

港湾技研資料

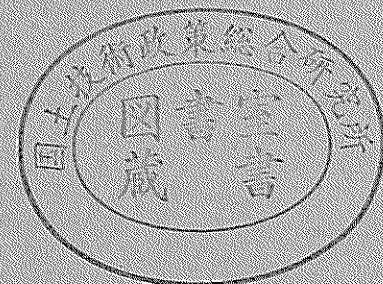
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No.916 Sept. 1998

壁に作用する土圧に及ぼす壁面摩擦の影響

菊池喜昭
吉野博之

運輸省港湾技術研究所



目 次

要 旨	3
1. はじめに	3
2. 既往の研究	4
3. 実験装置と実験方法	5
3.1 実験に用いた装置と砂	5
3.2 実験方法	5
4. 壁面摩擦の測定を伴う土圧実験	6
4.1 実験のケースと土圧算定方法	6
4.2 壁面摩擦除去処理のある場合の土圧実験	7
4.3 壁面摩擦除去処理のない場合の受働土圧実験	13
5. 考察	14
6. まとめ	17
7. おわりに	18
参考文献	18
記号表	19

壁に作用する土圧に及ぼす壁面摩擦の影響

菊池喜昭*

吉野博之**

要 旨

基礎構造物は、土圧に抵抗したり、土圧を利用したりする構造物であり、数多く築造されてきている。このため、土圧に関する研究は古くからなされており、実用式も提案されている。しかし、土圧を測定することは比較的難しく、設計値と実測値の比較は不十分な状況にある。実験的にみても壁面に垂直な合力もしくは応力分布を測定した事例が中心であり、壁面に作用するせん断力については合力を測定した例がいくつかある程度で、壁面摩擦角についての詳細な検討は十分ではない。

そこで、壁面に作用する垂直方向とせん断方向の荷重を同時に計測できる二分力計を用いた土圧実験を行い、壁の移動に伴う壁面摩擦角の変化の様子を調べ、壁面摩擦がどのように作用しているかについて検討した。その結果、以下のような結論を得た。

- (1) 静止状態及び主働状態では壁面摩擦係数は深度方向にほぼ一定である。今回の実験では、これらの状態のときにはほぼ完全に摩擦力が発揮されているようであった。
- (2) 壁が下端を中心に回転挙動をしながら静止状態から受働状態へと変化する場合には、壁の上部から受働状態に達する。受働状態に達した時の上部の摩擦係数はほぼ一定値になっている。この時の受働状態の壁面垂直応力係数は実測値と理論値で良い対応を示した。
- (3) 壁が下端を中心に回転挙動をしながら静止状態から受働状態へと変化する場合には、壁に作用する摩擦力は大きさおよび向きが変化する。この時、壁面の最大摩擦係数の違いによって、変化の仕方が異なる。
- (4) 受働状態に達する過程での壁の各深度に生じる壁面垂直応力と変位の関係は非線形である。また、この壁面垂直応力は壁面摩擦係数の影響を受けているようである。

キーワード：土圧，壁面摩擦，受働土圧，模型実験

1. はじめに

土留め壁、重力式構造物、根入れ構造物などはいずれも土圧に抵抗したり土圧を利用したりする構造物である。このため、これらの構造物へ作用する土圧に関しては古くから研究がなされており、設計手法として実務にも使用されている。しかし、土圧を精度よく測定することは比較的難しく、設計値と実測値の比較検討は不十分な状況にある。実験的にも壁面に垂直な合力もしくは応力分布を測定した事例が中心であり、壁面に作用するせん断力については合力を測定した例がいくつかあるくらいで、壁面の摩擦角について詳細な検討は十分ではない。

既往の研究によると、構造物の設計に用いられる

クーロン土圧式で受働土圧を計算する際、内部摩擦角、壁面摩擦角が大きい場合には土圧係数が異常に大きく計算されることが知られている。また、クーロン土圧式を用いると受働土圧は壁面摩擦角の変化によって変化する度合いが大きいことがわかっている²⁾。壁面摩擦角は、壁面垂直応力と壁面せん断応力の比より求められるものであり、受働土圧の評価にはせん断応力の測定が重要であることを意味している。また、もし土圧算定に用いる土の内部摩擦角が明らかであれば、実験によって得られた土圧係数から壁面摩擦角を推定することが可能となるが、一般的には、特に模型実験では内部摩擦角を特定することが難しく、土圧や発生するすべり線などの議論には、壁面摩擦角の測定が重要となってくる。

このように、壁面摩擦角の測定は重要であるが、これ

* 土質部基礎工研究室長

(〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 運輸省港湾技術研究所 電話：0468-44-5024 FAX：0468-44-0618

E-mail：kikuchi@phri.go.jp)

** 前土質部基礎工研究室研修生(八千代エンジニアリング(株))

までの研究では、せん断応力分布を計測した事例がほとんどなく、壁に作用する垂直合力と、せん断応力の合力でしか壁面摩擦角を評価できなかった。そこで、壁面に作用する垂直方向とせん断方向の荷重を同時に計測できる二分力計を用いた土圧実験を行い、壁の移動に伴う壁面摩擦角の変化の様子を調べ、壁面摩擦が測定される土圧にどのように影響するかを検討したものである。

2. 既往の研究

一般に、土留め壁のような壁体は変位させる方法によって、壁体背後に生じる地盤の崩壊形状は著しく異なり、壁体に作用する土圧分布は、壁体の挙動によって変化することが知られている。

市原ら³⁾は、振動時にも土圧が精度良く測定できるように工夫された大型砂槽(長さ2.0m×巾1.0m×深さ0.75m)内で、気乾状態の標準砂と矢作川砂を用いて、無振動状態のまま壁体を連続的に変位させた時の土圧とせん断力の特性について詳細な検討をした。この砂槽の可動壁の下端を中心に可動壁を主働、受働側に回転させることにより、土圧の変化を測定し、土圧3要素(土圧係数 K 、土圧合力の相対着力点 h/H 、壁面摩擦係数 $\tan\delta$)の変化の様相を調べた。彼らは密詰め地盤の実験結果から土圧3要素のいずれもが、可動壁を主働側に0.0004rad程度傾けたときに概ね一定の値に達していることを示し、壁のわずかな回転変位で、主働平衡状態に達することを示した。また、この実験では、壁面に作用する垂直合力とせん断合力から求めた壁面摩擦係数 $\tan\delta$ は砂充填時には0.08($\delta=5^\circ$)程度であったが、可動壁の主働側への回転角が0.0004rad程度となった時には0.51($\delta=27^\circ$)と最大値になっていた。また、彼らは緩い砂の状態においても同様の検討を行っており(図-1)、主働状態での壁面摩擦係数は密な砂とほとんど等しい結果となった。

彼らは、壁面と砂との壁面摩擦係数を求めるために直接せん断試験を別途実施し、土圧実験で土圧測定に用いた壁と同様に加工されたラッカーを塗布したアルミニウム版を用いてその面と砂との間に生じる壁面摩擦角 δ を測定し、相対密度によらずほぼ 30° であることを示した。この結果と主働時の壁面摩擦角とは良く対応していた。

高橋・春日井ら⁴⁾は、相模川で採取された砂を気乾状態で用い、壁間隔を変化させたり壁を傾斜させたりして土圧、壁面せん断力、壁面摩擦係数を計測した。彼らの用いた実験用土槽(長さ2.4m×巾2.0m×深さ2.0m)の一方は斜面壁になっており、壁体を傾斜させることができ

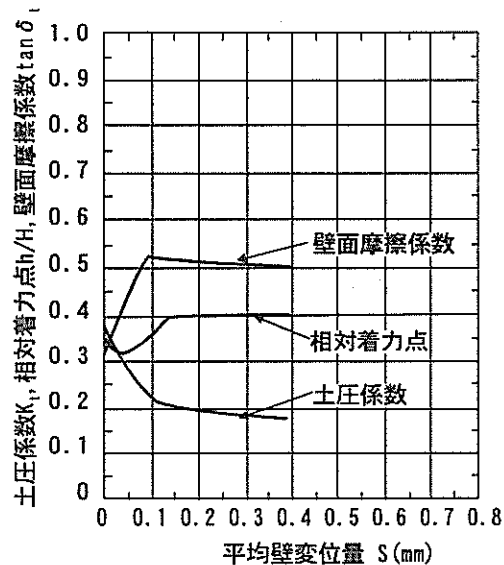


図-1 ゆるい砂における壁の変位に対する土圧3要素の変化

る。計測機器は土圧計を深度方向に5個2列に取付けられ、斜面壁の背後には引張型荷重計及び圧縮型荷重計をあわせて8個と、斜面壁に作用する垂直力を測定する荷重計2個が取付けられている。これらの荷重計を用いた土圧、垂直荷重を計測した。壁体はコンクリート製で壁面摩擦除去処理をしておらず、締め固めにより密な地盤を作成している。彼らの計測した壁面摩擦係数は $\tan\delta = 0.35 \sim 0.90$ ($\delta = 19.3 \sim 42.0^\circ$)となっており、非常にばらついていた。

以上の二つの実験では、壁の変位に対する壁全体の土圧、せん断力の合力を測定しているのみであるので、土圧、せん断力、壁面摩擦係数の深度分布は不明である。特に、高橋・春日井らが示したように壁面摩擦係数が大きく変動する場合には、壁面摩擦係数が一様ではなく、またその影響によって得られる土圧係数の値にばらつきがあることが考えられる。

菊池ら⁵⁾は、気乾状態の高萩砂を用い、数多くの土圧実験を行うことで、土圧のばらつきの検討をした。彼らの実験結果によると静止土圧、主働土圧、受働土圧の変動係数はそれぞれ0.1程度以上の変動係数を有していることがわかった。これは、非常にコントロールされた条件下で実験されているため、土圧のばらつきの下限値に近い値を提供していると考えられる。この時の実験では、地盤作成方法などには非常に気を使って実験をしていたが、壁面摩擦係数のような制御しきれない要因によって土圧係数が変動した可能性がある。

また、菊池ら⁵⁾は、近接した動かない構造物に挟まれた土による土圧と構造物の接近度の関係について実験を

行っており、壁面摩擦係数の存在により、壁間隔の違いによって静止状態の壁面垂直応力係数や主動状態の壁面垂直応力係数が変化することを示した。

3. 実験装置と実験方法

3.1 実験に用いた装置と砂

本実験では図-2に示す土槽²⁾(長さ2.0m×幅1.8m×高さ1.0m)を用いた。この土槽は可動壁が設置できる構造となっている。可動壁は2枚あり、一方の可動壁の設置位置は固定されており、土槽壁からほぼ20cm離れたところに設置されている(この壁を以降“受圧壁”と呼ぶ)。他方の壁(この壁を以降“加圧壁”と呼ぶ)は受圧壁から20, 30, 50, 80cmの場所に設置することができる。各壁は下端で底版に剛結されており、下端から20cmの所を中心に回転出来るようなヒンジ構造となっている。回転部の高さは60cmである。受圧壁の回転部の幅方向の中央には、壁面垂直応力と壁面の上下方向に作用するせん断力の深度分布を測定するために、二分力計を8個組み込んでいる(図-3)。

図-3に示す二分力計は、高さ7.5cm×幅15cm×厚さ5.6cmで、二枚の受圧版とセンサー部から構成されている。受圧版の材質はアルミニウムであり、容量は面垂直方向で約50kgf(0.44kgf/cm²、定格出力2000 μ)、せん断方向で約10kgf(0.089kgf/cm²、定格出力500 μ)である。この二分力計を用いて、受圧壁に作用する壁面垂直応力とせん断応力を同時に測定した。

今回用いた土槽では、構造上土槽内に設置した受圧壁・加圧壁のヒンジの遊びが問題となる²⁾。ヒンジの遊びが大きければ、変位量や計測された応力に影響を生じるものと考えられるが、その影響は下端付近の結果に顕著に現れる。そこで、下端付近の計測結果のうち、明らかにおかしいと考えられる結果については利用しないこととし、実験結果への影響をできるだけ小さくするように考慮した。

実験に使用した砂は茨城県高萩海岸の砂(高萩砂)である。高萩砂の物理定数は $\rho_s = 2.655\text{g/cm}^3$ 、 $e_{\max} = 0.986$ 、 $e_{\min} = 0.639$ である。試料の粒径加積曲線を図-4に示す。均等係数 U_c は1.88である。実験では、この砂を自然乾燥状態で用いた。

3.2 実験方法

(1) 壁面摩擦除去処理

今回の実験では、壁面摩擦角が土圧に与える影響を調べるため、壁面摩擦がある状態とない状態の2種類につ

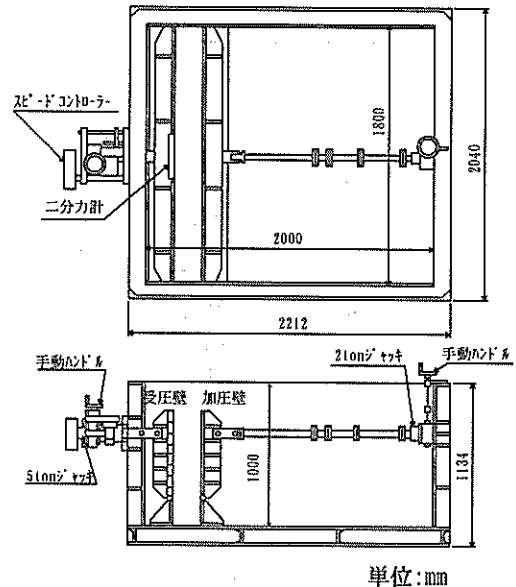


図-2 実験土槽

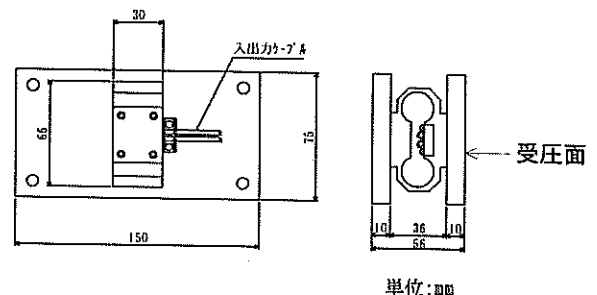


図-3 二分力計

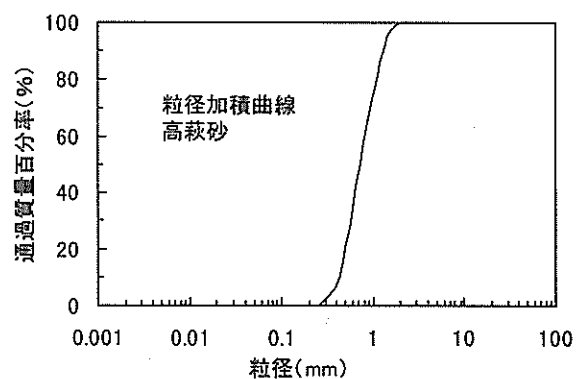


図-4 粒径加積曲線

いて実験を行った。

本実験で用いた壁面摩擦除去処理の方法は以下のとおりである。すなわち、まず壁体へビニールシートを展帳し、ビニールシートへ直接シリコングリスを塗布した後、再びビニールシートを展帳した。この方法は二重に展帳したビニールシートの中にシリコングリスを挟むことで、この間の摩擦を小さくし、砂と壁の間に発生する

表-1 実験ケース一覧

実験ケース名	壁を回転させた方向	壁面間隔 B(cm)	地盤高さ (cm)	単位体積重量 γ_a (gf/cm ³)	相対密度 D_r (%)	間げき比 e	摩擦除去処理の有無
1-01	主働側	20	75	1.444	42	0.839	有り
1-02	主働側	30	75	1.444	42	0.839	有り
1-03	主働側	50	75	1.446	43	0.836	有り
1-04	主働側	80	75	1.451	45	0.830	有り
3-01	受働側	180	80	1.467	51	0.810	有り
3-01-1	受働側	180	80	1.451	45	0.830	有り
3-02	受働側	180	80	1.451	45	0.830	無し
3-03	受働側	180	80	1.451	45	0.830	無し

壁面摩擦を低減することをねらった方法である。この処理を行ったケースでは、二つの可動壁のみならず、側面の2つの土槽壁についても同様の壁面摩擦除去処理を実施した。

実験ではこのような処理を行ったケースと行っていないケースとがある。そこで、処理を行ったケースについては壁面摩擦除去処理のある場合と呼び、行っていないケースについては、壁面摩擦除去処理のない場合と呼ぶことにする。

(2) 実験方法

静止状態と主働側の壁面垂直応力及びせん断力分布を調べる実験では、加圧壁の設置位置を変えることにより壁の間隔を4種類に変化させて実験をした。受働状態を調べる実験では、加圧壁を用いないで実験を行った。

実験では、まず加圧壁を設置し、地盤を作成した。地盤は乾燥状態の砂をホッパーに入れ、空中落下させて、一層の撒き出し厚を10cmとして地盤を作成した。ホッパーの先端にはホースがついており、ホースの吐き出し口からの落下高さはほぼ20cmになるように調節しながら均一な地盤となるようにした。目標とした相対密度は45%であるが、できあがった地盤の相対密度は42~51%となった。

地盤作成直後の状態を静止状態として、各種計測を実施した。ついで、受圧壁を回転させて主働側と受働側の土圧を求める実験を行った。受圧壁の回転速度は0.01 rad/minとした。

実験中は、全ての実験で受圧壁の二分力計に作用する垂直力とせん断力を測定した。この測定により壁面垂直応力、せん断応力の深度方向の分布と受圧壁に作用する土圧合力、壁面摩擦係数を求めた。なお、壁面せん断応力が上向きに作用している場合を正とした。

受圧壁の回転角は、受圧壁の上端に設置した傾斜計を用いて計測した。受圧壁を回転させたときに、加圧壁が

変位していないことを確認するため、加圧壁にも傾斜計を設置した。

各部の水平変位は、受圧壁が下端から20cmのヒンジを中心に回転しており、たわまないものとして算定した。

地盤面の鉛直変位は地表面に設置された変位計によって測定した。地盤の変形の様子は色砂を用いて土槽側面のアクリル版をとおして観察した。

4. 壁面摩擦の測定を伴う土圧実験

4.1 実験のケースと土圧算定方法

表-1に今回行った実験ケースの一覧を示す。静止状態の土圧はこれらの実験の全てのケースで計測してある。

以降の検討において、土圧測定深度の補正、壁面垂直力の合力の算定、各深度毎の壁面垂直応力係数の算定は以下のような方法によって行っている。

(a) 土圧測定深度の補正

この実験では、砂を投入した直後の静止状態から主働側、受働側へと移行した時、地盤面の高さが変化する。

ところで、静止状態、主働側、受働側における土圧係数を求めるためには、二分力計で測定される壁面垂直応力と、地表面から二分力計までの深度より求められる鉛直応力が必要となる。このため、実験解析において、地盤面の高さを正確に把握することは重要である。また、壁を回転させることにより地盤面の高さが変化する場合には、壁の近傍の地盤面は斜面になっており、各深さに設置してある二分力計の深さでの鉛直応力を求めるのに考慮すべき地表面の範囲には適切な評価が必要である。

地盤面から二分力計までの深度の補正は次式によって行った。

$$H_1 = H(1 - \cos\theta) + h_0 \cos\theta - d \quad (1)$$

ここに、

- H_1 : 地表面から二分力計中央までの垂直距離
- h_0 : 初期状態での地盤面から二分力計中央までの距離
- d : 地盤面の高さの変化分
- H : 壁面のヒンジ点より上方向に測った地盤の初期高さ
- θ : 受圧壁の回転角

である。

(b) 壁面垂直力の合力の算定

壁面垂直力の合力は二分力計の計測値を深さ方向に積分して求めた。

$$P_N = \sum P_{Ei} \quad (2)$$

ここに、

- P_N : 壁面垂直力の合力
- P_{Ei} : 各二分力計に作用する壁面垂直力

である。

(c) 各深度の壁面垂直応力係数の算定

深度毎の壁面垂直応力係数は各二分力計の読み値とその位置における土被り圧との比であるとして、次式で求めた。

$$K \cos \delta = \frac{P_E}{\gamma_t H_1 A_E} \quad (3)$$

ここに、

- $K \cos \delta$: 各深度の壁面垂直応力係数
 - P_E : 二分力計に作用する壁面垂直力
 - γ_t : 地盤の乾燥密度
 - A_E : 二分力計の受圧面積 (7.5cm × 15cm)
- である。

4.2 壁面摩擦除去処理のある場合の土圧実験

(1) 静止状態における土圧

静止状態の壁面垂直応力とせん断応力の深度分布の例(実験ケース1-04)を図-5に示す。図-5からわかるように、壁面垂直応力、せん断応力分布は深度とともに増加する傾向を示している。

図-6に各壁間隔での静止状態の壁面垂直応力係数 $K_0 \cos \delta$ の深度分布を示す。図-6によると、壁間隔 B が20cmと30cmの場合には深くなるにつれて静止状態の壁面垂直応力係数が増加し、壁間隔 B が50cmと80cmの場合には深度が深くなっても静止状態の壁面垂直応力係数は増加せず、逆に減少傾向にある。また、 $K_0 \cos \delta$ は壁間隔が大きくなるにつれて大きくなっている。ただし、今回の計測では、壁面摩擦除去処理のある場合には、壁面垂直応力の測定値に多少の変動があることが考えられ、

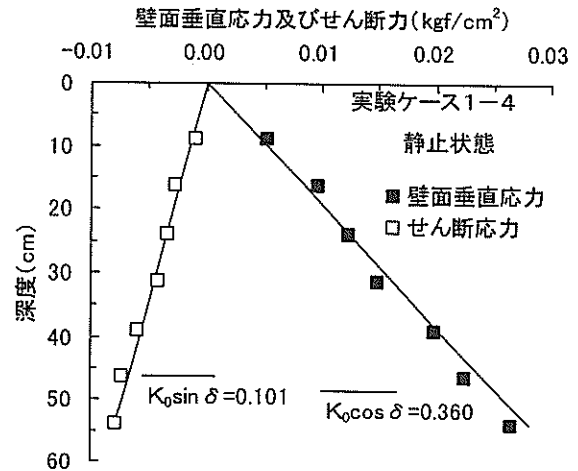


図-5 静止状態の壁面垂直応力とせん断応力の分布の例

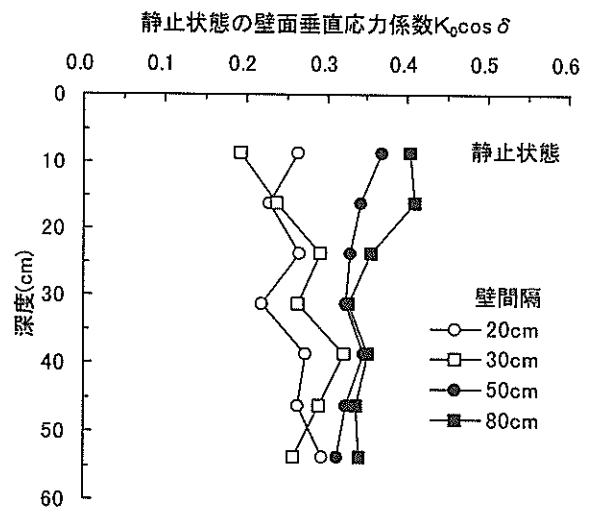


図-6 壁間隔の違いによる静止状態の壁面垂直応力係数の違い

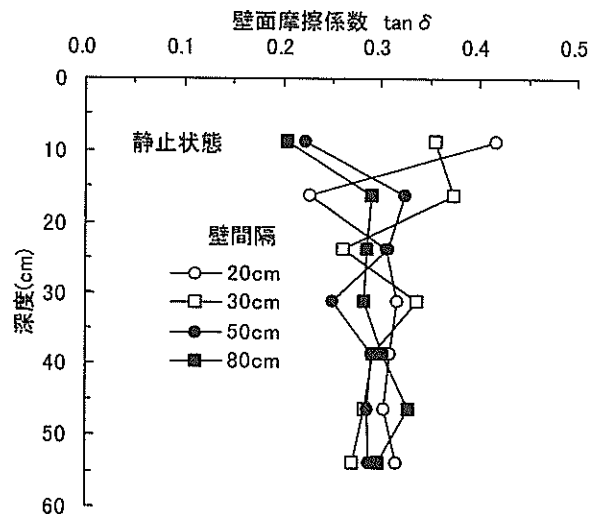


図-7 壁間隔の違いによる静止状態の壁面摩擦係数の違い

特に深度 15cm くらいより浅いところでは、もともとの計測値が小さいこともあり、測定データの変動を受けやすい状況にあったことに注意する必要がある。このことを考えると少なくとも 20cm より深いところでは静止状態の壁面垂直応力係数が深度方向に変化しているような傾向にはなかったといえる。今回の実験で得られた静止状態の壁面垂直応力係数は前回の計測値の平均²⁾に比べると全体的にやや低めであるが、全体的な傾向としては、ほぼ同じものであった。なお、このような結果となったひとつの可能性としては、今回の摩擦除去処理方法は摩擦角を小さくする方法としては望ましいものではあるが、応力レベルが低いときにはグリスの粘性抵抗のほうが本来の壁面摩擦角によるものよりも大きな壁面せん断抵抗を示してしまうため、壁面上部では摩擦除去処理をしないときよりも壁面の抵抗を大きくするような結果となっていたことが影響していることが考えられる。

図-7に各壁間隔での壁面摩擦係数 $\tan\delta$ の深度分布を示す。全ての壁間隔において深度が 30cm までは壁面摩擦係数の値はばらついているが、それ以深では壁面摩擦係数は一定の値を示すようになり、その値は壁間隔によらずほぼ 0.3 となる。既に述べてきているように、浅部では二分力計の精度に比べて測定データの大きさが小さかったため、多少精度が悪くなっているようである。そこで、静止状態の測定において二分力計で計測された壁面垂直応力の測定値のみが $\pm 1\mu$ 変動しているものとして壁面摩擦係数の変化を計算してみた。その結果、深度 8.75cm の二分力計の壁面摩擦係数 $\tan\delta$ は $0.05(\delta=1.2^\circ)$ 程度の違いを示し、測定値に対する割合として約 13% と極めて高いことが判明した。また、違いの割合は深度が深くなるに従い小さくなる傾向を示し、深度 23.75cm 以深では 5% 以下になった。このように考えた場合の壁面摩擦係数のばらつきが 5% 以下となる範囲における壁面摩擦係数 $\tan\delta$ は壁間隔 B が 20cm の場合で 0.30~0.31、壁間隔 B が 30cm では 0.27~0.29、壁間隔 B が 50cm では 0.27~0.30、壁間隔 B が 80cm では 0.30~0.33 となっており、壁間隔の影響をほとんど受けていないことがわかる。なお、これらから δ を求めてみるとおよそ $15^\circ \sim 18^\circ$ の範囲にあった。

(2) 壁を主働側に変位させた場合の土圧

受圧壁を主働側へ回転変位させた時の二分力計の出力の一例(実験ケース 1-03)を図-8に示す。地表面に最も近い二分力計は実験中に地表面よりも上に出てしまうこと、また、回転の中心に近い、最も下の二分力計はヒンジの遊びが測定値に与える影響が懸念されるため、これら最上端と最下端の二分力計を除いた残りの深度の二

分力計についてのみ示す。この出力から次のことがわかる。

受圧壁が回転変位すると、深度の浅い二分力計(深度 8.75~23.75cm)の壁面垂直応力は初期に減少するが、ほぼ一定の値を示し、せん断力はほとんど減少していない。逆に、深度の深い二分力計(31.25~46.25cm)の壁面垂直応力は初期に減少しその後、増加傾向に転じた。せん断力も符号は逆であるが、同様の挙動を示した。

このように、二分力計を設置した深度の浅い箇所と深い箇所では壁の変位に対する壁面垂直応力変化の様相が異なる。これは砂が受ける土被り厚さの差に起因していると考えられる。実験では、受圧壁が主働側へ回転するに従い地盤が崩壊する。この地盤の崩壊に伴い地盤高さが低下し、深度の浅い箇所に位置する二分力計の土被り圧も小さくなる。この影響は浅いところほど顕著になっている。一方、主働土圧は壁の傾斜角が大きくなるにつれて大きくなり、このことが土圧の変化に影響を及ぼしていると考えられる。すなわち、深度の深い箇所では地盤高さが減少の影響が相対的に小さいため、主働土圧係数の変化の影響によって壁の回転による土圧の増大が見られたと考えられる。

受圧壁を主働側へ 0.05rad 回転変位させた時の壁面垂直応力及びせん断応力の深度分布の例(実験ケース 1-04)を図-9に示す。この時の壁間隔 B は 80cm である。図-9に示した段階では土圧はほぼ主働状態にあると考えてよい。このとき、静止状態と同様、壁面垂直応力及びせん断応力分布は深度方向に増加する傾向を示している。

図-10に各壁間隔での主働状態の壁面垂直応力係数 $K_p \cos\delta$ の深度分布を示す。深度 20cm まで主働状態の壁面垂直応力係数は増加傾向にあるように見えるが、既に述べているように浅部での土圧の計測精度には十分な精度がないのでこの区間の値については十分な議論ができない。すなわち、静止状態と同様に、二分力計の壁面垂直力の測定値を $\pm 1\mu$ 強制的に変化させると、深度の浅い箇所では測定値に対する変化が 40% あり、深度が 30cm 以深でようやく 10% 以下になる。従って、静止状態と同様、主働側も深度の浅い箇所は測定値の僅かな違いが主働状態の壁面垂直応力係数の推定に影響を与えていると考えられる。

図-10によると、深度が 30cm より深い部分では主働状態の壁面垂直応力係数はほぼ一定の値を示している。ただし、壁間隔 B が 20cm の場合には、他の壁間隔と比べると主働状態の壁面垂直応力係数はやや小さい傾向を示しているようであり、壁間隔 B が 20cm の主働状態の

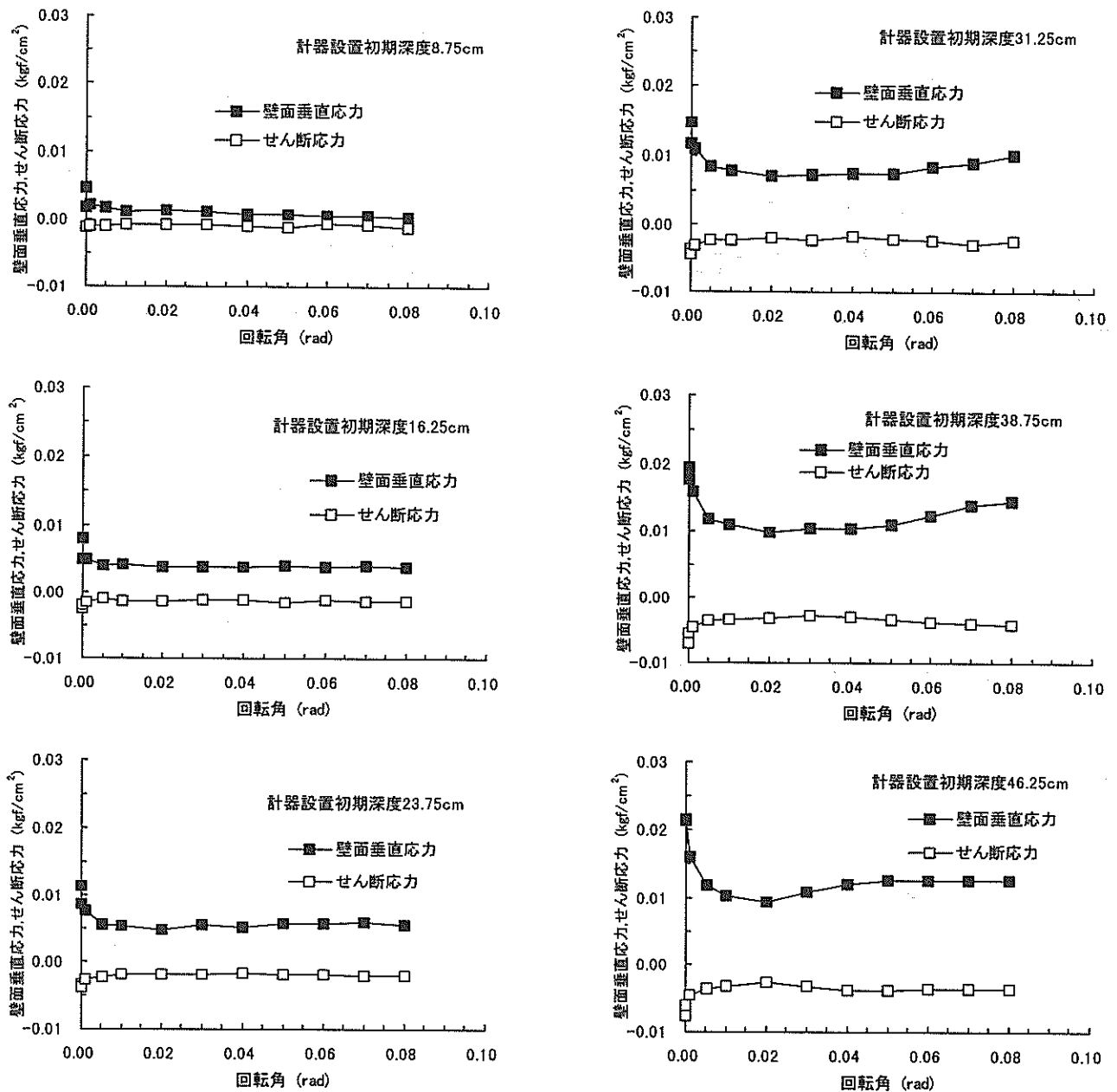


図-8 受圧壁を主働側へ変位させた時の二分力計の出力の変化の一例(実験ケース1-03)

壁面垂直応力係数は壁間隔の影響を受けている可能性がある。この傾向はこれまでの実験結果²⁾とはやや矛盾する結果となっているが、このケースの場合には、下端の土圧が特別に大きく出る結果となっており、そのことが深度が30~50cm付近の主働状態の壁面垂直応力係数が小さく出たことの原因になっている可能性も考えられる。

図-11に各壁間隔での壁面摩擦係数 $\tan\delta$ の分布を示す。全ての壁間隔について深度が地表面から30cmまではより深い部分に比べて壁面摩擦係数が大きくなっているが、既に述べてきているように深度30cmより浅い所

では土圧の計測精度が不十分であるため、十分な議論はできない。深度が30cm以深に着目すると、中には異常に大きな値を示しているものもあるが、壁面摩擦係数 $\tan\delta$ はおよそ0.30($\delta=16.7^\circ$)の近傍に分布している。

最後に、土圧合力と土圧分布の関係についてみてみる。

受圧壁の回転変位による土圧合力の3要素(合力より求めた状態の壁面垂直応力係数 $K_v \cos\delta$ 、土圧合力の相対着力点 h/H 、合力より求めた壁面摩擦係数 $\tan\delta$)の変化の一例(実験ケース1-03)を図-12に示す。なお、ここで計算された土圧合力は、個々の二分力計の出力を合計

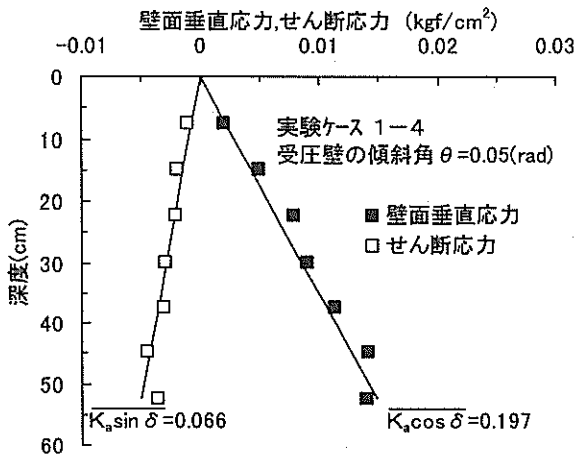


図-9 主動状態の壁面垂直応力とせん断応力の分布の例

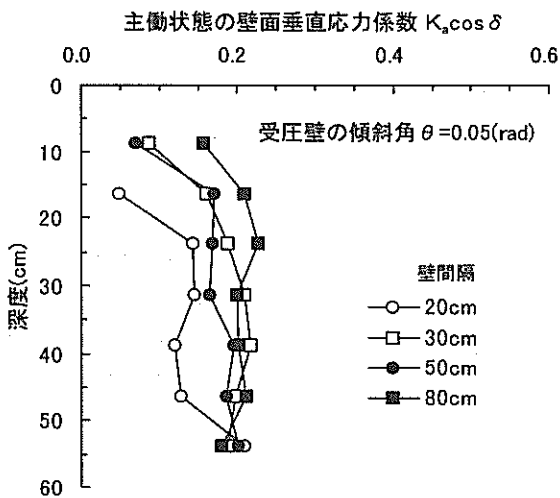


図-10 壁間隔の違いによる主動状態の壁面垂直応力係数の違い

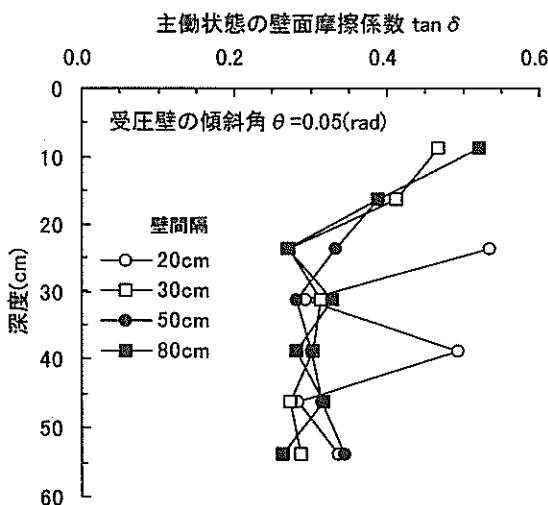


図-11 壁間隔の違いによる主動状態の壁面摩擦係数の違い

したものから計算したものである。

壁面垂直応力係数 $K_v \cos \delta$ は静止状態時には0.34であったが、受圧壁をわずかに $\theta = 0.01 \text{ rad}$ 程度回転させると、 $K_v \cos \delta$ が0.15まで減少し、さらに回転させると $K_v \cos \delta$ が0.18まで僅かに増加する。壁面摩擦係数 $\tan \delta$ は静止状態で0.28 ($\delta = 16.7^\circ$) を示し、受圧壁をさらに回転変位させても最大で0.32 ($\delta = 17.7^\circ$) を超えない程度である。土圧合力の着力点 h/H は水平変位量が2cmを超えると値が減少しているが、概ね0.28～0.34範囲に分布している。

また、図-12から、当該実験は受圧壁を $\theta = 0.01 \text{ rad}$ 程度回転させれば、塑性平衡状態に達していると考えられる。

次に、受圧壁の回転角と深度毎の壁面垂直応力係数 $K_v \cos \delta$ および合力の壁面垂直応力係数 $K_v \cos \delta$ の関係を図-13に、受圧壁の回転角と深度毎のせん断応力係数 $K_s \sin \delta$ および合力のせん断応力係数 $K_s \sin \delta$ の関係を図-14に、受圧壁の回転角と深度毎の壁面摩擦係数 $\tan \delta$ および合力の壁面摩擦係数 $\tan \delta$ の関係を図-15に示す。なお、これらの図に示した測定値を得た計器は、図-8と同じ深度に設置したものである。

図-13を見ると、壁面垂直応力係数と受圧壁の回転角の関係は深度毎に多少傾向が異なっている様子が分かる。すなわち、受圧壁の回転角が小さいときには、 $K_v \cos \delta$ の値はほとんどの深度で $K_v \cos \delta$ とほぼ同じ値を示しているが、いくつかの深度のデータでは、 $K_v \cos \delta$ とはかけ離れた値を示している。また、受圧壁の回転角が大きくなった場合には、 $K_v \cos \delta$ の値が回転とともに上昇傾向にあるものと減少傾向にあるものとに別れるが、 $K_v \cos \delta$ はほぼ一定の値を示している。

図-14を見ると、図-13に示したように特に他のデータとかけ離れたものはないが、特に適当な傾向もなくばらついているようである。図-15に示した壁面摩擦係数については、壁面垂直応力と壁面摩擦応力の両方のばらつきを含むことになるため、分布値については適当なばらつきを持つことになる。

以上見てきたように、全体の土圧合力やせん断力、壁面摩擦角について大きなばらつきはなくとも、深度毎の壁面垂直応力やせん断力、壁面摩擦角はばらついていることがある。この原因については、さまざまな原因が考えられる。実際に土圧分布がこのようにばらついているものだとも考えられるし、計測上の都合でこのようにばらついてしまったという可能性もあり、今回の実験だけでは結論できない。

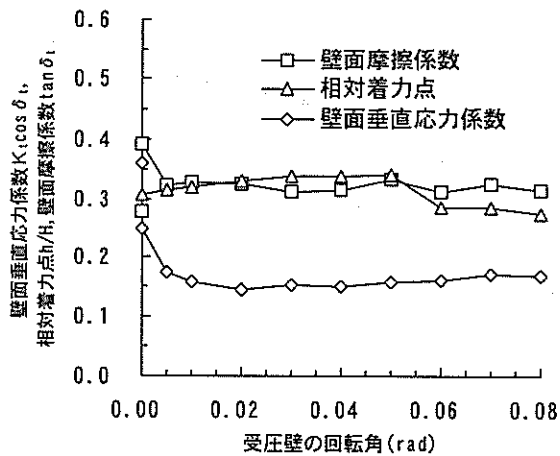


図-12 高粘砂における壁の変位に対する土圧3要素の変化

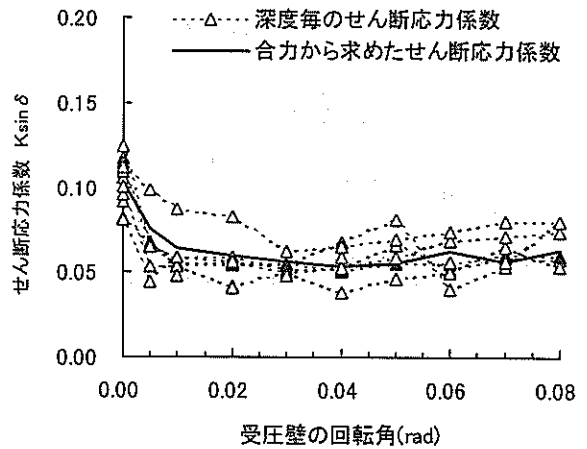


図-14 受圧壁の回転によるせん断応力係数の変化

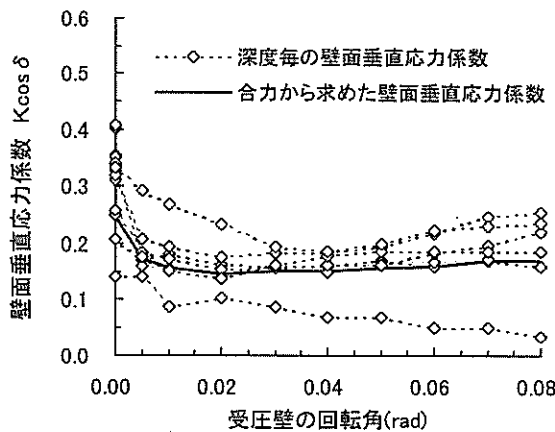


図-13 受圧壁の回転による壁面垂直応力係数の変化

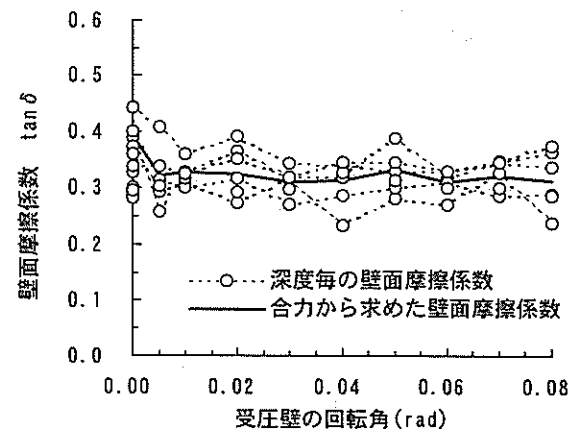


図-15 受圧壁の回転による壁面摩擦係数の変化

(3) 壁を受働側に変位させた場合の土圧

受圧壁を受働側へ回転変位させた時の二分力計の出力の一例(実験ケース3-01-1)を図-16に示す。図-16によると受圧壁が回転変位するにつれ各深度の壁面垂直応力およびせん断応力は増加し、壁面垂直応力およびせん断応力の増加傾向は、受圧壁の中間付近が最も大きく、深度の浅い箇所や深い箇所は大きくないことがわかる。これらを現象に即して考えてみると、地表面近傍の二分力計の水平方向の変位量は大きい、土被り厚が小さいためか地盤の横抵抗はあまり大きくなる。一方、深度が深くなると水平変位量は小さくなるが、土被り厚が大きくなるので地盤の横抵抗は大きくなるはずであり、深度が深くなるにつれて計測される壁面垂直応力は大きくなると思われる。しかし、下端に近い深度では壁の水平変位量が極端に小さくなるので、十分に地盤の横抵抗が発揮され難くなるため、同じ回転角での

計測される壁面垂直応力が小さくなったと考えられる。

また、せん断応力は静止状態・主働側と異なり、回転の初期には静止状態・主働側と同様、下向きに深度方向へ増大する傾向であったが、回転が増加するにつれ、せん断応力の方向が上向きに変わっている。

図-17に壁を受働方向へ回転させている時の回転角と壁面垂直応力とせん断応力の深度分布の関係の一例を示す。図-16の説明でも述べたように、図-17からも、回転角の増大に伴って中央部の壁面垂直応力は増えていくが、上端部と下端部の壁面垂直応力はあまり増大しないことがわかる。なお、図-17に示した結果では壁面垂直応力分布の中央が凹んでいるが、これは実験誤差であり、重要な意味はないと考えられる。なお、別途同様の実験を行った結果、壁面垂直応力は中央部分で最大値を示す傾向にあることを確認している(図-18参照)。また、せん断応力は回転角の増大に伴って中央部では増え

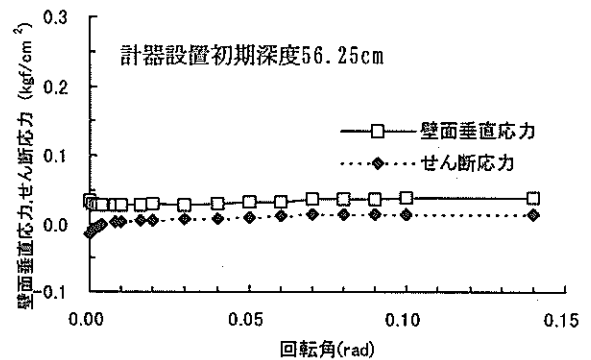
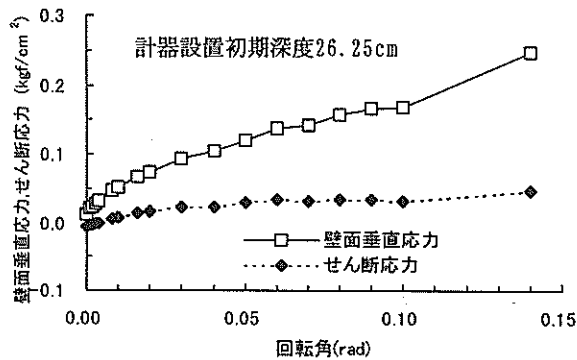
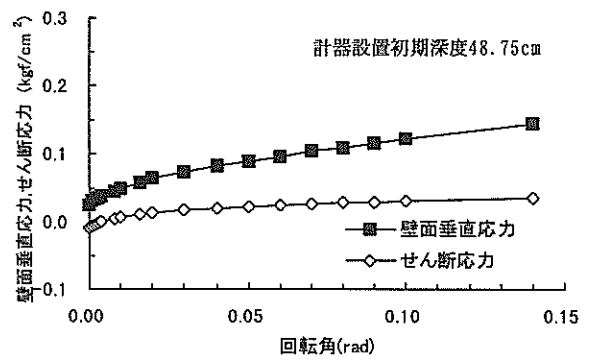
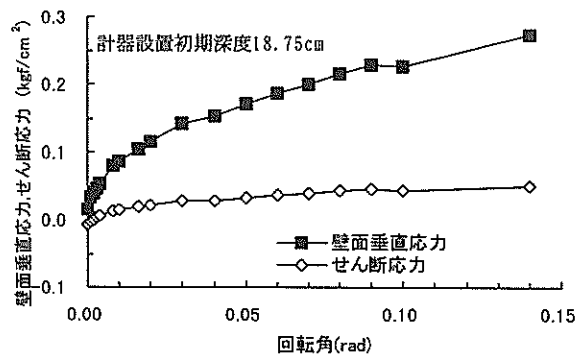
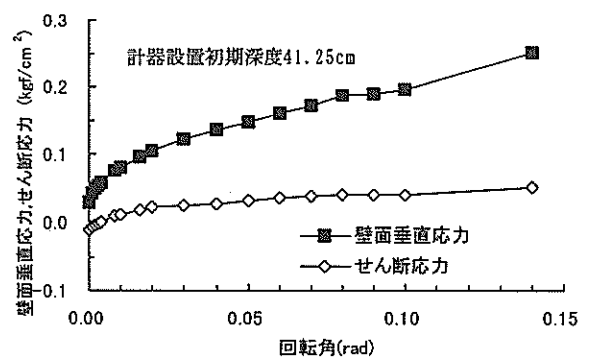
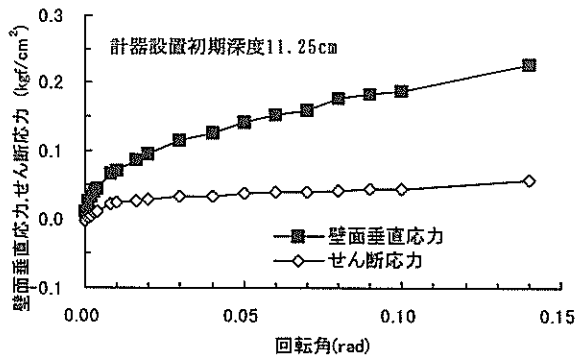
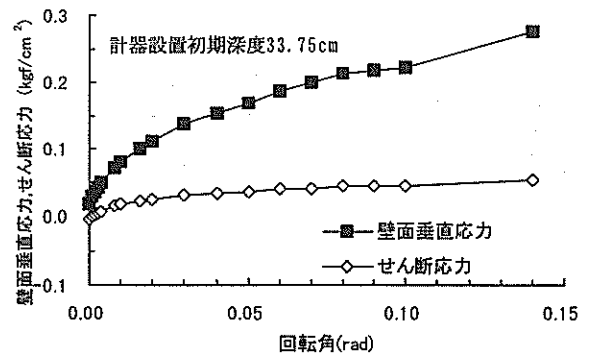
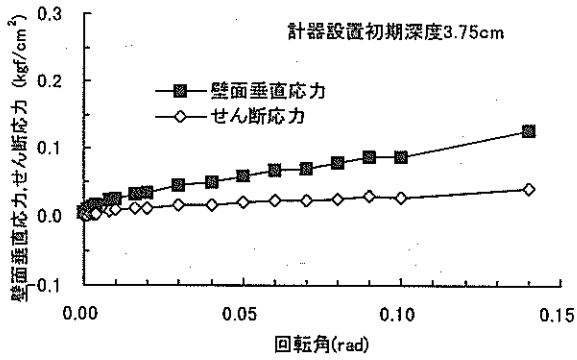


図-16 受圧壁を受働側へ変位させた時の二分力計の出力の変化の一例 (実験ケース3-01-1)

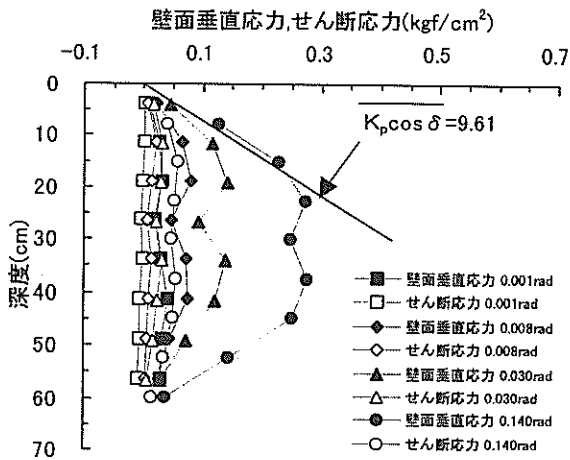


図-17 壁を受働側へ回転させたときの壁面垂直応力とせん断応力の変化 (壁面摩擦除去処理のある場合)

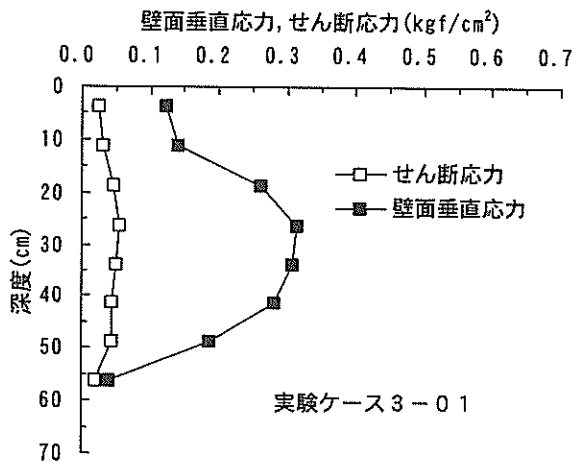


図-18 壁を受働側へ回転させたときの壁面垂直応力とせん断応力

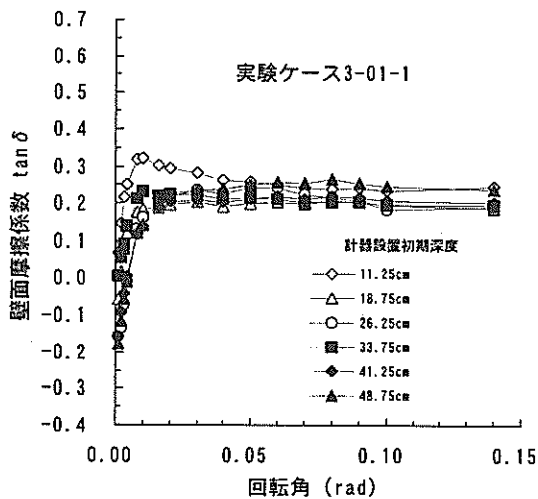


図-19 壁を受働側へ回転させたときの壁面摩擦係数と回転角の関係 (壁面摩擦除去処理のある場合)

ていくが、上端部と下端部のせん断応力はあまり増大していないことがわかる。

以上のことから、今回用いたような実験条件では、深部のせん断ひずみが小さいので、深部では受働状態に達しておらず、浅い部分でのみ受働状態になっていたと考えられる。

受圧壁の回転角 θ と壁面摩擦係数 $\tan\delta$ の変化を図-19に示す。計測した二分力計の内、地表面付近は地盤の盛り上り等の影響が、ヒンジ近傍は受圧壁の回転による砂の潜込み影響を受けていると考えられるので、受圧壁に生じる壁面摩擦係数は残りの箇所を検討を行う。静止状態における各深度の壁面摩擦係数 $\tan\delta$ はおよそ0.36($\delta=19.8^\circ$)であった。ただし、この時壁に作用している摩擦力の向きは下向きである。受圧壁を受働側へ0.001rad回転させると、壁に作用するせん断力が上向きに変化する。この時、深度が浅い箇所ほど壁面摩擦係数の変化は大きく、深度が深くなるにつれ壁面摩擦係数の変化は小さい。さらに受圧壁を回転させると、深度の深い箇所も壁面摩擦係数の変化は大きくなっていく。最終的には、深度の浅い所も深い所も、地表面付近と最下端を除き、壁面摩擦係数 $\tan\delta$ は0.2~0.25($\delta=11\sim 14^\circ$)くらいで一定の値を示すようになる。なお、全ての深度で壁面摩擦係数が収束するのに必要な回転角は0.10radであった。

4.3 壁面摩擦除去処理のない場合の受働土圧実験

主働土圧と受働土圧に対する壁面摩擦角の影響を考えると以下のような特徴がある。すなわち、壁面摩擦角 δ の値が変化しても主働土圧の値は大きく変化しないが、受働土圧は大きく変化する。このように、受働土圧では壁面摩擦角 δ が受働状態の壁面垂直応力係数に与える影響が大きいことから、受働側について壁面摩擦の影響が土圧に与える影響について検討するために、壁面摩擦除去処理のない場合の実験を実施した。

壁面摩擦除去処理のない場合の静止状態における各深度の壁面摩擦係数 $\tan\delta$ を測定したところ、概ね0.56($\delta=29^\circ$)となっており、壁面摩擦除去処理のある場合に比べ壁面摩擦係数は大きかった。

受圧壁を受働側へ回転変位させている時の壁面垂直応力とせん断応力の深度分布の関係の一例(実験ケース3-02)を図-20示す。壁面垂直応力とせん断応力は図-17と同様の傾向を示すが、中央部付近の壁面垂直応力は摩擦が無い時よりも大きく、上部での受働状態の壁面垂直応力係数の平均値 $K_p \cos\delta$ は10.58であり、その近傍に分布する範囲も深くなっている。同様に、せん断応力

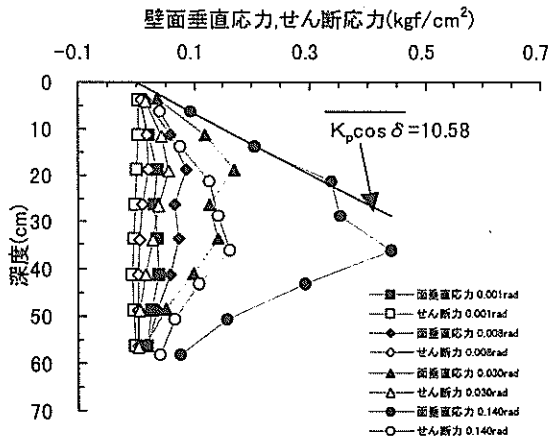


図-20 壁を受働側へ回転させたときの壁面垂直応力とせん断応力の変化(壁面摩擦除去処理のない場合)

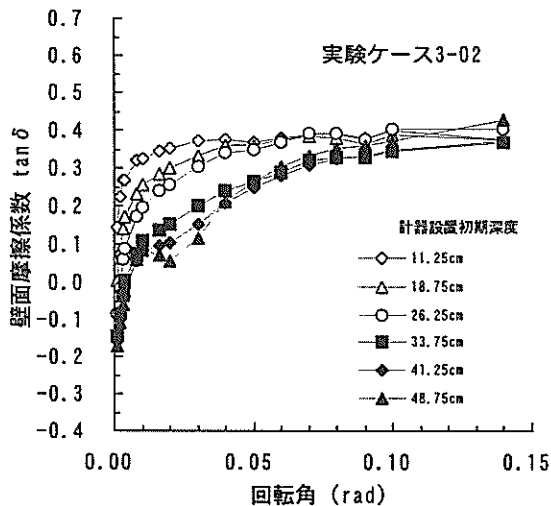


図-21 壁を受働側へ回転させたときの壁面摩擦係数と回転角の関係(壁面摩擦除去処理のない場合)

も深度により直線的に増加する範囲も深くなっている。なお、壁面摩擦除去処理のある場合の上部の受働状態の壁面垂直応力係数の平均 $\overline{K_p \cos \delta}$ は、図-17に示したとおり9.61であった。このように、壁面摩擦除去処理のない場合の方が壁面摩擦除去処理のある場合よりも受働状態の壁面垂直応力係数は大きくなる傾向を示している。

壁面摩擦除去処理のない場合の受圧壁の回転角と壁面摩擦係数の変化を図-21に示す。このデータでは、最も浅いところの二分力計で測定した壁面摩擦係数のみ傾向が異なっていたが、測定精度に問題があると考え、図-21には示していない。図-21から、受圧壁を受働側へ0.001rad回転させる間の壁面摩擦係数の変化を見ると、深度が浅い箇所ほど変化が大きく、深度が深くなるにつれ変化が小さくなっていることがわかる。壁面摩擦除去処理のある場合に比べ、深度の浅い箇所の壁面摩擦係数の変化は大きく、逆に、深度の深い箇所の壁面摩擦

係数の変化は小さい傾向を示した。さらに受圧壁を回転変位させると、深度の深い箇所も壁面摩擦係数の変化が大きくなるが、壁面摩擦除去処理のある場合と比べ増加の割合は小さい。受圧壁の回転変位が進行するに従い、深度の浅い箇所から順次壁面摩擦係数 $\tan \delta$ が0.35 ~ 0.45($\delta=19.3 \sim 24.2^\circ$)の範囲に収束していくが、深度が深い箇所ほどより多く回転しないと収束しない。深度の浅い箇所は受圧壁を0.10rad回転させれば壁面摩擦係数は収束するが、深い箇所は受圧壁を0.14rad回転させても完全に収束しているとは言い難い。また、収束した壁面摩擦係数の値は、壁面摩擦除去処理のある場合に比べて大きくなっている。

5. 考察

(1) 壁面摩擦と受働状態の壁面垂直応力係数の関係

実験の結果では、壁の回転角が大きくなったときには上部ではほぼ受働状態に達していたと考えて良いと思われる。この時の受働状態の壁面垂直応力係数について理論値との比較を試みる。

壁面摩擦除去処理のある場合、各深度の壁面摩擦係数の値が一定になった時の平均 $\overline{\tan \delta}$ は0.22($\delta=12.4^\circ$)であった。この壁面摩擦係数を用い、砂の内部摩擦角 $\phi=38^\circ$ 、としてクーロンの受働土圧式を用いて受働状態の壁面垂直応力係数を計算すると、摩擦除去処理のある場合の壁面垂直応力係数 $K_p \cos \delta$ は9.82となった。実験から得られた受働状態の壁面垂直応力係数 $K_p \cos \delta$ は9.61であったことから、摩擦除去処理をした時、理論値の方が実験値よりも大きくなっているが、概ね合っていると考えられる。

一方、壁面摩擦除去処理のない場合の各深度の壁面摩擦係数の値が一定になった時の平均 $\overline{\tan \delta}$ は0.40($\delta=22^\circ$)であった。この場合のクーロンの土圧式では受働状態の壁面垂直応力係数 $K_p \cos \delta$ は19.56となり、実験から得られた受働状態の壁面垂直応力係数 $K_p \cos \delta$ が10.58であったのとはるかに大きな値が得られる。しかし、クーロンの土圧式では、内部摩擦角と壁面摩擦角が大きい場合には受働状態の壁面垂直応力係数が異常に大きくなることが知られているので、J.Kerisel, E.Absi⁵⁾の表の値を補間して受働状態の壁面垂直応力係数を求めると理論壁面垂直応力係数 $K_p \cos \delta$ は11.5となった。この結果は、実験値と比較的良くあっている。

(2) 受働過程での壁面摩擦係数分布の変化

次に、受働状態の極限に達する過程での壁面摩擦係数の分布について検討してみる。

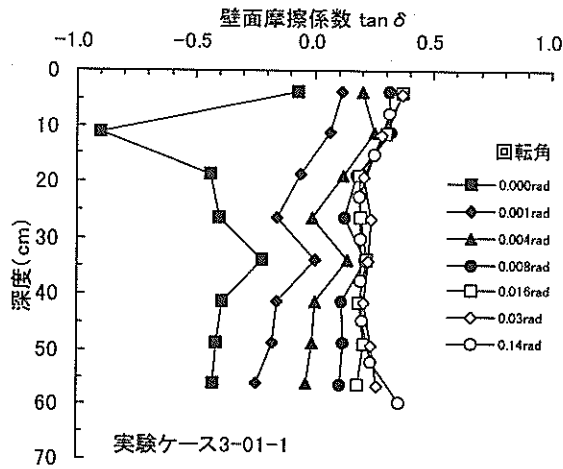


図-22 壁の回転角と壁面摩擦係数の深度分布の関係 (壁面摩擦除去処理のある場合)

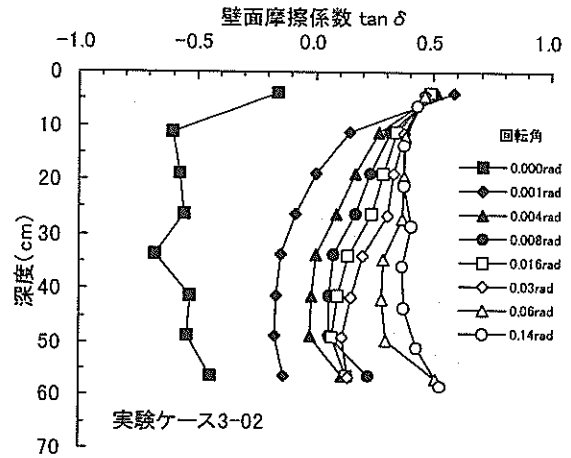


図-23 壁の回転角と壁面摩擦係数の深度分布の関係 (壁面摩擦除去処理のない場合)

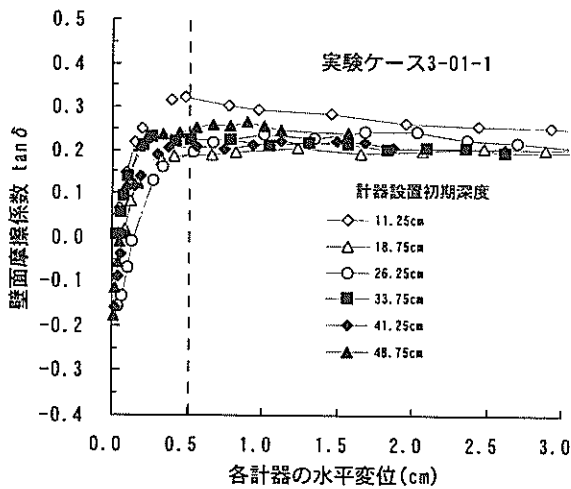


図-24 壁を受働側へ回転させたときの壁面摩擦係数と水平変位の関係 (壁面摩擦除去処理のある場合)

壁面摩擦除去処理のある場合の壁面摩擦係数分布の変化を図-22に示す。静止状態では浅い部分を除き、壁面摩擦係数はほぼ-0.4程度と一定であるが、壁の回転につれて上部ほど壁面摩擦係数の変化が大きく、やや遅れて下部の壁面摩擦係数が変化する。最終的には、0.016rad程度の回転角になるとほとんど壁面摩擦係数は一定の値となり、この時の壁面摩擦係数は0.2~0.4の間であり、壁の中央部付近でやや小さ目の値を示している。

壁面摩擦除去処理のない場合の壁面摩擦係数分布の変化を図-23に示す。この場合も浅いところを除き、静止状態では壁面摩擦係数は-0.4~-0.6の間にあるが、壁の回転によって上部は急激に壁面摩擦係数が変化し中央部および下部ではゆっくりと壁面摩擦係数が変化して

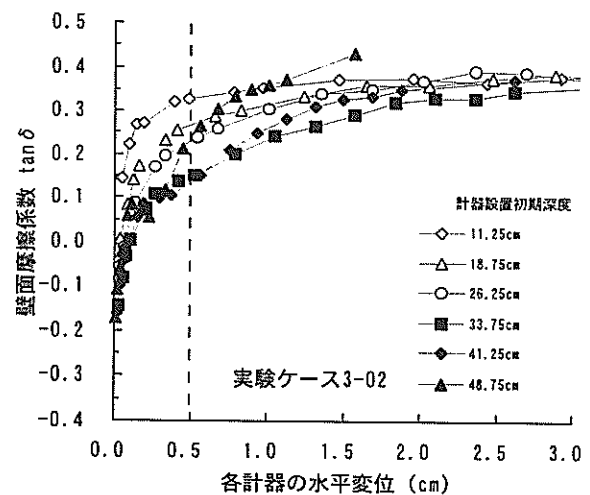


図-25 壁を受働側へ回転させたときの壁面摩擦係数と水平変位の関係 (壁面摩擦除去処理のない場合)

いることがわかる。この図では、壁の回転角が0.14radになるとほぼ一定の壁面摩擦係数分布になっているように見受けられるが、収束したかどうかを判定できるほどではない。また、この場合も、図-22と同様に、壁中央部付近の壁面摩擦係数はやや小さ目の値を示している。

回転角と壁面摩擦係数の関係については既に述べた4.2と4.3の図-19と図-21と上述の図-22、図-23から明らかにされているが、受圧壁に取り付けられている二分力計は深度方向に配置されているため、受圧壁を回転させた時、深度の違いにより水平変位量が異なってくる。そこで、受圧壁の水平変位と壁面摩擦係数の変化を調べることにする。

図-24に壁面摩擦除去処理のある場合の受圧壁の水平変位と壁面摩擦係数の変化を示す。各深度とも、水平

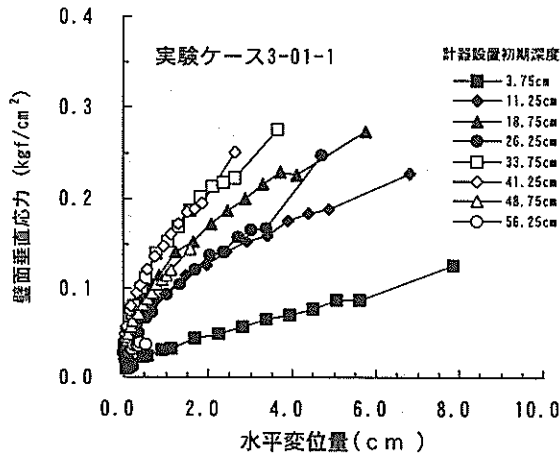


図-26 壁面垂直応力と水平変位の関係
(壁面摩擦除去処理のある場合)

変位量に対する壁面摩擦係数の変化は同様の傾向を示しており、水平変位量が5mm以下では壁面摩擦係数は水平変位の増加とともに増大し、水平変位が5mmをこえると壁面摩擦係数は一定値に収束することがわかる。このように、壁面摩擦が小さい場合、壁面摩擦係数の変化は水平変位量によって決まると考えられる。

図-25に壁面摩擦除去処理のない場合の受圧壁の水平変位と壁面摩擦係数の変化を示す。壁面摩擦除去処理のある場合と異なり、深度の浅い箇所から深い箇所へ順次、壁面摩擦係数が大きくなっていくことがわかる。壁面摩擦除去処理のない場合、壁面摩擦係数の変化は水平変位量によって決まっているとは言えない。

(3) 受働過程での壁面垂直応力係数分布の変化

図-26に壁面摩擦除去処理のある場合に壁を受働側へ回転させたときの各深度の土圧側定位置での壁の変位量と壁に作用している壁面垂直応力の関係を示す。図-26をみると、いずれの深度*x*においても壁面垂直応

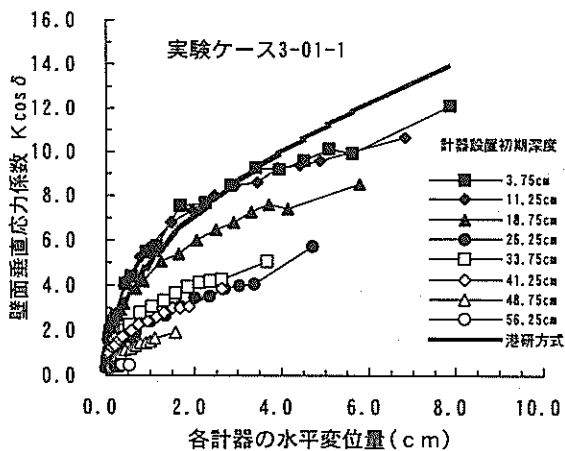


図-27 壁面垂直応力係数と水平変位の関係
(壁面摩擦除去処理のある場合)

力 $K\gamma x \cos \delta$ は水平変位 d_h に対してやや上に凸な関係を持っていることがわかる。この関係は図-27中に太線で示しているように

$$K \cdot \gamma_i \cdot x \cdot \cos \delta \propto d_h^{0.5} \quad (4)$$

で近似されるような関係にある。

ところで、深度方向に壁面垂直応力の大きさを見てみると33cm付近までは深くなるにつれて同じ水平変位での壁面垂直応力が増加する傾向にあるが、それより深くなるとかえって深さとともに壁面垂直応力が小さくなる傾向にあることがわかる。

図-27では同じ結果について縦軸を壁面垂直応力係数 $K \cos \delta$ にして示したものである。このようにしてみると約20cmの深さあたりまでは壁面垂直応力係数と水平変位の関係は深さによらずほぼ一定であるようである。すなわち、この部分については次式に示すように港研方式のS型地盤⁹⁾の地盤反力の関係とよく似た傾向になっていることを示している。

$$K \cdot \gamma_i \cdot x \cdot \cos \delta = p = k \cdot x \cdot d_h^{0.5} \quad (5)$$

ここで、

p : 地盤反力

k : 地盤反力定数

である。

しかし、20cmより深い場合には、深くなるにつれて壁面垂直応力係数が小さくなる傾向にあり、式(5)が成立しているとはいえない。これまで、この原因の主たるものではないかと考えてきたが、このように極端に地盤反力が出にくくなる影響はそればかりではないのではないかと考えられる。例えば、壁の中間部と土槽底面の間で

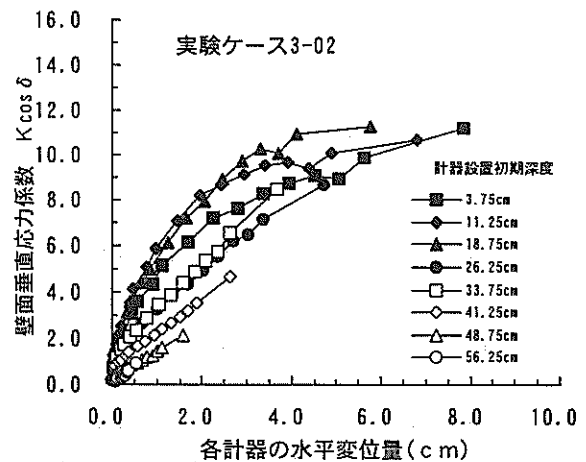


図-28 壁面垂直応力係数と水平変位の関係
(壁面摩擦除去処理のない場合)

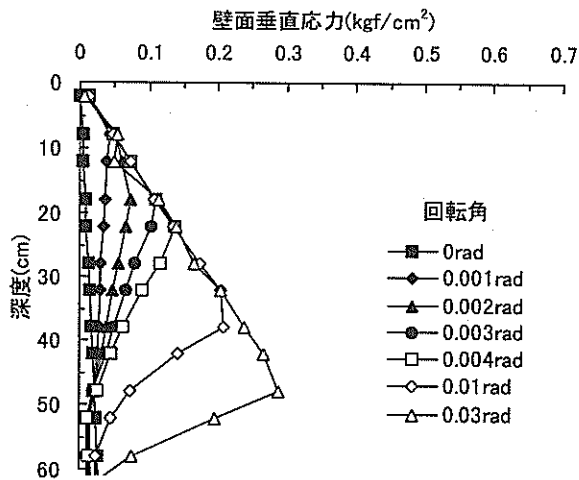


図-29 数値計算における壁面垂直応力の分布

アーチングが生じていることなどは十分考えられることである。ただし、今回のデータだけではその点については明らかにすることができない。

壁面摩擦除去処理のない場合の壁面垂直応力係数と水平変位の関係を示したのが図-28である。全体的な傾向は図-27に示した壁面摩擦除去処理のある場合の結果とよく似ているが、全体的に壁面垂直応力係数の値が壁面摩擦除去処理のない場合の方が大きくなる傾向を示している。これら二つの実験条件の違いの結果、図-22と図-23に示したとおり、壁面摩擦角の変化の仕方に違いが出ており、このように壁面に作用する摩擦の違いが壁面に作用する土圧の違いとして表れることを示している。

(4) 数値解析結果との比較

有限要素法を用いて、壁面摩擦除去処理の有無が受働側の壁面垂直応力へ与える影響について検討を行った。有限要素法による解析ではモール・クーロンのモデル(弾塑性有限要素法)を用いた⁹⁾。

数値解析では、壁面摩擦除去処理の有無に係わらず、砂の内部摩擦角 $\phi = 38^\circ$ 、単位体積重量を 1.45g/cm^3 とし、壁面摩擦除去処理の有る場合の壁面摩擦係数 $\tan\delta$ は $0.22(\delta=12.4^\circ)$ とし、壁面摩擦除去処理の無い場合の壁面摩擦係数 $\tan\delta$ は $0.40(\delta=22^\circ)$ として計算を行った。実験結果から、壁面摩擦係数は受圧壁の回転に伴い変化することが分かったが、計算上の制限より壁面摩擦係数は固定して計算している。なお、ここでは、壁面摩擦係数を変えて計算を実施したが、両者の間に土圧計算の結果に差異は生じなかった。計算は受圧壁の傾斜角を幾つか変えて行ったが、受圧壁の傾斜角 $0.03\text{rad}(=1.7^\circ)$ を超えると計算が収束せずに発散したことから、受圧壁の傾斜角 $0 \sim 0.03\text{rad}(=0 \sim 1.7^\circ)$ の範囲について検討した。数値

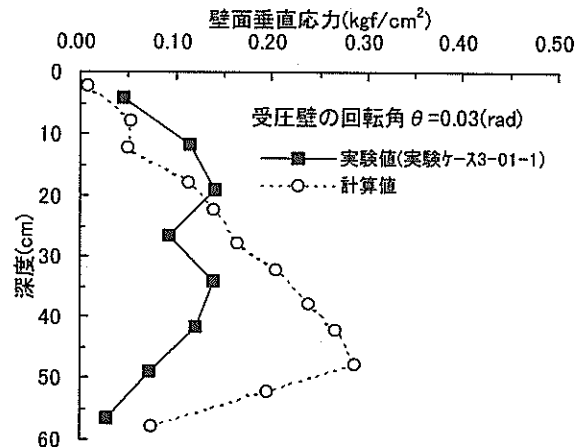


図-30 壁面垂直応力の分布に関する実験値と解析値の比較

計算における壁面垂直応力の分布を図-29に示す。図-29より受圧壁の傾斜が大きくなるに従い、壁面垂直応力は地表面から順次受働状態へ移行していくことがわかる。

また、壁面摩擦除去処理が無い場合と計算との壁面垂直応力を比較したものを図-30に示す。実験値では地表面から深度約20cmの所までが、計算値では地表面から約50cmの所までが受働状態に達していると考えられる。

6. まとめ

本研究では壁面に作用しているせん断力を深度方向に計測することで、壁面摩擦係数が土圧に及ぼす影響を調べた。実験結果から以下のようなことが結論される。

- (1) 静止状態及び主働状態では壁面摩擦係数は深度方向にほぼ一定である。今回の実験では、これらの状態のときにはほぼ完全に摩擦力が発揮されているようであった。
- (2) 壁が下端を中心に回転挙動をしながら静止状態から受働状態へと変化する場合には、壁の上部から受働状態に達する。受働状態に達した時の上部の摩擦係数はほぼ一定値になっている。この時の受働状態の壁面垂直応力係数は実測値と理論値で良好な対応を示した。
- (3) 壁が下端を中心に回転挙動をしながら静止状態から受働状態へと変化する場合には、壁に作用する摩擦力は大きさおよび向きが変化する。この時、壁面の最大摩擦係数の違いによって、変化の仕方が異なる。
- (4) 受働状態に達する過程での壁の各深度に生じる壁面

垂直応力と変位の関係は非線形である。また、この壁面垂直応力は壁面摩擦係数の影響を受けているようである。

7. おわりに

この報告では、土圧実験で問題となる壁面摩擦の影響について実験した結果を報告した。

土圧については、多くの研究が為されており、様々な基準に取り入れられて実務に使用されている。しかし、特に受働抵抗として取扱うときの考え方や、地震時の挙動など、剛塑性の考え方をこえた土圧の問題についてはほとんどわかっていないといって過言ではないのではなかろうか。限界状態設計法の導入が検討されつつある現在、これまでの土圧論を超えた新しい土圧の考え方を設計に導入していくべき時にきていると考えられる。

受働土圧の問題を考えると、壁面摩擦角の評価が重要であるが、これまで、壁面摩擦係数については、室内実験のレベルでも合力としてしか評価できなかったため、静止状態から主働・受働側へ挙動が変化した時にどの様に変化するかが一切不明であり、推定の域を出ていなかった。また、せん断試験によって壁面摩擦係数を評価した手法もあるが、砂と壁の表面の状態や砂に作用する拘束圧の影響等によって壁面摩擦係数の挙動が変化するといった問題があると思われる。さらに、正確な壁面摩擦係数を評価することは数値モデルの構築や、数値シミュレーションによる実験結果の検証という観点から重要である。

本研究では、このようなことから壁面摩擦角の分布の測定に取り組んだが、計器の精度の問題や土槽の構造上の問題などがあったため、ところによっては満足な結果とは言えないところがある。今後は、より精度のいい実験ができるよう検討を進め、壁面摩擦角の影響について議論を進めたいと考えている。

なお、本研究を取りまとめるにあたり、善功企土質部長と水上純一主任研究官には貴重なご意見を頂きました。ここに記して謝意を表します。

(1998年6月30日受付)

参考文献

- 1) 松尾稔・富永眞生：土圧，鹿島出版会，pp.12-13,1975.
- 2) 菊池喜昭・高橋邦夫・小椋卓実：土圧実験における土圧のばらつきと近接構造物の水平変位による土圧の変化に関する実験，港湾技研資料 No.811，運輸省港湾技術研究所，1995.
- 3) 市原松平・松沢宏：壁変位中における土圧特性と裏込砂のせん断特性の関連，土木学会論文報告集，第176号，

(社)土木学会，1970.

- 4) 高橋邦夫・春日井康夫・滑川信孝・榎信昭・鈴木操：斜面壁を有するケーソンに中詰めされた砂の土圧，港湾技研資料 No.604，1987.
- 5) J. Kerisel and E. Absi : *Active and Passive Earth Pressure Table*, A.A.BALKEMA, 1990.
- 6) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，上巻，pp. 376 - 388., 1989.
- 7) 小林正樹：有限要素法による地盤の安定解析，港湾技術研究所報告，第23巻第1号，1984.
- 8) 田中洋行：軟弱地盤における山留め工の挙動に関する研究，港湾技研資料 No.734，1992.

記号表

A_E : 二分力計の受圧面積
 B : 壁の間隔
 d : 地盤面の低下量
 d_h : 壁の水平変位量
 D_r : 相対密度
 e_{\max} : 最大間隙比
 e_{\min} : 最小間隙比
 H : 受圧壁のヒンジより上の部分の地盤の高さ
 H_1 : 地表面から二分力計中央までの垂直距離
 h_0 : 初期状態での地盤面から二分力計中央までの深さ
 h/H : 土圧合力の相対着力点
 k : 地盤反力定数
 K : 土圧係数
 K_0 : 静止土圧係数
 K_a : 主働土圧係数
 K_p : 受働土圧係数
 $\overline{K_0 \cos \delta}$: 静止状態での壁面垂直応力係数の平均値
 $\overline{K_a \cos \delta}$: 主働状態での壁面垂直応力係数の平均値
 $\overline{K_p \cos \delta}$: 受働状態での壁面垂直応力係数の平均値
 K_f : 合力から求めた土圧係数
 p : 地盤反力
 P_N : 壁面垂直力の合力
 P_E : 二分力計に作用する面垂直力
 S : 受圧壁の平均水平変位量
 $\tan \delta$: 壁面摩擦係数
 $\overline{\tan \delta}$: 壁面摩擦係数の平均値
 U_c : 均等係数
 x : 深さ
 δ : 壁面摩擦角
 δ_f : 合力から求めた壁面摩擦角
 γ_t : 自然状態の単位体積重量
 ρ_s : 土粒子密度

港湾技術資料 No. 916

1998・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行人 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 株式会社ポートサイド印刷

Published by the Port and Harbour Research Institute
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1998) by P.H.R.I

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複写は、港湾技術研究所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。