

独立行政法人港湾空港技術研究所

港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

Vol.48 No.4 December 2009

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 48 卷 第 4 号 (Vol. 48, No. 4), 2009年12月 (December 2009)

目 次 (CONTENTS)

杭の軸直角方向抵抗性能を推定するための Chang のモデルに用いる地盤反力係数の新たな推定方法の提案 菊池喜昭.....	3
(Horizontal Subgrade Reaction Model for Estimation of Lateral Resistance of Pile Yoshiaki KIKUCHI)	
断面修復を施したコンクリート床版の鉄筋腐食性状に関する検討 加藤絵万・審良善和・岩波光保・横田弘.....	23
(Corrosion Behavior of Steel Bars in Reinforced Concrete Slabs Repaired by Partial Patching Ema KATO, Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA)	
水中音響レンズを用いた超音波式三次元映像取得装置の開発 松本さゆり・片倉景義・吉住夏輝.....	53
(Development of Underwater Three-Dimensional Imaging SONAR System with Acoustic Lens Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA, Natsuki YOSHIZUMI)	
空港アスファルト舗装剥離の非破壊探査方法の提案 前川亮太・蘇凱・水上純一・坪川将丈.....	71
(Proposals of non-destructive methods to detect stripping damages in airport asphalt concrete layers Ryota MAEKAWA, Kai SU, Junichi MIZUKAMI, Yukitomo TSUBOKAWA)	
水中鋼構造物の非接触式肉厚測定器の開発 吉住夏輝・松本さゆり・片倉景義.....	89
(Development of Noncontact Thickness Gauging Equipment for Underwater Steel Structure Natsuki YOSHIZUMI, Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA)	
流出油回収装置への蒸気エゼクタの応用 藤田勇・吉江宗生・竹崎健二.....	109
(Steam-Driven Ejector Applied to Spilled Oil Recovery Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Kenji TAKEZAKI)	

杭の軸直角方向抵抗性能を推定するための Changのモデルに用いる地盤反力係数の新たな推定方法の提案

菊池 喜昭*

要 旨

従来から、港湾の施設の技術上の基準・同解説(以下技術基準)では、杭の横抵抗を推定するために、弾性床上の梁理論を用いている。この際の地盤反力モデルとしていわゆる Chang のモデルのほかに、港研方式を提示してきた。これらの方法を用いるためには、地盤反力係数を決定することが必要となる。このため、技術基準では、 N 値から地盤反力係数を決定するための図表を提供している。これらの図をもとに、それぞれの地盤反力モデルで用いる地盤反力係数と N 値の間の相関性を整理すると、Chang のモデルの場合の相関性が著しく悪く、港研方式の場合には相関性が良いことがわかった。

そこで、港研方式の地盤反力係数と N 値の関係をj用いて、Chang のモデルに用いる地盤反力係数と N 値の関係を整理し直した。その結果、Chang のモデルが N 値と相関が悪くなっていた理由は、 N 値が深度方向に増加するような地盤においては、Chang のモデルに用いる地盤反力係数が杭の単位幅当たりの断面剛性 EI/D の影響を強く受けているためであることがわかった。

また、Chang のモデルに用いる地盤反力係数と N 値の関係について新たな関係式を提案した。

キーワード：地盤反力係数，弾性床上の梁理論，Chang のモデル，港研方式， N 値

* 地盤・構造部 部長
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5037 Fax：046-844-0255 e-mail:kikuchi@pari.go.jp

Horizontal Subgrade Reaction Model for Estimation of Lateral Resistance of Pile

Yoshiaki KIKUCHI*

Synopsis

A sort of beam on an elastic medium theory is usually used for designing piles loaded perpendicular to the pile axis. Three types of subgrade reaction model, namely Chang's model, S-type model, and C-type model, are usually used. The estimated coefficient of subgrade reaction varies from geotechnical investigation results quite differently for each model. It is therefore important to improve the accuracy of estimating the coefficient of subgrade reaction in reliability design methods. To do this for the most popular Chang's model, a new relationship between SPT- N value and the coefficient of subgrade reaction in Chang's model, k_{CH} , is proposed.

Key Words: Coefficient of subgrade reaction, Beam on an elastic medium, Chang's model, PHRI method, SPT- N value

* Director, Geotechnical & Structural Engineering Department
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan, Port & Airport Research Institute
Phone : +81-46-844-5037 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:kikuchi@pari.go.jp

目 次

要 旨	3
1.はじめに	7
2.杭の軸直角方向抵抗力推定のための地盤反力モデル	7
3.技術基準における地盤反力係数推定の現状	9
4.地盤反力モデルの比較	11
4.1 既往の実験結果と地盤反力係数の関係	11
4.2 地表面変位を合わせた場合の相関性	13
4.3 最大曲げモーメントで合わせた場合の相関性	18
5. k_{CH} の推定式の提案	19
6. 設計用値に及ぼす影響	20
7. 結論	21
8. おわりに	21
参考文献	22

1.はじめに

わが国の多くの設計基準では単杭の軸直角方向の抵抗特性を検討する際に杭を弾性床上の梁としてモデル化して解析している。この方法はやや便宜的なところもあるが、簡便であり、十分な実用性を持っている。杭を弾性床上の梁にモデル化すると、地盤工学的には地盤反力をどうモデル化するかが重要なポイントとなる。地盤反力モデルとしては、線形弾性地盤反力モデル（いわゆる Chang のモデル）によるモデル化が最もよく用いられている。一方、港湾の施設の技術上の基準同解説の付属書(国土交通省, 2007)(以下、技術基準と略称する)では、港研方式も推奨している。

Chang のモデルは地盤反力とたわみの間に線形の仮定をおいている。これは、梁の方程式を解くうえで重要なことである。つまり、Chang の提案したモデルであれば、梁の方程式を解析的に解くことが出来る。しかし、このモデルでは必ずしも現象を適切に表現できず、またたとえば N 値のような簡便に得られる地盤情報との相関性が低いといった問題があり、今後普及する部分係数法による設計法を導入しようとした時に、不利な取り扱いを受ける可能性が高い(3. 参照)。

一方、港研方式のモデルは、実験結果をもとに提案されたものであり、地盤反力とたわみとの間に非線形な関係を導入し、地盤反力係数を定数として取り扱っているモデルである。港研方式は現象をよりの確に表すモデルであるが、地盤反力とたわみとの間の非線形性を考慮したために、梁の方程式を解析的に解くことができない。このため、久保(1964)は相似則を用いて計算する方法を提案した。また、山下ら(1971)は久保の提案を発展させ、相似則を用いて計算するための精度の高い数表を作成した。このような表を用いることによって、港研方式のモデルを用いた場合でも簡便に杭の挙動を推定できるようになっているが、他のプログラムへの移植性を考えるとやや不利な状況にある。

ここでは、解析的に有利な Chang の方法をより現象に即した形で利用できるように、技術基準における Chang のモデルの取り扱いを基本として、港研方式との比較から Chang のモデルにおける地盤反力係数 k_{CH} に関する新しい推定式を提案し、Chang のモデルの適用性を改善することを目的とする。

2.杭の軸直角方向抵抗力推定のための地盤反力モデル

わが国の各機関の有する技術基準類では、杭の軸直角方向抵抗力を推定するには、弾性床上の梁理論を用いている。すなわち、杭の地中部の挙動の支配方程式は次式であるとされている。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + Dp = 0 \quad (1)$$

ここに、
 EI : 杭の曲げ剛性
 y : 杭の変位
 x : 深度
 D : 杭幅(杭径)
 p : 単位幅あたりの地盤反力である。

この場合、議論は、地盤反力をどのようにしてモデル化するかという点に集中する。ここでは、主として弾性地盤反力法について説明をすることにする。弾性地盤反力法のモデルによるときは、式(1)の p を以下のように考える。

$$p = k \cdot f(x) \cdot g(y) \quad (2)$$

ここに、 k : 地盤反力係数、 $f(x)$: 深さ x が地盤反力に及ぼす影響を表す関数、 $g(y)$: 杭のたわみ y が地盤反力に及ぼす影響を表す関数である。

$f(x)$ 、 $g(y)$ としてどのような関数を用いるかで、①線形弾性地盤反力法、②非線形弾性地盤反力法、③ $p \sim y$ 曲線法に分類される。これらの関数形が複雑になると式(1)の理論解を得ることは困難となる。解析的に解けるものとして良く用いられているモデルは次式で示されるのもである。

$$p = k_{CH} \cdot y \quad (3)$$

ここで、 k_{CH} は定数である。

このモデルは技術基準では Chang の方法あるいは Chang の計算法と呼んでいる。この方法をここでは Chang のモデルと呼ぶことにする。

地盤反力のモデルとして式(3)を用いた場合の式(1)の一般解は次式となる。

$$y = e^{\beta x} (C_1 \cos \beta x + C_2 \sin \beta x) + e^{-\beta x} (C_3 \cos \beta x + C_4 \sin \beta x) \quad (4)$$

ここで、

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_{CH} D}{4EI}} \quad (5)$$

である。 β を特性値と呼ぶ。また、 β の逆数である β^{-1} は長さの単位を持ち、特性長と呼ばれている。Chang のモデルでは、 β^{-1} が杭の挙動を表す重要なパラメータとなっている。

Chang のモデルは簡便であるが、水平荷重による杭の挙

動の非線形を表すことができないという問題を含んでいる。図-1 に実際に载荷試験で得られた杭頭の荷重と変位の関係と Chang のモデルを用いた場合の荷重変位関係を示す。図中の直線はそれぞれ異なった地盤反力係数を仮定したときの Chang のモデルによる計算結果である。実際の荷重変位曲線は Chang のモデルで地盤反力係数を変化させて得られた線と次々と交差する。つまり、Chang のモデルを用いて実際の杭の荷重と杭頭変位の関係を表すには荷重レベルごとに適切に地盤反力係数を設定することが必要となる。

杭の挙動の評価では、地表面変位 y_0 や杭頭変位 y_{top} のほかに、曲げモーメント分布の推定が重要である。ところが、式(3)では、 $g(y)=y$ としているおり、 y と p が線形であると仮定しているために、式(2)に示す $g(y)$ の持つ本質的な非線形性による地盤反力係数の変化を表すことができない。このため、実際に生じる杭の曲げモーメント分布を適切に表現できない。また、杭頭変位の推定のための地盤反力係数と最大曲げモーメント推定のための地盤反力係数とは異なったものとする必要が生じることになる。

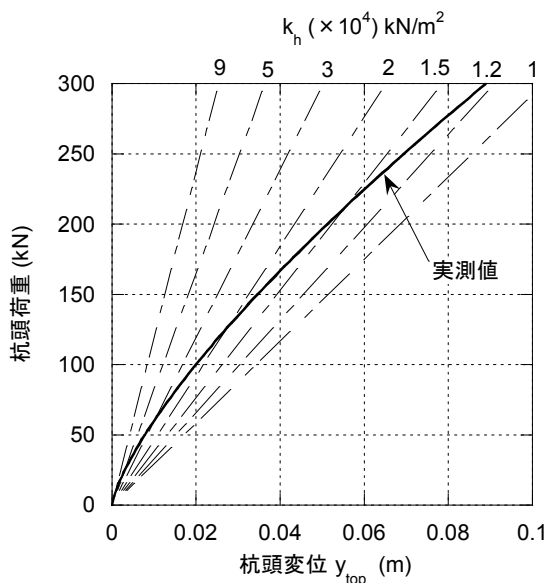


図-1 Chang のモデルと実際の杭の杭頭荷重変位関係の比較

これとは別に、多くの地盤では地盤の剛性は深度とともに大きくなるのが普通であり、その結果、深度の異なる点で同じたわみが生じたときの地盤反力は深度方向に増加する場合が多い。しかし、式(3)ではそのことを表せていない。このため、式(3)を次式のようにするだけで、式(3)の持つ欠点のある程度補うことができる。

$$p = k \cdot x \cdot y \tag{6}$$

地盤反力係数は、地盤材料のせん断剛性やせん断強度と関連性があること、正規圧密状態にある地盤ではせん断剛性やせん断強度が深度に対しほぼ直線的に増加することが多いことを考えれば、式(6)が式(3)に比べて地盤反力係数の特性を表す上で優れていることが推測される。さらに、たわみと地盤反力の関係の非線形性を考慮すれば、より現象に即したモデルとなる。ただし、これらのモデルを用いると梁の方程式が解析的に解けなくなるという問題を含んでいる。そのため、差分法、べき級数解、相似側を用いた計算法などが提案されてきている。ただし、「解析的に解けない」という問題は近年のコンピュータの発達により、実質的な障害とはなりにくくなってきている。

港研方式では次のような地盤反力を仮定している。

$$p = k \cdot x^m \cdot y^{0.5} \tag{7}$$

ここに、

p : 深さ x における杭の単位幅当たりの地盤反力

k : 地盤の横抵抗常数

m : 指数 1 または 0 の値をとる

x : 地表面からの深さ

y : 深さ x における杭の変位

港研方式では、地盤を S 型地盤と C 型地盤に分類し、それぞれの地盤種別ごとに別々のモデルを提案している。それらの違いは表-1 に示すとおりである。表-1 から分かるように、指数 m の違いによってそれぞれの地盤分類ごとに別のモデルを提案している。一般に S 型地盤と C 型地盤を見分けるには、深度方向の N 値の分布から判断する方法を用いればよい。すなわち、杭の横抵抗に重要な比較的表層部分(表層から $0.5l_{m1} \sim l_{m1}$ までの範囲; l_{m1} : 頭部自由杭の曲げモーメントの第一 0 点の深さあるいは頭部固定杭の曲げモーメント第二 0 点の深さ)の N 値が深度方向に増加しているか一定であるかを基準として S 型地盤と C 型地盤とを見分ければよい(図-2)。

表-1 S 型地盤と C 型地盤の違い

地盤の分類	S 型地盤	C 型地盤
指数 m	1	0
港研方式における地盤反力モデル	$p = k_s x y^{0.5}$	$p = k_c y^{0.5}$
N 値	深さとともに直線的に増加する	深さによらず一定
地盤の例	・一様な密度の砂	・表面のしまった砂

	地盤 ・正規圧密の粘土 地盤	地盤 ・大きな先行荷重を 受けた粘土地盤
--	----------------------	----------------------------

港研方式では、S型地盤における横抵抗常数を k_s 、C型地盤における横抵抗常数を k_c と表す。これらの係数を常数と呼ぶのは、一般的には、式(7)のようなモデル化を行うことにより、地盤の横抵抗係数が、杭の条件、変位状態などの影響を受けず、地盤条件によってほぼ決定されるためである。ここでは、S型地盤に用いられるモデルをS型モデルと呼び、C型地盤に用いられるモデルをC型モデルと呼ぶことにする。また、上述のように、 k_s と k_c は、原論文(久保,1964)では「横抵抗常数」と呼ばれているが、ここでは、いずれも「地盤反力係数」と呼ぶことにする。

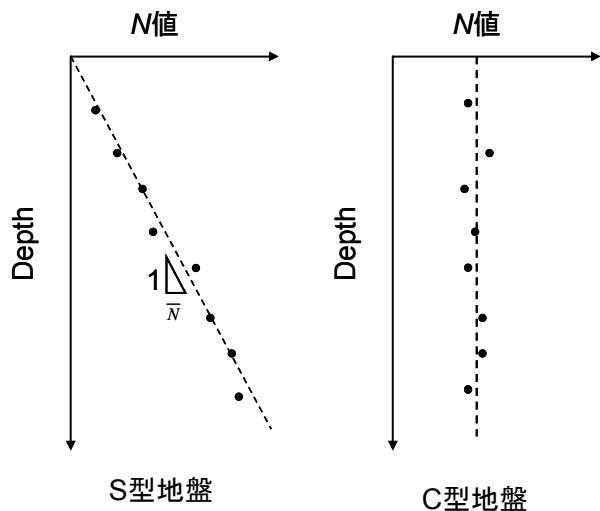


図-2 N 値の深度分布と地盤分類

港研方式を用いた場合、式(1)の梁の方程式を解析的に解くことができなくなる。そのため、港研方式の計算では、相似側に基づいた計算図表が用意されている(国交省, 2007)。これは、精度の良い数値解析を1本の杭(基準杭；s杭)に対して行っておき(基準曲線)、実際の杭(原型杭；p杭)の計算には、相似側を利用して比例的に解を求めようとするものである。現在では、コンピュータ環境がよくなったため、精度の問題をうるさく言わない限り、数值的に解くことは可能となったが、相似側を利用した計算方法の簡便性は失われていない。

3.技術基準における地盤反力係数推定の現状

技術基準では、地盤反力係数を載荷試験より求めることを推奨している。しかし、実際には載荷試験の実施が困難なこともあるので、N値の深度分布から推定する図を用意

している。それらを図-3～図-5に k_s 、 k_c 、 k_{CH} の順に示す(運輸省,1999)。これらの図を用いる場合、N値は土被り圧補正をせずに用いる。

図-3は久保(1962)によって示されたものである。この図は砂質地盤に対して作成されたものである。この図は杭幅30cm以上の杭の水平載荷試験結果を収集し、荷重変位曲線や実測曲げひずみなどをもとに推定されたものである。久保はこの図を作成するに当たり、なぜ、N値と地盤反力係数を関連付けるかについて考え方を説明している(久保, 1962)。久保は、杭に作用する地盤反力が地盤の相対密度と密接な関係があると考えていた。また、N値は、相対密度と有効上載圧の両者の影響を受けるものであると考えていた。そうすると、N値と $k_s \cdot x$ とが関連性があると考えられる。N値をこのように考えることは深さが深くなった場合には適当ではない可能性があるが、杭の横抵抗のように地表面付近の特性が重要な場合には、このような関連性を仮定しても大きく間違っていないのではないかと。久保は以上のような考え方をういてN値と k_s の関係を整理したのである。

なお、久保は、この図の横軸の \bar{N} として、1mの深さのN値をとって整理した。但し、この際の久保の考え方は杭の横抵抗に支配的な $(1/3 \sim 1/4)l_{ml}$ 付近までのN値の深度方向の増加率をとるべきであるというものであるが、当時の載荷試験の杭のサイズでは $(1/3 \sim 1/4)l_{ml}$ がほぼ1mであったために便宜的に上記のN値を用いたものと考えられる。

図-4は林ら(運輸省港湾技術研究所他, 1963)によって示されたものである。このデータも杭の載荷試験結果に基づいて作成されたものである。

図-5は横山(1977)によって示されたものである。横山は、この図を作成するに当たり、杭幅30cm以上の杭の水平載荷試験結果を収集し、荷重変位曲線や実測曲げひずみなどをもとに、地表面変位が1cmとなるときの k_{CH} を求めた。また、地表面から $1/\beta$ までの区間のN値の平均をとって図-5の横軸のN値とした。すなわち、図-2に示したS型地盤の場合には、地表面から $1/\beta$ までのN値の平均をとって地盤のN値とする方法を取っている。

いずれの図においても図中の数字を示してあるものが実測データから推定されたN値と地盤反力係数の関係である。この結果から細線で示すような関係が示されており、これらの線の間接をもとに、N値から地盤反力係数を推定することがよく行われている。特に、 k_{CH} については、実線あるいは、実線のある程度割り引いた $k_{CH}=1500N(\text{kN/m}^3)$ が設計で通常用いられてきている。 k_s では、3本の線の真ん中の関係が主として用いられてきている。

これらの線がどのような考えで引かれたものであるかは原論文では明確には記述されていないので、ここでは、最小二乗法によって回帰直線を求めた(Kikuchi & Suzuki, 2006)。なお、それぞれの図において、N値、地盤反力係

数ともものによっては確定値ではなく、範囲で示されたものがある。これらのデータについては、ばらつきの中の中央値を代表値であるとして計算した。図-3 から図-5 に回帰直線を太い破線で示すとともに、ここに示されている関係から、 N 値とそれぞれの地盤反力係数との関係式を調べてみると表-2 のようになる。

これらの結果を見ると、 k_c と k_s は既存の提案関係が最小二乗法による関係とほぼ同じであり、変動係数も小さいものであることがわかる。しかし、 k_{CH} については、提案されている関係がデータの関係とやや乖離していること、最小二乗法による関係式の変動係数もきわめて大きいことがわかる。

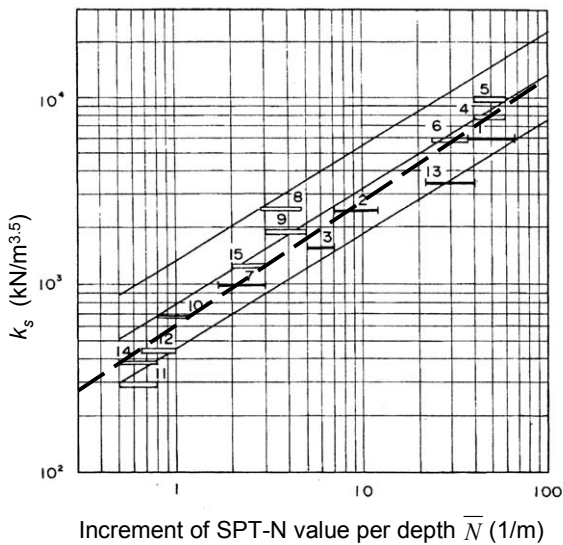


図-3 N 値の増加率 \bar{N} と k_s の関係(運輸省(1999)に加筆)

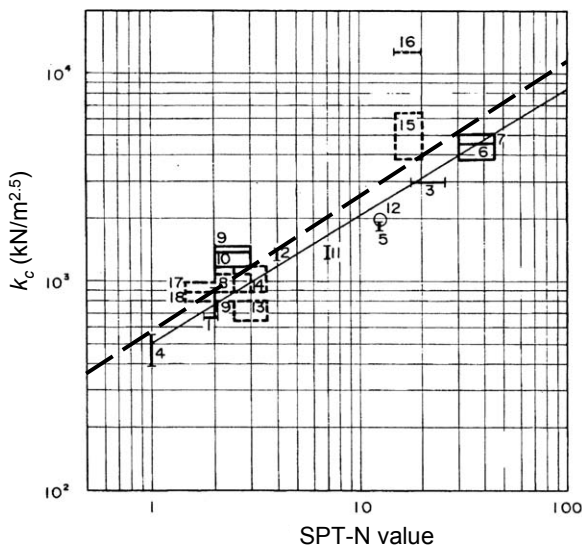


図-4 N 値と k_c の関係(運輸省(1999)に加筆)

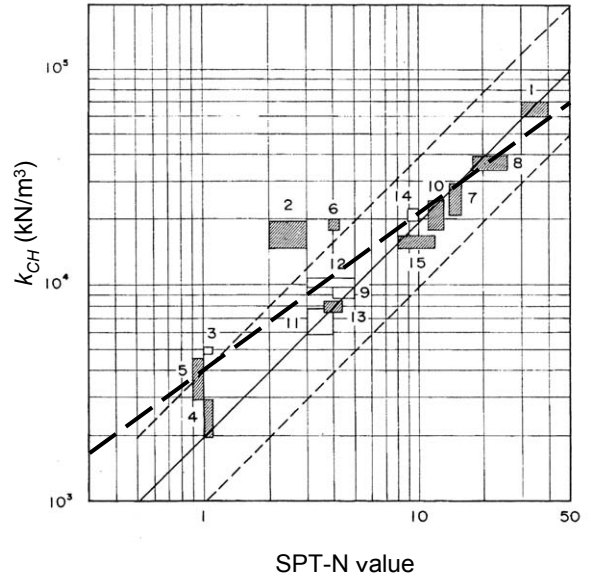


図-5 N 値と k_{CH} の関係(運輸省(1999)に加筆)

表-2 N 値と地盤反力係数の間の関係式

相関式	相関係数	変動係数
$k_{CH}=3900N^{0.733}$ (kN/m ³)	0.917	0.754
$k_c=540N^{0.648}$ (kN/m ^{2.5})	0.872	0.111
$k_s=592\bar{N}^{0.654}$ (kN/m ^{3.5})	0.966	0.077

2007年に改定された技術基準(国土交通省, 2007)において、変動係数が0.7を超えるものは、モデルの適合性が悪いため、モデルの見直しをすべきパラメータとして取り扱われることになっている。すなわち、従来、図-5に示していた関係は、現行の基準では不適切な関係であることがうたわれている。仮に、不適切であるとの判断までいかない場合でも、変動係数が大きくなると設計用値を選定する場合に不利な取り扱いがなされる。つまり、地盤反力の設計値は地盤反力の特性値から、式(8)によって求められる。このとき、もし変数が対数正規分布に従う場合には、式(8)の部分係数 γ_k は式(9)により求められる。

$$k_d = \gamma_k \cdot k_k \tag{8}$$

ここで、

k_d : 地盤反力係数の設計値

k_k : 地盤反力係数の特性値

γ_k : 地盤反力係数 k の部分係数である。

$$\gamma_x = \frac{\exp(-\alpha_x \beta_T \sqrt{\text{Ln}(1+V_x^2)})}{\sqrt{1+V_x^2}} \cdot \frac{\mu_x}{X_k} \tag{9}$$

ここで、

α_k : 地盤反力係数 k の感度係数

β_T : 目標信頼性指標

V_k : 地盤反力係数 k の変動係数

μ_k : 地盤反力係数 k の平均値

k_k : 地盤反力係数 k の特性値

である。

技術基準によると、現行の横棧橋の設計(国土交通省, 2007)では、耐震強化施設以外の横棧橋の杭に生じる応力の照査について次の数値が示されている。 $\alpha=0.257$, $\beta_1=2.9$,

$V_{k_{CH}}=0.76$, $\mu/k_{CH_k}=1.333$ 。なお、 μ/k_{CH_k} が 1.333 となっ

ているのは、横棧橋の設計では、図-5 の実線の関係($k_{CH}=2000N$)ではなく、それを低減した $k_{CH}=1500N$ という式を用いて k_{CH} の特性値を推定しているためである。この結果、部分係数 γ_k は、0.60 を用いることになっている。仮に、

$V_{k_{CH}}=0.10$, $\mu/k_{CH_k}=1.0$ であれば、 γ_k は、0.90 を用いるこ

とができるようになる(γ_k は 0.05 単位で丸めている)。

このことからわかるように、変動係数の大きなパラメータを設計に用いると、設計値として著しく小さい値をとることが必要となり、不経済な設計となりやすい。

もともと、どのような地盤パラメータであっても安易に N 値との相関をとることに対して強い批判がある。その意味では、 N 値と地盤反力係数を関係付けること自体に対する批判もあるが、これらの結果を見る限り、 k_s , k_c については結果的に N 値の情報を用いて、地盤反力係数を推定することが許容できると考えられる。しかし、 k_{CH} の場合には許容できないものである。これは、 k_{CH} の推定の仕方に問題があるためであると考えられる。

4. 地盤反力モデルの比較

4.1 既往の実験結果と地盤反力係数の関係

ここで参照する実験(菊池ほか, 1992)は港湾空港技術研究所所有のコンクリート製の大型土槽(深さ 3m, 長さ 6m, 幅 3m)で行われた。用いた砂は浅間山砂($\rho_s=2.746\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=1.681\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmin}=1.336\text{g/cm}^3$)である。この砂の粒度分布を図-6 に示す。この砂を気乾状態で空中落下させて厚さ 2.4m の模型地盤を作製した。用いた杭は板杭で幅 20cm である。曲げ剛性は 3 種類($EI=1.47, 2.94, 4.90\text{kNm}^2$)を選んでい。実験シリーズ全体では、曲げ剛性のほかに、载荷パターン、载荷高さなどをパラメータとして、様々な実験を行った。ここでは、その一部を用いて検討を行う。

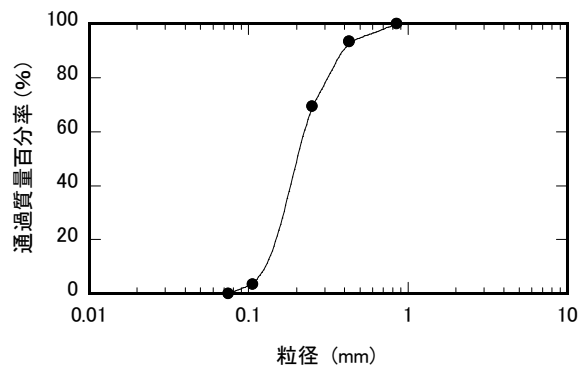


図-6 浅間山砂の粒度加積曲線

一般に杭の静的水平载荷試験結果から杭の横方向地盤反力係数を推定するには、最低限、杭の条件(杭の根入れ長さ、杭の曲げ剛性、杭幅)と载荷条件(荷重、载荷高さ)、杭の代表点の変位量がわかればよい。例えば、すでに示した図-1 は、杭の条件と载荷条件がわかった上で、载荷点の変位量を用いて Chang のモデルの地盤反力係数を推定したものである。

ここでは、実験結果から杭頭の荷重と変位の関係を用いて地盤反力係数を推定する。ここでは、地盤反力モデルの違いを明らかにするために、それぞれの地盤反力モデルによる計算結果と実験結果を比較する。ここで比較する実験結果の実験条件は、杭の根入れ長さ 2.1m, 杭の曲げ剛性 2.94kNm^2 , 杭幅 20cm, 水平荷重の载荷高さ 25cm で、約 4kN まで静的に水平荷重を作用したものである。地盤は緩詰め状態 (D_r はおよそ 40%) である。

図-7(a)~(c)に実験での杭頭部の荷重変位関係と Chang のモデル、港研方式 S 型モデル、C 型モデルによる計算結果の比較結果を示す。太線が実験結果であり、点線が各モデルでの計算結果である。(a)は Chang のモデルの結果である。荷重が低いところでは、 k_{CH} がおよそ 2000kN/m^3 程度であるが、杭頭荷重が 3.5kN 程度になると k_{CH} は 800kN/m^3 程度まで低下していることが分かる。これは、図-1 に示したのと同様、Chang のモデルを用いる場合には、地盤反力係数が杭頭荷重(杭頭変位といってもよい)とともに変化することを示したものである。(b)は港研方式 S 型モデルと比較したものである。この場合には、荷重条件によらず、 k_s がほぼ一定の値であるとして行うことができる。(c)は港研方式の C 型モデルとした場合の比較である。このモデルを用いると、(a)とは逆に荷重が増えるにつれて多少ではあるが k_c が大きくなるという結果となっている。

この結果だけから判断すると、S 型モデルの場合のみ、荷重レベルによらずに地盤反力係数を設定できることが分かる。

次に、杭の曲げ剛性を変えた実験結果について Chang のモデルと港研方式の S 型モデルとで実験結果とモデル

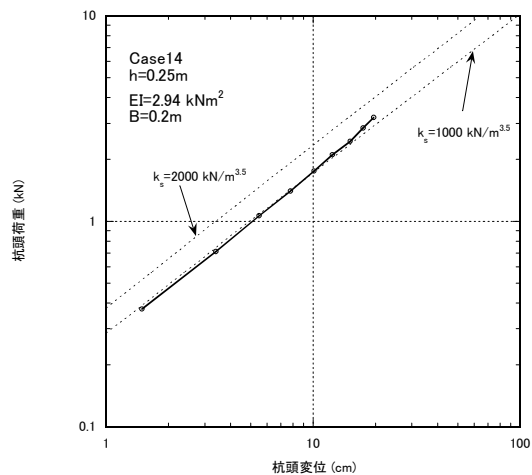
による計算結果について比較してみる。ここに示す3つの実験は、同一地盤で実施したものである。この時の地盤条件は、図-7の場合とは異なり、やや密詰めの地盤(Drがおよそ65%)となっている。地盤の条件以外の条件のうち、杭の根入れ長、載荷高さ、杭幅は同じ条件であるが、杭の曲げ剛性を変えてある。ここで用いた杭の曲げ剛性は、1.47, 2.94, 4.90kNm²の3種類である。また、これらの実験では、いくつかの荷重レベルで繰返し載荷を実施しているが、ここでは、処女載荷とみなせる部分だけを取りだして実験結果と計算結果を比較をしている。

図-8は実験結果と港研方式S型モデルの計算結果の比較をしたものである。太線が実験結果であり、点線が計算結果である。(a)~(c)の結果をみると、どのケースでも推定される地盤反力係数 k_s はほぼ2000kN/m^{3.5}であり、杭の曲げ剛性が異なっても、同じ値となる。

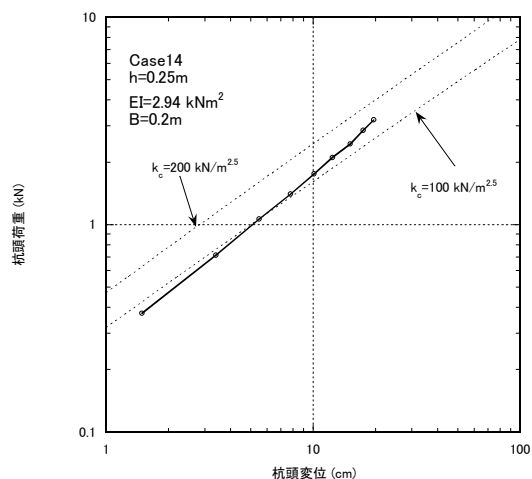
図-9は同じ実験結果についてChangのモデルで計算したものを比較したものである。荷重レベルが高くなると推定される地盤反力係数が小さくなるばかりでなく、杭の曲げ剛性の違いによって推定される地盤反力係数に違いが出るのが分かる。このケースでは、(a)と(b)では実験結果と適合する地盤反力係数にはあまり差がないが、(c)のケースでは実験結果と適合する地盤反力係数が他のものに比べて非常に大きなものとなっている。

このように、すべての荷重条件、杭の条件で港研方式S型モデルの場合には一定の地盤反力係数を推定しているのに対し、Changのモデルでは、同じ杭の条件で荷重レベルの違いによって推定される地盤反力係数が変化するばかりでなく、杭の条件が変わっても推定される地盤反力係数が変化することが分かる。

これに、地中部での杭の変形モードの違い、曲げモーメント分布の違いを議論すると、さらに各地盤反力モデルの特性の違いが明らかになる。この点については次節で詳述する。

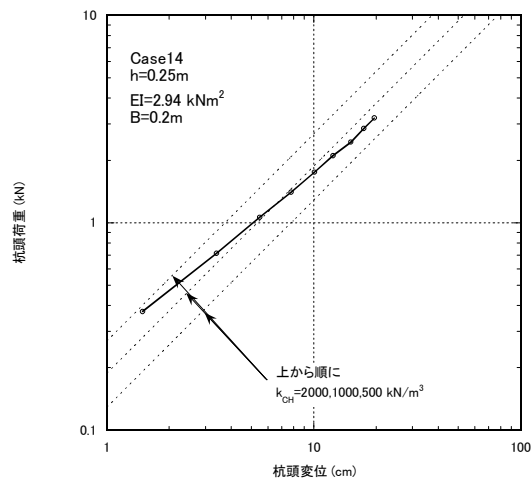


(b) S型モデルとの比較

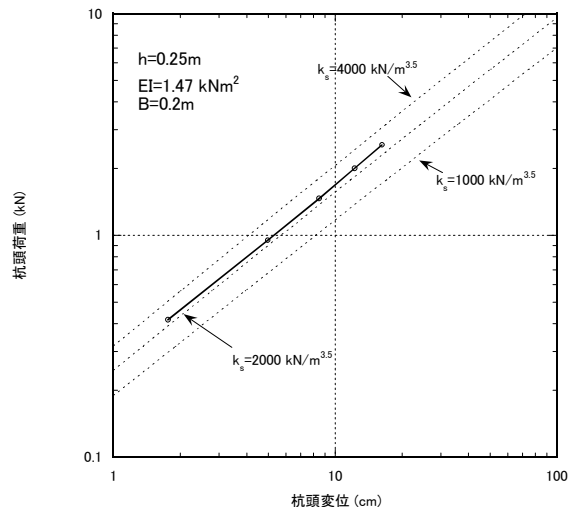


(c) C型モデルとの比較

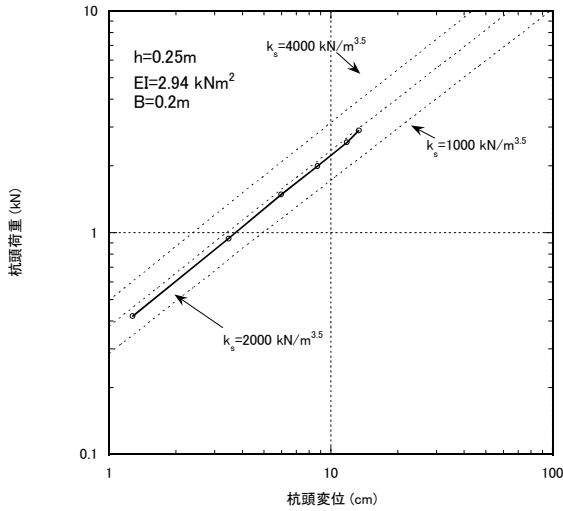
図-7 実験結果(Case14)と各モデルの地盤反力係数の関係



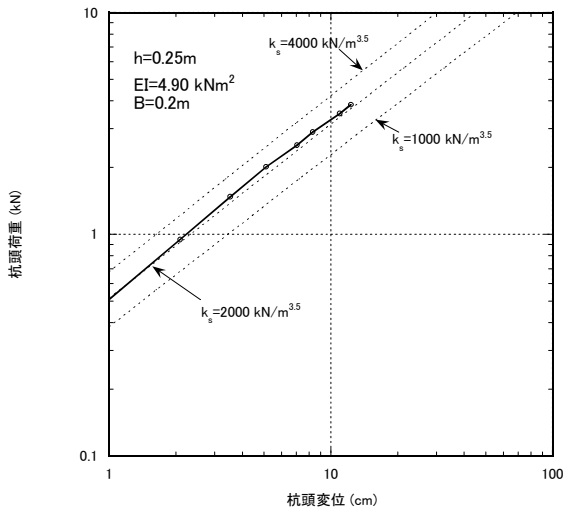
(a) Chang のモデルとの比較



(a) EI=1.97kNm² の場合

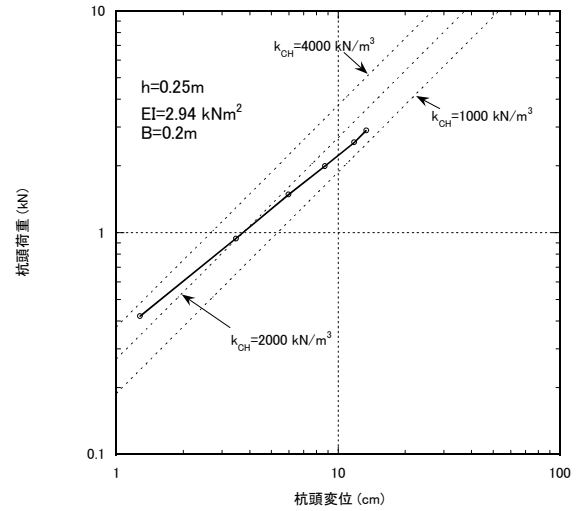


(b) $EI=2.94\text{kNm}^2$ の場合

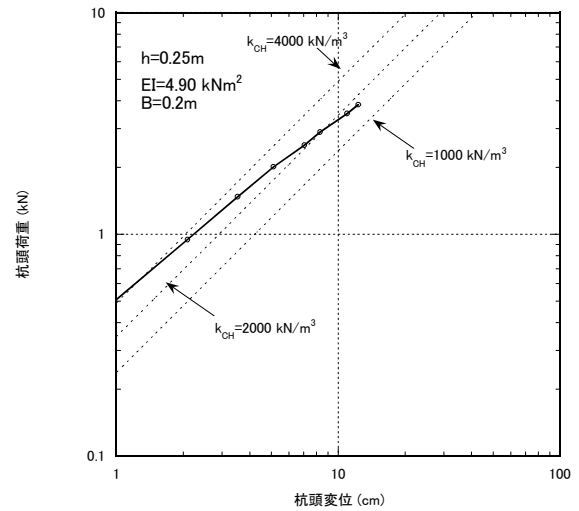


(c) $EI=4.90\text{kNm}^2$ の場合

図-8 実験結果と港研方式 S 型モデルとの比較



(b) $EI=2.94\text{kNm}^2$ の場合



(c) $EI=4.90\text{kNm}^2$ の場合

図-9 実験結果と Chang のモデルとの比較

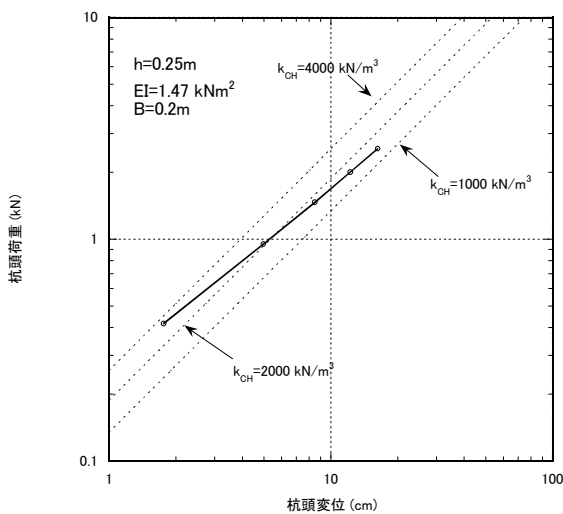
なお、篠原・久保(1961)は、飽和砂地盤において、杭の形状(板状、管状)、杭の根入れ長さ、杭の曲げ剛性、地盤条件を系統的に変化させた実験シリーズを行い、港研方式 S 型モデルの地盤反力係数 k_s が地盤の条件だけで決定されるパラメータであると結論付けている。

4.2 地表面変位を合わせた場合の相関性

(1) 実験結果へのフィッティング

ここでは、Chang のモデルと S 型モデルについて比較する(菊池ら, 2007)。

図-10 は図-7 に示した実験について、杭頭荷重が、2.45kN と 4.0kN の場合について、実験結果と地表面変位が一致するように地盤反力係数を求めて、各モデルによる数値計算を行い、たわみ分布を比較したものである。実験では、いくつかの深度での曲げモーメントを測定しており、



(a) $EI=1.97\text{kNm}^2$ の場合

その結果をもとに 2 階積分することによってたわみを求めた。どちらのモデルでも杭のたわみは比較的良く再現できている。ただし、Chang のモデルの場合には、地中部の 0.7m から 2m までの区間で実験結果よりも大きく杭がたわむという計算結果となっている。また、図-7 と同じように、S 型では荷重レベルによらず同じ地盤反力係数で杭の現象を説明できているが、Chang のモデルの場合には、荷重レベルによって杭のたわみを再現するには、異なる地盤反力係数を用いる必要がある。

図-11 は図-10 に示した比較によって決定された地盤反力係数を用いて、実験結果と計算結果による曲げモーメント分布の違いを比較したものである。S 型モデルの場合には、たわみから設定した地盤反力係数を用いて計算した曲げモーメント分布も概ね実験結果と同じ結果となっている。しかし、Chang のモデルでは、最大曲げモーメントを著しく過小評価するほか、深部(0.7m から 1.8m 区間)で曲げモーメント分布の傾向が著しく異なるなど、実験で得られた曲げモーメント分布の特徴を全く表現することができていない。最大曲げモーメントの大きさと位置や曲げモーメントが深い部分でどのように 0 に近づいていくかは設計においても重要なファクターであり、これらの値の推定精度が低いのは大いに問題である。

これらの地盤反力モデルの差によるシミュレーション結果の差の原因は、地盤反力特性の深度方向の変化と非線形性を考慮に入れていないことによるものである。このうち後者は Chang のモデルの致命的な弱点である。

(2) (1)で示した条件以外での地盤条件、杭頭条件での各モデルによる計算結果の比較

杭頭の拘束条件を「杭頭固定」とすることや C 型地盤の地盤条件を模型実験で再現するのが非常に困難であるため、ここでは、解析結果同士を比較することによって、それぞれのモデルと特徴を議論する。

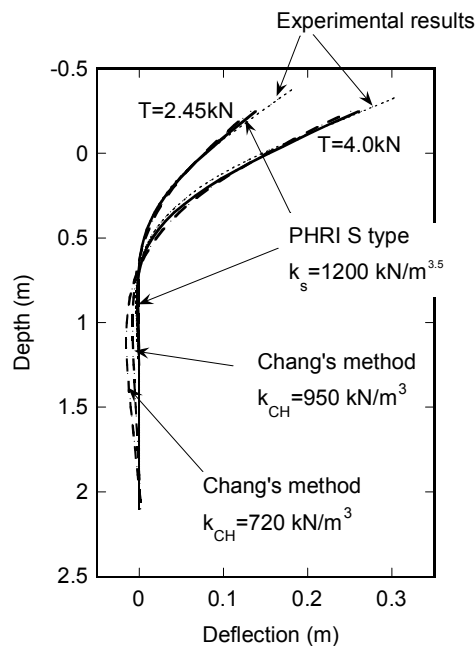


図-10 地盤反力モデルの違いによる杭の挙動の推定結果の違い(たわみ)

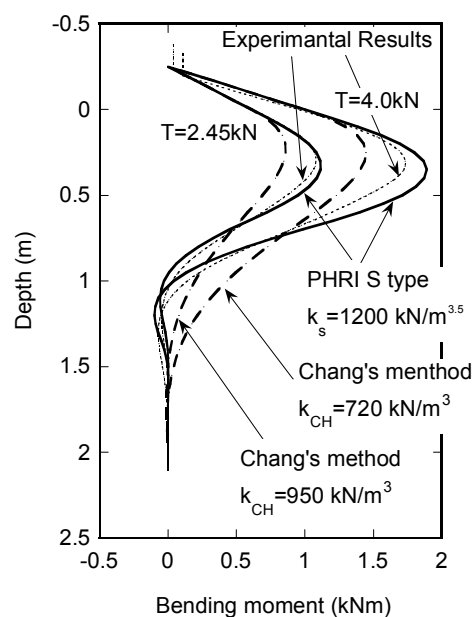


図-11 地盤反力モデルの違いによる杭の挙動の推定結果の違い(曲げモーメント)

ここで示すのは以下の 3 条件での比較である。①S 型地盤、杭頭固定、②C 型地盤、杭頭自由、③C 型地盤、杭頭固定。なお、この比較では、実杭を想定して、杭の諸元を決定し、地盤条件も実地盤を想定して決定している。具体的には、ここでは $EI=9.56 \times 10^5 \text{ kNm}^2$ 、杭径 1m の杭を 20m 根入れして設置し、3m の高さの点に水平力を載荷した場合を想定する。地盤条件は、S 型地盤の場合には、 $\bar{N}=5$

とし、C型地盤の場合には、 N 値が8であるとした。この仮定により、ここでは、表-2の式を用いて、 $k_s=1700\text{kN/m}^{3.5}$ 、 $k_c=2080\text{kN/m}^{2.5}$ とした。また、いずれの比較においても、それぞれの条件で地表面変位が一致するような条件を求めて比較している。比較に用いた地表面変位は0.01mと0.1mである。

図-12に①S型地盤、杭頭固定の場合の比較結果を示す。全体的な傾向は図-10、図-11と同様である。すなわち、たわみ分布についてみると、Changのモデルで計算した場合には、地中部の深いところでもたわみが生じる計算結果となる。また、曲げモーメント分布については、Changのモデルによる方が最大曲げモーメントが小さく、深部においてなかなか0に近づきにくい傾向にある。

図-13には②C型地盤、杭頭自由の場合の比較結果を示す。(a)に示したたわみ分布から分かるように、C型地盤においても、Changのモデルによる計算結果では、深部で大きなたわみが生じる傾向にある。この結果を見る限り、 $T=1200\text{kN}$ のときには、杭の下端の固定が不十分な計算結果となっており、場合によっては根入れが不足していると判断される可能性もある。曲げモーメント分布についてはS型モデルで見られたほどには大きな乖離はないが、Changのモデルの場合には深部で曲げモーメントの深度方向の変化が小さくなるという傾向が見られる。

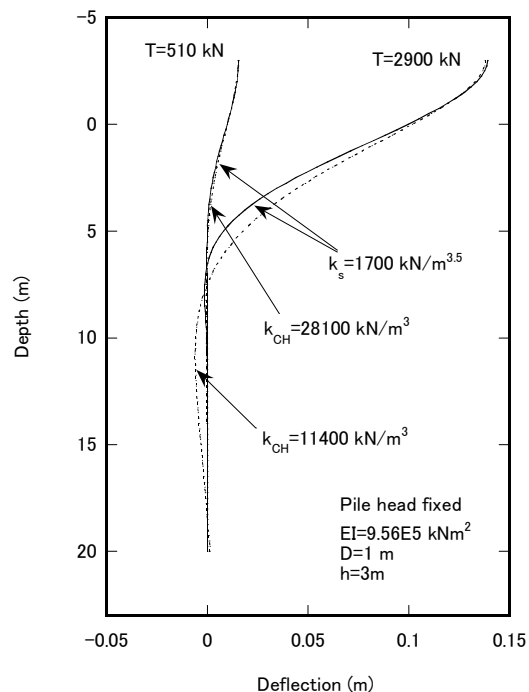
図-14は③C型地盤、杭頭固定の場合の比較結果である。一般的傾向は図-13と変わらない。

以上の結果を総合すると、全体としてChangのモデルを用いた場合には、根入れの深い部分で杭にやや大きめのたわみを計算したり、深い部分での曲げモーメント分布の変化が小さめになったりするという結果を示す傾向にある。また、S型地盤では、最大曲げモーメントを過小評価する傾向にある。

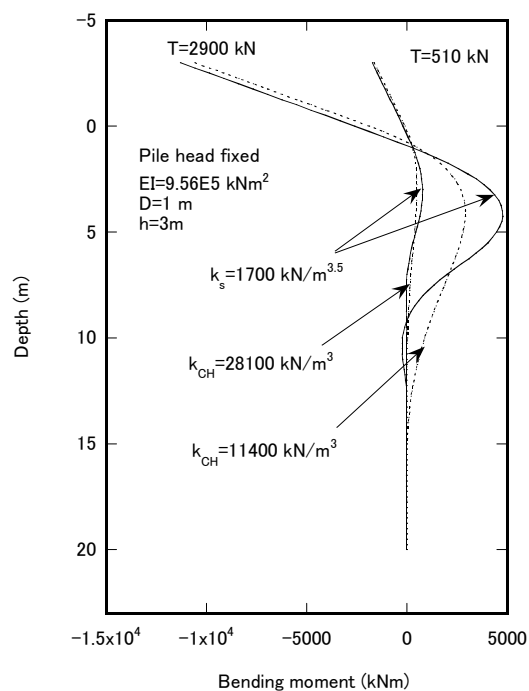
(3) 相関式の提案

表-2からもわかるように、 k_c や k_s と N 値の関数に比べて、 k_{CH} と N 値の関係は大きくばらついている。この原因としては、 k_{CH} が解析の簡便性を主として提案されたのに対し、 k_s や k_c が地盤条件のみで設定できる定数として提案された(久保, 1964)ところに差があると考えられる。そこで、 N 値から k_s や k_c を通して k_{CH} を推定する方法について検討する。

すでに述べてきているように、杭の軸直角方向抵抗特性を評価する場合にChangのモデルには致命的と言って良いような問題がある。しかし、Changのモデルは解析的に解けるため、様々な解析プログラムに組み入れるのが簡単であるなどの理由から広く用いられている。 k_{CH} の持つ本質的な問題の解決にはならないが、新たな k_{CH} の推定方法を提案する。ここでの目的は、変動係数の小さな推定式を提案することである。

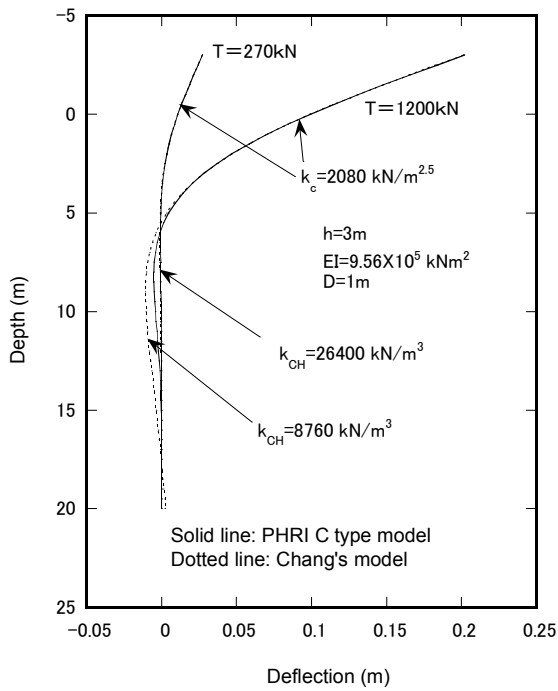


(a) たわみ分布

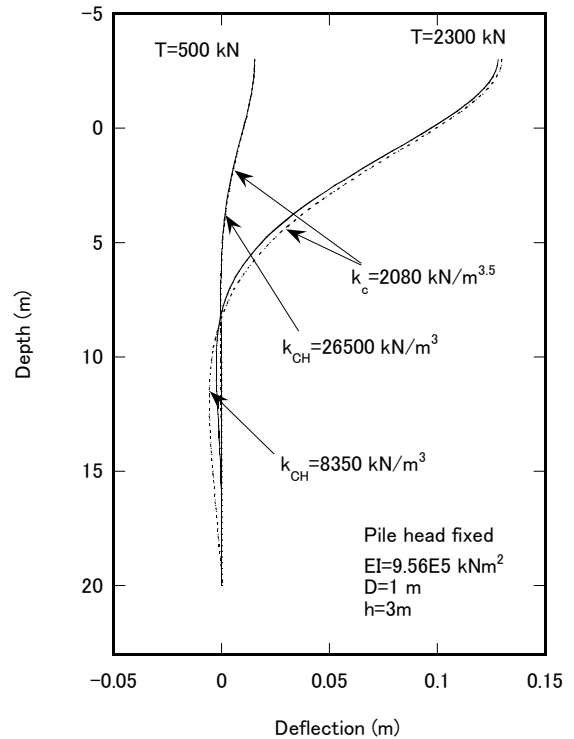


(b) 曲げモーメント分布

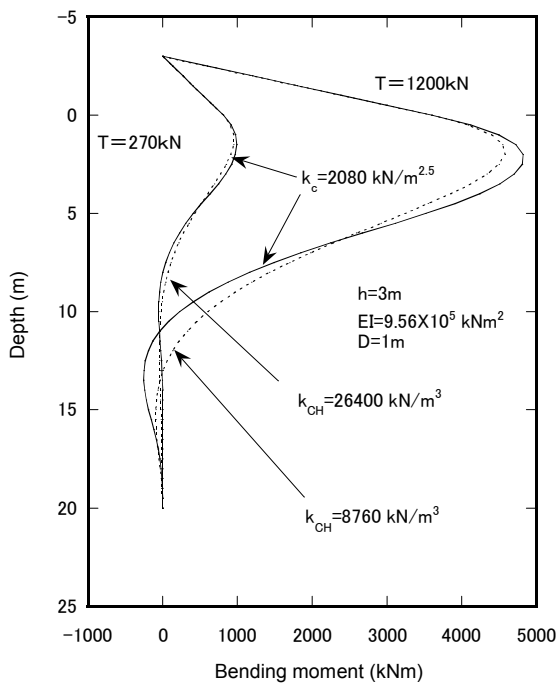
図-12 S型地盤、杭頭固定条件でのChangのモデルとS型モデルの比較



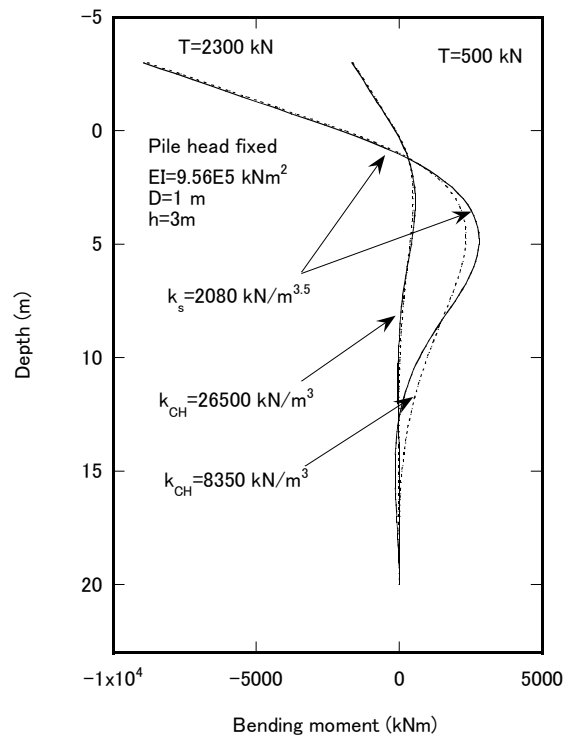
(a) たわみ分布



(a) たわみ分布



(b) 曲げモーメント分布



(b) 曲げモーメント分布

図-13 C型地盤, 杭頭自由の場合の Chang のモデルと C型モデルの比較

図-14 C型地盤, 杭頭固定の場合の Chang のモデルと C型モデルの比較

久保らの研究(例えば, 久保 1962)から, k_s や k_c が地盤条件から決定されている地盤反力係数である点に着目する. そこで, k_{CH} と k_s や k_c との相関関係を求めることにより, k_{CH} がどのような要因によって決定されているかを把握する.

ここでは, 杭の条件, 荷重条件が等しい時に地表面変位が一致するようにこれらの地盤反力係数の関係を求める.

地表面荷重(荷重高さが 0)の場合には, 港研方式による計算をするのに相似則を利用できないため, 次式のような近似解が技術基準に示されている (運輸省, 1999):

S 型地盤の場合:

杭頭自由条件:

$$\log y_0 = 0.38958 - \frac{4}{7} \log EI - \frac{6}{7} \log Dk_s + \frac{10}{7} \log T \quad (10a)$$

杭頭固定条件:

$$\log y_0 = -0.16047 - \frac{4}{7} \log EI - \frac{6}{7} \log Dk_s + \frac{10}{7} \log T \quad (10b)$$

C 型地盤の場合:

杭頭自由条件:

$$\log y_0 = 0.11328 - \frac{2}{5} \log EI - \frac{6}{5} \log Dk_c + \frac{8}{5} \log T \quad (11a)$$

杭頭固定条件:

$$\log y_0 = -0.32731 - \frac{2}{5} \log EI - \frac{6}{5} \log Dk_c + \frac{8}{5} \log T \quad (11b)$$

ここで,

EI : 杭の曲げ剛性

D : 杭径

k : 地盤反力係数

T : 杭頭に作用する水平荷重

y_0 : 地表面変位

である.

なお, 杭頭自由条件とは, 杭頭に曲げモーメントが作用しない条件のことを指す. また, 杭頭固定条件とは, 杭頭のたわみ角が 0 の条件のことをいう. したがって, たとえば栈橋の頂部で杭頭部を完全に剛結したとしても, それだけでは杭頭固定条件は一般的には満足しない. また, 杭頭とは, 水平力が作用している高さを指すのであって, 杭の実際の頭部を指すものではない.

上記式(10), (11)を用いることによって, T と y_0 の関係が等しくなる条件での k_s や k_c と k_{CH} の間の相関をとることができる. なお, Chang のモデルにおいて, 地表面荷重で杭頭自由の場合には, 地表面変位は $y_0 = T / (2EI\beta^3)$ であ

る. また, 杭頭固定の場合には, $y_0 = T / (4EI\beta^3)$ である. これらを組み合わせることによって, 以下の式が導かれる.

S 型と Chang のモデルの関係

杭頭自由:

$$k_{CH} = 0.687 \left(\frac{EI}{D} \right)^{\frac{1}{5}} y_0^{-\frac{2}{5}} \cdot k_s^{\frac{4}{5}} \quad (12a)$$

杭頭固定:

$$k_{CH} = 0.889 \left(\frac{EI}{D} \right)^{\frac{1}{5}} y_0^{-\frac{2}{5}} \cdot k_s^{\frac{4}{5}} \quad (12b)$$

C 型と Chang のモデルの関係

杭頭自由:

$$k_{CH} = 1.277 \cdot y_0^{-\frac{1}{2}} \cdot k_c \quad (13a)$$

杭頭固定:

$$k_{CH} = 1.181 \cdot y_0^{-\frac{1}{2}} \cdot k_c \quad (13b)$$

式(12)の式は, k_{CH} と k_s の関係は y_0 のみならず, (EI/D) の違いによっても変化することを意味している.

式(13)の関係は以前より用いられており, かつては道路橋下部構造設計指針・同解説(日本道路協会, 1976)において Chang のモデルを適用する場合の地盤反力係数の補正

方法として, 地盤反力係数に $y_0^{-\frac{1}{2}}$ を乗ずるという処置がなされている時代があった. また, 建築学会の建築基礎構造設計指針(2001)でも同様の補正方法が提案されている.

ここでは, 荷重点が地表面よりも高い場合について, 同様の関係式が得られないかどうか検討する. 荷重点が地表面よりも高い場合には, 港研方式は解析的には解けない. このため, 山下ら(1971)は標準的な条件の杭(基準杭と呼ぶ)について精密な計算を行い, 数値的に解を求めている. 一般的な杭に対する解は, 基準杭の計算結果に相似則を適用して求めることができるようになっている. ここでは, この相似則を用いて多くのケースについて解を求めた.

一般的に港湾施設の設計で想定される杭の諸元を前提に, 表-3 に示す範囲で変数を振って, 杭と荷重の条件が等しい場合について, 地表面変位が等しくなる k_{CH} と k_c , k_s の関係を検討した. 杭頭の条件(杭頭固定, 杭頭自由)と地盤反力モデルの条件(S 型, C 型)の組み合わせで 4 つの条件についてそれぞれ 1200 ケースずつ解析を行い, 多重

回帰分析を行なった。その結果、次に示すような関係があることがわかった。なお、これらの関係式における重相関係数は0.9999以上であった。その一例として杭頭自由の場合の k_{CH} と k_s からの推定式の関係を図-15に示す。

表-3 計算に用いた杭の条件の範囲

杭径 D	0.5~1.8 m
EI/D	120~6400 MN/m
載荷高さ h	1~20 m
地表面範囲 y_0	0.01~0.1 m
k_s or k_c	300~10000 kN/m ^{3.5} (or kN/m ^{2.5})

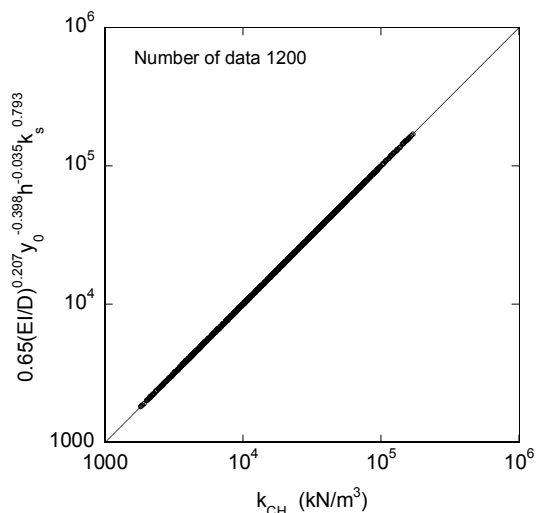


図-15 S型地盤杭頭自由条件における k_{CH} とその回帰曲線式の相関性

$$k_{CH} = 0.650 \left(\frac{EI}{D} \right)^{0.207} y_0^{-0.398} \cdot h^{-0.035} \cdot k_s^{0.793} \quad (\text{杭頭自由}) \quad (14)$$

$$k_{CH} = 0.763 \left(\frac{EI}{D} \right)^{0.216} y_0^{-0.392} \cdot h^{-0.088} \cdot k_s^{0.784} \quad (\text{杭頭固定}) \quad (15)$$

$$k_{CH} = 1.327 \left(\frac{EI}{D} \right)^{-0.001} y_0^{-0.499} \cdot h^{0.009} \cdot k_c^{1.001} \quad (\text{杭頭自由}) \quad (16)$$

$$k_{CH} = 1.266 \left(\frac{EI}{D} \right)^{-0.005} y_0^{-0.501} \cdot h^{0.028} \cdot k_c^{1.005} \quad (\text{杭頭固定}) \quad (17)$$

これらの関係式では、Changのモデルの地盤反力係数と港研方式の地盤反力係数の間には弱いながらも載荷高さ h の影響を受けることが示されている。

これらの式の精度を確認するために、図-10と図-11に示した実験条件での k_s と k_{CH} の関係について確認した。図

-10と図-11に示したとおり、この実験における最適の k_s は1200kN/m^{3.5}である。荷重条件が2.45kNと4.0kNのときの地表面変位は、それぞれ0.078mと0.145mであった。このときの載荷高さ0.25m、 $EI/D=14.7$ kNmであることから、荷重条件が2.45kNと4.00kNのときの k_{CH} は式(12)からそれぞれ912、713kN/m³となり、フィッティングによって求めた k_{CH} とほぼ一致している。

一方、C型地盤の実験結果は適当なものがないので、計算によって比較する。ここでは、図-13に示したのと同じ杭の条件、同じ地盤条件で比較した。 N 値が8のとき、 k_c は表-2から2080kN/m^{2.5}と推定される。水平荷重として、270kNと1200kNを載荷すると、地表面変位はそれぞれ0.010mと0.096mとなる。このとき、式(16)を用いて k_{CH} を計算すると、それぞれ26400kN/m³と8760kN/m³となる。これらの地盤反力係数は図-13に示したものと一致している。

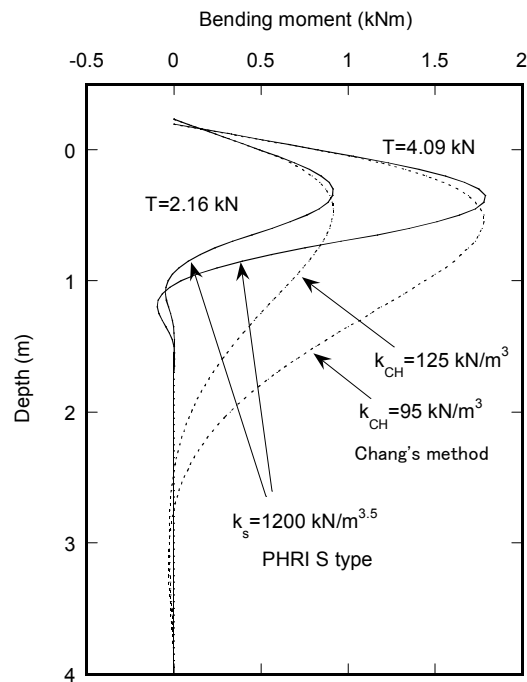
4.3 最大曲げモーメントで合わせた場合の相関性

杭の挙動で重要なのは、たわみそのもののほかに、発生する曲げモーメントがある。特に、最大曲げモーメントについてはその大きさと発生位置が重要で、これによって構造物の断面が決定されることになる。

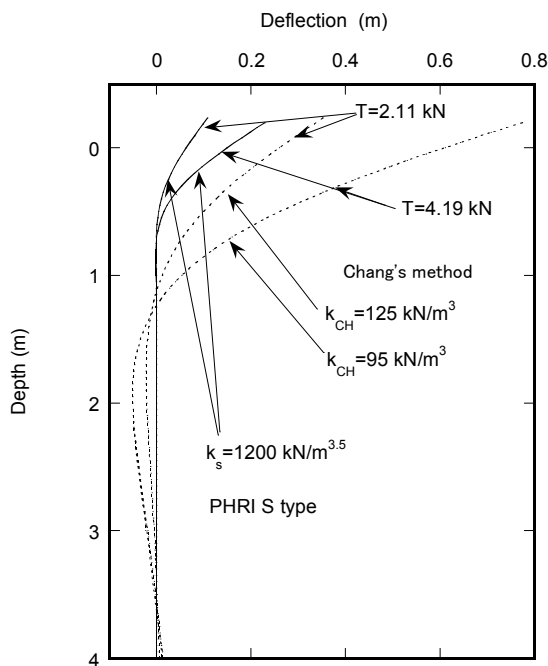
前節では、地表面変位を指標として比較をしてきたが、この方法では、特にS型地盤（すなわち、 N 値が深度方向に増加するような地盤）の場合に、Changのモデルを用いると曲げモーメントの過小評価をする危険性がある。

そこでここでは、最大曲げモーメントを一致させることによって港研方式のモデルとChangのモデルの相関性をとることにどのような意味があるかを示す。

4.1や4.2で示した実験とほぼ同じ条件で港研方式S型モデルとChangのモデルを比較してみた。その結果を図-16に示す。図-16(a)に曲げモーメント分布を示す。図からわかるようにここでは、最大曲げモーメントを一致させている。この場合は、当然のことながら、 k_{CH} は先ほどの結果に比べて非常に小さい値となっており、その結果曲げモーメント分布の収束が著しく悪くなっていることが分かる。このため、この計算では、杭の根入れ長を実験で用いたものよりも長いものとして計算している。この曲げモーメント分布の違いが杭のたわみ量に及ぼす影響は極めて大きく、このようなフィッティングをした場合には、杭のたわみの計算結果は図-16(b)に示すとおり両者で全くかけ離れたものとなる。



(a) 曲げモーメント分布



(b) 杭の変位分布

図-16 最大曲げモーメントを一致させるように地盤反力係数を決定したときの Chang のモデルと S 型モデルの計算結果の比較

S 型モデルと Chang のモデルとでこのような大きな乖離が生じる理由は、地盤反力モデル(例えば式(2)参照)の中に深度の項を考慮している(式(2)でいえば $f(x)$ を一定値としないこと)かどうかによるもの大きい。

このため、C 型モデルと Chang のモデルの間では、このような乖離は比較的小さくなるが、図-8 からわかるように、最大曲げモーメントを一致させるには、Chang のモデルにより小さめの地盤反力係数を設定させることとなり、杭に生じるたわみに乖離が出ることは違いがない。

以上のことからして、港研方式と Chang のモデルの相関を取るには、杭の地表面変位が一致する条件で決定することが望ましいと結論できる。

5. k_{CH} の推定式の提案

実務上は、地盤調査結果と地盤反力係数の関係を知りたいので、式(14)~(17)に表-2 に示した k_s あるいは k_c と N 値に関する関係から、 k_{CH} と N 値あるいは \bar{N} 値との関係を求めると次式のようなになる。

S 型地盤(N 値が深度方向に増加する地盤)の場合

$$k_{CH} = 103 \left(\frac{EI}{D} \right)^{0.207} y_0^{-0.398} \cdot h^{-0.035} \cdot \bar{N}^{0.519} \quad (\text{杭頭自由}) \quad (18)$$

$$k_{CH} = 114 \left(\frac{EI}{D} \right)^{0.216} y_0^{-0.392} \cdot h^{-0.088} \cdot \bar{N}^{0.513} \quad (\text{杭頭固定}) \quad (19)$$

C 型地盤(N 値が深度方向に一定の地盤)の場合

$$k_{CH} = 719 \left(\frac{EI}{D} \right)^{-0.001} y_0^{-0.499} \cdot h^{0.009} \cdot N^{0.649} \quad (\text{杭頭自由}) \quad (20)$$

$$k_{CH} = 557 \left(\frac{EI}{D} \right)^{-0.005} y_0^{-0.501} \cdot h^{0.028} \cdot N^{0.651} \quad (\text{杭頭固定}) \quad (21)$$

これまで、 k_{CH} は N 値と関連付けられてきたが、これらの式によって、 N 値だけではなく、 \bar{N} 値とも関連付けられたことになる。また、杭頭の条件によっても関係式を変えるべきであることが示されたことになる。特に、 \bar{N} 値との関連を示したということは、S 型地盤の場合の Chang のモデルの地盤反力係数の考え方を新たに示したことになる。この場合、 k_{CH} は \bar{N} 値のみならず、杭の条件である (EI/D) の影響も受けることに注意が必要である。なお、 (EI/D) の項は、式(5)からもわかるように、 β を決定する要因のひとつである。 $1/\beta$ は杭の曲げに主たる影響を及ぼす範囲(深さ)の指標であり、S 型地盤の場合には、この深さが変わると杭の軸直角方向の抵抗特性を表現する地盤反力係数に違いが生じる。このために、S 型地盤の場合には、 k_{CH} が \bar{N} 値のみならず、 (EI/D) の影響も受けることになるものと考えられる。

なお、杭頭固定と杭頭自由という条件は杭頭の条件としては極端な条件である。現実には生じる杭頭が半固定の場合の杭の挙動の考え方は菊池(2003)にまとめられている。

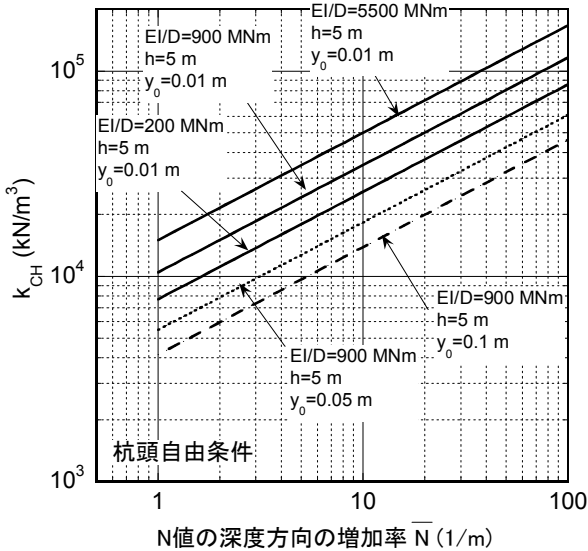


図-17 S型地盤の場合の \bar{N} 値と k_{CH} の新しい関係

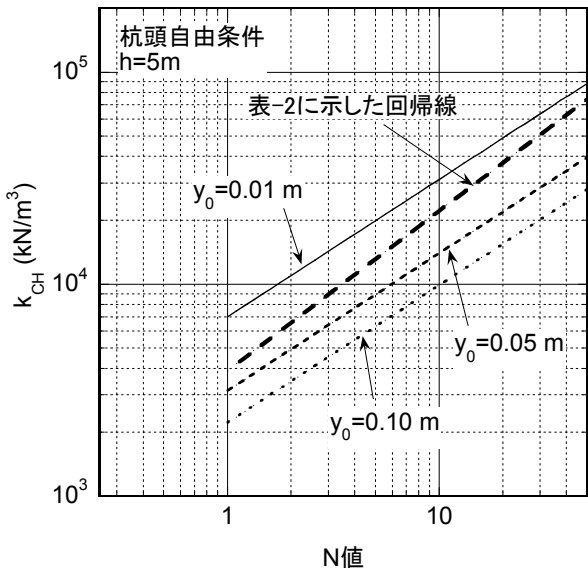


図-18 C型地盤の場合の N 値と k_{CH} の新しい関係

式(18)から(20)に示した関係のうち、杭頭自由の条件である、式(18)と式(20)についての計算結果の一例をそれぞれ図-17と図-18に示した。

図-17はS型地盤(N 値が深度方向に増加する地盤)について計算した例を示したものである。全部で5つの線が示されている。このうち、真中の線が、この計算における基本となる計算結果を示したものである。つまり、このときの計算条件は、 $(EI/D)=200\text{MNm}$ 、荷高 $h=5\text{m}$ 、

$y_0=0.01\text{m}$ の時のものである。下側の2本の点線は、 y_0 のレベルを変えたものである。これらの線の比較から、考える y_0 のレベルが大きくなるにつれて、同じ \bar{N} 値に対して取るべき k_{CH} が小さくなることがわかる。

一方、基本となる計算結果の上側にある2本の実線は、杭の曲げ剛性(EI/D)を増加させた場合の計算結果である。このとき、荷高 h 、地表面変位 y_0 は基本となる計算条件と同一である。この計算結果を比較すると、 (EI/D) が大きくなるほど同じ \bar{N} 値に対して取るべき k_{CH} が大きくなることがわかる。

図-18はC型地盤(N 値が深度方向に一定と考えられる地盤)について計算した例を示したものである。この図には、図-5に示した、横山の示した関係図から最小二乗法で求めた曲線を太い破線で示した。他の線は、式(20)を用いていくつかのレベルの地表面変位 y_0 の場合について図示したものである。図-5から最小二乗法によって求められた線と他の線がほぼ平行となっているところが特徴的である。横山は、 $y_0=0.01\text{m}$ のところでデータを整理していたので、図-18の実線と一致するのが望ましいところであるが、横山は図-17のような N 値が深度方向に変化するケースについても一緒に取りまとめたためにこのような違いが生じたものと思われる。

以上をまとめると次のようになる。図-5に示した技術基準における k_{CH} と N 値の関係は地表面変位 $y_0=1\text{cm}$ を基準に作成されていた。 N 値が一定の地盤であれば、 k_c のように推定結果にばらつきが生じなかったものと考えられる。しかし、S型地盤(深度方向に N 値が増加する地盤)の条件では k_{CH} の推定結果に、 EI/D の違いが大きく影響する。このことによる変動性をうまく表現できていなかったことが N 値からの推定結果のばらつきの原因になっていたものと考えられる。

6. 設計用値に及ぼす影響

新しい技術基準では、直杭式横棧橋の船舶の作用による変動状態(耐震強化施設以外)の際の地盤反力係数 k_{CH} の部分係数として表-3のものを示している。

ここで、偏差が1.333となっているのは、図-5の細い実線の関係式 $k_{CH}=2000N$ が k_{CH} の平均値 μ であると考えた場合に、横棧橋の設計に用いる k_{CH} の特性値 k_{CH_k} と N 値の関係式は $k_{CH_k}=1500N$ となっているためである。つまり、この分の偏差があるとしたものである。

このように、偏差が1.333と大きいにもかかわらず、非常に小さい部分係数が設定されていることがわかる。このような結果となる最大の要因は、変動係数が大きいことにある(表-2参照)。また、このような大きな変動係数は設計用地盤パラメータの設定上何らかの問題があると判断されるレベルであり(国土交通省, 2007)、モデルが適切でないという評価となる。

表-3 直杭式横棧橋の船舶の作用による変動状態(耐震強化施設以外)において、杭の応力を照査する際に用いる地盤反力係数の部分係数

部分係数 γ	0.6
目標破壊確率 P_{JT}	1.9×10^{-3} ($\beta_T=2.9$)
感度 α	0.257
偏差 μ/X_k	1.333
変動係数 V	0.76
確率分布	対数正規分布

一方、新たに提案した関係式を用いて同じ k_{CH} に用いる部分係数の計算内容を示したのが、表-4 である。変動係数は、表-2 にあるように S 型地盤であるか、C 型地盤であるかによって多少異なるが、ここでは、大きいほうの値を用いている。なお、感度係数は設計点の取り方によって多少変動するが、基本的に設計モデルに依存するものであるので、ここでは、従来の式を用いた場合と同じ感度係数を持つものとした。

表-4 直杭式横棧橋の船舶の作用による変動状態(耐震強化施設以外)において、杭の応力を照査する際に用いる地盤反力係数の部分係数(提案式による場合)

部分係数 γ	0.92
目標破壊確率 P_{JT}	1.9×10^{-3} ($\beta_T=2.9$)
感度 α	0.257
偏差 μ/X_k	1.0
変動係数 V	0.10
確率分布	対数正規分布

ここで、杭径 D が 1m、曲げ剛性 $EI=1 \times 10^6 \text{kNm}^2$ の杭が地表面変位 y_0 で 1cm となる場合の設計を考えてみる。なお、載荷高さは 5m とする。また、杭頭は自由条件であると考えてよい。地盤は S 型地盤で、1m 当たりの N 値の増加率が 5 となるような地盤であるとする。

現行の k_{CH} の推定式では、特性値 β を求めることが必要となる。この杭と地盤の条件では、簡単な繰り返し計算の結果から、 $1/\beta$ が 4m 程度であったので、 $1/\beta$ 区間の平均 N 値は 10 程度となる。この結果から、 k_{CH} の特性値 $k_{CHK}=1500N=15000 \text{ kN/m}^3$ が推定され、設計用値 k_{CHd} は 9000 kN/m^3 となる。

一方の新しい提案式では、式(18)より、特性値 $k_{CHK}=24700 \text{ kN/m}^3$ となり、設計用値 k_{CHd} は、 22700 kN/m^3 となる。

このような違いとなった原因は、そもそも、従来の相関式が、 N 値が小さい所で過小な地盤反力係数を推定していた上に、地盤のモデル化が不適切であったために、用いら

れている相関式が大きくなばらつきを有していたことによる。このため、設計照査時に不当に小さな地盤反力係数を用いることが強いられていた。

7. 結論

従来から、技術基準では、杭の横抵抗を推定するために、Chang のモデルのほかに、港研方式を提示してきた。これらの方法を用いるためには、地盤反力係数を決定することが必要となる。このため、技術基準では、 N 値から地盤反力を決定するための図表を提供している。これらの図をもとに、それぞれの地盤反力モデルで用いられる地盤反力係数と N 値の間の相関性を整理すると、Chang のモデルの場合の相関性が著しく悪く、港研方式の場合には相関性が良いことがわかった。

そこで、港研方式の地盤反力係数と N 値の関係を用いて、Chang のモデルに用いる地盤反力係数と N 値の関係を整理し直した。そして、Chang のモデルに用いる地盤反力係数と N 値の関係について新たな関係式を提案した。

新たな関係式から、Chang のモデルが N 値と相関が悪くなっていた理由は、 N 値が深度方向に増加するような地盤においては、Chang のモデルに用いる地盤反力係数が、杭の単位幅当たりの断面剛性 EI/D の影響を強く受けているためであることがわかった。

最後に、新たに提案した相関式を用いることで、設計に用いる地盤反力係数の値が改善されることを示した。

8. おわりに

我が国の杭の横抵抗の設計はどの機関においても、おおむね弾性床上の梁理論に基づいて行われている。この場合には、地盤反力係数のモデルをどのように設定するかが議論となる。この地盤反力係数のモデルとして、港湾の技術基準を除くほとんどの基準が Chang のモデルを適用している。これは数学的取り扱いが簡便なことによると思われる。

著者のこれまでの経験からすると、杭の横抵抗を考える際に、地盤反力のモデルに非線形性が入っていることが極めて重要である。すなわち、杭の横抵抗の現象を弾性床上の梁理論の観点からみれば明らかに地盤ばねの非線形性が効いている。残念ながら Chang のモデルだけを取り扱っている限り、そのことに対する理解は深まらない。本論文中に示したように、Chang のモデルでは、S 型地盤での曲げモーメント分布を適切に表現できないなど、致命的と思われる欠陥があるので、本来は港研方式によって杭の軸

直角方向の挙動を検討すべきである。しかし、解析の汎用性から、港研方式を用いることが難しい場合がある。そこで、Chang のモデルに用いる地盤反力係数の推定方法の改善を目指した。

ここで提案した式は 2007 年の技術基準に掲載されている。しかし、各構造物の設計で用いられている N 値と Chang のモデルの地盤反力係数の関係は旧来のものである。これは、この論文に示した新しい関係式の提案が技術基準の改定作業の終期に出てきたものであったためである。現在の技術基準は、膨大な数値計算の結果として示されたものであり、その計算作業を繰り返す時間が取れなかったことによる。なお、推定誤差が設計計算結果に及ぼす影響は、パラメータの感度に依存するので、相関式の相異の影響は、構造形式(設計照査式)ごとに異なる。技術基準の利用に当たってはこの点について十分に注意されたい。

最後に、本研究を始める際に行った清水建設(株)の鈴木誠博士とのディスカッションが大変役立ちました。熊本大学大谷順教授には、地盤反力モデルの考え方について示唆をいただきました。また、港湾空港技術研究所地盤・構造部森川嘉之チームリーダーと水谷崇亮主任研究官には、原稿について貴重なご意見をいただきました。記して謝意を表します。

(2009年8月14日受付)

参考文献

- Kikuchi, Y., & Suzuki, M. (2006): Variance of the subgrade reaction for the estimating the resistance of a pile perpendicular to pile axis, ASCE GeoShanghai, pp.111-118.
- 運輸省港湾局監修(1999): 港湾の施設の技術上の基準・同解説.
- 運輸省港湾技術研究所・八幡製鉄株式会社(1963): Hパイルの水平抵抗に関する研究, p.353.
- 菊池喜昭・高橋邦夫・鈴木操(1992): 繰返し水平荷重下で大変形する砂地盤中の杭の挙動, 港研報告第31巻第4号, pp.33-60.
- 菊池喜昭(2003): 軟弱粘性土地盤着底式くし形構造物の横抵抗特性に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1039, pp.89-90.
- 菊池喜昭・鈴木誠(2007): 杭の軸直角方向抵抗推定のための地盤反力係数モデルの検討, JCOSSAR2007, pp.289-292.
- 久保浩一(1962): 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, pp.533-559.
- 久保浩一(1964): 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, 37p.
- 国土交通省港湾局監修(2007): 港湾の施設の技術上の基準・同解説.
- 篠原登美雄・久保浩一(1961): 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, pp.169-242.
- 日本建築学会(2001): 建築基礎構造設計指針, pp.276-277.
- 日本道路協会(1976): 道路橋下部構造設計指針・同解説 くい基礎の設計篇, p.57.
- 山下生比古・稲富隆昌・小倉紘一郎・奥山育英(1971): 数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, pp.107-168.
- 横山幸満(1977): くい構造物の計算法と計算例, pp.71-72, 山海堂.

港湾空港技術研究所報告 第48巻第4号

2009.12

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 昭和情報プロセス株式会社

Copyright © (2009) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI.

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

CONTENTS

Horizontal Subgrade Reaction Model for Estimation of Lateral Resistance of Pile	Yoshiaki KIKUCHI	3
Corrosion Behavior of Steel Bars in Reinforced Concrete Slabs Repaired by Partial Patching	Ema KATO, Yoshikazu AKIRA, Mitsuyasu IWANAMI, Hiroshi YOKOTA	23
Development of Underwater Three-Dimensional Imaging SONAR System with Acoustic Lens	Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA, Natsuki YOSHIZUMI.....	53
Proposals of non-destructive methods to detect stripping damages in airport asphalt concrete layers	Ryota MAEKAWA, Kai SU, Junichi MIZUKAMI, Yukitomo TSUBOKAWA	71
Development of Noncontact Thickness Gauging Equipment for Underwater Steel Structure	Natsuki YOSHIZUMI, Sayuri MATSUMOTO, Kageyoshi KATAKURA	89
Steam-Driven Ejector Applied to Spilled Oil Recovery	Isamu FUJITA, Muneo YOSHIE, Kenji TAKEZAKI	109