_2}{B} \right) \end{aligned} \right\} \tag{65}$$

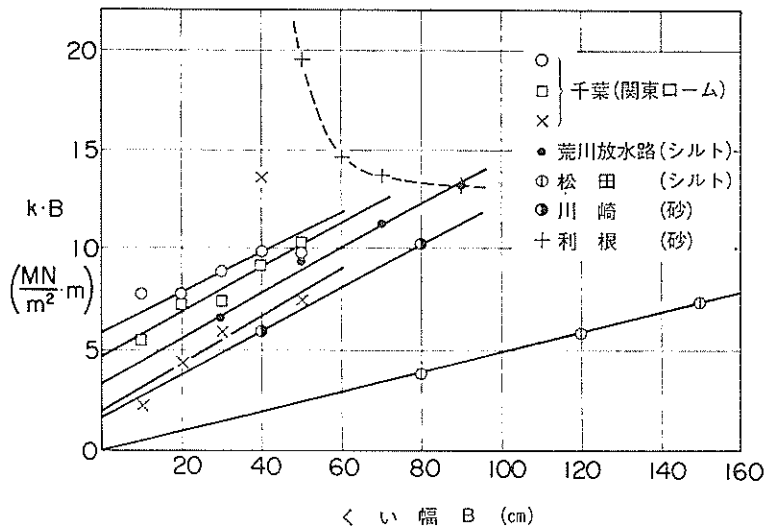


図-22 k 値と杭幅

表-10 横方向地盤反力定数と幅の関係

*: 資料からの読取り値

杭の試験場所 (地盤の種類)	k_{n3}^* MN/m ³	幅 B^* cm	② $k_{n2} \cdot B$ (MN/m ²)m	① $k_{n1} \cdot B_1$ (MN/m ²)m	k_{n1} MN/m ³	③ $B/k_{n1} = B_1$ cm	④ $B/k_{n1} = B + B_1$ cm	⑤ $B - B_1$ cm	k_{n3}/k_{n1}
千葉 (関東ローム)	○	10	7.80				80.0	70.0	8.00
		20	7.80				80.0	60.0	4.00
		30	8.82	5.88	9.80	60.0	90.0	60.0	3.00
		40	9.80				100.0	60.0	2.50
		50	9.80				100.0	50.0	2.00
	□	10	5.49				50.0	40.0	5.00
		20	7.25				66.1	46.1	3.22
		30	7.35	4.70	10.98	42.9	67.0	37.0	2.23
		40	9.41				85.7	45.7	2.14
		50	10.29				93.8	43.8	1.88
	×	10	2.40				20.4	10.4	2.04
		20	4.51				38.3	18.3	1.92
		30	5.80	1.96	11.76	16.7	50.0	20.0	1.67
		40	13.70				(116.7)	(76.7)	(2.98)
		50	7.35				62.5	12.5	1.25
荒川放水 (シルト)	●	30	6.47				58.4	28.4	1.95
		50	9.31	3.43	11.07	31.0	84.0	34.0	1.68
		70	11.32				102.2	32.5	1.46
		90	13.23				119.5	29.5	1.33
松田 (シルト)	①	80	3.92				80.0	0	1.00
		120	5.88	0	4.90	0	120.0	0	1.00
		150	7.35				150.0	0	1.00
川崎 (砂)	①	40	5.88				55.6	15.6	1.39
		80	10.19	1.67	10.58	15.8	96.3	16.3	1.21
利根 (砂)	+	50	19.60						
		60	14.70						
		70	13.72						
		90	13.23						

ここで、 k_{n3} は単杭の横方向地盤反力定数、 k_{n1} は杭の前後の地盤によって期待される抵抗土圧強度 k_{r1} によって決められる横方向地盤反力定数、 k_{n2} は仮想付加杭とその周辺の地盤によって期待される抵抗土圧強度 k_{r2} によって決められる横方向地盤反力定数、 $B=D$ は杭幅、 B_2 は仮想付加杭の杭幅、 B_1 は横方向地盤反力定数を k_{n1} としたときの換算杭幅である。

横方向地盤反力定数について、久保²⁾は杭幅 20cm 以上で一定になり、杭幅が 20cm 以下では杭幅に逆比例するといった。沢口¹⁹⁾はこれを若干訂正し、砂地盤では一定になる限界が 30cm であるが、粘性土では幅の平方根

に逆比例すると述べた。その後、沢口は高橋¹²⁾との研究で砂質地盤についても平方根に逆比例するとして取り扱っても大差ないと述べた。幅と地盤反力の関係については古くはエンゲツサー^{18), 19)}が既に指摘しているとおり、幅の増加に伴ない地盤反力は減少するものようである。港湾の技術基準では久保や沢口の意見を入れてのに対し、道路杭指針⁵⁾や国鉄の設計標準⁶⁾では杭幅の 3/4 乗に逆比例すると定めている。しかしこの問題は解決されたわけではなく、各分野で一応の取り扱いの標準を定めているにすぎない。これに関して、筆者は鋼管杭に関する設計資料⁸⁹⁾を用いて、式(6)によって検討した。

用いた資料は付録A.2に示すが、解析の結果を図-22と表-10に示す。これらの資料は野外実験の結果であるが横方向地盤反力定数はすべて杭頭変位1cmのときの値である。大部分の地盤は、関東ロームとシルトであるが、砂地盤も2例含まれている。設計資料からの読み取りに若干の誤差が入ることは止むを得ないとして、その他の作業は容易に行えたので、資料の再現性に特に問題はないと考える。図-22からわかるように、式(6)では整理することができないものが若干あるが、ここではこれらを除いて整理することにした。結果を要約すると次のようになる。①大筋において式(6)に従って整理することができる。②仮想付加杭の杭幅は関東ロームおよびシルト系地盤で平均41cm、砂質土盤で平均16cmとなった。③横方向地盤反力定数の k_{h3}/k_{h1} は1.0~8.0であるが杭径10cmを除くと、その上限は4.0となる。④ k_{h3}/k_{h1} は杭径の増大に伴って減少し、杭径50cm以上では2.0以下となる。

このような結果から、関東ローム・シルト地盤の仮想付加杭の杭幅、約40cmについては、これをシルト・粘土系の粘性土盤にそのまま適用できると考える。これに対して、砂質土盤の場合は、資料の数が少ないので、数値的に精度が低くなるが、解析で得られた結果を参考にして、ここでは仮想付加杭の幅を20cm

と仮定し、以後の解析に用いることにする。

6.3 単杭の横方向地盤反力定数

杭の横抵抗では単杭が最も基本的であり、すべての問題の原点であるとともに、他のあらゆる課題に対して何らかの係わりをもっていると考えられる。ここでは杭の耐震設計は地盤の抵抗土圧にすべてを集約し、これに対する横方向地盤反力定数をそのまま常時および地震時の地盤反力に反映させようという方策が立てられている。

なお、横方向地盤反力定数を求めるための資料として、港湾技術研究所と現在の新日本製鉄株式会社とが共同で行ったH形鋼杭の資料¹³⁾および港湾局調査設計室¹⁵⁾が集録し解析したものを用いることにする。これらは、ともに実物大の杭による野外実験で、研究資料として規模および数量とも適切であるほか、実験データの詳細な記述や周辺地盤と地下水位などの資料が十分に整っており、信頼できる資料であると考えられる。

これらの実験は、いずれも杭頭自由の地上突出杭であるので、比較的画一的な方法で解析を行うことができた。まず、地盤の土質諸定数から抵抗土圧分布を求める。これによって、一定型の地盤か増加型の地盤かの判断も行う。一方、ここでは、横方向地盤反力定数は杭の曲げ応力（例えば鋼杭ならば $\sigma=980\sim1,470\text{kN/m}^2$ ）に対応する値を採ることにしたので、一定型地盤であれば式(6)

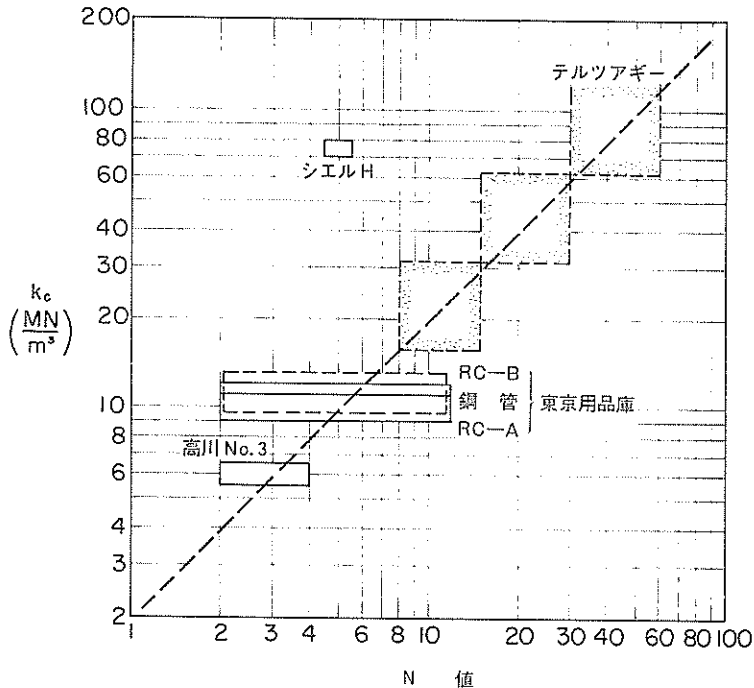


図-23 k_c と N 値

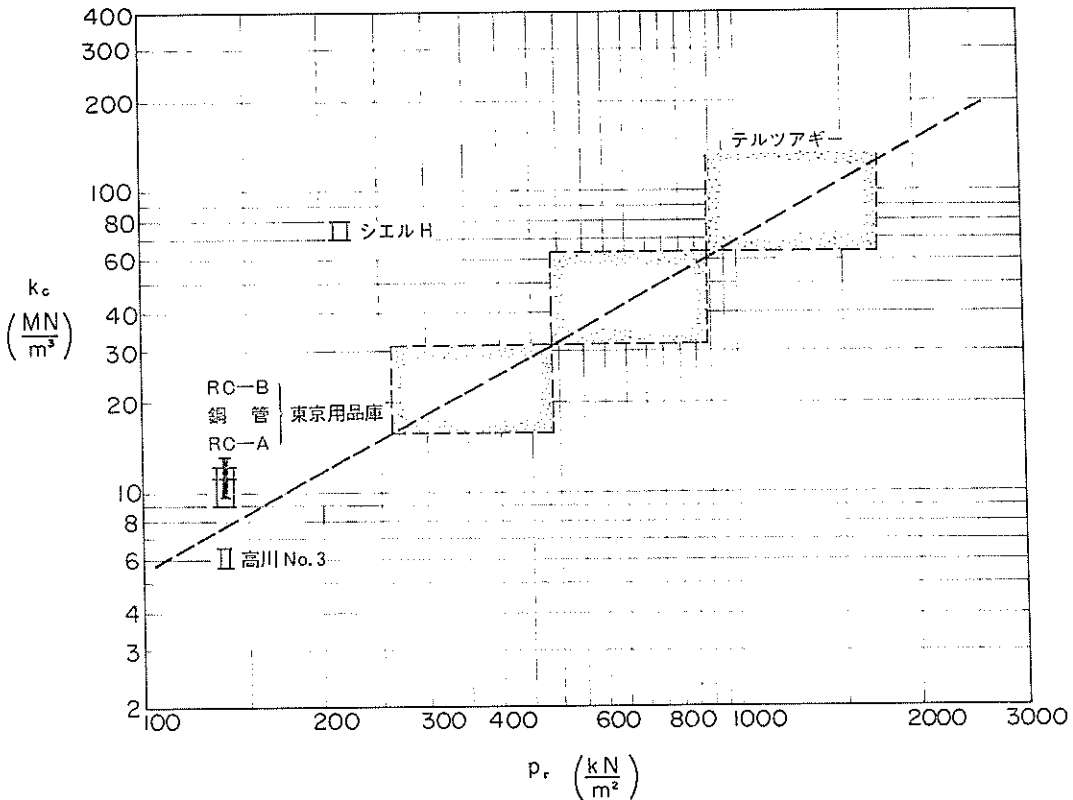


図-24 k_c と p_r (単杭)

94. 増加型地盤であれば式(7), (8)などによって, 予め水平変位と曲げモーメントの関係を求めておき, 野外実験の水平外力と変位の関係から, 所定の曲げ応力に対応する横方向地盤反力定数を求めた。これらは, 最終的には抵抗土圧の関連で整理し, 地震時の抵抗土圧を通じて, 地震時の横方向地盤反力として設計の基本資料にするように考えている。しかし, 現在までのところ, 横方向地盤反力定数を標準貫入試験値 (N 値) の関連によって表わされているものが多くあるので, これらと対比する意味で結果をまとめてみることにした。

まず, 粘性土地盤などに適用される一定型地盤の横方向地盤反力定数 (k_c) と標準貫入試験値 (N 値) の関係をまとめたのが 図-23 である。一定型の分類に入る例が 5 ケースしかなかったため確度の低い資料になった。これに, 粘性土地盤についてのテルツアギーの提案⁹⁰⁾を重ね合わせると, 両者は比較的よく一線に並んでいるのがわかる。この破線は重力単位で $k_c = 2.0N$ の線であり, 付録 A.1 の図にも示されているが, これを SI 単位で表わしたものである。したがって, これらは, シェルの H 形

鋼杭を除き, ほぼ式(8)の関係にあるといえる。また, 図中の高川 No.3 の場合, 抵抗土圧分布としては, 一定型地盤か増加型地盤か判断に迷う地盤であったので, ここでは, 両方の地盤でとり扱うことにした。

$$k_c = 1.95N \quad (60)$$

次に, これらを抵抗土圧強度 (p_r) によって示すと, 図-24 のようになる。野外実験の資料の一軸圧縮強度 (q_u) や標準貫入試験値から抵抗土圧を求める手順を示す。ここでは N 値が 10 までは福岡の粘土およびシルト質粘土の関係をを用い 10 以上は福岡の関係を, 連続な関係を示すベック (Peck) を適用して⁹²⁾, 一軸圧縮強度 (q_u) を求める。これを $c = 1/2 \cdot q_u$ による粘着力をもって, 他の土質諸定数とともに, 抵抗土圧を得るわけであるが, ここでは, 新たに導いた壁面付着力を考慮した地震時土圧式を用いることにした。ここで考える抵抗土圧の対象区間は, 杭の有効長の区間であるが, なかでも特に, 特性長の区間が重要であることは容易に理解することができる。また, 図の中の破線は, 図-23 のそれに対応するものであるが, 式(7)によって表わすことができる。

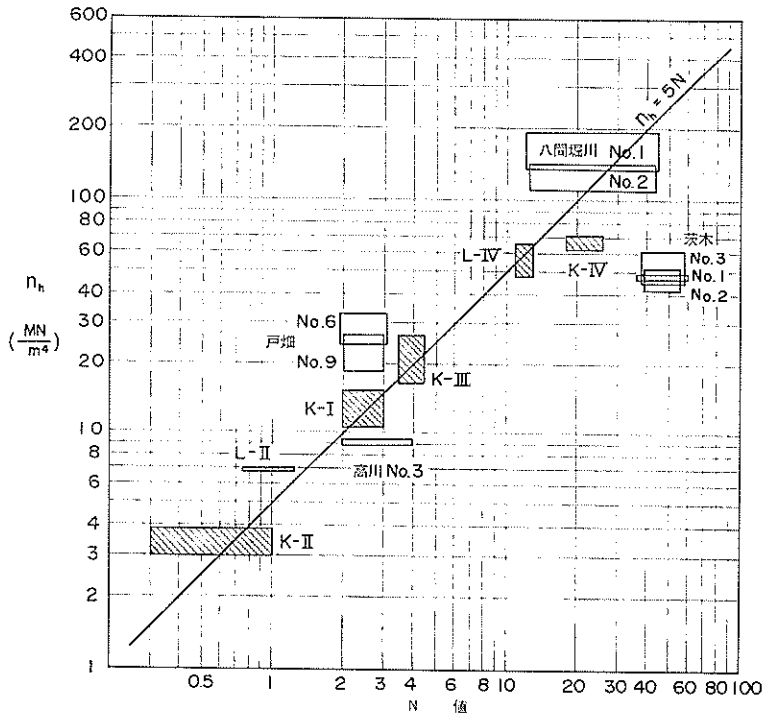


図-25 n_h と N 値

$$k_c = 5.3 \left(\frac{\bar{p}_r}{100} \right)^{1.121} = 0.03039 \bar{p}_r^{1.121} \quad (57)$$

次に、砂質地盤などに適用される増加型地盤の横方向地盤反力定数 (n_h) についてであるが、前例にしたがって、まず、標準貫入試験値に対する結果を図-25に示す。図の斜線を施したものは、前述の共同研究の野外実験によるものであるが、これに注目しながら直線を引くと、式(58)のように、横方向地盤反力定数と標準貫入値とは比

$$n_h = 5.0N \quad (58)$$

例関係になる。この図では茨木の3ケースが一群からはなれているほか、全体的にまとまりのある関係となっている。

つづいて、横方向地盤反力定数を抵抗土圧強度の深さ方向の強さ \bar{p}_r との関係で示したのが図-26である。この図では、前の図-25 ではなれてプロットされていた茨木の3ケースと戸畑の2ケースが、一群の中に加わったが、八間堀川の2ケースがはなれてプロットされている。この一群の関係を式(59)に示す。

$$n_h = 14.5 \left(\frac{\bar{p}_r}{100} \right)^{1.70} = 0.005773 \bar{p}_r^{1.70} \quad (59)$$

最後に、台形型地盤の横方向地盤反力定数については、これまで述べたような、一定型地盤や増加型地盤

が、おのおの独自に有する k_c や n_h のような横方向地盤反力定数は考えていない。それは、元来、台形型はこれらの組み合わせから成り立っているので、横方向地盤反力係数もこれらの組み合わせであると考ええる。台形型の場合、砂質土系地盤が一般的であるが、この場合、台形型の場合、砂質土系地盤が一般的であることから、抵抗土圧強度の強さ \bar{p}_r に対する n_h 値を求めることから始めなければならない。あとは、抵抗土圧の台形と横方向地盤反力定数の台形を単純にスライドさせることによって、台形型の横方向地盤反力定数を得ることができる。これに対して粘性土系の地盤の場合、抵抗土圧は常時では一定型地盤となるので特に問題にはならない。ただ、地震時において、水平地震震度が(粘着力)/(鉛直荷重)に近くなると、主働土圧強度のこう配の値が受働土圧強度のこう配より大きくなり、抵抗土圧強度が逆こう配の分布を示すようになる。この逆こう配が小さい間は、 k_c 値を若干補正することにより対処することができるが、これが大きくなると無視することができなくなり、 $(-ax+b)$ のような方式で台形型の杭の横抵抗を計算することになると考える。

6.4 連続壁の横方向地盤反力定数

矢板式係船岸の根入部やたわみ性控工の連続壁は単杭のように側面のせん断力による抵抗力の増加分を期待

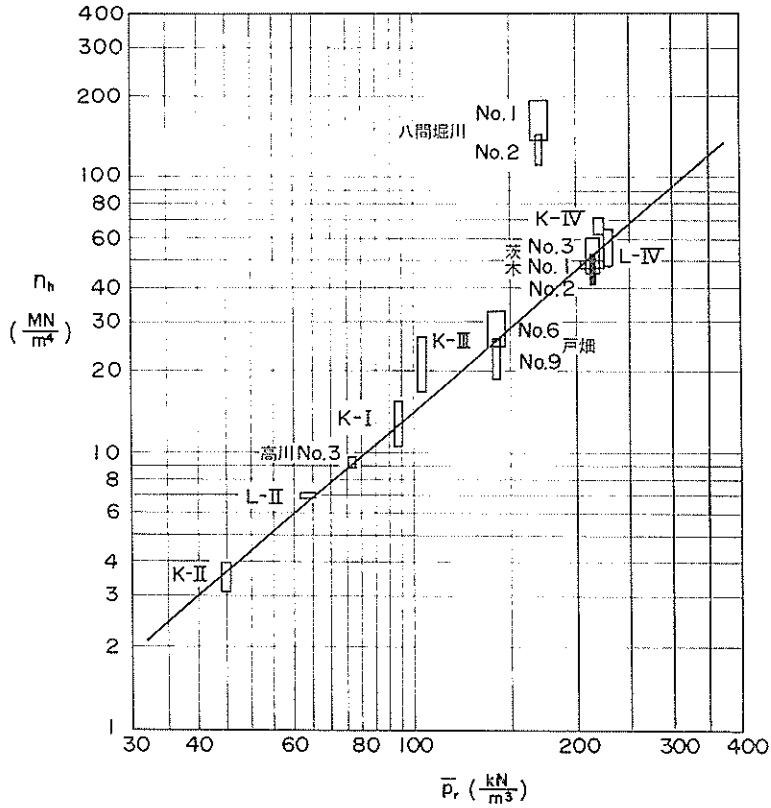


図-26 n_h と \bar{p}_r (単杭)

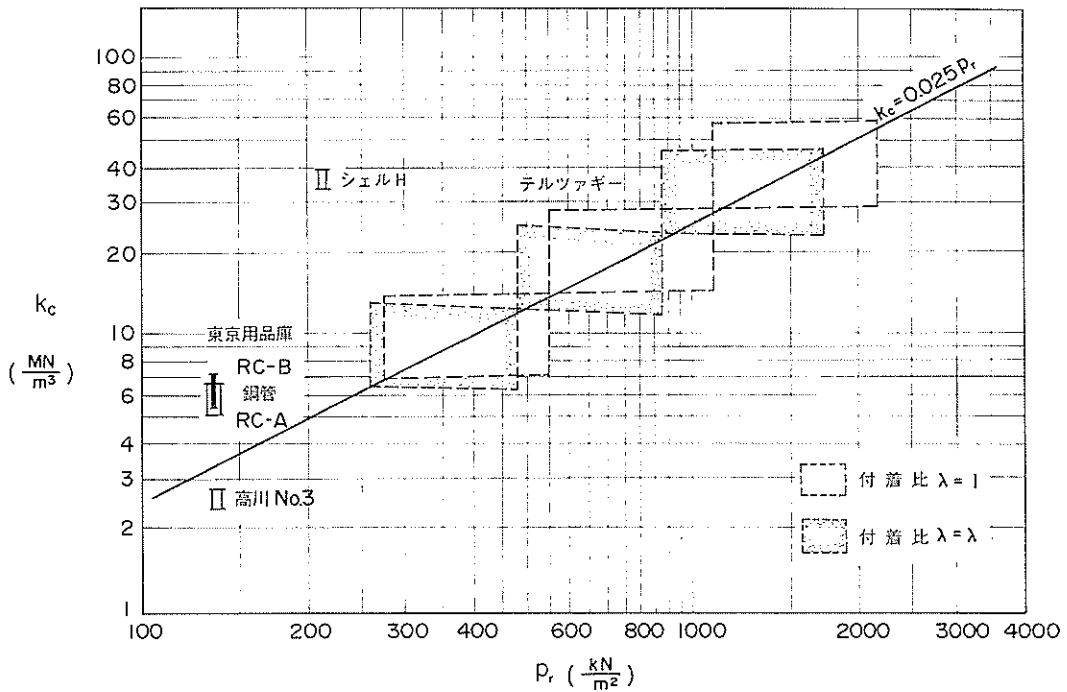


図-27 k_c と p_r (連続壁)

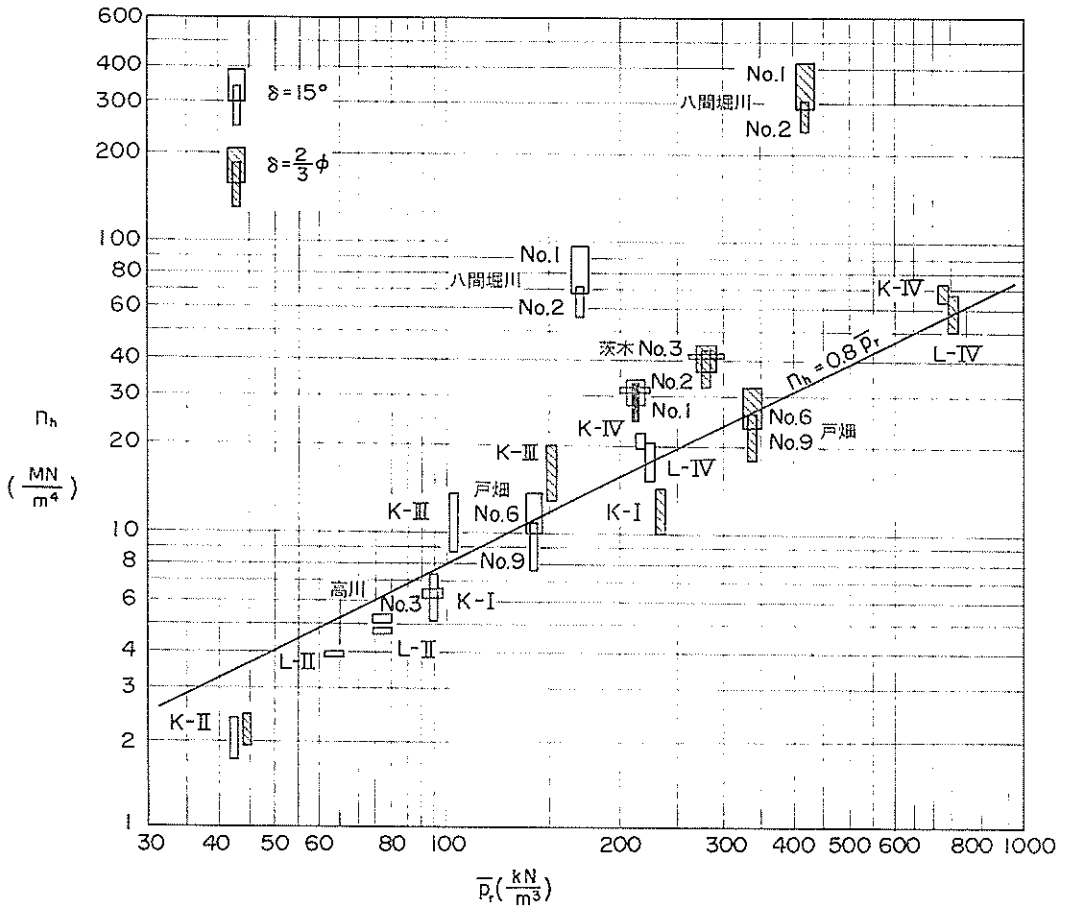


図-28 n_h と p_r (連続壁)

することはできない。ここでは、前述の考え方に基づいて、式(6)と仮想付加杭の幅が粘性土地盤で40cm、砂質土地盤で20cmの結果を用いて、図-24および図-26からおのおのの連続壁の抵抗土圧に対する横方向地盤反力定数を求めたが、これらの結果をそれぞれ図-27, 28に示した。

まず、一定型地盤について、ここでは、対象となる地盤がすべて粘性土であるので、野外実験の杭の壁面付着力は、港湾の技術基準に記載されているトムリンソンの壁面付着力を準用することにした。これに対し、仮想付加杭の壁面付着力は粘着力に等しいものと考えた。またテルツァギーの提案値については、幅30cmの杭についての値であると仮定して取り扱うことにした。図-27のテルツァギーの提案値が2通りあるのは、1つは実際の杭の前後の地盤に対する横方向地盤反力定数であり、他の1つは仮想付加杭の周辺地盤に対する横方向地盤反力定数である。また、これらに若干ひずみがあるのは、抵

抗土圧強度と付着比とが比例関係になく、これが抵抗土圧による配分比に影響が及んだものと考えられる。これに対し、野外実験の方は分配されずに描かれているように見えるが、双方の結果がほとんど同一で、この図では表現しきれなかったためである。これらは式(6)のように、ほぼ一線上に並ぶとともに、両者は比例関係となる。

$$k_c = 0.025 p_r \quad (7)$$

次に、増加型地盤については、前節では壁面摩擦角を15度としたが、ここでは、杭の壁面摩擦角は前同様15度とし、仮想付加杭については、壁面摩擦角に内部摩擦角を用いるのは過大にすぎると考え、内部摩擦角の2/3を採用することにした。得られた結果は図-28に示す通りであるが、八間堀川の例を除き全体的にかなりまとまっている。これらの中央に直線を引くと式(7)を得るが、横方向地盤反力定数は抵抗土圧強度の強さと比例関係にある。

$$n_h = 0.80\bar{p}_r \quad (7)$$

ここで、単杭から連続壁にいたる中間の場合の横方向地盤反力定数で群杭効果に影響されるものがあるが、その両極の単杭と連続壁について比較すると、上述の解析結果から一定型の場合、 $p_r=2,000\text{kN/m}^2$ 付近で単杭の場合の約1/3.0、 $p_r=100\text{kN/m}^2$ 付近で約1/2.5となっており、テルツァギ²⁰⁾の提案や金谷⁵³⁾の結果とほぼ一致している。一方の増加型地盤の場合は $\bar{p}_r=400\text{kN/m}^2$ 付近で単杭の場合の約1/5、 $\bar{p}_r=40\text{kN/m}^2$ 付近ではほぼ同一となっている。特に、後者の付近にプロットされているK-II杭は、単位体積重量 $\gamma=13.5\text{kN/m}^3$ 、内部摩擦角 $\phi=25^\circ$ の研究用の超軟弱人工砂質地盤であり、現実には存在しない地盤であるので、実際には対象外のデータとして扱うものとする。実際に設計の対象となるのは、L-II杭が最下限と考えられるので、連続壁と単杭の定数の比の最少値は1/1.5程度になるものと考えられる。このように、連続壁と単杭の場合の横方向地盤反力定数は一定型地盤・増加型地盤のいずれの場合においても実用の範囲でごく常識的な数値を示すことがわかった。

この中間の部分の群杭効果については資料不足で、ここでは、これ以上の検討はできない。当面この扱いは玉置¹⁷⁾らの研究結果とか道路杭指針⁵⁾などを参考に適宜処置することになるものと思われる。また、ここでの仮想付加杭と群杭効果の関連については、特別に配慮する必要はなく、群杭効果による横方向地盤反力定数の減少率に比例させるなどの処置で十分であると考えられる。

7. 新しいたわみ性控え工の設計法の適用

係船岸におけるたわみ性控え工の設計法についての基本的検討は前章で一応完了したが、ここでは、新しい設計法について実用上、残された諸点について検討する。

(1)現在まで行われてきた、杭の横抵抗の設計法には久保の港湾方式とチャンの方法および極限設計法の3通りがあげられるが、ここでは、港湾および土木構造物の設計に広く用いられているチャンの方法と比較することとした。既に述べたように、ここで新しく提案する設計法のうち、一定型地盤の方法は基本的にはチャンの方法と同一であるので、ここではふれる必要がない。それゆえ、増加型地盤の場合との比較になるが、その例として計算結果のみを表-11に示す。表のなかの値は、いずれも、杭頭部の水平外力と杭頭変位量が与えられた条件として、曲げ応力 $\sigma=980\sim 1,470\text{MN/m}^2$ に対する横方向地盤反力定数を求めたものである。単杭欄の k_c 値はチャンの方法による k_h 値と同じ値を示すものであるが、これと比較するためその下に n_h 値を併記した。例題の地盤条件であるが、八間堀川は良好な支持地盤で抵抗土圧分布からは増加型地盤と判断されるのに対し、高川の方は、やや軟弱な中程度の地盤であるが、抵抗土圧分布からは一定型地盤か増加型地盤か判断に迷うほどの地盤であり、ともに比較するには最適の地盤であると考えられる。表-11は、いずれも数値的には n_h が k_c より大きく、大体1.3~2.8倍の値を示している。これに対し、連続壁の

表-11 横方向地盤反力定数の比較表

杭 No.		八間堀川 No.1		八間堀川 No.2		高川 No.3		
種類	mm	ϕ -485, t-16 鋼管		ϕ -485, t-9 鋼管		H-300 H形鋼		
剛度 EI	MN-m ²	134.1		78.6		44.1		
応力 σ	MN/m ²	980~1470		980~1470		980~1470		
水平力 H	kN	68.6	98.0	45.0	68.6	127.4	186.2	
変位 \bar{y}	cm	3.4	5.3	2.3	3.4	3.0	5.0	
単杭	k_c	MN/m ³	84.5	48.0	102.3	84.0	6.5	5.5
	n_h	MN/m ⁴	194	134	141	110	9.4	8.9
連続壁	k_c	MN/m ³	—	—	—	—	2.8	2.4
	n_h	MN/m ⁴	96.0	66.4	69.8	54.4	5.2	4.9
地盤条件		N=12~45 ($\phi=42^\circ$) 互層であるが上層部は砂層		同左		N=2~4 ($\phi=30^\circ$) $q_u=49\text{kN/m}^2$ 互層		

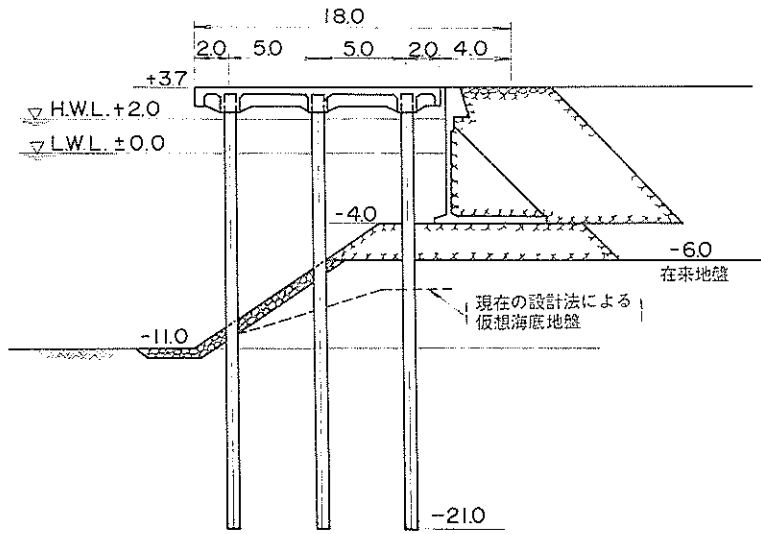
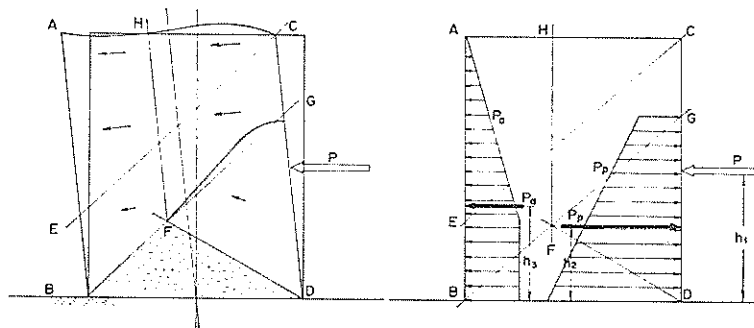


図-29 直杭式横さん橋



(a) 変形と崩壊面

(b) 土圧強度

図-30 二重矢板の設計基本図

場合は、杭の側面せん断力の効果がゼロになるので、いずれの場合も、連続壁の方が、単杭の方の1/2程度になっている。このように事例としては極端な場合をあげたにもかかわらず、数値的に特異なものはなく、極く自然なものを与える結果となった。

(2) 港湾では単杭構造物の代表例として直杭式さん橋があげられる。図-29は直杭式横さん橋の典型的な1例であるが、大口径鋼管杭が大量生産されるようになった1959年頃¹⁾から、経済的な係船岸の一つとして全国的に建設されるようになった。図のように横さん橋の場合は、陸側から海側にかけて常に偏荷重をうけている傾斜地盤に、直杭さん橋が設けられるわけである。これについて、港湾の技術基準²⁾は斜面での直杭計算に対する配慮から、杭の軸線上の位置で、前面水深と実斜面との1/2の高さに仮想地表面を設け、これによって杭の横抵抗の計算を行うこととしている。このことについて、筆者

³⁾は1963年に、杭の変位による地盤反力と斜面の海底地盤の抵抗土圧の検討を行い、抵抗土圧が不足ならばこれが平衡するところまで仮想地表面を下げ、その上の土砂は上載荷重として計算するという方法を提案している。また、1966年には久保³⁾らは斜面における鉛直単杭の横抵抗という実験的研究の報告があるが、斜面によって生ずる横方向地盤反力定数の低下に着目し、仮想海底面の設定法を提案している。このような状況にありながら港湾の技術基準は現在もなお、斜面二分法による設計法を採用し続けている。これは地震時における横さん橋の偏荷重による被害がないことを根拠としているように思われる。しかし、偏荷重による事故の例は、少なくないのであって、これらに対する何らかの設計法の改善がなされるべきであると考えられる。これに関しては、既に述べてきた新しい杭の設計法はそのまま適用できるのであって、特に、斜面における地震時の横方向地盤反力定数と

抵抗土圧に対しては新しい杭の横抵抗の設計法と壁面の付着力を考慮した新しい地震時土圧式が有効に活用できるものとする。

(3)最後に、二重矢板式係船岸と杭の横抵抗の関連についてのべる。沢口⁴¹⁾は二重矢板構造物について理論的解析と実験を行っているが、実用的設計法にまで至っていない。現在この種の設計法は矢板式⁴²⁾またはセル式の設計法⁴³⁾に従って検討がなされる。筆者⁴⁴⁾は、既に、1960年に地震時の二重矢板安定問題に対して、地震時土圧を用いて設計検討する方法を提案している。これは図-30(a)にあるように、外力 P によって、隔壁 \overline{AB} と \overline{CD} が外力の作用方向に傾斜するとき、主働崩壊面は \overline{BG} 、受働崩壊面は \overline{DF} に生ずる。この状態で考えられる主働土圧は図-30(b)にあるように $\square ABGC$ の土けいによって生ずることとなり、主働土圧強度は壁面 \overline{CG} の影響により台形になる。これに対して受働側は $\square HFGC$ を上載荷重とし $\triangle GFD$ を土けいとする受働土圧 P_p を得るが、受働土圧強度分布はほぼ台形になるものと思われる。この受働土圧強度の土柱と載荷重の関係は図-31のようであり、土砂の載荷重を式(2)のように補正する必要がある。

$$x = \frac{\sin \alpha \cos \beta}{\sin(\alpha + \beta)} \quad (2)$$

ここに、 x は土柱幅 l に対する上載荷重としての土柱の幅、 α は受働崩壊角、 β は主働崩壊面によって作られる受働側の仮想地表面である。

この基本的な考え方を係船岸に適用すると、図-32の

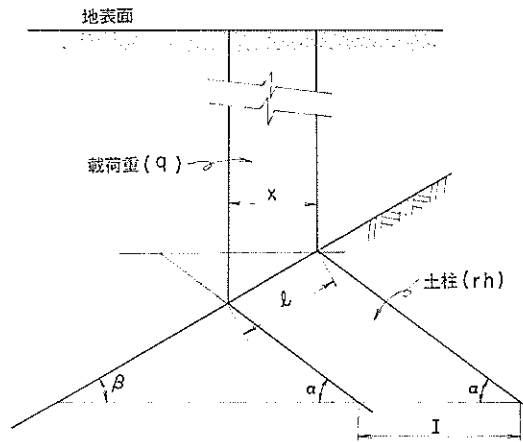


図-31 斜面をもつ土柱と載荷重

ようになる。簡単のため一様地盤とするが、港湾構造物は水位の影響を直接うけるのでこれを加えて計算すると、図-32(a)にあるような崩壊面図を得る。主働側は水位と背後の壁面の影響をうけて、直線と破線の崩壊面があるわけであるが、水深8~11mの間は2通りの崩壊面を持つことになる。これに対して受働側は1点破線の単純な崩壊面となる。これによって土圧分布を求めたのが図-32(b)である。ここで、 p_w は残留水圧である。 $p \sin \delta$ は主働土圧の場合は壁面に沿って下方に押し込む力となるが、これに対して受働側では押し上げる力となる。この隔壁構造の傾斜に対する安定計算は図にある8通りの土圧と水圧によって検討するわけであるが、この場合水深16mに対するものであるので、このほか海底面の位置

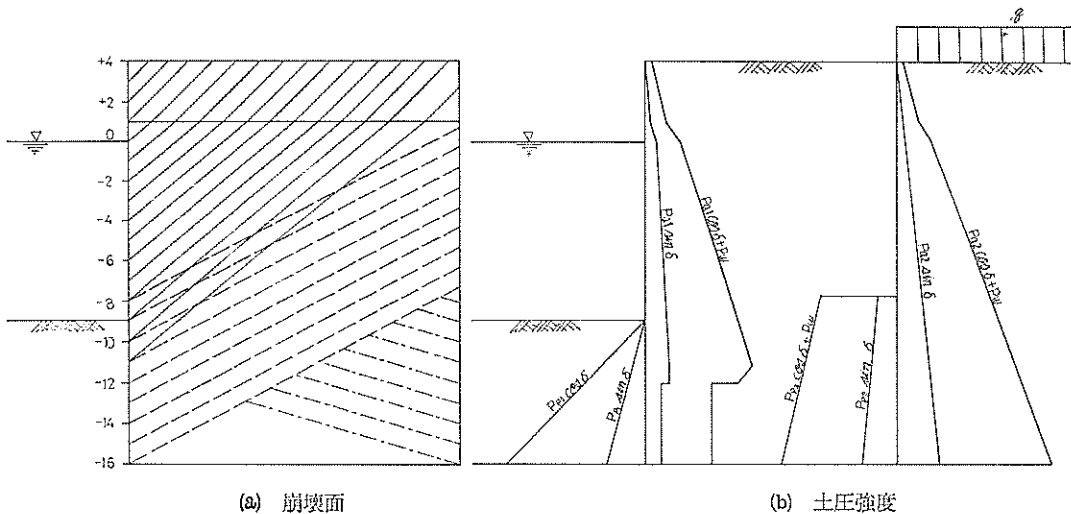


図-32 二重矢板の崩壊面と土圧強度

での検討は欠かせないものであり、その付近の2・3の深さでの検討を行う必要がある。

以上が、二重矢板構造物の地震時土圧による設計法であるが、これに対し、たわみ性連続控え壁の設計法を適用することもできると考えられる。

8. 結 論

最近の大型地震で矢板式係船岸のたわみ性控え工の被災が著しく目立った。これは結局は設計法に起因するものであることがわかったので、現行の設計法を改良するため、港湾以外の分野も含めて、杭の横抵抗の設計法についての現状と問題を握するとともに、実地に設計を行う側から新たな設計の改良点の諸項目を見出した。一方、杭の横抵抗の研究について、今日にいたるまでの内外の事情をは握し、特に、係船岸の設計に係わりのあると思われるものを抽出し、研究分野から設計法改良への諸項目を見出し対応策を講ずることにした⁹³⁾。

その結果、矢板式係船岸のたわみ性控え工の設計を改良するには、たわみ性控え工の設置位置から地中埋設杭を対象としなければならないことと、あらゆる種類の地盤について、地震時の設計が出来ることが必須条件であることがわかった。これに対し、久保の港研方式で対処するには非常に困難であることが明らかになり、別途対策を立て直す必要が生じた。それでまず新たな杭の横抵抗の基本式を整えることが必要となった。そして、この新たな横抵抗の基本式には適当な横方向地盤反力定数を設けなければならない。一方、従来横方向地盤反力定数の推定に標準貫入試験値 N 値を用いてきたが、 N 値自体その適用に限界があることのほか、地震時の横方向地盤反力定数を推定するには、問題があるのに対し、地震時の抵抗土圧を用いる方が適当であることがわかった。そのほか、特に、港湾では単杭のほか連続壁の設計も行わなければならないが、そのため、連続壁の横方向地盤反力定数を必要とすることなど、新設計法の改良の課題が明確になった。そこで、これらを解決し、新たに地震時のたわみ性控え工の設計法をとりまとめるための検討を行った。その主な内容は次の3点である。

- (1) 解析が容易で実用的な新しい杭の横抵抗の基本式を導くとともに、その特徴について解説した。
- (2) 新しい杭の横抵抗式に基づく単杭と連続壁の横方向地盤反力定数を抵抗土圧に関連づけるとともに、具体的な数値について提案した。
- (3) 地震時抵抗土圧を必要とするため、粘性土の粘着力および壁面付着力をも含む地震時土圧の一般式を導くとともに、その特徴について解説した。

以下、係船岸のたわみ性控え工の設計法についての研究の結果について、その概要を以下に記す。

- (1) 新しい杭の横抵抗の基本式を導いた。

横方向地盤反力定数の鉛直分布形によって、地盤を一定型地盤、増加型地盤および台形地盤に分類し、おのおのに適した新しい杭の横抵抗の基本式を導いた。

- 1) 一定型地盤 $y''''+by=0$ を解いた。
- 2) 増加型地盤 $y''''+axy=0$ を解いた。
- 3) 台形型地盤 $y''''+(ax+b)y=0$ を解いた。

なお、設計に便利なよう、計算表を作成した。

- (2) 杭幅と横方向地盤反力定数の関係について、仮想付加杭の仮説を立て、およその関係を見出した。

- (3) 新しい杭の横抵抗の式に対応する横方向地盤反力定数の図表を作成した。

- 1) 一定型地盤単杭用 $k_c \sim \bar{p}_r$, $k_c \sim N$ 値
- 2) 増加型地盤単杭用 $n_n \sim \bar{p}_r$, $n_n \sim N$ 値
- 3) 一定型地盤連続壁用 $k_c \sim \bar{p}_r$
- 4) 増加型地盤連続壁用 $n_n \sim \bar{p}_r$

なお、台形型地盤については上記の抵抗土圧に対する横方向地盤反力定数図表を利用する。

- (4) 新しい地震時土圧式を導いた。

岡部は粘着力を含む地震時主働土圧式を導いたがこれを補うため、新たに地震時土圧式を導くとともに、岡部の土圧合力方式よりも筆者の土圧強度方式の土圧算定がより合理的であることを確認した。また、壁面付着力を考慮した地震時土圧式を導いた。

- 1) 岡部の地震時主働土圧式を再誘導した。
- 2) 地震時受働土圧式を導いた。
- 3) 壁面付着力を考慮した地震時主働土圧式を導いた。
- 4) 壁面付着力を考慮した地震時受働土圧式を導いた。

なお、これらの地震時土圧の計算図表は別途港湾技研資料に公刊した。

- (5) 横さん橋式係船岸のように偏荷重をうけている斜面上のさん橋の直杭の設計は、たわみ性控え工の設計法をそのまま適用することによって、合理的設計ができることがわかった。

- (6) 二重矢板式係船岸の設計に際して、地震時土圧式を用いることによって設計できるが、たわみ性控え工の設計法を利用することもできると思われる。

9. あとがき

係船岸のたわみ性控え工の設計は、本報告をもって、

直ちに実地に設計できるようになった。しかし、問題が全くないわけではない。特に、群杭効果などは資料不足で、単に、意見を述べたに過ぎない程度で終わってしまった。これらは、今後の解決すべき重要な課題の1つであると考えている。以下、今後の研究課題および問題点などについて述べることにする。

- (1) 群杭効果については横列の砂質地盤と粘性土地盤について早急に解決すべき課題である。
- (2) 杭幅と k 値の問題について、多くの研究者が研究しているがあまりに意見が多すぎるので整理する必要がある。
- (3) 横方向地盤反力定数についての十分な資料が数多くあると思われるが、これらを整理し、一層充実した設計資料としたい。特に、一定地盤 k 値について、早急に追加する必要がある。
- (4) 台形型の杭の横抵抗については、これを電算化することによって計算を容易に行うことができるが、さらに、この計算の簡易化を図る必要がある。
- (5) 台形型の杭の横抵抗の野外試験を行い、新しい杭の横抵抗式の精度の検証を行いたい。
- (6) 地震時の横方向地盤反力定数についての研究が必要である。その成果を早急に期待したいが、十分なものを得るには相当な時間を必要とするであろう。
- (7) 土圧についての問題点としては、砂の受働土圧と粘性土の土圧などが残されているが、研究および野外実験などを促進して早期に解決するよう希望する。
- (8) 震度法は最近の傾向として、他の耐震設計法の出現により若干軽視の傾向にあるが、やはり、重要な設計手法の1つであるので、特に、地盤中の震度の与え方など研究すべき課題であると考えている。
- (9) 港湾の分野での専門課題と思われるが、矢板式係船岸の根入部の耐震性についての調査研究は重要である。これは地震時の矢板根入長の合理的設計法に直接的に関係するほか、地震時の地盤の支持力解明についての有力な手がかりとなる可能性は十分にあると考える。

本報告を行うにあたって、奥村土質部長および筑波大学沢口教授には多くのご意見を頂いた。また、設計基準部の奥山システム研究室長、柳生設計基準研究室長、内田自動設計研究室長および土質部高橋主任研究官には数次にわたる討議と多くの指摘を頂いた。そして、システム研究室吉田秀行君には設計資料の作成に当って多くの協力を得た。各氏に対し、ここに厚くお礼申し上げる次

第である。

(1980年6月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 松並仁茂：埋立護岸の形式にみる土木材料の変遷，土木学会誌，1978年10月
- 2) 久保浩一：杭の横抵抗の新しい計算法，港湾技術研究所報告，第2巻第3号，1962年3月
- 3) 山下生比古・稲富隆昌・小蔵紘一郎・奥山育英：教値解による杭の基準曲線の作成，港湾技術研究所報告，第10巻第1号，1971年3月
- 4) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1979年3月
- 5) 日本道路協会：道路橋下部構造設計指針・同解説—くいの基礎の設計篇一，1976年8月
- 6) 日本国有鉄道：建造物設計標準解説，基礎構造物及び杭土工構造物，1974年6月
- 7) 日本建築学会：建築基礎構造設計基準・同解説，1974年11月
- 8) 運輸省港湾局，第一港湾建設局，港湾技術研究所：新潟地震港湾被害報告（第1部），1964年9月（第2部）1965年3月
- 9) 土田 肇：砂地盤の流動化の予測と対策，昭和45年港湾技術研究所講演会講演概要，1970年12月
- 10) 運輸省港湾局，港湾技術研究所，第二港湾建設局，北海道開発局港湾部：1968年十勝沖地震被害報告，津波報告，1968年12月
- 11) 片山猛雄・中野拓治・進見隆・山口孝市：1968年十勝沖地震などの被災例による現行設計法の検討，港湾技研資料，No. 93，1969年12月
- 12) 土田肇・稲富隆昌・野田節男・柳生忠彦・田端竹千穂・徳永省三・大槻有吾・平野忠告：1978年宮城県沖地震港湾被害報告，港湾技研資料，No. 325，1979年9月
- 13) 北島昭一・上部達生：矢板岸壁地震時被災の分析，港湾技術研究所報告，第18巻，第1号，1979年3月
- 14) 野田節男・上部達生・千葉忠樹：重力式岸壁の震度と地盤加速度，港湾技術研究所報告，第14巻第4号1974年1月
- 15) 運輸省港湾局調査設計室：さん橋ドルフィン設計法，1962年3月
- 16) 宮本六男・沢口正俊：群ダイの横抵抗に対するタイ間隔の影響（第1報）—縦間隔について—，港湾技術研究所報告，第10巻第4号，1971年12月
- 17) 玉置脩・三橋晃司・今非常雄：水平抵抗における群杭効果の研究，土木学会論文報告集192号，1971年
- 18) 久保浩一・三枝富士男：垂直ひかえ杭の横抵抗，港湾技術研究所報告，第2巻第2号，1965年2月
- 19) 沢口正俊：くいの横抵抗における地盤定数に関する研究，港湾技術研究所報告，第7巻第2号，1968年6月
- 20) Terzaghi, K.: Evaluation of Coefficient of Subgrade Reaction, Géotechnique, Vol. 5, No. 4 Dec. 1955
- 21) 北島頭正・片山健次郎共訳：S. Timoshenko 材料力学下巻，コロナ社，1951年

- 22) 松尾春雄：林桂一先生の思い出，土木学会誌，第42巻第8号，1957年8月
- 23) 成岡昌夫：林桂一先生，土木学会誌，第42巻第12号1957年
- 24) Feagin, L.B.: Lateral Pile-Loading Tests, proc. ASCE, Nov. 1935
- 25) Cummings, A.E.: Discussion on the Paper "Lateral Pile-Loading Tests" by L.B. Feagin, Trans. ASCE, Paper No. 1959, Vol. 102, 1937
- 26) Chang, Y.L.: Discussion on the Paper "Lateral Pile-Loading Tests" by L.B. Feagin, Trans. ASCE, Paper No. 1959, Vol. 102, 1937
- 27) 南和夫：横力を受ける杭のたわみについて，基礎研究，7輯，1941年7月
- 28) Palmer, L.A., Thompson, J.B.: The Earth Pressure and Deflection along the Embedded Length of Piles subjected to Lateral Thrust, proc. 2nd ICSMFE, June 1948
- 29) 谷本喜一：杭打基礎の耐震性に関する基礎的研究，土木学会誌，第40巻第4号，1955年4月
- 30) Rowe, P.W.: The Single Pile subjected to Horizontal Force, Géotechnique, Vol. 6, No. 2, June 1956
- 31) McClelland, B., Focht, J.A.: Soil Modulus, for Laterally Loaded Piles, proc. ASCE, SM4 Oct. 1956
- 32) Gaul, R.D.: Model Study of a Dynamically Laterally Loaded Pile, proc. ASCE, Vol. 84, SM-1, Feb. 1958
- 33) 運輸省港湾技術研究所・八幡製鉄株式会社：Hパイルの水平抵抗に関する研究，1963年9月
- 34) 篠原登美雄・久保浩一：杭の横抵抗に関する実験的研究(その1)―垂直自由端単杭の横抵抗―，運輸技術研究所報告，第11巻第6号，1961年7月
- 35) 久保浩一：杭の横抵抗に関する実験的研究(その2)―地盤条件と杭の横抵抗の関係について―，運輸技術研究所報告，第11巻第12号，1962年2月
- 36) 久保浩一：杭の横抵抗に関する実験的研究(その3)―斜杭および頭部固定杭の横抵抗―，運輸技術研究所報告，第12巻第2号，1963年3月
- 37) 久保浩一：短杭の横抵抗，港湾技術研究所報告，第5巻第13号，1966年9月
- 38) 久保浩一・鈴木敦己・田中芳夫：斜面における鉛直単杭の横抵抗，港湾技術研究所報告，第5巻第2号，1966年1月
- 39) 山下生比古・荒川昌潔：C型地盤における頭部埋込杭の基準曲線，港湾技研資料，No.65, 1969年3月
- 40) 山下生比古：港研方式杭の横抵抗理論に基づく新しい図式計算法，港湾技研資料，No.104, 1970年3月
- 41) Sawaguchi, M.: Lateral Behavior of a Double Sheet Pile Wall Structure, Soils and Foundations, Vol. 14, No. 1, Mar. 1974
- 42) 高橋邦夫・沢口正俊：ウエルの横抵抗に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第16巻第4号，1977年12月
- 43) 横山幸満：鋼杭の設計と施工，山海堂，1963年3月
- 44) 横山幸満：くい構造物の設計法と計算例，山海堂，1977年10月
- 45) 石黒 健：鋼矢板工法，山海堂，1963年
- 46) 三橋郁雄：有限要素法による水平方向地盤反力係数の推定―特に2次元 k 値―，港湾技研資料，No.219 1975年6月
- 47) 駒田敬一：土木構造物のクイの水平抵抗，土と基礎25-8, 1977年8月
- 48) 山肩邦男：建築構造物のクイの水平抵抗，土と基礎25-8, 1977年8月
- 49) Broms, B.B.: Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils, ASCE, Vol. 90 SM3, May 1964
- 50) Broms, B.B.: Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils, ASCE, Vol. 90 SM2 Mar. 1964
- 51) 山肩・富永・小椋：砂地盤中の模型群グイの水平加力試験結果，第11回土質工学研究発表会発表講演概要集，1976年6月
- 52) 日本建築学会，地震時杭委員会：杭基礎の水平抵抗および振動挙動に関する研究，1965年5月
- 53) 古藤田喜久雄・風間 了：クイ材の塑性を考慮した解析法，土と基礎，25-8, 1977年8月
- 54) 岸田英明・中井正一：地盤反力―変位関係の非線形性―，土と基礎，25-8, 1977年8月
- 55) 矢作 柁：クイの水平耐力と地盤の変形― N 値と K 値の関連について―，25-8, 1977年8月
- 56) 山本稜威夫・森 紘一・大西靖和：打込みグイと埋込みグイの水平抵抗，25-8, 1977年8月
- 57) 小倉正己・奥田 庸・山岡重喜：群グイの水平抵抗―群グイ基礎水平載荷試験の結果―，25-8, 1977年8月
- 58) 金谷祐二・宮崎祐助・茶谷文雄：壁グイの水平抵抗，土と基礎，25-8, 1977年8月
- 59) 福岡正己・宇都一馬：ボーリング孔を利用した基礎地盤の横方向 K 値について，土と基礎特集号，No.1, 1959年8月
- 60) Kögler, F., Scheidig, A.: Baugrund und Bauwerk, Wilhelm Ernst & Sohn, 1938.
- 61) 吉田 巖・吉中竜之進：ボーリング孔内横方向載荷試験方法―3室型試験器と1室型試験器の比較試験について―，土木技術資料，Vol. 9, No. 6, 1967年6月
- 62) 吉中竜之進：横方向地盤反力係数，土木技術資料，Vol. 10, No. 1, 1968年1月
- 63) 陶山国男・今井常雄・他：地盤の横方向 K 値の研究(1), (2), 土と基礎，Vol. 11, No. 10, 1966年10月，および Vol. 11, No. 11, 1966年11月
- 64) 物部長穂：土木耐震学，理工図書，1952年9月，
：地震上下動に関する考察並に振動雑論，土木学会誌，Vol. 10, No. 5, 1924年
- 65) Okabe, S.: General Theory on Earth Pressure and Seismic Stability of Retaining Wall and Dam, JSCE, Vol. 10, No. 6, Dec. 1924
- 66) 運輸省第二港湾建設局監修：土圧係数図表，日本港

係船岸におけるたわみ性控え工の設計法に関する研究

港協会, 1959年9月
 67) 運輸省第二港湾建設局京浜港工事事務所: 山下ふ頭工事誌, 1969年12月
 68) 運輸省第五港湾建設局: 衣浦港トンネル工事誌, 1973年3月
 69) 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所: 土圧図表—その1—, 1964年4月
 70) 沢田源平: 斜面をもった矢板根入部の受働土圧計算法, 港湾技研資料, No. 9, 1964年4月
 71) 石井靖丸・林 聡・荒井秀夫: 振動中における乾燥砂の運動性状に関する研究 (第1報), (第2報), (第3報), (第4報), (第5報), (その1), (その2), 運輸技術研究所報告, 8巻10号, 1959年2月, 8巻11号, 1959年2月, 10巻11号, 1960年11月, 10巻11号, 1960年11月, 10巻11号, 1960年11月, 12巻2号, 1962年3月
 72) 荒井秀夫: 地震時土圧に関する一考察—乾燥砂の場合—, 港湾技術研究所報告, 第4巻第2号1965年2月
 73) 荒井秀夫・藤野芳明・坂井慧子: 矢板壁の耐震性に関する研究 (第2報), 港湾技術研究所報告, 1970年6月
 74) 荒井秀夫: 矢板壁の模型振動実験—控え壁が変位しうる場合—, 港湾技研資料, No. 296, 1978年6月
 75) 荒井秀夫・斎藤節文: 矢板壁の模型振動実験—根入部前面が斜面の場合—, 港湾技研資料, No. 297, 1978年6月
 76) 高橋邦夫・篠原邦彦・渡辺 剛: いくつかの矢板壁の問題に関する室内実験, 港湾技研資料, No. 320, 1979年6月
 77) 市原松平・森 信夫: 地震時受働土圧係数, 土木学会論文集, 第215号, 1973年7月
 78) 市原松平・中根 進: 内部摩擦をもつ粘性土の地震時受働土圧の算定, 土木学会論文報告集, 第253号, 1976年9月
 79) 市原松平・河邑 真・千田正孝: $\phi_u=0$, $c_u \neq 0$ 与えられる土の地震時受働土圧の算定, 土木学会論文報告集, 第274号, 1978年6月
 80) 市原松平・山田公夫・宇都宮洋一・梶井源一朗: 裏込め土が内部摩擦角をもつ粘性土の地震時主働土圧の合理的算定法, 第14回土質工学研究発表会発表講演集, 1979年6月
 81) Ichihara, M., Matsuzawa, H.: Earth Pressure Coefficient during Earthquake, Soil and Foundations, Vol. 13, No. 4, 1973
 82) 松沢 宏: 地震時壁面摩擦, 土と基礎, 27巻, 12号1979年12月
 83) 市原松平・千田正孝・大島 博: Sokolovski 法を用いた地震時受働土圧算定における誤差軽減の方法, 土質工学会論文報告集, Vol. 19, No. 2, 1979年6月
 84) 倉田 進・藤下利男: 砂粘土の混合土の工学的性質に関する研究, 運輸技術研究所報告, 第11巻第9号1961年10月
 85) 中瀬明男・勝野 克・小林正樹: 砂の多い粘性土の

一軸圧縮強さ, 港湾技術研究所報告, 第11巻第4号1972年12月
 86) 石下禎重: 土質基礎工学ライブラリー5, 一横浜本牧ふ頭の岸壁基礎—, 土質工学会, 1966年
 87) 松並仁茂・内田豊彦・岩崎正二: 地震時土圧の計算図表, 港湾技研資料, No. 357, 1980年9月
 88) 鋼管杭協会: 鋼管ぐい, 1977年9月, p.158
 89) 松並仁茂: 港湾構造物の設計, 全日本建設技術協会, 1980年1月, p.94
 90) 松並仁茂: 港湾工事における鋼管杭さん橋の問題点, 土木技術, Vol. 18, 1963年4月
 91) 北島昭一: セル岸壁の安定性に関する研究, 運輸技術研究所報告, 第12巻第3号, 1962年5月
 92) 松並仁茂・大田春彦: セル型隔壁の安定計算, 港湾, 37巻, 5号・6号, 1960年
 93) 松並仁茂: 係船岸のたわみ性控え工の設計法について, 土と基礎, 28巻, 9号, 1980年9月

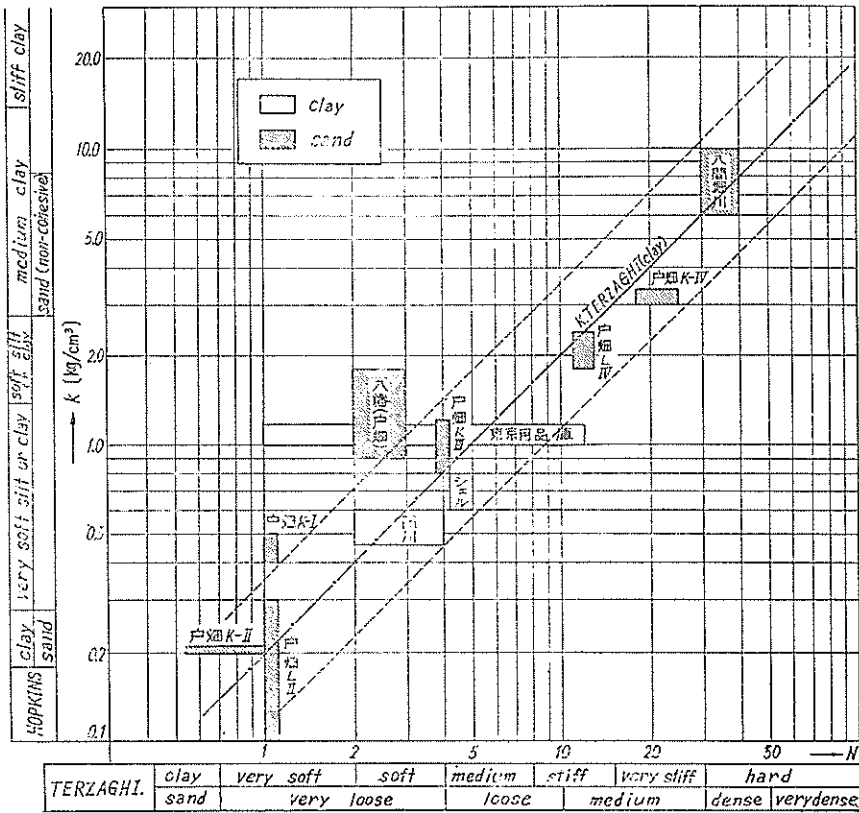
記 号 表

- A, B, C, D: 定数
 a, b, c: 定数
 $a: =n_h \cdot B/EI$ ($1/m^5$)
 $b: =k_c \cdot B/EI$ ($1/m^4$)
 B, D: くい幅 (m)
 c: 粘着強度 (kN/m²)
 E: 弾性係数 (MN/m²)
 $E_s: k_h \cdot B$ 土の弾性係数 (MN/m²)
 EI: くいの曲げ剛性 (MN/m²)
 H: くい頭に作用する水平力 (kN)
 k: 地盤反力定数, 地震震度
 k_h : 横方向地盤反力定数(または係数), 水平地震震度 (MN/m²)
 k_{h1}, k_{h2}, k_{h3} : 横方向地盤反力定数 (MN/m²)
 k_s, k_c : 横方向地盤反力定数 (MN/m²)
 L: 杭の有効長 (杭の特性長の3倍の長さ) (m), 杭の間隔 (m)
 l_{m1} : 曲げモーメント第1ゼロ点の深さ (m)
 M: 曲げモーメント (kN・m)
 m, n: べき数, 指数
 N: 標準貫入試験値
 n_h : 深さに係わる横方向地盤反力定数 (MN/m⁴)
 P: 地盤反力 (kN/m)
 P_a : 主働土圧力 (kN/m)
 P_p : 受働土圧力 (kN/m)
 p_a : 主働土圧強度 (kN/m²)
 p_p : 受働土圧強度 (kN/m²)
 p_r : 抵抗土圧強度 (= $p_p - p_a$) (kN/m²)
 \bar{p}_r : 抵抗土圧強度の深さ方向の強さ (kN/m²)
 Q, Q_c : 上載荷重および地震時上載荷重 (kN/m)
 q, q_c : 単位面積当りの上載荷重および地震時上載荷重 (kN/m²)
 S: せん断力または付着合力 (kN/m²)
 W, W_c : 土の重量および地震時の土の重量 (kN/m)
 x: 深さ (m)

- y : くいの各点の横方向のたわみ量 (cm, m)
 \bar{y} : くい頭部の横方向変位 (cm, m)
 y_0, f : 地表面におけるくいの横方向変位 (cm, m)
 y'''' : $= \frac{d^4 y}{dx^4}$ の略記号
 α : 係数, 崩壊角 (度)
 β : 壁面の水平となす角度 (角)
 $1/\beta$: $= \sqrt[3]{4EI/k_c B}$, k_c 型地盤の特性長 (m)
 γ, γ_e : 土の常時および地震時の単位体積重量 (kN/m³)
 $1/\gamma$: $= \sqrt[3]{4EI/(n_h x + k_c) B}$, 台形型地盤の特性長 (m)
 δ : 土の壁面摩擦角 (度)
- ε : 地震合成角 (度)
 θ : $= \frac{dy}{dx}$, たわみ角
 λ : 粘性土の付着力の粘着力に対する比
 $1/\lambda$: $= \sqrt[3]{5EI/n_h B}$, n_h 型地盤の特性長 (m)
 μ : 補正係数, 摩擦係数および角度の補正(度)
 Σ : $= \sum_{n=0}^{\infty}$ の略記号
 σ : 応力
 τ : 土の粘着合力 (kN/m)
 ϕ : 土の内部摩擦角 (度)
 ω : 地表面の傾斜角 (度)

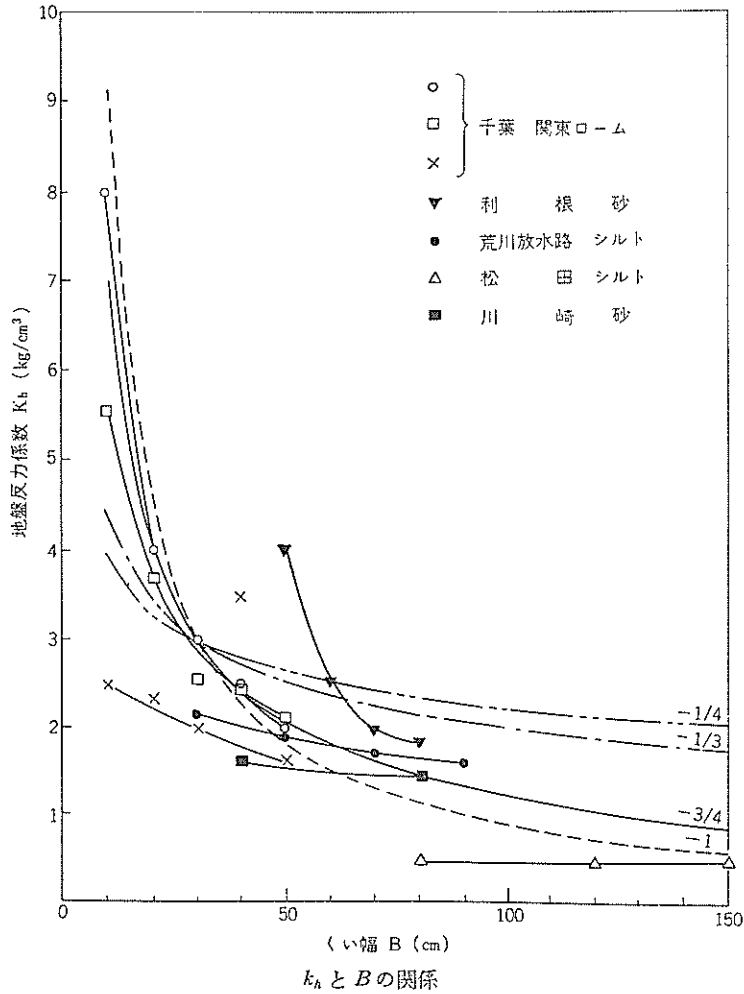
付 録

- A. 付 図
 - A.1 N 値と k 値との関係
 - A.2 k_b と B の関係
 - B. 杭の横抵抗の基本式の誘導
 - B.1 $y''''+(ax+b)y=0$ の解法
 - B.2 $y''''+axy=0$ の解法
 - B.3 $y''''+by=0$ の解法
 - B.4 $y''''+ax^m y=0$ の解法
 - C. 杭の横抵抗の計算表
-
- A. 付 図
 - A.1



N 値と k 値の関係
 $(\sigma_{max}=1,000\sim 1,500 \text{ kg/cm}^2)$ に対応する k 値と地表から $\beta^{-1}m$ 付近までの N 値)

A.2



B 杭の横抵抗の基本式の誘導

B.1 $y'''' + (ax+b)y = 0$ の解法

$$y'''' + (ax+b)y = 0 \tag{1}$$

$$y'''' = u(x) \text{ とおく} \tag{2}$$

$$\left. \begin{aligned} y''' &= \int_0^x u(x) dx + c_1 \\ y'' &= \int_0^x u(x) dx^2 + c_1 x + c_2 \\ y' &= \int_0^x u(x) dx^3 + \frac{c_1}{2} x^2 + c_2 x + c_3 \\ y &= \int_0^x u(x) dx^4 + \frac{c_1}{3!} x^3 + \frac{c_2}{2} x^2 + c_3 x + c_4 \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

ただし、 $\int_0^x u(x) dx^k$ は $u(x)$ を 0 から x まで k 回積分したものの略記である。

式(2), (3)を(1)に代入する。

$$u(x) = (ax+b) \left\{ \int_0^x u(x) dx^4 + \frac{c_1}{3!} x^3 + \frac{c_2}{2} x^2 + c_3 x + c_4 \right\} \tag{4}$$

ここに $\int_0^x u(x) dx^k = \int_0^x \frac{(x-t)^{k-1}}{(k-1)!} u(t) dt$ であるので式(4)は次のようになる。

$$u(x) = -(ax+b) \left(\frac{c_1}{3!} x^3 + \frac{c_2}{2} x^2 + c_3 x + c_4 \right) - (ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} u(t) dt \quad (5)$$

式(5)は $u(x) = f(x) + \lambda \int_0^x K(x,t) u(t) dt$ のいわゆる Volterra の第 2 種積分方程式であるので、解は唯一つであり、次のように表わされる。

$$u(x) = f(x) + A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n + \dots \quad (6)$$

$$A_1 = \lambda \int_0^x K(x,t) f(t) dt \quad (7)$$

.....

ここで、 $(ax+b)$ に注目した解の内訳を示す。

$$u(x) = f(x) - (ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} u(t) dt \quad (8)$$

式(7) $u(t)$ に式(7)自体を入れる (このときは x は t 、 t は t_1 におきかえる)。

$$\begin{aligned} u(x) &= f(x) - (ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left\{ f(t) - (at+b) \int_0^t \frac{(t-t_1)^3}{3!} u(t_1) dt_1 \right\} dt \\ &= f(x) - (ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} f(t) dt \\ &\quad + (ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \int_0^t \frac{(t-t_1)^3}{3!} u(t_1) dt_1 dt \\ &= f(x) - (ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} f(t) dt \\ &\quad + (ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \int_0^t \frac{(t-t_1)^3}{3!} f(t_1) dt_1 dt \\ &\quad - (ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \int_0^t \frac{(t-t_1)^3}{3!} (at_1+b) \int_0^{t_1} \frac{(t_1-t_2)^3}{3!} f(t_2) dt_2 dt_1 dt \\ &\quad + \dots \dots \dots \\ &\quad + (ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \int_0^t \frac{(t-t_1)^3}{3!} (at_1+b) \int_0^{t_1} \frac{(t_1-t_2)^3}{3!} f(t_2) dt_2 dt_1 dt \dots \dots \\ &\quad (at_{n-2}+b) \int_0^{t_{n-2}} \frac{(t_{n-2}-t_{n-1})^3}{3!} f(t_{n-1}) dt_{n-1} \dots \dots dt + R_{n+1}(x). \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに } R_{n+1}(x) &= (ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \int_0^t \frac{(t-t_1)^3}{3!} (at_1+b) \int_0^{t_1} \frac{(t_1-t_2)^3}{3!} f(t_2) dt_2 dt_1 dt_1 \dots \dots \\ &\quad \dots \dots (at_{n-1}+b) \int_0^{t_{n-1}} \frac{(t_{n-1}-t_n)^3}{3!} u(t_n) dt_n \dots \dots dt. \end{aligned}$$

$$\text{ここに } \left. \begin{aligned} f(x) &= -(ax+b) \left(\frac{c_1}{3!} x^3 + \frac{c_2}{2} x^2 + c_3 x + c_4 \right) \\ K(x,t) &= \frac{(x-t)^3}{3!} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} A_1 &= (ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \left(\frac{c_1}{3!} t^3 + \frac{c_2}{2} t^2 + c_3 t + c_4 \right) dt \\ &= a(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left(\frac{4c_1}{4!} t^4 + \frac{3c_2}{3!} t^3 + \frac{2c_3}{2!} t^2 + c_4 t \right) dt + b(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left(\frac{c_1}{3!} t^3 + \frac{c_2}{2!} t^2 + c_3 t + c_4 \right) dt \\ &= a(ax+b) \left(\frac{4c_1}{8!} x^8 + \frac{3c_2}{7!} x^7 + \frac{2c_3}{6!} x^6 + \frac{c_4}{5!} x^5 \right) + b(ax+b) \left(\frac{c_1}{7!} x^7 + \frac{c_2}{6!} x^6 + \frac{c_3}{5!} x^5 + \frac{c_4}{4!} x^4 \right) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} A_2 &= (ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \int_0^t \frac{(t-t_1)^3}{3!} f(t_1) dt_1 dt \\ &= -(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \int_0^t \frac{(t-t_1)^3}{3!} (at_1+b) \left(\frac{c_1}{3!} t_1^3 + \frac{c_2}{2!} t_1^2 + c_3 t_1 + c_4 \right) dt_1 dt \\ &= -(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \left\{ a \left(\frac{4c_1}{8!} t^8 + \frac{3c_2}{7!} t^7 + \frac{2c_3}{6!} t^6 + \frac{c_4}{5!} t^5 \right) + b \left(\frac{c_1}{7!} t^7 + \frac{c_2}{6!} t^6 + \frac{c_3}{5!} t^5 + \frac{c_4}{4!} t^4 \right) \right\} dt \\ &= -a^2(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left(\frac{9 \cdot 4}{9!} c_1 t^9 + \frac{8 \cdot 3}{8!} c_2 t^8 + \frac{7 \cdot 2}{7!} c_3 t^7 + \frac{6 \cdot 1}{6!} c_4 t^6 \right) dt \\ &\quad - ab(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left\{ \left(\frac{4c_1}{8!} t^8 + \frac{3c_2}{7!} t^7 + \frac{2c_3}{6!} t^6 + \frac{c_4}{5!} t^5 \right) + \left(\frac{8c_1}{8!} t^8 + \frac{7c_2}{7!} t^7 + \frac{6c_3}{6!} t^6 + \frac{5c_4}{5!} t^5 \right) \right\} dt \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -b^2(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left(\frac{c_1 t^7}{7!} + \frac{c_2 t^6}{6!} + \frac{c_3 t^5}{5!} + \frac{c_4 t^4}{4!} \right) dt \\
 &= -a^2(ax+b) \left(\frac{9 \cdot 4}{13!} c_1 x^{13} + \frac{8 \cdot 3}{12!} c_2 x^{12} + \frac{7 \cdot 2}{11!} c_3 x^{11} + \frac{6 \cdot 1}{10!} c_4 x^{10} \right) \\
 & \quad -ab(ax+b) \left(\frac{12}{12!} c_1 x^{12} + \frac{10}{11!} c_2 x^{11} + \frac{8}{10!} c_3 x^{10} + \frac{6}{9!} c_4 x^9 \right) -b^2(ax+b) \left(\frac{c_1}{11!} x^{11} + \frac{c_2}{10!} x^{10} + \frac{c_3}{9!} x^9 + \frac{c_4}{8!} x^8 \right) \quad (12) \\
 A_3 &= (ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \int_0^t \frac{(t-t_1)^3}{3!} (at_1+b) \int_0^{t_1} \frac{(t_1-t_2)^3}{3!} (at_2+b) \left(\frac{c_1 t_2^3}{3!} + \frac{c_2 t_2^2}{2} + c_3 t_2 + c_4 \right) dt_2 dt_1 dt \\
 &= a^3(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \left(\frac{9 \cdot 4}{13!} c_1 t^{13} + \frac{8 \cdot 3}{12!} c_2 t^{12} + \frac{7 \cdot 2}{11!} c_3 t^{11} + \frac{6 \cdot 1}{10!} c_4 t^{10} \right) dt \\
 & \quad + ab(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \left(\frac{12}{12!} c_1 t^{12} + \frac{10}{11!} c_2 t^{11} + \frac{8}{10!} c_3 t^{10} + \frac{6}{9!} c_4 t^9 \right) dt \\
 & \quad + b^2(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \left(\frac{c_1}{11!} t^{11} + \frac{c_2}{10!} t^{10} + \frac{c_3}{9!} t^9 + \frac{c_4}{8!} t^8 \right) dt \\
 &= a^3(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left(\frac{14 \cdot 9 \cdot 4}{14!} c_1 t^{14} + \frac{13 \cdot 8 \cdot 3}{13!} c_2 t^{13} + \frac{12 \cdot 7 \cdot 2}{12!} c_3 t^{12} + \frac{11 \cdot 6 \cdot 1}{11!} c_4 t^{11} \right) dt \\
 & \quad + a^2b(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left(\frac{9 \cdot 4}{13!} c_1 t^{13} + \frac{8 \cdot 3}{12!} c_2 t^{12} + \frac{7 \cdot 2}{11!} c_3 t^{11} + \frac{6 \cdot 1}{10!} c_4 t^{10} \right) dt \\
 & \quad + a^2b^2(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left(\frac{13 \cdot 12}{13!} c_1 t^{13} + \frac{12 \cdot 10}{12!} c_2 t^{12} + \frac{11 \cdot 8}{11!} c_3 t^{11} + \frac{10 \cdot 6}{10!} c_4 t^{10} \right) dt \\
 & \quad + ab^2(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left(\frac{12}{12!} c_1 t^{12} + \frac{10}{11!} c_2 t^{11} + \frac{8}{10!} c_3 t^{10} + \frac{6}{9!} c_4 t^9 \right) dt \\
 & \quad + ab^2(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left(\frac{12}{12!} c_1 t^{12} + \frac{11}{11!} c_2 t^{11} + \frac{10}{10!} c_3 t^{10} + \frac{9}{9!} c_4 t^9 \right) dt \\
 & \quad + b^3(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left(\frac{c_1}{11!} t^{11} + \frac{c_2}{10!} t^{10} + \frac{c_3}{9!} t^9 + \frac{c_4}{8!} t^8 \right) dt \\
 &= a^3(ax+b) \left(\frac{14 \cdot 9 \cdot 4}{18!} c_1 x^{18} + \frac{13 \cdot 8 \cdot 3}{17!} c_2 x^{17} + \frac{12 \cdot 7 \cdot 2}{16!} c_3 x^{16} + \frac{11 \cdot 6 \cdot 1}{15!} c_4 x^{15} \right) \\
 & \quad + a^2b(ax+b) \left(\frac{192}{17!} c_1 x^{17} + \frac{144}{16!} c_2 x^{16} + \frac{102}{15!} c_3 x^{15} + \frac{66}{14!} c_4 x^{14} \right) \\
 & \quad + ab^2(ax+b) \left(\frac{24}{16!} c_1 x^{16} + \frac{21}{15!} c_2 x^{15} + \frac{18}{14!} c_3 x^{14} + \frac{15}{13!} c_4 x^{13} \right) \\
 & \quad + b^3(ax+b) \left(\frac{c_1}{15!} x^{15} + \frac{c_2}{14!} x^{14} + \frac{c_3}{13!} x^{13} + \frac{c_4}{12!} x^{12} \right) \quad (13) \\
 A_4 &= -a^3(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \left(\frac{14 \cdot 9 \cdot 4}{18!} c_1 t^{18} + \frac{13 \cdot 8 \cdot 3}{17!} c_2 t^{17} + \frac{12 \cdot 7 \cdot 2}{16!} c_3 t^{16} + \frac{11 \cdot 6 \cdot 1}{15!} c_4 t^{15} \right) dt \\
 & \quad -a^2b(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \left(\frac{192}{17!} c_1 t^{17} + \frac{144}{16!} c_2 t^{16} + \frac{102}{15!} c_3 t^{15} + \frac{66}{14!} c_4 t^{14} \right) dt \\
 & \quad -ab^2(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \left(\frac{24}{16!} c_1 t^{16} + \frac{21}{15!} c_2 t^{15} + \frac{18}{14!} c_3 t^{14} + \frac{15}{13!} c_4 t^{13} \right) dt \\
 & \quad -b^3(ax+b) \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (at+b) \left(\frac{c_1}{15!} t^{15} + \frac{c_2}{14!} t^{14} + \frac{c_3}{13!} t^{13} + \frac{c_4}{12!} t^{12} \right) dt \\
 &= -a^4(ax+b) \left(\frac{19 \cdot 14 \cdot 9 \cdot 4}{23!} c_1 x^{23} + \frac{18 \cdot 13 \cdot 8 \cdot 3}{22!} c_2 x^{22} + \frac{17 \cdot 12 \cdot 7 \cdot 2}{21!} c_3 x^{21} + \frac{16 \cdot 11 \cdot 6 \cdot 1}{20!} c_4 x^{20} \right) \\
 & \quad -a^3b(ax+b) \left(\frac{14 \cdot 9 \cdot 4}{22!} c_1 x^{22} + \frac{13 \cdot 8 \cdot 3}{21!} c_2 x^{21} + \frac{12 \cdot 7 \cdot 2}{20!} c_3 x^{20} + \frac{11 \cdot 6 \cdot 1}{19!} c_4 x^{19} \right) \\
 & \quad -a^3b^2(ax+b) \left(\frac{18 \cdot 192}{22!} c_1 x^{22} + \frac{17 \cdot 144}{21!} c_2 x^{21} + \frac{16 \cdot 102}{20!} c_3 x^{20} + \frac{15 \cdot 66}{19!} c_4 x^{19} \right) \\
 & \quad -a^2b^3(ax+b) \left(\frac{192}{21!} c_1 x^{21} + \frac{144}{20!} c_2 x^{20} + \frac{102}{19!} c_3 x^{19} + \frac{66}{18!} c_4 x^{18} \right) \\
 & \quad -a^2b^3(ax+b) \left(\frac{17 \cdot 24}{21!} c_1 x^{21} + \frac{16 \cdot 21}{20!} c_2 x^{20} + \frac{15 \cdot 18}{19!} c_3 x^{19} + \frac{14 \cdot 15}{18!} c_4 x^{18} \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -ab^3(ax+b)\left(\frac{24}{20!}c_1x^{20}+\frac{21}{19!}c_2x^{19}+\frac{18}{18!}c_3x^{18}+\frac{15}{17!}c_4x^{17}\right) \\
 & -ab^3(ax+b)\left(\frac{16}{20!}c_1x^{16}+\frac{15}{19!}c_2x^{15}+\frac{14}{18!}c_3x^{14}+\frac{13}{17!}c_4x^{13}\right) \\
 & -b^4(ax+b)\left(\frac{c_1}{19!}x^{19}+\frac{c_2}{18!}x^{18}+\frac{c_3}{17!}x^{17}+\frac{c_4}{16!}x^{16}\right) \\
 = & -a^4(ax+b)\left(\frac{19\cdot 14\cdot 9\cdot 4}{23!}c_1x^{23}+\frac{18\cdot 13\cdot 8\cdot 3}{22!}c_2x^{22}+\frac{17\cdot 12\cdot 7\cdot 2}{21!}c_3x^{21}+\frac{16\cdot 11\cdot 6\cdot 1}{20!}c_4x^{20}\right) \\
 & -a^3b(ax+b)\left(\frac{3960}{22!}c_1x^{22}+\frac{2760}{21!}c_2x^{21}+\frac{1800}{20!}c_3x^{20}+\frac{1056}{19!}c_4x^{19}\right) \\
 & -a^2b^2(ax+b)\left(\frac{600}{21!}c_1x^{21}+\frac{480}{20!}c_2x^{20}+\frac{372}{19!}c_3x^{19}+\frac{276}{18!}c_4x^{18}\right) \\
 & -ab^3(ax+b)\left(\frac{40}{20!}c_1x^{20}+\frac{36}{19!}c_2x^{19}+\frac{32}{18!}c_3x^{18}+\frac{28}{17!}c_4x^{17}\right) \\
 & -b^4(ax+b)\left(\frac{c_1}{19!}x^{19}+\frac{c_2}{18!}x^{18}+\frac{c_3}{17!}x^{17}+\frac{c_4}{16!}x^{16}\right)
 \end{aligned} \tag{14}$$

ゆえに、次のような解を得る。

$$u(x)=y''''$$

$$\begin{aligned}
 = & -(ax+b)\left(\frac{c_1}{3!}x^3+\frac{c_2}{2}x^2+c_3x+c_4\right) \\
 & +a(ax+b)\left(\frac{4c_1}{8!}x^8+\frac{3c_2}{7!}x^7+\frac{2c_3}{6!}x^6+\frac{c_4}{5!}x^5\right)+b(ax+b)\left(\frac{c_1}{7!}x^7+\frac{c_2}{6!}x^6+\frac{c_3}{5!}x^5+\frac{c_4}{4!}x^4\right) \\
 & -a^2(ax+b)\left(\frac{9\cdot 4}{13!}c_1x^{13}+\frac{8\cdot 3}{12!}c_2x^{12}+\frac{7\cdot 2}{11!}c_3x^{11}+\frac{6\cdot 1}{10!}c_4x^{10}\right)-ab(ax+b)\left(\frac{12}{12!}c_1x^{12}+\frac{10}{11!}c_2x^{11}+\frac{8}{10!}c_3x^{10}\right. \\
 & \left.+\frac{6}{9!}c_4x^9\right)-b^2(ax+b)\left(\frac{c_1}{11!}x^{11}+\frac{c_2}{10!}x^{10}+\frac{c_3}{9!}x^9+\frac{c_4}{8!}x^8\right) \\
 & +a^3(ax+b)\left(\frac{14\cdot 9\cdot 4}{18!}c_1x^{18}+\frac{13\cdot 8\cdot 3}{17!}c_2x^{17}+\frac{12\cdot 7\cdot 2}{16!}c_3x^{16}+\frac{11\cdot 6\cdot 1}{15!}c_4x^{15}\right) \\
 & +a^2b(ax+b)\left(\frac{192}{17!}c_1x^{17}+\frac{144}{16!}c_2x^{16}+\frac{102}{15!}c_3x^{15}+\frac{66}{14!}c_4x^{14}\right) \\
 & +ab^2(ax+b)\left(\frac{24}{16!}c_1x^{16}+\frac{21}{15!}c_2x^{15}+\frac{18}{14!}c_3x^{14}+\frac{15}{13!}c_4x^{13}\right)+b^3(ax+b)\left(\frac{c_1}{15!}x^{15}+\frac{c_2}{14!}x^{14}+\frac{c_3}{13!}x^{13}+\frac{c_4}{12!}x^{12}\right) \\
 & -a^4(ax+b)\left(\frac{19\cdot 14\cdot 9\cdot 4}{23!}c_1x^{23}+\frac{18\cdot 13\cdot 8\cdot 3}{22!}c_2x^{22}+\frac{17\cdot 12\cdot 7\cdot 2}{21!}c_3x^{21}+\frac{16\cdot 11\cdot 6\cdot 1}{20!}c_4x^{20}\right) \\
 & -a^3b(ax+b)\left(\frac{3960}{22!}c_1x^{22}+\frac{2760}{21!}c_2x^{21}+\frac{1800}{20!}c_3x^{20}+\frac{1056}{19!}c_4x^{19}\right) \\
 & -a^2b^2(ax+b)\left(\frac{600}{21!}c_1x^{21}+\frac{480}{20!}c_2x^{20}+\frac{372}{19!}c_3x^{19}+\frac{276}{18!}c_4x^{18}\right) \\
 & -ab^3(ax+b)\left(\frac{40}{20!}c_1x^{20}+\frac{36}{19!}c_2x^{19}+\frac{32}{18!}c_3x^{18}+\frac{28}{17!}c_4x^{17}\right)-b^4(ax+b)\left(\frac{c_1}{19!}x^{19}+\frac{c_2}{18!}x^{18}+\frac{c_3}{17!}x^{17}+\frac{c_4}{16!}x^{16}\right) \\
 & +\dots\dots\dots
 \end{aligned} \tag{15}$$

y は式(1)と式(15)から次のようになる。

$$\begin{aligned}
 y = & -\frac{y''''}{(ax+b)} \\
 = & \frac{c_1}{3!}x^3+\frac{c_2}{2}x^2+c_3x+c_4 \\
 & -a\left(\frac{4c_1}{8!}x^8+\frac{3c_2}{7!}x^7+\frac{2c_3}{6!}x^6+\frac{c_4}{5!}x^5\right)-b\left(\frac{c_1}{7!}x^7+\frac{c_2}{6!}x^6+\frac{c_3}{5!}x^5+\frac{c_4}{4!}x^4\right) \\
 & +a^2\left(\frac{9\cdot 4}{13!}c_1x^{13}+\frac{8\cdot 3}{12!}c_2x^{12}+\frac{7\cdot 2}{11!}c_3x^{11}+\frac{6\cdot 1}{10!}c_4x^{10}\right)+ab\left(\frac{12}{12!}c_1x^{12}+\frac{10}{11!}c_2x^{11}+\frac{8}{10!}c_3x^{10}+\frac{6}{9!}c_4x^9\right) \\
 & +b^2\left(\frac{c_1}{11!}x^{11}+\frac{c_2}{10!}x^{10}+\frac{c_3}{9!}x^9+\frac{c_4}{8!}x^8\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -a^3\left(\frac{14\cdot 9\cdot 4}{18!}c_1x^{18}+\frac{13\cdot 8\cdot 3}{17!}c_2x^{17}+\frac{12\cdot 7\cdot 2}{16!}c_3x^{16}+\frac{11\cdot 6\cdot 1}{15!}c_4x^{15}\right)-a^2b\left(\frac{192}{17!}c_1x^{17}+\frac{144}{16!}c_2x^{16}+\frac{102}{15!}c_3x^{15}+\frac{66}{14!}c_4x^{14}\right) \\
 & -ab^2\left(\frac{24}{16!}c_1x^{16}+\frac{21}{15!}c_2x^{15}+\frac{18}{14!}c_3x^{14}+\frac{15}{13!}c_4x^{13}\right)-b^3\left(\frac{c_1}{15!}x^{15}+\frac{c_2}{14!}x^{14}+\frac{c_3}{13!}x^{13}+\frac{c_4}{12!}x^{12}\right) \\
 & +a^4\left(\frac{19\cdot 14\cdot 9\cdot 4}{23!}c_1x^{23}+\frac{18\cdot 13\cdot 8\cdot 3}{22!}c_2x^{22}+\frac{17\cdot 12\cdot 7\cdot 2}{21!}c_3x^{21}+\frac{16\cdot 11\cdot 6\cdot 1}{20!}c_4x^{20}\right) \\
 & +a^3b\left(\frac{3960}{22!}c_1x^{22}+\frac{2760}{21!}c_2x^{21}+\frac{1800}{20!}c_3x^{20}+\frac{1056}{19!}c_4x^{19}\right)+a^2b^2\left(\frac{600}{21!}c_1x^{21}+\frac{480}{20!}c_2x^{20}+\frac{372}{19!}c_3x^{19}+\frac{276}{18!}c_4x^{18}\right) \\
 & +ab^3\left(\frac{40}{20!}c_1x^{20}+\frac{36}{19!}c_2x^{19}+\frac{32}{18!}c_3x^{18}+\frac{28}{17!}c_4x^{17}\right)+b^4\left(\frac{c_1}{19!}x^{19}+\frac{c_2}{18!}x^{18}+\frac{c_3}{17!}x^{17}+\frac{c_4}{16!}x^{16}\right) \\
 & +\dots\dots\dots
 \end{aligned}$$

(16)

$$\begin{aligned}
 y' & =\frac{c_1}{2}x^2+c_2x+c_3-a\left(\frac{4c_1}{7!}x^7+\frac{3c_2}{6!}x^6+\frac{2c_3}{5!}x^5+\frac{c_4}{4!}x^4\right)-b\left(\frac{c_1}{6!}x^6+\frac{c_2}{5!}x^5+\frac{c_3}{4!}x^4+\frac{c_4}{3!}x^3\right) \\
 & +a^2\left(\frac{9\cdot 4}{12!}c_1x^{12}+\frac{8\cdot 3}{11!}c_2x^{11}+\frac{7\cdot 2}{10!}c_3x^{10}+\frac{6\cdot 1}{9!}c_4x^9\right)+ab\left(\frac{12}{11!}c_1x^{11}+\frac{10}{10!}c_2x^{10}+\frac{8}{9!}c_3x^9+\frac{6}{8!}c_4x^8\right) \\
 & +b^2\left(\frac{c_1}{10!}x^{10}+\frac{c_2}{9!}x^9+\frac{c_3}{8!}x^8+\frac{c_4}{7!}x^7\right) \\
 & -a^3\left(\frac{14\cdot 9\cdot 4}{17!}c_1x^{17}+\frac{13\cdot 8\cdot 3}{16!}c_2x^{16}+\frac{12\cdot 7\cdot 2}{15!}c_3x^{15}+\frac{11\cdot 6\cdot 1}{14!}c_4x^{14}\right)-a^2b\left(\frac{192}{16!}c_1x^{16}+\frac{144}{15!}c_2x^{15}+\frac{102}{14!}c_3x^{14}+\frac{66}{13!}c_4x^{13}\right) \\
 & -ab^2\left(\frac{24}{15!}c_1x^{15}+\frac{21}{14!}c_2x^{14}+\frac{18}{13!}c_3x^{13}+\frac{15}{12!}c_4x^{12}\right)-b^3\left(\frac{c_1}{14!}x^{14}+\frac{c_2}{13!}x^{13}+\frac{c_3}{12!}x^{12}+\frac{c_4}{11!}x^{11}\right) \\
 & +a^4\left(\frac{19\cdot 14\cdot 9\cdot 4}{22!}c_1x^{22}+\frac{18\cdot 13\cdot 8\cdot 3}{21!}c_2x^{21}+\frac{17\cdot 12\cdot 7\cdot 2}{20!}c_3x^{20}+\frac{16\cdot 11\cdot 6\cdot 1}{19!}c_4x^{19}\right) \\
 & +a^3b\left(\frac{3960}{21!}c_1x^{21}+\frac{2760}{20!}c_2x^{20}+\frac{1800}{19!}c_3x^{19}+\frac{1056}{18!}c_4x^{18}\right)+a^2b^2\left(\frac{600}{20!}c_1x^{20}+\frac{480}{19!}c_2x^{19}+\frac{372}{18!}c_3x^{18}+\frac{276}{17!}c_4x^{17}\right) \\
 & +ab^3\left(\frac{40}{19!}c_1x^{19}+\frac{36}{18!}c_2x^{18}+\frac{32}{17!}c_3x^{17}+\frac{28}{16!}c_4x^{16}\right)+b^4\left(\frac{c_1}{18!}x^{18}+\frac{c_2}{17!}x^{17}+\frac{c_3}{16!}x^{16}+\frac{c_4}{15!}x^{15}\right) \\
 & +\dots\dots\dots
 \end{aligned}$$

(17)

$$\begin{aligned}
 y'' & =c_1x+c_2-a\left(\frac{4c_1}{6!}x^6+\frac{3c_2}{5!}x^5+\frac{2c_3}{4!}x^4+\frac{c_4}{3!}x^3\right)-b\left(\frac{c_1}{5!}x^5+\frac{c_2}{4!}x^4+\frac{c_3}{3!}x^3+\frac{c_4}{2!}x^2\right) \\
 & +a^2\left(\frac{9\cdot 4}{11!}c_1x^{11}+\frac{8\cdot 3}{10!}c_2x^{10}+\frac{7\cdot 2}{9!}c_3x^9+\frac{6\cdot 1}{8!}c_4x^8\right)+ab\left(\frac{12}{10!}c_1x^{10}+\frac{10}{9!}c_2x^9+\frac{8}{8!}c_3x^8+\frac{6}{7!}c_4x^7\right) \\
 & +b^2\left(\frac{c_1}{9!}x^9+\frac{c_2}{8!}x^8+\frac{c_3}{7!}x^7+\frac{c_4}{6!}x^6\right) \\
 & -a^3\left(\frac{14\cdot 9\cdot 4}{16!}c_1x^{16}+\frac{13\cdot 8\cdot 3}{15!}c_2x^{15}+\frac{12\cdot 7\cdot 2}{14!}c_3x^{14}+\frac{11\cdot 6\cdot 1}{13!}c_4x^{13}\right)-a^2b\left(\frac{192}{15!}c_1x^{15}+\frac{144}{14!}c_2x^{14}+\frac{102}{13!}c_3x^{13}+\frac{66}{12!}c_4x^{12}\right) \\
 & -ab^2\left(\frac{24}{14!}c_1x^{14}+\frac{21}{13!}c_2x^{13}+\frac{18}{12!}c_3x^{12}+\frac{15}{11!}c_4x^{11}\right)-b^3\left(\frac{c_1}{13!}x^{13}+\frac{c_2}{12!}x^{12}+\frac{c_3}{11!}x^{11}+\frac{c_4}{10!}x^{10}\right) \\
 & +a^4\left(\frac{19\cdot 14\cdot 9\cdot 4}{21!}c_1x^{21}+\frac{18\cdot 13\cdot 8\cdot 3}{20!}c_2x^{20}+\frac{17\cdot 12\cdot 7\cdot 2}{19!}c_3x^{19}+\frac{16\cdot 11\cdot 6\cdot 1}{18!}c_4x^{18}\right) \\
 & +a^3b\left(\frac{3960}{20!}c_1x^{20}+\frac{2760}{19!}c_2x^{19}+\frac{1800}{18!}c_3x^{18}+\frac{1056}{17!}c_4x^{17}\right)+a^2b^2\left(\frac{600}{19!}c_1x^{19}+\frac{480}{18!}c_2x^{18}+\frac{372}{17!}c_3x^{17}+\frac{276}{16!}c_4x^{16}\right) \\
 & +ab^3\left(\frac{40}{18!}c_1x^{18}+\frac{36}{17!}c_2x^{17}+\frac{32}{16!}c_3x^{16}+\frac{28}{15!}c_4x^{15}\right)+b^4\left(\frac{c_1}{17!}x^{17}+\frac{c_2}{16!}x^{16}+\frac{c_3}{15!}x^{15}+\frac{c_4}{14!}x^{14}\right) \\
 & +\dots\dots\dots
 \end{aligned}$$

(18)

$$\begin{aligned}
 y''' & =c_1-a\left(\frac{4c_1}{5!}x^5+\frac{3c_2}{4!}x^4+\frac{2c_3}{3!}x^3+\frac{c_4}{2!}x^2\right)-b\left(\frac{c_1}{4!}x^4+\frac{c_2}{3!}x^3+\frac{c_3}{2!}x^2+c_4x\right) \\
 & +a^2\left(\frac{9\cdot 4}{10!}c_1x^{10}+\frac{8\cdot 3}{9!}c_2x^9+\frac{7\cdot 2}{8!}c_3x^8+\frac{6\cdot 1}{7!}c_4x^7\right)+ab\left(\frac{12}{9!}c_1x^9+\frac{10}{8!}c_2x^8+\frac{8}{7!}c_3x^7+\frac{6}{6!}c_4x^6\right) \\
 & +b^2\left(\frac{c_1}{8!}x^8+\frac{c_2}{7!}x^7+\frac{c_3}{6!}x^6+\frac{c_4}{5!}x^5\right) \\
 & -a^3\left(\frac{14\cdot 9\cdot 4}{15!}c_1x^{15}+\frac{13\cdot 8\cdot 3}{14!}c_2x^{14}+\frac{12\cdot 7\cdot 2}{13!}c_3x^{13}+\frac{11\cdot 6\cdot 1}{12!}c_4x^{12}\right)-a^2b\left(\frac{192}{14!}c_1x^{14}+\frac{144}{13!}c_2x^{13}+\frac{102}{12!}c_3x^{12}+\frac{66}{11!}c_4x^{11}\right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -ab^2\left(\frac{24}{13!}c_1x^{13}+\frac{21}{12!}c_2x^{12}+\frac{18}{11!}c_3x^{11}+\frac{15}{10!}c_4x^{10}\right)-b^3\left(\frac{c_1}{12!}x^{12}+\frac{c_2}{11!}x^{11}+\frac{c_3}{10!}x^{10}+\frac{c_4}{9!}x^9\right) \\
 & +a^4\left(\frac{19\cdot 14\cdot 9\cdot 4}{20!}c_1x^{20}+\frac{18\cdot 13\cdot 8\cdot 3}{19!}c_2x^{19}+\frac{17\cdot 12\cdot 7\cdot 2}{18!}c_3x^{18}+\frac{16\cdot 11\cdot 6\cdot 1}{17!}c_4x^{17}\right) \\
 & +a^3b\left(\frac{3960}{19!}c_1x^{19}+\frac{2760}{18!}c_2x^{18}+\frac{1800}{17!}c_3x^{17}+\frac{1056}{16!}c_4x^{16}\right)+a^2b^2\left(\frac{600}{18!}c_1x^{18}+\frac{480}{17!}c_2x^{17}+\frac{372}{16!}c_3x^{16}+\frac{276}{15!}c_4x^{15}\right) \\
 & +ab^3\left(\frac{40}{17!}c_1x^{17}+\frac{36}{16!}c_2x^{16}+\frac{32}{15!}c_3x^{15}+\frac{28}{14!}c_4x^{14}\right)+b^4\left(\frac{c_1}{16!}x^{16}+\frac{c_2}{15!}x^{15}+\frac{c_3}{14!}x^{14}+\frac{c_4}{13!}x^{13}\right) \\
 & +\dots\dots\dots \\
 y'''' & =-(ax+b)\left(\frac{c_1}{3!}x^3+\frac{c_2}{2}x^2+c_3x+c_4\right) \\
 & +a^2x\left(\frac{4c_1}{8!}x^8+\frac{3c_2}{7!}x^7+\frac{2c_3}{6!}x^6+\frac{c_4}{5!}x^5\right)+ab\left(\frac{12}{8!}c_1x^8+\frac{10}{7!}c_2x^7+\frac{8}{6!}c_3x^6+\frac{6}{5!}c_4x^5\right)+b^2\left(\frac{c_1}{7!}x^7+\frac{c_2}{6!}x^6+\frac{c_3}{5!}x^5+\frac{c_4}{4!}x^4\right) \\
 & -a^3x\left(\frac{9\cdot 4}{13!}c_1x^{13}+\frac{8\cdot 3}{12!}c_2x^{12}+\frac{7\cdot 2}{11!}c_3x^{11}+\frac{6\cdot 1}{10!}c_4x^{10}\right)-a^2b\left(\frac{192}{13!}c_1x^{13}+\frac{144}{12!}c_2x^{12}+\frac{102}{11!}c_3x^{11}+\frac{66}{10!}c_4x^{10}\right) \\
 & -ab^2\left(\frac{24}{12!}c_1x^{12}+\frac{21}{11!}c_2x^{11}+\frac{18}{10!}c_3x^{10}+\frac{15}{9!}c_4x^9\right)-b^3\left(\frac{c_1}{11!}x^{11}+\frac{c_2}{10!}x^{10}+\frac{c_3}{9!}x^9+\frac{c_4}{8!}x^8\right) \\
 & +a^4x\left(\frac{14\cdot 9\cdot 4}{18!}c_1x^{18}+\frac{13\cdot 8\cdot 3}{17!}c_2x^{17}+\frac{12\cdot 7\cdot 2}{16!}c_3x^{16}+\frac{11\cdot 6\cdot 1}{15!}c_4x^{15}\right) \\
 & +a^3b\left(\frac{3960}{18!}c_1x^{18}+\frac{2760}{17!}c_2x^{17}+\frac{1800}{16!}c_3x^{16}+\frac{1056}{15!}c_4x^{15}\right)+a^2b^2\left(\frac{600}{17!}c_1x^{17}+\frac{480}{16!}c_2x^{16}+\frac{372}{15!}c_3x^{15}+\frac{276}{14!}c_4x^{14}\right) \\
 & +ab^3\left(\frac{40}{16!}c_1x^{16}+\frac{36}{15!}c_2x^{15}+\frac{32}{14!}c_3x^{14}+\frac{28}{13!}c_4x^{13}\right)+b^4\left(\frac{c_1}{15!}x^{15}+\frac{c_2}{14!}x^{14}+\frac{c_3}{13!}x^{13}+\frac{c_4}{12!}x^{12}\right) \\
 & +\dots\dots\dots
 \end{aligned} \tag{19}$$

B.2 $y''''+axy=0$ の解法

$$\begin{aligned}
 u(x) & =f(x)-ax\int_0^x K(x,t)u(t)dt \\
 u(x) & =f(x)-ax\int_0^x K(x,t)\left\{f(t)-at\int_0^t K(t,t_1)u(t_1)dt_1\right\}dt \\
 & =f(x)-ax\int_0^x K(x,t)f(t)dt-a^2x\int_0^x K(x,t)t\int_0^t K(t,t_1)u(t_1)dt_1dt \\
 & =f(x)-ax\int_0^x K(x,t)f(t)dt \\
 & \quad +a^2x\int_0^x K(x,t)t\int_0^t K(t,t_1)f(t_1)dt_1dt \\
 & \quad -a^3x\int_0^x K(x,t)t\int_0^t K(t,t_1)t_1\int_0^{t_1} K(t_1,t_2)f(t_2)dt_2dt_1dt \\
 & \quad +\dots\dots\dots \\
 & \quad +a^n x\int_0^x K(x,t)t\int_0^t K(t,t_1)t_1\int_0^{t_1} K(t_1,t_2)t_2\int_0^{t_2} K(t_2,t_3)t_3\dots\dots \\
 & \quad \dots\dots t_{n-2}\int_0^{t_{n-2}} K(t_{n-2},t_{n-1})(f(t_{n-1})dt_{n-1}\dots\dots dt_1dt+R_{n+1}(x)
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\text{こゝに } R_{n+1}(x)=a^n x\int_0^x K(x,t)t\int_0^t K(t,t_1)t_1\dots\dots\int_0^{t_{n-1}} K(t_{n-1},t_n)u(t_n)u(t_n)dt_n\dots\dots dt_1dt.$$

$$y''''+axy=0$$

$$\left. \begin{aligned}
 u(x) & =-ax\left(\frac{c_1}{3!}x^3+\frac{c_2}{2}x^2+c_3x+c_4\right)-ax\int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!}u(t)dt \\
 f(x) & =-ax\left(\frac{c_1}{3!}x^3+\frac{c_2}{2}x^2+c_3x+c_4\right), \quad K(x,t)=\frac{(x-t)^3}{3!}
 \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}
 A_1 & =-ax\int_0^x K(x,t)f(t)dt \\
 & =-ax\int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!}(-a)t\left(\frac{c_1}{3!}t^3+\frac{c_2}{2}t^2+c_3t+c_4\right)dt
 \end{aligned}$$

$$= a^2 x \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left(\frac{4c_1}{4!} t^4 + \frac{3c_2}{3!} t^3 + \frac{2c_3}{2!} t^2 + c_4 t \right) dt$$

$$= a^2 x \left(\frac{4c_1}{8!} x^8 + \frac{3c_2}{7!} x^7 + \frac{2c_3}{6!} x^6 + \frac{c_4}{5!} x^5 \right)$$

または

$$= a^2 \left(\frac{9 \cdot 4c_1}{9!} x^9 + \frac{8 \cdot 3c_2}{8!} x^8 + \frac{7 \cdot 2c_3}{7!} x^7 + \frac{6 \cdot 1c_4}{6!} x^6 \right) \quad (3)$$

$$D_2 = a^2 x \int_0^x K(x, t) \int_0^t K(t, t_1) f(t_1) dt_1 dt$$

$$= -a^3 x \int_0^x \frac{(x-t)^3 t}{3!} \int_0^t \frac{(t-t_1)^3 t_1}{3!} \left(\frac{4c_1}{4!} t_1^4 + \frac{3c_2}{3!} t_1^3 + \frac{2c_3}{2!} t_1^2 + c_4 t_1 \right) dt_1 dt$$

$$= -a^3 x \int_0^x \frac{(x-t)^3 t}{3!} \left(\frac{9 \cdot 4c_1}{9!} t^9 + \frac{8 \cdot 3c_2}{8!} t^8 + \frac{7 \cdot 2c_3}{7!} t^7 + \frac{6 \cdot 1c_4}{6!} t^6 \right) dt$$

$$= -a^3 \left(\frac{14 \cdot 9 \cdot 4 \cdot c_1}{14!} x^{14} + \frac{13 \cdot 8 \cdot 3 \cdot c_2}{13!} x^{13} + \frac{12 \cdot 7 \cdot 2 \cdot c_3}{12!} x^{12} + \frac{11 \cdot 6 \cdot 1 \cdot c_4}{11!} x^{11} \right)$$

+.....

$$D_n = (-a)^{n+1} \left\{ \frac{(5n+4)!!}{(5n+4)!} c_1 x^{5n+4} + \frac{(5n+3)!!}{(5n+3)!} c_2 x^{5n+3} + \frac{(5n+2)!!}{(5n+2)!} c_3 x^{5n+2} + \frac{(5n+1)!!}{(5n+1)!} c_4 x^{5n+1} \right\}$$

$$= (-a)^{n+1} \left\{ \frac{(5n-1)!!}{(5n+3)!} c_1 x^{5n+4} + \frac{(5n-2)!!}{(5n+2)!} c_2 x^{5n+3} + \frac{(5n-3)!!}{(5n+1)!} c_3 x^{5n+2} + \frac{(5n-4)!!}{(5n)!} c_4 x^{5n+1} \right\} \quad (4)$$

ゆえに、次のような解を得る。

$$u(x) = y''''$$

$$= \Sigma (-a)^{n+1} \left\{ \frac{(5n-1)!!}{(5n+3)!} c_1 x^{5n+4} + \frac{(5n-2)!!}{(5n+2)!} c_2 x^{5n+3} + \frac{(5n-3)!!}{(5n+1)!} c_3 x^{5n+2} + \frac{(5n-4)!!}{(5n)!} c_4 x^{5n+1} \right\} \quad (5)$$

註) $\left\{ \begin{array}{l} \text{ここで、!!は5とびの階乗とする 例えは } (5n-1)!! = 4 \cdot 9 \cdot 14 \cdot 19 \cdots (5n-1). \\ \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad \qquad (5n-2)!! = 3 \cdot 8 \cdot 13 \cdot 18 \cdots (5n-2). \\ \text{ただし、()内が0または負の場合はすべて1とする。} \end{array} \right.$

B.3 $y'''' + by = 0$ の解法

$$y'''' + by = 0 \quad (1)$$

$$y'''' = u(x) \quad (2)$$

$$u(x) = -b \left(\frac{c_1}{3!} x^3 + \frac{c_2}{2!} x^2 + c_3 x + c_4 \right) - b \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} u(t) dt \quad (3)$$

$$f(x) = -b \left(\frac{c_1}{3!} + \frac{c_2}{2!} x^2 + c_3 x + c_4 \right), \quad \lambda = -b, \quad K(x, t) = \frac{(x-t)^3}{3!}$$

式(2), (3)を式(1)に代入する。

$$u(x) = f(x) + D_1 + D_2 + D_3 + \cdots + D_n + \cdots$$

$$D_1 = \lambda \int_0^x K(x, t) f(t) dt$$

$$= \frac{b^2}{3!} \int_0^x (x-t)^3 \left(\frac{c_1}{3!} t^3 + \frac{c_2}{2} t^2 + c_3 t + c_4 \right) dt$$

$$= b^2 \left(\frac{c_1}{7!} x^7 + \frac{c_2}{6!} x^6 + \frac{c_3}{5!} x^5 + \frac{c_4}{4!} x^4 \right) \quad (4)$$

$$D_2 = -b^3 \left(\frac{c_1}{11!} x^{11} + \frac{c_2}{10!} x^{10} + \frac{c_3}{9!} x^9 + \frac{c_4}{8!} x^8 \right) \quad (5)$$

$$D_3 = b^4 \left(\frac{c_1}{15!} x^{15} + \frac{c_2}{14!} x^{14} + \frac{c_3}{13!} x^{13} + \frac{c_4}{12!} x^{12} \right) \quad (6)$$

.....

$$D_n = (-b)^{n+1} \left(\frac{c_1}{(4n+3)!} x^{4n+3} + \frac{c_2}{(4n+2)!} x^{4n+2} + \frac{c_3}{(4n+1)!} x^{4n+1} + \frac{c_4}{(4n)!} x^{4n} \right) \quad (7)$$

ゆえに、次のような解を得る。

$$u(x) = \Sigma (-b)^{n+1} \left\{ \frac{c_1}{(4n+3)!} x^{4n+3} + \frac{c_2}{(4n+2)!} x^{4n+2} + \frac{c_3}{(4n+1)!} x^{4n+1} + \frac{c_4}{(4n)!} x^{4n} \right\} = y'''' \quad (8)$$

$$y = \Sigma(-b)^n \left\{ \frac{c_1}{(4n+3)!} x^{4n+3} + \frac{c_2}{(4n+2)!} x^{4n+2} + \frac{c_3}{(4n+1)!} x^{4n+1} + \frac{c_4}{(4n)!} x^{4n} \right\} \quad (9)$$

B.4 $y'''' + ax^m y = 0$ の解法

$$y'''' + ax^m y = 0 \quad (1)$$

$$y'''' = u(x) \text{ とおくと} \quad (2)$$

$$y = \int_0^x u(x) dx^4 + \frac{c_1}{3!} x^3 + \frac{c_2}{2!} x^2 + c_3 x + c_4 \quad (3)$$

式(2)と(3)を式(1)に代入する

$$\left. \begin{aligned} u(x) &= -ax^m \left(\frac{c_1}{3!} x^3 + \frac{c_2}{2!} x^2 + c_3 x + c_4 \right) - ax^m \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} u(t) dt \\ f(x) &= -ax^m \left(\frac{c_1}{3!} x^3 + \frac{c_2}{2!} x^2 + c_3 x + c_4 \right), \quad K(x, t) = \frac{(x-t)^3}{3!} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} A_1 &= -ax^m \int_0^x K(x, t) f(t) dt \\ &= -ax^m \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} (-a)t^m \left(\frac{c_1}{3!} t^3 + \frac{c_2}{2!} t^2 + c_3 t + c_4 \right) dt = a^2 x^m \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left(\frac{c_1}{3!} t^{3+m} + \frac{c_2}{2!} t^{2+m} + c_3 t^{1+m} + c_4 t^m \right) dt \\ &= a^2 x^m \left\{ \frac{(3+m)!}{(7+m)! 3!} c_1 x^{7+m} + \frac{(2+m)!}{(6+m)! 2!} c_2 x^{6+m} + \frac{(1+m)!}{(5+m)!} c_3 x^{5+m} + \frac{m!}{(4+m)!} c_4 x^{4+m} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} A_2 &= a^2 x^m \int_0^x K(x, t) t^m \int_0^t K(t, t_1) f(t_1) dt_1 dt \\ &= -a^3 x^m \int_0^x \frac{(x-t)^3 t^m}{3!} \int_0^t \frac{(t-t_1)^3}{3!} \left(\frac{c_1}{3!} t_1^{3+m} + \frac{c_2}{2!} t_1^{2+m} + c_3 t_1^{1+m} + c_4 t_1^m \right) dt_1 dt \\ &= -a^3 x^m \int_0^x \frac{(x-t)^3 t^m}{3!} \left\{ \frac{(3+m)!}{(7+m)! 3!} c_1 t^{7+m} + \frac{(2+m)!}{(6+m)! 2!} c_2 t^{6+m} + \frac{(1+m)!}{(5+m)!} c_3 t^{5+m} + \frac{m!}{(4+m)!} c_4 t^{4+m} \right\} dt \\ &= -a^3 x^m \int_0^x \frac{(x-t)^3}{3!} \left\{ \frac{(3+m)!}{(7+m)! 3!} c_1 t^{7+2m} + \frac{(2+m)!}{(6+m)! 2!} c_2 t^{6+2m} + \frac{(1+m)!}{(5+m)!} c_3 t^{5+2m} + \frac{m!}{(4+m)!} c_4 t^{4+2m} \right\} dt \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} &= -a^3 x^{3m} \left\{ \frac{(7+2m)! (3+m)!}{(11+2m)! (7+m)! 3!} c_1 x^{11} + \frac{(6+2m)! (3+m)!}{(10+2m)! (6+m)! 2!} c_2 x^{10} \right. \\ &\quad \left. + \frac{(5+2m)! (2+m)!}{(9+2m)! (5+m)! 2!} c_3 x^9 + \frac{(4+2m)! (1+m)!}{(8+2m)! (4+m)!} c_4 x^8 \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

.....

$$\begin{aligned} A_n &= (-a)^{n+1} x^{(n+1)m} \left\{ \frac{c_1 (3+m)! (7+2m)! \cdots (1-4n+nm)!}{3! (7+m)! (11+2m)! \cdots (3+4n+nm)!} x^{3+4n} \right. \\ &\quad + \frac{c_2 (2+m)! (6+2m)! \cdots (2-4n+nm)!}{2! (6+m)! (10+2m)! \cdots (2+4n+nm)!} x^{2+4n} \\ &\quad + \frac{c_3 (1+m)! (5+2m)! \cdots (3-4n+nm)!}{(5+m)! (9+2m)! \cdots (1+4n+nm)!} x^{1+4n} \\ &\quad \left. + \frac{c_4 m! (4+2m)! \cdots (4-4n+nm)!}{(4+m)! (8+2m)! \cdots (4n+nm)!} x^{4n} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} u(x) = y'''' &= -ax^m \left(\frac{c_1}{3!} x^3 + \frac{c_2}{2!} x^2 + c_3 x + c_4 \right) + \Sigma (-a)^{n+1} x^{(n+1)m} \left\{ \frac{c_1 (3+m)! (7+2m)! \cdots (1-4n+nm)!}{3! (7+m)! (11+2m)! \cdots (3+4n+nm)!} x^{3+4n} \right. \\ &\quad + \frac{c_2 (2+m)! (6+2m)! \cdots (2-4n+nm)!}{2! (6+m)! (10+2m)! \cdots (2+4n+nm)!} x^{2+4n} + \frac{c_3 (1+m)! (5+2m)! \cdots (3-4n+nm)!}{(5+m)! (9+2m)! \cdots (1+4n+nm)!} x^{1+4n} \\ &\quad \left. + \frac{c_4 m! (4+2m)! \cdots (4-4n+nm)!}{(4+m)! (8+2m)! \cdots (4n+nm)!} x^{4n} \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

C. 杭の横抵抗の計算表

C.1 増加型地盤

$\frac{x}{L}$	$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-1)!!1215^n}{(5n+3)!}$	$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-2)!!1215^n}{(5n+2)!}$	$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-3)!!1215^n}{(5n+1)!}$	$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-4)!!1215^n}{(5n)!}$
0.2000E-01	0.16667E 00	0.50000E 00	0.10000E 01	0.10000E 01
0.4000E-01	0.16667E 00	0.50000E 00	0.10000E 01	0.10000E 01
0.6000E-01	0.16667E 00	0.50000E 00	0.10000E 01	0.99999E 00
0.8000E-01	0.16667E 00	0.50000E 00	0.99999E 00	0.99997E 00
0.1000E 00	0.16667E 00	0.49999E 00	0.99997E 00	0.99990E 00
0.1200E 00	0.16666E 00	0.49998E 00	0.99992E 00	0.99975E 00
0.1400E 00	0.16666E 00	0.49996E 00	0.99982E 00	0.99946E 00
0.1600E 00	0.16665E 00	0.49992E 00	0.99965E 00	0.99894E 00
0.1800E 00	0.16664E 00	0.49986E 00	0.99936E 00	0.99809E 00
0.2000E 00	0.16663E 00	0.49977E 00	0.99892E 00	0.99676E 00
0.2200E 00	0.16660E 00	0.49963E 00	0.99826E 00	0.99478E 00
0.2400E 00	0.16657E 00	0.49942E 00	0.99731E 00	0.99194E 00
0.2600E 00	0.16652E 00	0.49914E 00	0.99599E 00	0.98797E 00
0.2800E 00	0.16646E 00	0.49876E 00	0.99419E 00	0.98258E 00
0.3000E 00	0.16637E 00	0.49824E 00	0.99180E 00	0.97541E 00
0.3400E 00	0.16612E 00	0.49672E 00	0.98468E 00	0.95405E 00
0.3800E 00	0.16571E 00	0.49427E 00	0.97329E 00	0.91993E 00
0.4200E 00	0.16509E 00	0.49056E 00	0.95598E 00	0.86809E 00
0.4600E 00	0.16419E 00	0.48514E 00	0.93071E 00	0.79250E 00
0.5000E 00	0.16291E 00	0.47747E 00	0.89504E 00	0.68597E 00
0.5500E 00	0.16062E 00	0.46379E 00	0.83145E 00	0.49660E 00
0.6000E 00	0.15735E 00	0.44421E 00	0.74068E 00	0.22740E 00
0.6500E 00	0.15280E 00	0.41708E 00	0.61535E 00	-0.14207E 00
0.7000E 00	0.14665E 00	0.38053E 00	0.44732E 00	-0.63319E 00
0.8000E 00	0.12808E 00	0.27090E 00	-0.50832E -01	-0.20589E 01
0.9000E 00	0.98438E -01	0.98417E -01	-0.81532E 00	-0.41462E 01
0.1000E 01	0.54525E -01	-0.15081E 00	-0.18715E 01	-0.67737E 01

$\frac{x}{L}$	$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-1)!!1215^n}{(5n+2)!}$	$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-2)!!1215^n}{(5n+1)!}$	$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-3)!!1215^n}{(5n)!}$	$\Sigma(-1)^{n-1} \frac{(5n+1)!!1215^n}{(5n+4)!}$
0.2000E-01	0.50000E 00	0.10000E 01	0.10000E 01	-0.41667E -01
0.4000E-01	0.50000E 00	0.10000E 01	0.10000E 01	-0.41667E -01
0.6000E-01	0.50000E 00	0.10000E 01	0.99998E 00	-0.41667E -01
0.8000E-01	0.50000E 00	0.99998E 00	0.99993E 00	-0.41667E -01
0.1000E 00	0.49999E 00	0.99995E 00	0.99980E 00	-0.41666E -01
0.1200E 00	0.49998E 00	0.99987E 00	0.99950E 00	-0.41666E -01
0.1400E 00	0.49995E 00	0.99973E 00	0.99891E 00	-0.41666E -01
0.1600E 00	0.49990E 00	0.99947E 00	0.99788E 00	-0.41665E -01
0.1800E 00	0.49982E 00	0.99904E 00	0.99617E 00	-0.41663E -01
0.2000E 00	0.49969E 00	0.99838E 00	0.99352E 00	-0.41660E -01
0.2200E 00	0.49950E 00	0.99739E 00	0.98957E 00	-0.41656E -01
0.2400E 00	0.49923E 00	0.99597E 00	0.98388E 00	-0.41651E -01
0.2600E 00	0.49885E 00	0.99399E 00	0.97595E 00	-0.41643E -01
0.2800E 00	0.49834E 00	0.99129E 00	0.96517E 00	-0.41632E -01
0.3000E 00	0.49766E 00	0.98770E 00	0.95083E 00	-0.41618E -01
0.3400E 00	0.49562E 00	0.97702E 00	0.90811E 00	-0.41575E -01
0.3800E 00	0.49237E 00	0.95994E 00	0.83991E 00	-0.41508E -01
0.4200E 00	0.48742E 00	0.93399E 00	0.73632E 00	-0.41404E -01
0.4600E 00	0.48019E 00	0.89611E 00	0.58534E 00	-0.41253E -01
0.5000E 00	0.46997E 00	0.84266E 00	0.37274E 00	-0.41040E -01
0.5500E 00	0.45175E 00	0.74746E 00	-0.47542E -02	-0.40658E -01
0.6000E 00	0.42569E 00	0.61169E 00	-0.54031E 00	-0.40111E -01
0.6500E 00	0.38960E 00	0.42451E 00	-0.12733E 01	-0.39351E -01
0.7000E 00	0.34105E 00	0.17409E 00	-0.22436E 01	-0.38322E -01
0.8000E 00	0.19585E 00	-0.56451E 00	-0.50321E 01	-0.35203E -01
0.9000E 00	-0.31237E -01	-0.16854E 01	-0.90187E 01	-0.30191E -01
0.1000E 01	-0.35586E 00	-0.32014E 01	-0.13783E 02	-0.22679E -01

付 録

$\frac{x}{L}$	$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-1)!!1215^n}{(5n+1)!}$	$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-2)!!1215^n}{(5n)!}$	$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{(5n+2)!!1215^n}{(5n+4)!}$	$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{(5n+1)!!1215^n}{(5n+3)!}$
0.20000E-01	0.10000E 01	0.10000E 01	-0.83333E-01	-0.16667E 00
0.40000E-01	0.10000E 01	0.10000E 01	-0.83333E-01	-0.16667E 00
0.60000E-01	0.99999E 00	0.99998E 00	-0.83333E-01	-0.16667E 00
0.80000E-01	0.99998E 00	0.99990E 00	-0.83333E-01	-0.16667E 00
0.10000E 00	0.99993E 00	0.99970E 00	-0.83333E-01	-0.16666E 00
0.12000E 00	0.99983E 00	0.99924E 00	-0.83332E-01	-0.16666E 00
0.14000E 00	0.99964E 00	0.99837E 00	-0.83331E-01	-0.16666E 00
0.16000E 00	0.99929E 00	0.99682E 00	-0.83328E-01	-0.16665E 00
0.18000E 00	0.99872E 00	0.99426E 00	-0.83324E-01	-0.16663E 00
0.20000E 00	0.99784E 00	0.99028E 00	-0.83318E-01	-0.16661E 00
0.22000E 00	0.99652E 00	0.98435E 00	-0.83309E-01	-0.16657E 00
0.24000E 00	0.99463E 00	0.97582E 00	-0.83296E-01	-0.16652E 00
0.26000E 00	0.99198E 00	0.96392E 00	-0.83278E-01	-0.16645E 00
0.28000E 00	0.98839E 00	0.94775E 00	-0.83253E-01	-0.16636E 00
0.30000E 00	0.98361E 00	0.92625E 00	-0.83219E-01	-0.16623E 00
0.34000E 00	0.96936E 00	0.86219E 00	-0.83120E-01	-0.16585E 00
0.38000E 00	0.94660E 00	0.75994E 00	-0.82962E-01	-0.16524E 00
0.42000E 00	0.91201E 00	0.60469E 00	-0.82721E-01	-0.16431E 00
0.46000E 00	0.86154E 00	0.37853E 00	-0.82369E-01	-0.16295E 00
0.50000E 00	0.79036E 00	0.60303E-01	-0.81871E-01	-0.16103E 00
0.55000E 00	0.66365E 00	-0.50405E 00	-0.80981E-01	-0.15761E 00
0.60000E 00	0.48315E 00	-0.13031E 01	-0.79706E-01	-0.15270E 00
0.65000E 00	0.23466E 00	-0.23936E 01	-0.77933E-01	-0.14590E 00
0.70000E 00	-0.97069E 01	-0.38314E 01	-0.75535E-01	-0.13672E 00
0.80000E 00	-0.10704E 01	-0.79199E 01	-0.68277E-01	-0.10909E 00
0.90000E 00	-0.25304E 01	-0.13619E 02	-0.56637E-01	-0.65299E-01
0.10000E 01	-0.44614E 01	-0.20035E 02	-0.39261E-01	-0.12156E-02

$\frac{x}{L}$	$\Sigma(-1)^n \frac{(5n-1)!!1215^n}{(5n)!}$	$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{(5n+3)!!1215^n}{(5n+4)!}$	$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{(5n+2)!!1215^n}{(5n+3)!}$	$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{(5n+1)!!1215^n}{(5n+2)!}$
0.20000E-01	0.10000E 01	-0.12500E 00	-0.33333E 00	-0.50000E 00
0.40000E-01	0.10000E 01	-0.12500E 00	-0.33333E 00	-0.50000E 00
0.60000E-01	0.99997E 00	-0.12500E 00	-0.33333E 00	-0.50000E 00
0.80000E-01	0.99987E 00	-0.12500E 00	-0.33333E 00	-0.50000E 00
0.10000E 00	0.99960E 00	-0.12500E 00	-0.33333E 00	-0.49999E 00
0.12000E 00	0.99899E 00	-0.12500E 00	-0.33332E 00	-0.49996E 00
0.14000E 00	0.99782E 00	-0.12500E 00	-0.33331E 00	-0.49992E 00
0.16000E 00	0.99575E 00	-0.12499E 00	-0.33329E 00	-0.49985E 00
0.18000E 00	0.99235E 00	-0.12498E 00	-0.33325E 00	-0.49973E 00
0.20000E 00	0.98704E 00	-0.12497E 00	-0.33320E 00	-0.49954E 00
0.22000E 00	0.97913E 00	-0.12496E 00	-0.33312E 00	-0.49925E 00
0.24000E 00	0.96776E 00	-0.12494E 00	-0.33300E 00	-0.49885E 00
0.26000E 00	0.95190E 00	-0.12490E 00	-0.33283E 00	-0.49828E 00
0.28000E 00	0.93034E 00	-0.12486E 00	-0.33261E 00	-0.49751E 00
0.30000E 00	0.90167E 00	-0.12480E 00	-0.33231E 00	-0.49649E 00
0.34000E 00	0.81629E 00	-0.12464E 00	-0.33142E 00	-0.49343E 00
0.38000E 00	0.68002E 00	-0.12436E 00	-0.32999E 00	-0.48855E 00
0.42000E 00	0.47320E 00	-0.12395E 00	-0.32783E 00	-0.48113E 00
0.46000E 00	0.17206E 00	-0.12335E 00	-0.32466E 00	-0.47030E 00
0.50000E 00	-0.25134E 00	-0.12249E 00	-0.32019E 00	-0.45500E 00
0.55000E 00	-0.10013E 01	-0.12097E 00	-0.31220E 00	-0.42772E 00
0.60000E 00	-0.20611E 01	-0.11878E 00	-0.30077E 00	-0.38875E 00
0.65000E 00	-0.35031E 01	-0.11575E 00	-0.28492E 00	-0.33490E 00
0.70000E 00	-0.53964E 01	-0.11164E 00	-0.26355E 00	-0.26262E 00
0.80000E 00	-0.10723E 02	-0.99233E-01	-0.19934E 00	-0.47688E-01
0.90000E 00	-0.17950E 02	-0.79375E-01	-0.97943E-01	0.28427E 00
0.10000E 01	-0.25538E 02	-0.49844E-01	0.49509E-01	0.74831E 00

C.2 一定型地盤

$\frac{x}{L}$	$\Sigma(-1)^n \frac{324^n}{(4n+4)!}$	$\Sigma(-1)^n \frac{324^n}{(4n+3)!}$	$\Sigma(-1)^n \frac{324^n}{(4n+2)!}$	$\Sigma(-1)^n \frac{324^n}{(4n+1)!}$
0.20000 E -01	0.41667 E -01	0.16667 E 00	0.50000 E 00	0.10000 E 01
0.40000 E -01	0.41667 E -01	0.16667 E 00	0.50000 E 00	0.99999 E 00
0.60000 E -01	0.41667 E -01	0.16667 E 00	0.49999 E 00	0.99997 E 00
0.80000 E -01	0.41666 E -01	0.16666 E 00	0.49998 E 00	0.99989 E 00
0.10000 E 00	0.41666 E -01	0.16666 E 00	0.49995 E 00	0.99973 E 00
0.12000 E 00	0.41665 E -01	0.16665 E 00	0.49991 E 00	0.99944 E 00
0.14000 E 00	0.41664 E -01	0.16664 E 00	0.49983 E 00	0.99896 E 00
0.16000 E 00	0.41661 E -01	0.16662 E 00	0.49971 E 00	0.99823 E 00
0.18000 E 00	0.41658 E -01	0.16660 E 00	0.49953 E 00	0.99717 E 00
0.20000 E 00	0.41654 E -01	0.16656 E 00	0.49928 E 00	0.99568 E 00
0.22000 E 00	0.41648 E -01	0.16652 E 00	0.49895 E 00	0.99368 E 00
0.24000 E 00	0.41640 E -01	0.16645 E 00	0.49851 E 00	0.99105 E 00
0.26000 E 00	0.41630 E -01	0.16637 E 00	0.49794 E 00	0.98767 E 00
0.28000 E 00	0.41617 E -01	0.16627 E 00	0.49724 E 00	0.98342 E 00
0.30000 E 00	0.41602 E -01	0.16615 E 00	0.49636 E 00	0.97815 E 00
0.34000 E 00	0.41559 E -01	0.16581 E 00	0.49399 E 00	0.96397 E 00
0.38000 E 00	0.41499 E -01	4.16533 E 00	0.49063 E 00	0.94383 E 00
0.42000 E 00	0.41417 E -01	0.16467 E 00	0.48603 E 00	0.91626 E 00
0.46000 E 00	0.41307 E -01	0.16379 E 00	0.47991 E 00	0.87969 E 00
0.50000 E 00	0.41165 E -01	0.16266 E 00	0.47199 E 00	0.83238 E 00
0.55000 E 00	0.40933 E -01	0.16081 E 00	0.45906 E 00	0.75535 E 00
0.60000 E 00	0.40629 E -01	0.15838 E 00	0.44217 E 00	0.65493 E 00
0.65000 E 00	0.40239 E -01	0.15528 E 00	0.42059 E 00	0.52722 E 00
0.70000 E 00	0.39750 E -01	0.15138 E 00	0.39362 E 00	0.36833 E 00
0.80000 E 00	0.38412 E -01	0.14078 E 00	0.32051 E 00	-0.57760 E -01
0.90000 E 00	0.36488 E -01	0.12561 E 00	0.21710 E 00	-0.64848 E 00
0.10000 E 01	0.33849 E -01	0.10499 E 00	0.78540 E -01	-0.14161 E 01

$\frac{x}{L}$	$\Sigma(-1)^n \frac{324^n}{(4n)!}$	$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{324^{n+1}}{(4n+4)!}$	$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{324^{n+1}}{(4n+3)!}$	$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{324^{n+1}}{(4n+2)!}$
0.20000 E -01	0.10000 E 01	-0.13500 E 02	-0.54000 E 02	-0.16200 E 03
0.40000 E -01	0.99997 E 00	-0.13500 E 02	-0.54000 E 02	-0.16200 E 03
0.60000 E -01	0.99983 E 00	-0.13500 E 02	-0.54000 E 02	-0.16200 E 03
0.80000 E -01	0.99945 E 00	-0.13500 E 02	-0.53999 E 02	-0.16199 E 03
0.10000 E 00	0.99865 E 00	-0.13500 E 02	-0.53998 E 02	-0.16199 E 03
0.12000 E 00	0.99720 E 00	-0.13499 E 02	-0.53996 E 02	-0.16197 E 03
0.14000 E 00	0.99481 E 00	-0.13499 E 02	-0.53992 E 02	-0.16194 E 03
0.16000 E 00	0.99115 E 00	-0.13498 E 02	-0.53986 E 02	-0.16190 E 03
0.18000 E 00	0.98583 E 00	-0.13497 E 02	-0.53978 E 02	-0.16185 E 03
0.20000 E 00	0.97841 E 00	-0.13496 E 02	-0.53967 E 02	-0.16177 E 03
0.22000 E 00	0.96839 E 00	-0.13494 E 02	-0.53951 E 02	-0.16166 E 03
0.24000 E 00	0.95524 E 00	-0.13491 E 02	-0.53931 E 02	-0.16152 E 03
0.26000 E 00	0.93836 E 00	-0.13488 E 02	-0.53905 E 02	-0.16133 E 03
0.28000 E 00	0.91712 E 00	-0.13484 E 02	-0.53872 E 02	-0.16110 E 03
0.30000 E 00	0.89082 E 00	-0.13479 E 02	-0.53831 E 02	-0.16082 E 03
0.34000 E 00	0.82006 E 00	-0.13465 E 02	-0.53722 E 02	-0.16005 E 03
0.38000 E 00	0.71964 E 00	-0.13446 E 02	-0.53566 E 02	-0.15896 E 03
0.42000 E 00	0.58244 E 00	-0.13419 E 02	-0.53353 E 02	-0.15747 E 03
0.46000 E 00	0.40076 E 00	-0.13384 E 02	-0.53069 E 02	-0.15549 E 03
0.50000 E 00	0.16640 E 00	-0.13338 E 02	-0.52702 E 02	-0.15292 E 03
0.55000 E 00	-0.21359 E 00	-0.13262 E 02	-0.52101 E 02	-0.14874 E 03
0.60000 E 00	-0.70602 E 00	-0.13164 E 02	-0.51315 E 02	-0.14326 E 03
0.65000 E 00	-0.13273 E 01	-0.13038 E 02	-0.50309 E 02	-0.13627 E 03
0.70000 E 00	-0.20922 E 01	-0.12879 E 02	-0.49048 E 02	-0.12753 E 03
0.80000 E 00	-0.40977 E 01	-0.12445 E 02	-0.45611 E 02	-0.10384 E 03
0.90000 E 00	-0.67566 E 01	-0.11822 E 02	-0.40699 E 02	-0.70340 E 02
0.10000 E 01	-0.99669 E 01	-0.10967 E 02	-0.34015 E 02	-0.25447 E 02

$\frac{x}{L}$	$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{324^{n+1}}{(4n+1)!}$	$\Sigma(-1)^{n+1} \frac{324^{n+1}}{(4n)!}$
0.20000 E-01	-0.32400 E 03	-0.32400 E 03
0.40000 E-01	-0.32400 E 03	-0.32399 E 03
0.60000 E-01	-0.32399 E 03	-0.32394 E 03
0.80000 E-01	-0.32396 E 03	-0.32382 E 03
0.10000 E 00	-0.32391 E 03	-0.32356 E 03
0.12000 E 00	-0.32382 E 03	-0.32309 E 03
0.14000 E 00	-0.32366 E 03	-0.32232 E 03
0.16000 E 00	-0.32343 E 03	-0.32113 E 03
0.18000 E 00	-0.32308 E 03	-0.31941 E 03
0.20000 E 00	-0.32260 E 03	-0.31700 E 03
0.22000 E 00	-0.32195 E 03	-0.31376 E 03
0.24000 E 00	-0.32110 E 03	-0.30950 E 03
0.26000 E 00	-0.32000 E 03	-0.30403 E 03
0.28000 E 00	-0.31863 E 03	-0.29715 E 03
0.30000 E 00	-0.31692 E 03	-0.28863 E 03
0.34000 E 00	-0.31233 E 03	-0.26570 E 03
0.38000 E 00	-0.30580 E 03	-0.23316 E 03
0.42000 E 00	-0.29687 E 03	-0.18871 E 03
0.46000 E 00	-0.28502 E 03	-0.12985 E 03
0.50000 E 00	-0.26969 E 03	-0.53915 E 02
0.55000 E 00	-0.24473 E 03	0.69203 E 02
0.60000 E 00	-0.21220 E 03	0.22875 E 03
0.65000 E 00	-0.17082 E 03	0.43004 E 03
0.70000 E 00	-0.11934 E 03	0.67789 E 03
0.80000 E 00	0.18714 E 02	0.13276 E 04
0.90000 E 00	0.21011 E 03	0.21891 E 04
0.10000 E 01	0.45883 E 03	0.32293 E 04

註) E 00= $\times 10^0$
 例えは E 03= $\times 10^3$
 E -02= $\times 10^{-2}$

C.3 $x=10^m$ における y とその微分式

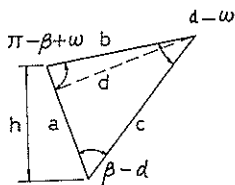
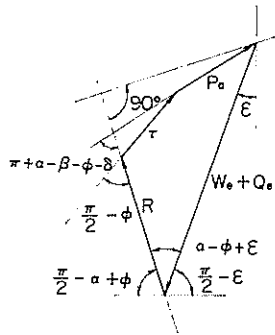
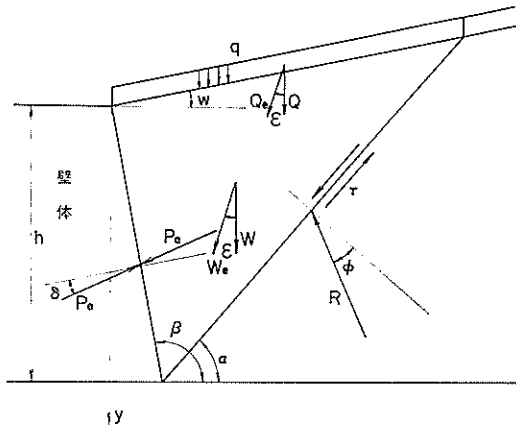
$$\begin{aligned}
 y &= c_1(166.667 - 9920.6a - 1984.12b + 57813a^2 + 25052ab + 2505.2b^2 - 78721a^3 - 53980a^2b - 11470.7ab^2 \\
 &\quad - 764.72b^3 + 37042a^4 + 35231a^3b + 11744a^2b^2 + 1644.1ab^3 + 82.206b^4) \\
 &\quad + c_2(50 - 5952.4a - 1388.9b + 50104a^2 + 25052ab + 2755.7b^2 - 87717a^3 - 68824a^2b - 16059ab^2 - 1147.07b^3 \\
 &\quad + 49964a^4 + 54021a^3b + 23840a^2b^2 + 2959.4ab^3 + 156.19b^4) \\
 &\quad + c_3(10 - 2777.8a - 833.33b + 35073a^2 + 22046ab + 2755.7b^2 - 80295a^3 - 78001a^2b - 20647ab^2 - 1605.9b^3 \\
 &\quad + 55900a^4 + 73986a^3b + 30581a^2b^2 + 4998.1ab^3 + 281.15b^4) \\
 &\quad + c_4(1 - 833.33a - 416.67b + 16534a^2 + 16534ab + 2480.2b^2 - 50471a^3 - 75707a^2b - 24089ab^2 - 2087.7b^3 \\
 &\quad + 43405a^4 + 86810a^3b + 43109a^2b^2 + 7872.1ab^3 + 477.95b^4) \\
 y' &= c_1(50 - 7936.5a - 1388.9b + 75156a^2 + 30063ab + 2755.7b^2 - 141697a^3 - 91766a^2b - 18353ab^2 - 1147.07b^3 \\
 &\quad + 85196a^4 + 77509a^3b + 24662a^2b^2 + 3288.3ab^3 + 156.19b^4) \\
 &\quad + c_2(10 - 4166.7a - 833.33b + 60125a^2 + 27557ab + 2755.7b^2 - 149119a^3 - 110119a^2b - 24089ab^2 - 1605.9b^3 \\
 &\quad + 109921a^4 + 113444a^3b + 47680a^2b^2 + 5622.9ab^3 + 281.15b^4) \\
 &\quad + c_3(1 - 1666.7a - 416.67b + 38580a^2 + 22046ab + 2480.2b^2 - 128472a^3 - 117001a^2b - 28906ab^2 - 2087.7b^3 \\
 &\quad + 117390a^4 + 147971a^3b + 58103a^2b^2 + 8996.7ab^3 + 477.95b^4) \\
 &\quad + c_4(-416.67a - 166.67b + 16534a^2 + 14880.9ab + 1984.1b^2 - 75707a^3 - 105989a^2b - 31315ab^2 - 2505.2b^3 \\
 &\quad + 86810a^4 + 164939a^3b + 77596a^2b^2 + 13383ab^3 + 764.72b^4) \\
 y'' &= c_1(10 - 5555.6a - 833.33b + 90188a^2 + 33069ab + 2755.7b^2 - 240886a^3 - 146826a^2b - 27530ab^2 - 1605.9b^3 \\
 &\quad + 187430a^4 + 162769a^3b + 49324a^2b^2 + 6247.7ab^3 + 281.15b^4) \\
 &\quad + c_2(1 - 2500a - 416.67b + 66138a^2 + 27557ab + 2480.2b^2 - 238592a^3 - 165179a^2b - 33724ab^2 - 2087.7b^3 \\
 &\quad + 230835a^4 + 226890a^3b + 90591a^2b^2 + 10121ab^3 + 477.95b^4) \\
 &\quad + c_3(-833.33a - 166.67b + 38580a^2 + 19841ab + 1984.1b^2 - 192709a^3 - 163802a^2b - 37578ab^2 - 2505.2b^3 \\
 &\quad + 234781a^4 + 281146a^3b + 104586a^2b^2 + 15294ab^3 + 764.72b^4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &+c_4(-166.67a-50b+14881a^2+11905ab+1388.9b^2-105990a^3-137787a^2b-37578ab^2-2755.7b^3 \\
 &+164939a^4+296890a^2b+131914a^2b^2+21412ab^3+1147.1b^4) \\
 y''' = &c_1(1-3333.3a-416.67b+99206a^2+33069ab+2480.2b^2-385417a^3-220238a^2b-38542ab^2-2087.7b^3 \\
 &+393604a^4+325537a^2b+93715a^2b^2+11246ab^3+477.95b^4) \\
 &+c_2(-1250a-166.67b+66138a^2+24802ab+1984.1b^2-357887a^3-231250a^2b-43841ab^2-2505.2b^3 \\
 &+461671a^4+431090a^2b+163065a^2b^2+17206ab^3+764.72b^4) \\
 &+c_3(-333.33a-50b+34722a^2+15873ab+1388.9b^2-269792a^3-212943a^2b-45094ab^2-2755.7b^3 \\
 &+446085a^4+506062a^2b+177797a^2b^2+24471ab^3+1147.1b^4) \\
 &+c_4(-50a-10b+11905a^2+8333.3ab+833.33b^2-137787a^3-165344a^2b-41336ab^2-2755.7b^3 \\
 &+296890a^4+504713a^2b+211062a^2b^2+32118ab^3+1605.9b^4)
 \end{aligned}$$

D. 地震時土圧式

D.1 地震時主動土圧式

1.1 地震時主動土圧の一般式



$$\begin{aligned}
 \frac{a}{\sin(\alpha-\omega)} &= \frac{b}{\sin(\beta-\alpha)} = \frac{c}{\sin(\pi-\beta+\omega)} \\
 a &= \frac{h}{\sin \beta} \\
 b &= \frac{h \sin(\beta-\alpha)}{\sin \beta \sin(\alpha-\omega)} \\
 \Delta abc &= \frac{1}{2} ad = \frac{1}{2} a^2 \frac{\sin(\beta-\alpha)}{\sin(\alpha-\omega)} \sin(\beta-\omega) \\
 c &= \frac{h}{\sin \beta} \frac{\sin(\pi-\beta+\omega)}{\sin(\alpha-\omega)}
 \end{aligned}$$

$$(W_e + Q_e) \sin(\alpha - \phi + \varepsilon) = P_a \sin(\pi + \alpha - \beta - \phi - \delta) + \tau \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right)$$

$$W_e = \frac{\gamma_e}{2} \left(\frac{h}{\sin \beta}\right)^2 \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin(\alpha - \omega)} \sin(\beta - \omega), \quad Q_e = q_e \frac{h \sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta \sin(\alpha - \omega)}, \quad \tau = c \frac{h}{\sin \beta} \frac{\sin(\beta - \omega)}{\sin(\alpha - \omega)}$$

$$P_a = \frac{h}{\sin \beta} \frac{\left\{ \frac{\gamma_e h \sin(\beta - \omega)}{2 \sin \beta} + q_e \right\} \sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) - c \sin(\beta - \omega) \cos \phi}{\sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)}$$

$$\frac{\partial P_a}{\partial y} \sin \beta = p_a = \left\{ \frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \frac{\sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - \alpha)}{\sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)} - \frac{c \sin(\beta - \omega) \cos \phi}{\sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)}$$

崩壊角 α をもとめるために $\frac{\partial p_a}{\partial \alpha} = 0$ とおく,

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_a}{\partial \alpha} = & \left[\left\{ \frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \{ \cos(\alpha - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) \right. \\ & \left. - \sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \cos(\beta - \alpha) \right] \sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega) \\ & - \left[\left\{ \frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) - c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \right] \{ -\cos(\beta - \alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega) \\ & + \sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \cos(\alpha - \omega) \} \div \{ \sin(\alpha - \omega) \sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \}^2 = 0 \end{aligned}$$

ここに,

$$\begin{aligned} \cos(\alpha - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) - \sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \cos(\beta - \alpha) &= \sin(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) \\ -\cos(\beta - \alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega) + \sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \cos(\alpha - \omega) &= \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) \\ 0 = \sin(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) \sin(\alpha - \omega) \sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) - \sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) \\ &+ \frac{c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e} \end{aligned}$$

ここに,

$$\begin{aligned} \sin(\alpha - \omega) \sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) &= \frac{1}{2} \{ \cos(\alpha - \omega - \beta + \alpha - \phi - \delta) - \cos(\alpha - \omega + \beta - \alpha + \phi + \delta) \} \\ &= \frac{1}{2} \{ \cos(2\alpha - \omega - \beta - \phi - \delta) - \cos(\beta - \omega + \phi + \delta) \} \\ \sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) &= \frac{1}{2} \{ \cos(\alpha - \phi + \varepsilon - \beta + \alpha) - \cos(\alpha - \phi + \varepsilon + \beta - \alpha) \} \\ &= \frac{1}{2} \{ \cos(2\alpha - \phi - \beta + \varepsilon) - \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \} \\ 0 = \sin(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) \{ \cos(2\alpha - \beta - \omega - \phi - \delta) - \cos(\beta - \omega + \phi + \delta) \} \\ &- \sin(\beta - 2\alpha + \omega + \phi + \delta) \{ \cos(2\alpha - \phi - \beta + \varepsilon) - \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \} \\ &+ \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e} \end{aligned}$$

ここに,

$$\begin{aligned} \sin(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) \cos(2\alpha - \beta - \omega - \phi - \delta) - \sin(\beta - 2\alpha + \omega + \phi + \delta) \cos(2\alpha - \phi - \beta + \varepsilon) \\ = \frac{1}{2} \{ \sin(-\omega - \delta - \varepsilon) + \sin(2\beta - 4\alpha + 2\phi + \delta + \omega - \varepsilon) - \sin(\omega + \delta + \varepsilon) \\ - \sin(2\beta - 4\alpha + 2\phi + \delta + \omega - \varepsilon) \} = -\sin(\omega + \delta + \varepsilon) \\ 0 = -\sin(\omega + \delta + \varepsilon) - \sin(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) \cos(\beta - \omega + \phi + \delta) + \sin(\beta - 2\alpha + \omega + \phi + \delta) \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \\ + \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\beta - 2\alpha + \omega + \phi + \delta)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e} \end{aligned}$$

ここに, $\beta - 2\alpha + \phi = \mu$ とおく,

$$\sin(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) = \sin(\mu - \varepsilon) = \sin \mu \cos \varepsilon - \cos \mu \sin \varepsilon$$

$$\begin{aligned} \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) &= \sin(\mu + \delta + \omega) = \sin \mu \cos(\delta + \omega) + \sin(\delta + \omega) \cos \mu \\ \sin(\omega + \delta + \varepsilon) &= \cos \mu \left(\cos(\beta - \omega + \phi + \delta) \sin \varepsilon + \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \sin(\delta + \omega) + \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\delta + \omega)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e} \right) \\ &\quad - \sin \mu \left(\cos(\beta - \omega + \phi + \delta) \cos \varepsilon - \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \cos(\delta + \omega) - \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \cos(\delta + \omega)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e} \right) \end{aligned}$$

ここに,

$$A = \sin(\omega + \delta + \varepsilon)$$

$$B = \cos(\beta - \omega + \phi + \delta) \cos \varepsilon - \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \cos(\delta + \omega) - \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \cos(\delta + \omega)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e}$$

$$C = \cos(\beta - \omega + \phi + \delta) \sin \varepsilon + \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \sin(\delta + \omega) + \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\delta + \omega)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e}$$

$$A = C \cos \mu - B \sin \mu$$

$A \sec \mu = C - B \tan \mu$ これを2乗して, $\sec^2 \mu = \tan^2 \mu + 1$ から,

$$\tan^2 \mu - \frac{2BC}{B^2 - A^2} \tan \mu + \frac{C^2 - A^2}{B^2 - A^2} = 0$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC + A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \text{ ただし, } 2\alpha = \beta + \phi - \mu$$

1.2 壁面鉛直, 地表面傾斜の地震時主働土圧式

1) 一般土の場合 $\beta = 90^\circ$

$$p_a = (\gamma y \cos \omega + q) \frac{\sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \cos \alpha}{\cos \varepsilon \cos(\alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega)} - \frac{c \cos \phi \cos \omega}{\cos(\alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega)}$$

$$A = \sin(\delta + \varepsilon + \omega)$$

$$B = -\sin(\phi + \delta - \omega) \cos \varepsilon - \sin(\phi - \varepsilon) \cos(\delta + \omega) - \frac{2c \cos \varepsilon \cos \phi \cos(\delta + \omega) \cos \omega}{\gamma y \cos \omega + q}$$

$$C = -\sin(\phi + \delta - \omega) \sin \varepsilon + \sin(\phi - \varepsilon) \sin(\delta + \omega) + \frac{2c \cos \varepsilon \cos \phi \sin(\delta + \omega) \cos \omega}{\gamma y \cos \omega + q}$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC + A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \text{ ただし, } 2\alpha = 90^\circ + \phi - \mu$$

2) 砂質土の場合 $\beta = 90^\circ, c = 0$

$$p_a = (\gamma y \cos \omega + q) \frac{\sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \cos \alpha}{\cos \varepsilon \cos(\alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega)}, \quad K_a = \frac{\sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \cos \alpha}{\cos \varepsilon \cos(\alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega)}$$

$$A = \sin(\delta + \varepsilon + \omega), \quad B = -\sin(\phi + \delta - \omega) \cos \varepsilon - \sin(\phi - \varepsilon) \cos(\delta + \omega)$$

$$C = -\sin(\phi + \delta - \omega) \sin \varepsilon + \sin(\phi - \varepsilon) \sin(\delta + \omega)$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC + A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \text{ ただし, } 2\alpha = 90^\circ + \phi - \mu$$

3) 粘性土の場合 $\beta = 90^\circ, \phi = 0, \delta = 0,$

$$p_a = (\gamma y \cos \omega + q) \frac{\sin(\alpha + \varepsilon)}{\cos \varepsilon \sin(\alpha - \omega)} - \frac{c \cos \omega}{\cos \alpha \sin(\alpha - \omega)}$$

$$A = \sin(\varepsilon + \omega)$$

$$B = \cos \varepsilon \sin \omega + \sin \varepsilon \cos \omega - \frac{2c \cos \varepsilon \cos^2 \omega}{\gamma y \cos \omega + q}$$

$$C = \frac{2c \cos \varepsilon \sin \omega \cos \omega}{\gamma y \cos \omega + q}$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC + A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \text{ ただし, } 2\alpha = 90^\circ - \mu$$

1.3 壁面鉛直，地表面水平の地震時主動土圧式

1) 一般土の場合 $\beta=90^\circ, \omega=0$

$$p_a = (\gamma y + q) \frac{\sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \cos \alpha}{\cos \varepsilon \cos(\alpha - \phi - \delta) \sin \alpha} - \frac{c \cos \phi}{\cos(\alpha - \phi - \delta) \sin \alpha}$$

$$A = \sin(\delta + \varepsilon)$$

$$B = -\sin(\phi + \delta) \cos \varepsilon - \sin(\phi - \varepsilon) \cos \delta - \frac{2c \cos \varepsilon \cos \phi \cos \delta}{\gamma y + q}$$

$$C = -\sin(\phi + \delta) \sin \varepsilon + \sin(\phi - \varepsilon) \sin \delta + \frac{2c \cos \varepsilon \cos \phi \sin \delta}{\gamma y + q}$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC + A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \quad \text{ただし, } 2\alpha = 90^\circ + \phi - \mu$$

2) 砂質土の場合 $\beta=90^\circ, \omega=0, c=0$

$$p_a = (\gamma y + q) \frac{\sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \cos \alpha}{\cos \varepsilon \cos(\alpha - \phi - \delta) \sin \alpha} = K_a(\gamma y + q), \quad K_a = \frac{\sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \cos \alpha}{\cos \varepsilon \cos(\alpha - \phi - \delta) \sin \alpha}$$

$$A = \sin(\delta + \varepsilon)$$

$$B = -\sin(\phi + \delta) \cos \varepsilon - \sin(\phi - \varepsilon) \cos \delta$$

$$C = -\sin(\phi + \delta) \sin \varepsilon + \sin(\phi - \varepsilon) \sin \delta$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC + A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \quad \text{ただし, } 2\alpha = 90^\circ + \phi - \mu$$

3) 粘性土の場合 $\beta=90^\circ, \omega=0, \phi=0, \delta=0$

$$p_a = (\gamma y + q) \frac{\sin(\alpha + \varepsilon)}{\cos \varepsilon \sin \alpha} - \frac{c}{\cos \alpha \sin \alpha}$$

$$A = \sin \varepsilon$$

$$B = \sin \varepsilon - \frac{2c \cos \varepsilon}{\gamma y + q}$$

$$C = 0$$

$$\mu = \tan^{-1} \sqrt{\frac{A^2}{B^2 - A^2}}, \quad \text{ただし, } 2\alpha = 90^\circ - \mu$$

D.2 地震時受働土圧式

2.1 地震時受働土圧の一般式

$$(W_e + Q_e) \sin(\alpha + \phi - \varepsilon) + \tau \sin\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = P_p \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta)$$

$$W_e = \frac{\gamma_e}{2} \left(\frac{h}{\sin \beta}\right)^2 \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin(\alpha - \omega)} \sin(\beta - \omega), \quad Q_e = q_e \frac{h}{\sin \beta} \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin(\alpha - \omega)}, \quad \tau = c \frac{h}{\sin \beta} \frac{\sin(\beta - \omega)}{\sin(\alpha - \omega)}$$

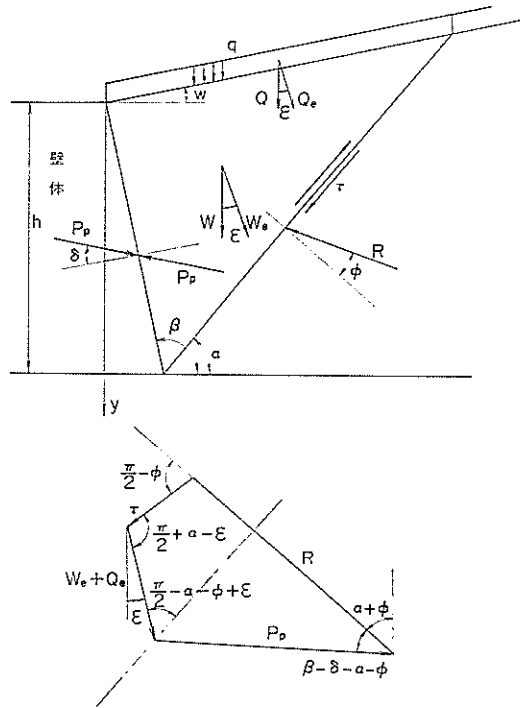
$$P_p = \frac{h}{\sin \beta} \frac{\left\{ \frac{\gamma_e h \sin(\beta - \omega)}{2 \sin \beta} + q_e \right\} \sin(\alpha + \phi - \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) + c \sin(\beta - \omega) \cos \phi}{\sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega)}$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial y} \sin \beta = p_p = \frac{\left\{ \frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \sin(\alpha + \phi - \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) + c \sin(\beta - \omega) \cos \phi}{\sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega)}$$

崩壊角 α をもとめるため, $\frac{\partial p_p}{\partial \alpha} = 0$ とおくと,

$$\begin{aligned} \frac{\partial p_p}{\partial \alpha} = & \left[\left\{ \frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \{ \cos(\alpha + \phi - \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) \right. \\ & - \sin(\alpha + \phi - \varepsilon) \cos(\beta - \alpha) \} \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega) \\ & - \left. \left[\left\{ \frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \sin(\alpha + \phi - \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) + c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \right] \{ -\cos(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega) \right. \right. \\ & \left. \left. + \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \cos(\alpha - \omega) \right\} \right] \div \{ \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega) \}^2 = 0 \end{aligned}$$

付 録



ここに,

$$\begin{aligned} \cos(\alpha + \phi - \epsilon) \sin(\beta - \alpha) - \sin(\alpha + \phi - \epsilon) \cos(\beta - \alpha) &= \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) \\ -\cos(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega) + \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \cos(\alpha - \omega) &= \sin(\beta - 2\alpha + \omega - \phi - \delta) \\ 0 &= \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega) - \sin(\alpha + \phi - \epsilon) \sin(\beta - \alpha) \sin(\beta - 2\alpha + \omega - \phi - \delta) \\ &\quad - \frac{c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\beta - 2\alpha + \omega - \phi - \delta)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e} \end{aligned}$$

ここに,

$$\begin{aligned} \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega) &= \frac{1}{2} \{ \cos(2\alpha - \omega - \beta + \phi + \delta) - \cos(\beta - \omega - \phi - \delta) \} \\ -\sin(\alpha + \phi - \epsilon) \sin(\beta - \alpha) &= \frac{1}{2} \{ \cos(\beta + \phi - \epsilon) - \cos(2\alpha - \beta + \phi - \epsilon) \} \\ 0 &= \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) \{ \cos(2\alpha - \omega - \beta + \phi + \delta) - \cos(\beta - \omega - \phi - \delta) \} \\ &\quad + \{ \cos(\beta + \phi - \epsilon) - \cos(2\alpha - \beta + \phi - \epsilon) \} \sin(\beta - 2\alpha + \omega - \phi - \delta) \\ &\quad - \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\beta - 2\alpha + \omega - \phi - \delta)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e} \end{aligned}$$

ここに,

$$\begin{aligned} \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) \cos(2\alpha - \omega - \beta + \phi + \delta) - \cos(2\alpha - \beta + \phi - \epsilon) \sin(\beta - 2\alpha + \omega - \phi - \delta) &= -\sin(\omega - \delta - \epsilon) \\ 0 &= -\sin(\omega - \delta - \epsilon) - \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) \cos(\beta - \omega - \phi - \delta) + \cos(\beta + \phi - \epsilon) \sin(\beta - 2\alpha + \omega - \phi - \delta) \\ &\quad - \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\beta - 2\alpha + \omega - \phi - \delta)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e} \end{aligned}$$

ここに, $\beta - 2\alpha - \phi = \mu$ とおき, 整理する。

$$\sin(\mu + \epsilon) = \sin \mu \cos \epsilon + \cos \mu \sin \epsilon, \quad \sin(\mu + \omega - \delta) = \sin \mu \cos(\omega - \delta) + \cos \mu \sin(\omega - \delta)$$

$$\begin{aligned} \sin(\omega - \delta - \varepsilon) &= -(\sin \mu \cos \varepsilon + \cos \mu \sin \varepsilon) \cos(\beta - \omega - \phi - \delta) \\ &\quad + \{\sin \mu \cos(\omega - \delta) + \cos \mu \sin(\omega - \delta)\} \cos(\beta + \phi - \varepsilon) \\ &\quad \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \{\sin \mu \cos(\omega - \delta) + \cos \mu \sin(\omega - \delta)\}}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e} \\ &= -\cos \mu \left\{ \cos(\beta - \omega - \phi - \delta) \sin \varepsilon - \cos(\beta + \phi - \varepsilon) \sin(\omega - \delta) + \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\omega - \delta)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e} \right\} \\ &\quad - \sin \mu \left\{ \cos(\beta - \omega - \phi - \delta) \cos \varepsilon - \cos(\beta + \phi - \varepsilon) \cos(\omega - \delta) + \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \cos(\omega - \delta)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e} \right\} \end{aligned}$$

ここに,

$$A = -\sin(\delta + \varepsilon - \omega)$$

$$B = \cos(\beta - \omega - \phi - \delta) \cos \varepsilon - \cos(\beta + \phi - \varepsilon) \cos(\omega - \delta) + \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \cos(\omega - \delta)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e}$$

$$C = \cos(\beta - \omega - \phi - \delta) \sin \varepsilon - \cos(\beta + \phi - \varepsilon) \sin(\omega - \delta) + \frac{2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\omega - \delta)}{\frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e}$$

$$A = -C \cos \mu - B \sin \mu, \quad 2 \text{ 乗して, } A^2 = C^2 \cos^2 \mu + B^2 \sin^2 \mu + 2BC \cos \mu \sin \mu$$

$$A^2 \sec^2 \mu = C^2 + B^2 \tan^2 \mu + 2BC \tan \mu, \quad \tan^2 \mu + \frac{2BC}{B^2 - A^2} \tan \mu + \frac{C^2 - A^2}{B^2 - A^2} = 0$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC - A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \quad \text{ただし, } 2\alpha = \beta - \phi - \mu$$

2.2 壁面鉛直, 地表面傾斜の地震時受働土圧式

1) 一般土の場合 $\beta = 90^\circ$

$$p_p = (\gamma y \cos \omega + q) \frac{\sin(\alpha + \phi - \varepsilon) \cos \alpha}{\cos \varepsilon \cos(\alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)} + \frac{c \cos \phi \cos \omega}{\cos(\alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)}$$

$$A = -\sin(\delta + \varepsilon - \omega)$$

$$B = \sin(\phi + \delta + \omega) \cos \varepsilon + \sin(\phi - \varepsilon) \cos(\delta - \omega) + \frac{2c \cos \varepsilon \cos \phi \cos(\delta - \omega) \cos \omega}{\gamma y \cos \omega + q}$$

$$C = \sin(\phi + \delta + \omega) \sin \varepsilon - \sin(\phi - \varepsilon) \sin(\delta - \omega) - \frac{2c \cos \varepsilon \cos \phi \sin(\delta - \omega) \cos \omega}{\gamma y \cos \omega + q}$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC - A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \quad \text{ただし, } 2\alpha = 90^\circ - \phi - \mu$$

2) 砂質土の場合 $\beta = 90^\circ, c = 0$

$$p_p = (\gamma y \cos \omega + q) \frac{\sin(\alpha + \phi - \varepsilon) \cos \alpha}{\cos \varepsilon \cos(\alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)}, \quad K_p = \frac{\sin(\alpha + \phi - \varepsilon) \cos \alpha}{\cos \varepsilon \cos(\alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)}$$

$$A = -\sin(\delta + \varepsilon - \omega)$$

$$B = \sin(\phi + \delta + \omega) \cos \varepsilon + \sin(\phi - \varepsilon) \cos(\delta - \omega)$$

$$C = \sin(\phi + \delta + \omega) \sin \varepsilon - \sin(\phi - \varepsilon) \sin(\delta - \omega)$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC - A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \quad \text{ただし, } 2\alpha = 90^\circ - \phi - \mu$$

3) 粘性土の場合 $\beta = 90^\circ, \phi = 0, \delta = 0$

$$p_p = (\gamma y \cos \omega + q) \frac{\sin(\alpha - \varepsilon)}{\cos \varepsilon \sin(\alpha - \omega)} + \frac{c \cos \omega}{\cos \alpha \sin(\alpha - \omega)}$$

$$A = -\sin(\varepsilon - \omega)$$

$$B = \cos \varepsilon \sin \omega - \sin \varepsilon \cos \omega + \frac{2c \cos \varepsilon \cos^2 \omega}{\gamma y \cos \omega + q}$$

$$C = \frac{2c \cos \varepsilon \sin \omega \cos \omega}{\gamma y \cos \omega + q}$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC - A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \text{ ただし, } 2\alpha = 90^\circ - \mu$$

2.3 壁面鉛直，地表面水平の地震時受働土圧式

1) 一般土の場合 $\beta = 90^\circ, \omega = 0$

$$p_p = (\gamma y + q) \frac{\sin(\alpha + \phi - \varepsilon) \cos \alpha}{\cos \varepsilon \cos(\alpha + \phi + \delta) \sin \alpha} + \frac{c \cos \phi}{\cos(\alpha + \phi + \delta) \sin \alpha}$$

$$A = -\sin(\delta + \varepsilon)$$

$$B = \sin(\phi + \delta) \cos \varepsilon + \sin(\phi - \varepsilon) \cos \delta + \frac{2c \cos \varepsilon \cos \phi \cos \delta}{\gamma y + q}$$

$$C = \sin(\phi + \delta) \sin \varepsilon - \sin(\phi - \varepsilon) \sin \delta - \frac{2c \cos \varepsilon \cos \phi \sin \delta}{\gamma y + q}$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC - A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \text{ ただし, } 2\alpha = 90^\circ - \phi - \mu$$

2) 砂質土の場合 $\beta = 90^\circ, \omega = 0, c = 0$

$$p_p = (\gamma y + q) \frac{\sin(\alpha + \phi - \varepsilon) \cos \alpha}{\cos \varepsilon \cos(\alpha + \phi + \delta) \sin \alpha}, \quad K_p = \frac{\sin(\alpha + \phi - \varepsilon) \cos \alpha}{\cos \varepsilon \cos(\alpha + \phi + \delta) \sin \alpha}$$

$$A = -\sin(\delta + \varepsilon)$$

$$B = \sin(\phi + \delta) \cos \varepsilon + \sin(\phi - \varepsilon) \cos \delta$$

$$C = \sin(\phi + \delta) \sin \varepsilon - \sin(\phi - \varepsilon) \sin \delta$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC - A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \text{ ただし, } 2\alpha = 90^\circ - \phi - \mu$$

3) 粘性土の場合 $\beta = 90^\circ, \omega = 0, \phi = 0, \delta = 0$

$$p_p = (\gamma y + q) \frac{\sin(\alpha - \varepsilon)}{\cos \varepsilon \sin \alpha} + \frac{c}{\cos \alpha \sin \alpha}$$

$$A = -\sin \varepsilon$$

$$B = -\sin \varepsilon + \frac{2c \cos \varepsilon}{\gamma y + q}$$

$$C = 0$$

$$\mu = \tan^{-1} \sqrt{\frac{A^2}{B^2 - A^2}}, \text{ ただし, } 2\alpha = 90^\circ - \mu$$

D.3 壁面付着力を考慮した地震時主働土圧式

3.1 壁面付着力を考慮した地震時主働土圧の一般式

$$(W_e + Q_e) \sin(\alpha - \phi + \varepsilon) = P_a \sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) + S \cos(\beta - \alpha + \phi) + \tau \cos \phi$$

$$W_e = \frac{\gamma_e}{2} \left(\frac{h}{\sin \beta} \right)^2 \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin(\alpha - \omega)} \sin(\beta - \omega)$$

$$Q_e = q_e \frac{h \sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta \sin(\alpha - \omega)}, \quad S = \frac{\lambda c h}{\sin \beta}, \quad \tau = \frac{c h \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta \sin(\alpha - \omega)}, \quad 0 \leq \lambda \leq 1$$

$$P_a = \frac{1}{\sin(\beta - \alpha + \phi + \delta)} \{ (W_e + Q_e) \sin(\alpha - \phi + \varepsilon) - S \cos(\beta - \alpha + \phi) - \tau \cos \phi \}$$

$$= \frac{h}{\sin \beta \sin(\beta - \alpha + \phi + \delta) \sin(\alpha - \omega)} \left[\left\{ \frac{\gamma_e h}{2 \sin \beta} \sin(\beta - \omega) + q_e \right\} \sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) - \lambda c \cos(\beta - \alpha + \phi) \sin(\alpha - \omega) - c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \right]$$

$$\frac{\partial P_a}{\partial y} \sin \beta = p_a = \left[\left\{ \frac{\gamma_e y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) - \lambda c \cos(\beta - \alpha + \phi) \sin(\alpha - \omega) \right]$$

$$\begin{aligned} \sin(\alpha - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) &= \frac{1}{2} \{ \cos(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) - \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \} \\ \cos(\beta + \phi - \alpha) \sin(\alpha - \omega) &= \frac{1}{2} \{ \sin(\beta + \phi - \omega) - \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \omega) \} \\ 0 &= [\bar{A} \sin(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) - \lambda c \cos(\beta - 2\alpha + \phi + \omega)] \{ \cos(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) - \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) \} \\ &\quad - [\bar{A} \{ \cos(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) - \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \} - \lambda c \{ \sin(\beta + \phi - \omega) - \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \omega) \} \\ &\quad - 2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi] \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) \\ 0 &= \bar{A} \sin(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) \cos(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) - \lambda c \cos(\beta - 2\alpha + \phi + \omega) \cos(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) \\ &\quad - \bar{A} \sin(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) + \lambda c \cos(\beta - 2\alpha + \phi + \omega) \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) \\ &\quad - \bar{A} \cos(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) + \lambda c \sin(\beta + \phi - \omega) \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) \\ &\quad - \lambda c \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \omega) \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) \\ &\quad + \bar{A} \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) + 2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) \end{aligned}$$

こゝに、

$$\begin{aligned} \bar{A} \{ \sin(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) \cos(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) - \cos(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) \} &= -\bar{A} \sin(\delta + \omega + \varepsilon) \\ -\lambda c \cos(\beta - 2\alpha + \phi + \omega) \cos(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) - \lambda c \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \omega) \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) &= -\lambda c \cos \delta \\ \lambda c \cos(\beta - 2\alpha + \phi + \omega) \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) &= \frac{\lambda c}{2} \{ \cos(2\beta - 2\alpha + 2\phi + \delta) + \cos(2\alpha + \delta - 2\omega) \} \dots\dots\dots \textcircled{1} \\ \lambda c \sin(\beta + \phi - \omega) \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) &= -\frac{\lambda c}{2} \{ \cos(2\beta - 2\alpha + 2\phi + \delta) - \cos(2\alpha - \delta - 2\omega) \} \dots\dots\dots \textcircled{2} \end{aligned}$$

$$\textcircled{1} + \textcircled{2} = \frac{\lambda c}{2} \{ \cos(2\alpha + \delta - 2\omega) + \cos(2\alpha - \delta - 2\omega) \} = \lambda c \cos(2\alpha - 2\omega) \cos \delta$$

$$\begin{aligned} 0 &= -\bar{A} \sin(\delta + \omega + \varepsilon) - \bar{A} \sin(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) + \bar{A} \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) \\ &\quad - \lambda c \cos \delta + \lambda c \cos(2\alpha - 2\omega) \cos \delta + 2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) \\ \sin(\delta + \omega + \varepsilon) + \frac{\lambda c}{\bar{A}} \cos \delta &= -\sin(\beta - 2\alpha + \phi - \varepsilon) \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) + \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) \\ &\quad + \frac{c}{\bar{A}} \{ \lambda \cos(2\alpha - 2\omega) \cos \delta + 2 \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\beta - 2\alpha + \phi + \delta + \omega) \} \end{aligned}$$

こゝで、 $\mu = \beta - 2\alpha + \phi$ とおくと、

$$\begin{aligned} \sin(\delta + \omega + \varepsilon) + \frac{\lambda c}{\bar{A}} \cos \delta &= -\sin(\mu - \varepsilon) \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) + \sin(\mu + \delta + \omega) \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \\ &\quad + \frac{c}{\bar{A}} \{ \lambda \cos(\beta + \phi - 2\omega - \mu) + 2 \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\mu + \delta + \omega) \} \\ &= -(\sin \mu \cos \varepsilon - \cos \mu \sin \varepsilon) \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) \\ &\quad + \{ \sin \mu \cos(\delta + \omega) + \cos \mu \sin(\delta + \omega) \} \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \\ &\quad + \frac{c}{\bar{A}} [\{ \lambda \cos(\beta + \phi - 2\omega) \cos \mu + \lambda \sin(\beta + \phi - 2\omega) \sin \mu \} \cos \delta \\ &\quad + 2 \sin(\beta - \omega) \cos \phi \{ \sin \mu \cos(\delta + \omega) + \cos \mu \sin(\delta + \omega) \}] \\ &= -\sin \mu \{ \cos \varepsilon \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) - \cos(\delta + \omega) \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \\ &\quad - \frac{c}{\bar{A}} [\lambda \sin(\beta + \phi - 2\omega) \cos \delta + 2 \sin(\beta - \omega) \cos \phi \cos(\delta + \omega) \}] \\ &\quad + \cos \mu \{ \sin \varepsilon \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) + \sin(\delta + \omega) \cos(\beta - \phi + \varepsilon) \\ &\quad + \frac{c}{\bar{A}} [\lambda \cos(\beta + \phi - 2\omega) \cos \delta + 2 \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\delta + \omega) \}] \end{aligned}$$

$$A = \sin(\delta + \omega + \varepsilon) + \frac{\lambda c}{\bar{A}} \cos \delta$$

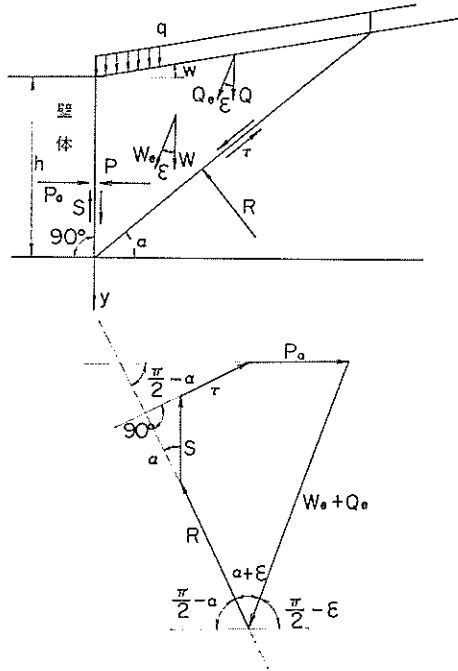
$$B = \cos \varepsilon \cos(\beta + \phi + \delta - \omega) - \cos(\delta + \omega) \cos(\beta - \phi + \varepsilon)$$

$$- \frac{c}{\bar{A}} \{ \lambda \sin(\beta + \phi - 2\omega) \cos \delta + 2 \sin(\beta - \omega) \cos \phi \cos(\delta + \omega) \}$$

$$C = \sin \varepsilon \cos (\beta + \phi + \delta - \omega) + \sin (\delta + \omega) \cos (\beta - \phi + \varepsilon) \\ + \frac{c}{A} \{ \lambda \cos (\beta + \phi - 2\omega) \cos \delta + 2 \sin (\beta - \omega) \cos \phi \sin (\delta + \omega) \}$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC + A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \text{ ただし, } \mu = \beta - 2\alpha + \phi, \bar{A} = \frac{\gamma_e y \sin (\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e$$

3.2 壁面鉛直，地表面傾斜，壁面付着力を考慮した地震時主働土圧式



$$(W_e + Q_e) \sin (\alpha + \varepsilon) + P_a \cos \alpha + \tau + S \sin \alpha$$

$$W_e = \frac{\gamma_e h^2}{2} \frac{\cos \alpha \cos \omega}{\sin (\alpha - \omega)}, \quad Q_e = q_e h \frac{\cos \alpha}{\sin (\alpha - \omega)}, \quad \tau = ch \frac{\cos \omega}{\sin (\alpha - \omega)}, \quad S = \lambda ch, \quad 0 \leq \lambda \leq 1,$$

$$P_a = \frac{1}{\cos \alpha} \{ (W_e + Q_e) \sin (\alpha + \varepsilon) - \tau - S \sin \alpha \} \\ = \frac{h}{\cos \alpha} \left\{ \left(\frac{\gamma_e h}{2} \cos \omega + q_e \right) \frac{\cos \alpha \sin (\alpha + \varepsilon)}{\sin (\alpha - \omega)} - \frac{c \cos \omega}{\sin (\alpha - \omega)} - \lambda c \sin \alpha \right\} \\ = \frac{h}{\sin (\alpha - \omega) \cos \alpha} \left\{ \left(\frac{\gamma_e h}{2} \cos \omega + q_e \right) \cos \alpha \sin (\alpha + \varepsilon) - c \cos \omega - \lambda c \sin \alpha \sin (\alpha - \omega) \right\}$$

$$\frac{\partial P_a}{\partial y} = p_a = \frac{(\gamma_e y \cos \omega + q_e) \cos \alpha \sin (\alpha + \varepsilon) - c \cos \omega - \lambda c \sin \alpha \sin (\alpha - \omega)}{\sin (\alpha - \omega) \cos \alpha}$$

ここに,

$$A = \sin (\omega + \varepsilon) + \frac{\lambda c}{(\gamma_e y \cos \omega + q_e)}$$

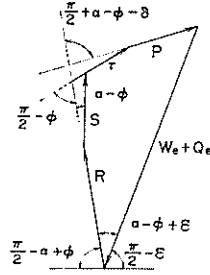
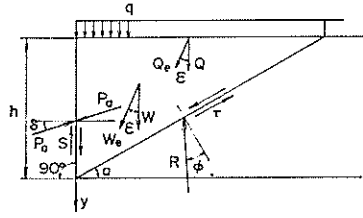
$$B = \cos \varepsilon \sin \omega + \sin \varepsilon \cos \omega - \frac{c}{(\gamma_e y \cos \omega + q_e)} \{ 2 \cos^2 \omega + \lambda \cos 2\omega \}$$

$$C = \frac{c}{(\gamma_e y \cos \omega + q_e)} \{ 2 \sin \omega \cos \omega + \lambda \sin 2\omega \} = \frac{(1 + \lambda) c \sin 2\omega}{(\gamma_e y \cos \omega + q_e)}$$

$$A = -B \sin \mu + C \cos \mu$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC + A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2} \text{ ただし, } \mu = 90^\circ - 2\alpha, \gamma_e y + q_e = \frac{\gamma y + q}{\cos \varepsilon}$$

3.3 壁面鉛直，地表面水平，壁面付着力を考慮した地震時主働土圧式



$$(W_e + Q_e) \sin(\alpha - \phi + \epsilon) = P_a \cos(-\alpha + \phi + \delta) + \tau \cos \phi + S \sin(\alpha - \phi)$$

$$W_e = \frac{\gamma_e h^2}{2} \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}, \quad Q_e = q_e h \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}, \quad \tau = c \frac{h}{\sin \alpha}, \quad S = \lambda c h, \quad 0 \leq \lambda \leq 1$$

$$P_a = \frac{1}{\cos(-\alpha + \phi + \delta)} \{ (W_e + Q_e) \sin(\alpha - \phi + \epsilon) - \tau \cos \phi - S \sin(\alpha - \phi) \}$$

$$= \frac{h}{\sin \alpha \cos(-\alpha + \phi + \delta)} \left\{ \left(\frac{\gamma_e h}{2} + q_e \right) \cos \alpha \sin(\alpha - \phi + \epsilon) - c \cos \phi - \lambda c \sin \alpha \sin(\alpha - \phi) \right\}$$

$$\frac{\partial P_a}{\partial y} = p_a = \frac{(\gamma_e y + q_e) \cos \alpha \sin(\alpha - \phi + \epsilon) - c \cos \phi - \lambda c \sin \alpha \sin(\alpha - \phi)}{\sin \alpha \cos(-\alpha + \phi + \delta)}$$

ここに、

$$A = \sin(\delta + \epsilon) + \frac{\lambda c}{(\gamma_e y + q_e)} \cos \delta$$

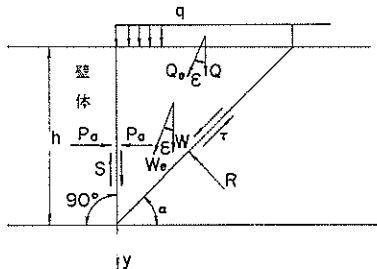
$$B = -\cos \epsilon \sin(\phi + \delta) - \cos \delta \sin(\phi - \epsilon) - \frac{(2 + \lambda)c}{(\gamma_e y + q_e)} \cos \phi \cos \delta$$

$$C = -\sin \epsilon \sin(\phi + \delta) + \sin \delta \sin(\phi - \epsilon) + \frac{c}{(\gamma_e y + q_e)} (2 \cos \phi \sin \delta - \lambda \sin \phi \cos \delta)$$

$$\tan \mu = \frac{BC + A\sqrt{B^2 - A^2} + C^2}{B^2 - A^2} \quad \text{ただし、} \quad \mu = 90^\circ - 2\alpha + \phi, \quad (\gamma_e y + q_e) = \frac{(\gamma y + q)}{\cos \epsilon}$$

[粘性土の場合] $\phi = 0, \delta = 0$

$$p_a = \frac{(\gamma_e y + q_e) \cos \alpha \sin(\alpha + \epsilon) - c(1 + \lambda \sin^2 \alpha)}{\sin \alpha \cos \alpha} = \frac{(\gamma y + q) \sin(\alpha + \epsilon)}{\cos \epsilon \sin \alpha} - \frac{2c(1 + \lambda \sin^2 \alpha)}{\sin 2\alpha}$$



$$A = \sin \varepsilon + \frac{\lambda c \cos \varepsilon}{(\gamma y + q)}$$

$$B = \sin \varepsilon - \frac{(2 + \lambda) c \cos \varepsilon}{(\gamma y + q)}$$

$$C = 0$$

$$\mu = \tan^{-1} \sqrt{\frac{A^2}{B^2 - A^2}}, \text{ ただし, } \mu = 90^\circ - 2\alpha$$

D.4 壁面付着力を考慮した地震時受働土圧式

4.1 壁面付着力を考慮した地震時受働土圧の一般式

$$(W_e + Q_e) \sin(\alpha + \phi - \varepsilon) + S \cos(\beta - \alpha - \phi) + \tau \cos \phi = P_p \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta)$$

$$W_e = \frac{\gamma c}{2} \left(\frac{h}{\sin \beta} \right)^2 \frac{\sin(\beta - \alpha)}{\sin(\alpha - \omega)} \sin(\beta - \omega), \quad Q_e = q_e \frac{h \sin(\beta - \alpha)}{\sin \beta \sin(\alpha - \omega)},$$

$$S = \frac{\lambda ch}{\sin \beta}, \quad \tau = \frac{ch \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta \sin(\alpha - \omega)}, \quad 0 \leq \lambda \leq 1,$$

$$P_p = \frac{1}{\sin(\beta - \alpha - \phi - \delta)} \{ (W_e + Q_e) \sin(\alpha + \phi - \varepsilon) + S \cos(\beta - \alpha - \phi) + \tau \cos \phi \}$$

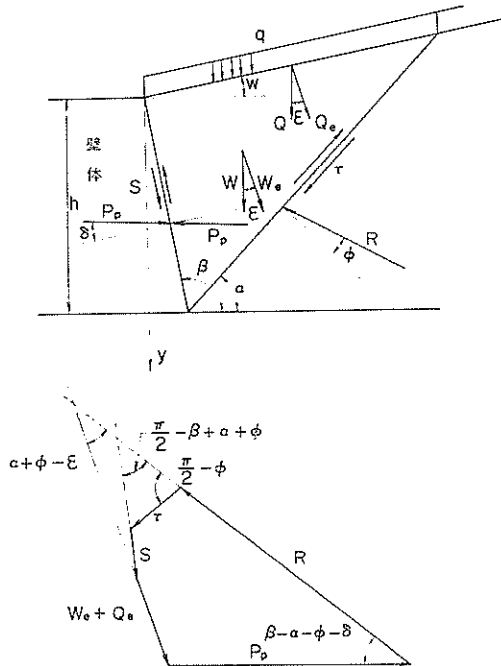
$$= \frac{h}{\sin \beta \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega)} \left\{ \left(\frac{\gamma c h}{2 \sin \beta} \sin(\beta - \omega) + q_e \right) \sin(\alpha + \phi - \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) \right.$$

$$\left. + \lambda c \cos(\beta - \alpha - \phi) \sin(\alpha - \omega) + c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \right\}$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial y} \sin \beta = p_p = \left[\left\{ \frac{\gamma c y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \sin(\alpha + \phi - \varepsilon) \sin(\beta - \alpha) \right.$$

$$\left. + \lambda c \cos(\beta - \alpha - \phi) \sin(\alpha - \omega) + c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \right] \div \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega)$$

崩壊角をもとめるため $\frac{\partial p_p}{\partial \alpha} = 0$ とおくと、



$$\begin{aligned} \frac{\partial p_p}{\partial \alpha} = & \left[\left\{ \frac{\gamma \epsilon y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \{ \cos(\alpha + \phi - \epsilon) \sin(\beta - \alpha) - \sin(\alpha + \phi - \epsilon) \cos(\beta - \alpha) \} \right. \\ & \left. + \lambda c \{ \sin(\beta - \alpha - \phi) \sin(\alpha - \omega) + \cos(\beta - \alpha - \phi) \cos(\alpha - \omega) \} \right] \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega) \\ & - \left[\left\{ \frac{\gamma \epsilon y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} \sin(\alpha + \phi - \epsilon) \sin(\beta - \alpha) + \lambda c \cos(\beta - \alpha - \phi) \sin(\alpha - \omega) + c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \right] \\ & \times \{ -\cos(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega) + \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \cos(\alpha - \omega) \} \div \{ \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega) \}^2 = 0 \end{aligned}$$

ここに,

$$\left\{ \frac{\gamma \epsilon y \sin(\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e \right\} = \bar{A}$$

$$\begin{aligned} \cos(\alpha + \phi - \epsilon) \sin(\beta - \alpha) - \sin(\alpha + \phi - \epsilon) \cos(\beta - \alpha) &= \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) \\ \sin(\beta - \alpha - \phi) \sin(\alpha - \omega) + \cos(\beta - \alpha - \phi) \cos(\alpha - \omega) &= \cos(\beta - 2\alpha - \phi + \omega) \\ -\cos(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega) + \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \cos(\alpha - \omega) &= \sin(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) \\ 0 &= \{ \bar{A} \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) + \lambda c \cos(\beta - 2\alpha - \phi + \omega) \} \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega) \\ &\quad - \{ \bar{A} \sin(\alpha + \phi - \epsilon) \sin(\beta - \alpha) + \lambda c \cos(\beta - \alpha - \phi) \sin(\alpha - \omega) + c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \} \sin(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) \end{aligned}$$

ここに,

$$\begin{aligned} \sin(\beta - \alpha - \phi - \delta) \sin(\alpha - \omega) &= \frac{1}{2} \{ \cos(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) - \cos(\beta - \phi - \delta - \omega) \} \\ \sin(\alpha + \phi - \epsilon) \sin(\beta - \alpha) &= \frac{1}{2} \{ \cos(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) - \cos(\beta + \phi - \epsilon) \} \\ \cos(\beta - \alpha - \phi) \sin(\alpha - \omega) &= \frac{1}{2} \{ \sin(\beta - \phi - \omega) - \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \omega) \} \\ 0 &= \{ \bar{A} \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) + \lambda c \cos(\beta - 2\alpha - \phi + \omega) \} \{ \cos(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) - \cos(\beta - \phi - \delta - \omega) \} \\ &\quad - [\bar{A} \{ \cos(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) - \cos(\beta + \phi - \epsilon) \} + \lambda c \{ \sin(\beta - \phi - \omega) - \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \omega) \} \\ &\quad + 2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi] \sin(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) \\ 0 &= \bar{A} \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) \cos(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) + \lambda c \cos(\beta - 2\alpha - \phi + \omega) \cos(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) \\ &\quad - \bar{A} \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) \cos(\beta - \phi - \delta - \omega) - \lambda c \cos(\beta - 2\alpha - \phi + \omega) \cos(\beta - \phi - \delta - \omega) \\ &\quad - \bar{A} \cos(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) \sin(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) - \lambda c \sin(\beta - \phi - \omega) \sin(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) \\ &\quad + \lambda c \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \omega) \sin(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) \\ &\quad + \bar{A} \cos(\beta + \phi - \epsilon) \sin(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) - 2c \sin(\beta - \omega) \cos \phi \sin(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) \end{aligned}$$

ここに,

$$\begin{aligned} \bar{A} \{ \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) \cos(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) - \cos(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) \sin(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) \} &= \bar{A} \sin(\delta - \omega + \epsilon) \\ \lambda c \{ \cos(\beta - 2\alpha - \phi + \omega) \cos(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) + \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \omega) \sin(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) \} &= \lambda c \cos \delta \\ -\lambda c \cos(\beta - 2\alpha - \phi + \omega) \cos(\beta - \phi - \delta - \omega) &= -\frac{\lambda c}{2} \{ \cos(2\beta - 2\alpha - 2\phi - \delta) + \cos(2\alpha - \delta - 2\omega) \} \dots \dots \dots \textcircled{1} \\ -\lambda c \sin(\beta - \phi - \omega) \sin(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) &= -\frac{\lambda c}{2} \{ \cos(2\alpha + \delta - 2\omega) - \cos(2\beta - 2\alpha - 2\phi - \delta) \} \dots \dots \dots \textcircled{2} \\ \textcircled{1} + \textcircled{2} &= -\frac{\lambda c}{2} \{ \cos(2\alpha - \delta - 2\omega) + \cos(2\alpha + \delta - 2\omega) \} = -\lambda c \cos(2\alpha - 2\omega) \cos \delta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 0 &= \bar{A} \sin(\delta - \omega + \epsilon) - \bar{A} \sin(\beta - 2\alpha - \phi + \epsilon) \cos(\beta - \phi - \delta - \omega) + \bar{A} \cos(\beta + \phi - \epsilon) \sin(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) \\ &\quad + \lambda c \cos \delta - \lambda c \cos(2\alpha - 2\omega) \cos \delta - 2c \sin(\beta - \omega) \sin(\beta - 2\alpha - \phi - \delta + \omega) \cos \phi \end{aligned}$$

ここで, $\mu = \beta - 2\alpha - \phi$ とおくと,

$$\begin{aligned} -\sin(\delta - \omega + \epsilon) - \frac{\lambda c}{\bar{A}} \cos \delta &= -\sin(\mu + \epsilon) \cos(\beta - \phi - \delta - \omega) + \sin(\mu - \delta + \omega) \cos(\beta + \phi - \epsilon) \\ &\quad - \frac{c}{\bar{A}} \{ \lambda \cos(\mu - \beta + \phi + 2\omega) \cos \delta + 2 \sin(\mu - \delta + \omega) \sin(\beta - \omega) \cos \phi \} \\ &= -\{ \sin \mu \cos \epsilon + \cos \mu \sin \epsilon \} \cos(\beta - \phi - \delta - \omega) \\ &\quad + \{ \sin \mu \cos(\delta - \omega) - \cos \mu \sin(\delta - \omega) \} \cos(\beta + \phi - \epsilon) \end{aligned}$$

付 録

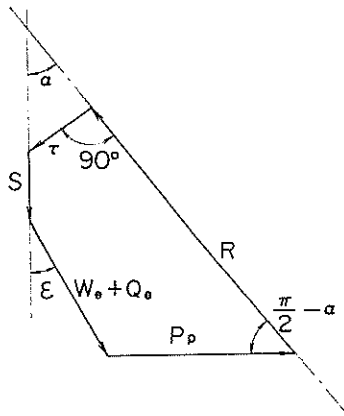
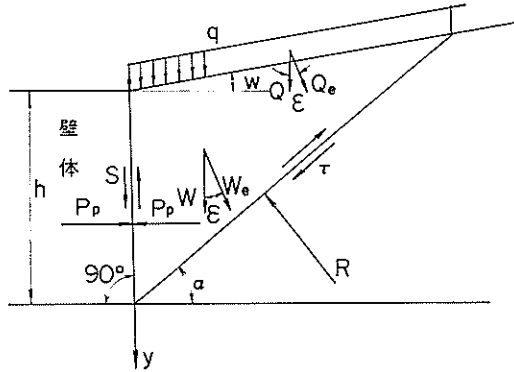
$$\begin{aligned}
 & -\frac{c}{A} \left[\lambda \{ \cos \mu \cos (\beta - \phi - 2\omega) + \sin \mu \sin (\beta - \phi - 2\omega) \} \cos \delta \right. \\
 & \left. + 2 \{ \sin \mu \cos (\delta - \omega) - \cos \mu \sin (\delta - \omega) \} \sin (\beta - \omega) \cos \phi \right] \\
 & = -\sin \mu \left[\cos \varepsilon \cos (\beta - \phi - \delta - \omega) - \cos (\delta - \omega) \cos (\beta + \phi - \varepsilon) \right. \\
 & \left. + \frac{c}{A} \{ \lambda \sin (\beta - \phi - 2\omega) \cos \delta + 2 \cos (\delta - \omega) \sin (\beta - \omega) \cos \phi \} \right. \\
 & \left. - \cos \mu \left[\sin \varepsilon \cos (\beta - \phi - \delta - \omega) + \sin (\delta - \omega) \cos (\beta + \phi - \varepsilon) \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{c}{A} \{ \lambda \cos (\beta - \phi - 2\omega) \cos \delta - 2 \sin (\delta - \omega) \sin (\beta - \omega) \cos \phi \} \right] \right]
 \end{aligned}$$

$$A = -\sin (\delta - \omega + \varepsilon) - \frac{\lambda c}{A} \cos \delta$$

$$\begin{aligned}
 B &= \cos \varepsilon \cos (\beta - \phi - \delta - \omega) - \cos (\delta - \omega) \cos (\beta + \phi - \varepsilon) \\
 &+ \frac{c}{A} \{ \lambda \sin (\beta - \phi - 2\omega) \cos \delta + 2 \cos (\delta - \omega) \sin (\beta - \omega) \cos \phi \}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 C &= \sin \varepsilon \cos (\beta - \phi - \delta - \omega) + \sin (\delta - \omega) \cos (\beta + \phi - \varepsilon) \\
 &+ \frac{c}{A} \{ \lambda \cos (\beta - \phi - 2\omega) \cos \delta - 2 \sin (\delta - \omega) \sin (\beta - \omega) \cos \phi \}
 \end{aligned}$$

$$\tan \mu = \frac{-BC - A\sqrt{B^2 - A^2} + C^2}{B^2 - A^2}, \quad \mu = \beta - 2\alpha - \phi, \quad \bar{A} = \frac{\gamma_e y \sin (\beta - \omega)}{\sin \beta} + q_e$$



4.2 壁面鉛直，地表面傾斜，壁面付着力を考慮した地震時受働土圧式

$$(W_e + Q_e) \sin(\alpha - \varepsilon) + \tau + S \sin \alpha = P_p \cos \alpha$$

$$W_e = \frac{\gamma_e h^2}{2} \frac{\cos \alpha \cos \omega}{\sin(\alpha - \omega)}, \quad Q_e = q_e h \frac{\cos \alpha}{\sin(\alpha - \omega)}, \quad \tau = ch \frac{\cos \omega}{\sin(\alpha - \omega)}, \quad S = \lambda ch, \quad 0 \leq \lambda \leq 1$$

$$P_p = \frac{1}{\cos \alpha} \{ (W_e + Q_e) \sin(\alpha - \varepsilon) + \tau + S \sin \alpha \}$$

$$= \frac{h}{\sin(\alpha - \omega) \cos \alpha} \left\{ \left(\frac{\gamma_e h}{2} \cos \omega + q_e \right) \cos \alpha \sin(\alpha - \varepsilon) + c \cos \omega + \lambda c \sin \alpha \sin(\alpha - \omega) \right\}$$

$$\frac{\partial P_p}{\partial y} = P_p = \frac{(\gamma_e y \cos \omega + q_e) \cos \alpha \sin(\alpha - \varepsilon) + c \cos \omega + \lambda c \sin \alpha \sin(\alpha - \omega)}{\sin(\alpha - \omega) \cos \alpha}$$

$$A = \sin(\omega - \varepsilon) - \frac{\lambda c}{(\gamma_e y \cos \omega + q_e)}$$

$$B = \cos \varepsilon \sin \omega - \sin \varepsilon \cos \omega + \frac{c}{(\gamma_e y \cos \omega + q_e)} (2 \cos^2 \omega + \lambda \cos 2\omega)$$

$$C = \frac{c}{(\gamma_e y \cos \omega + q_e)} [2 \sin \omega \cos \omega + \lambda \sin 2\omega] = \frac{(1 + \lambda) c \sin 2\omega}{(\gamma_e y \cos \omega + q_e)}$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{BC - A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \quad \text{ただし, } \mu = 90^\circ - 2\alpha, \quad \gamma_e y \cos \omega + q_e = \frac{\gamma_e \cos \omega + q}{\cos \varepsilon}$$

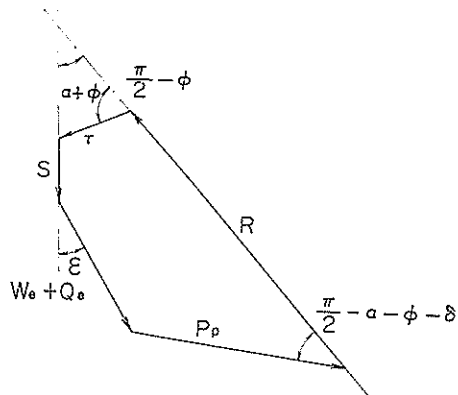
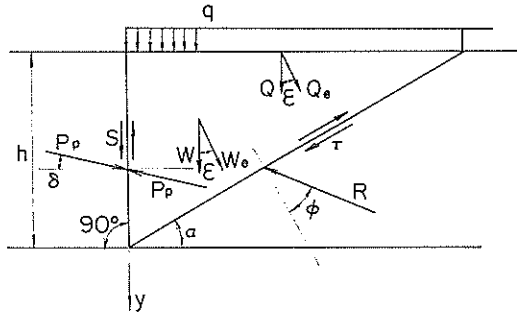
4.3 壁面鉛直，地表面水平，壁面付着力を考慮した地震時受働土圧式

$$(W_e + Q_e) \sin(\alpha + \phi - \varepsilon) + \tau \cos \phi + S \sin(\alpha + \phi) = P_p \cos(\alpha + \phi + \delta)$$

$$W_e = \frac{\gamma_e h^2}{2} \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}, \quad Q_e = q_e h \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha}, \quad \tau = c \frac{h}{\sin \alpha}, \quad S = \lambda ch, \quad 0 \leq \lambda \leq 1$$

$$P_p = \frac{1}{\cos(\alpha + \phi + \delta)} \{ (W_e + Q_e) \sin(\alpha + \phi - \varepsilon) + \tau \cos \phi + S \sin(\alpha + \phi) \}$$

$$= \frac{h}{\sin \alpha \cos(\alpha + \phi + \delta)} \left\{ \left(\frac{\gamma_e h}{2} + q_e \right) \cos \alpha \sin(\alpha + \phi - \varepsilon) + c \cos \phi + \lambda c \sin \alpha \sin(\alpha + \phi) \right\}$$



付 録

$$\frac{\partial P_p}{\partial y} = p_p = \frac{(\gamma_e y + q_e) \cos \alpha \sin (\alpha + \phi - \varepsilon) + c \cos \phi + \lambda c \sin \alpha \sin (\alpha + \phi)}{\sin \alpha \cos (\alpha + \phi + \delta)}$$

ここに,

$$A = -\sin (\delta + \varepsilon) - \frac{\lambda c}{(\gamma_e y + q_e)} \cos \delta$$

$$B = \cos \varepsilon \sin (\phi + \delta) + \cos \delta \sin (\phi - \varepsilon) + \frac{(2 + \lambda)c}{(\gamma_e y + q_e)} \cos \phi \cos \delta$$

$$C = \sin \varepsilon \sin (\phi + \delta) - \sin \delta \sin (\phi - \varepsilon) - \frac{2c}{(\gamma_e y + q_e)} \sin \delta \cos \phi + \frac{\lambda c}{(\gamma_e y + q_e)} \sin \phi \cos \delta$$

$$\mu = \tan^{-1} \frac{-BC - A\sqrt{B^2 - A^2 + C^2}}{B^2 - A^2}, \quad \text{ただし } \mu = 90^\circ - 2\alpha - \phi, \quad (\gamma_e y + q_e) = \frac{(\gamma y + q)}{\cos \varepsilon}$$

[粘性土の場合] $\phi = 0, \delta = 0$

$$p_p = \frac{(\gamma_e y + q_e) \cos \alpha \sin (\alpha - \varepsilon) + c(1 + \lambda \sin^2 \alpha)}{\sin \alpha \cos \alpha} = \frac{(\gamma y + q) \sin (\alpha - \varepsilon)}{\cos \varepsilon \sin \alpha} + \frac{2c(1 + \lambda \sin^2 \alpha)}{\sin 2\alpha}$$

$$A = -\sin \varepsilon - \frac{\lambda c \cos \varepsilon}{(\gamma y + q)}$$

$$B = -\sin \varepsilon + \frac{(2 + \lambda)c \cos \varepsilon}{(\gamma y + q)}$$

$$C = 0$$

$$\mu = \tan^{-1} \sqrt{\frac{A^2}{B^2 - A^2}}, \quad \text{ただし } \mu = 90^\circ - 2\alpha$$

