

地盤剛性の深度方向変化を考慮した 杭の水平抵抗評価法

片上典久¹・斎藤邦夫²・吉福 司³・佐藤 豊⁴・古山章一⁵・栗山道夫⁶

¹正会員 株式会社日建設 中瀬土質研究所(〒212-0055 川崎市幸区南加瀬4丁目11-1)

²正会員 工博 副所長 株式会社日建設 中瀬土質研究所(同上)

³正会員 工修 設計主管 株式会社日建設 土木事務所(〒112-8565 東京都文京区後楽2丁目2-23)

⁴正会員 主席 東日本旅客鉄道株式会社 建設工務部(〒151-0053 東京都渋谷区代々木2丁目2-2)

⁵正会員 副課長 東日本旅客鉄道株式会社 東北工事事務所(〒980-8580 仙台市青葉区五橋1丁目1-1)

⁶正会員 JR東日本コンサルタント株式会社(〒151-0053 東京都渋谷区代々木2丁目2-6)

杭を設計する際には、各種の設計指針、示方書では、Changの方法を適用するように記されている。Changの方法は、深さ方向に水平地盤反力係数(k_h)が一定であることが前提である。しかし、現実の地盤では、深さ方向に水平地盤反力係数が一定値を示す場合は逆に希である。

本研究では、砂地盤ならびに粘土/砂2層地盤において杭の水平載荷実験を遠心加速度場で実施し、Changの方法と Reese-Matlockの方法の有効性について検討した。さらに室内土質試験結果から深さ方向に変化する地盤の k_h を求め、梁部材の剛性マトリクスを用いた計算により杭の応力状態を推定する方法を提案した。

Key Words: pile, lateral resistance, centrifuge model test

まえがき

杭の設計は、その殆どが地盤の水平抵抗の評価によって決ると言って過言ではない。現在の道路橋、建築物等の杭の設計では、弾性支床上の梁として考へており、その中で最もよく用いられているのがChangの方法¹⁾である。

Changの方法は、これまで数多くの設計で実績を貯えている。しかし、砂地盤のように深度方向に地盤の剛性が增大する、すなわち応力依存性が卓越する地盤、あるいは正規圧密粘土地盤のように深さ方向に強度が増加するような地盤では、杭に対して危険側の評価となる事も考えられる。このような場合には、例えば水平地盤反力を地盤の有効抵抗土圧を上限に設定することで援用²⁾している。しかし、実際に地盤の応力依存性を考慮して杭の設計を行なっているケースは少ないのが現状である。

本研究では、応力依存性を考慮する必要のある地盤、すなわち砂地盤を対象とした杭の水平載荷実験

を行った。この実験結果と砂地盤の応力依存性に関するパラメータを三軸圧縮試験から求め、そのパラメータを基に地盤を分割して各地層毎に水平地盤反力係数を変化させる方法(本文では多層地盤バネ法という)で計算した結果との比較を行った。

この比較から応力依存性のパラメータを用いて水平地盤反力係数を求めることの有効性を検討した。また、深さ方向に一定の強度を示す粘土層とその下に砂層が分布するような2層地盤(以下、粘土/砂2層地盤という)に対しても同様の検討を行った。

1. 既往の研究

深さ方向に変形係数が増加する地盤に対する水平抵抗の考え方には、地盤剛性増加法(Reese-Matlock³⁾、港研式のS地盤等⁴⁾がある。

港湾構造物の設計に際しては、港研式が用いられるケースが多い。しかし、その他の構造物の各種基

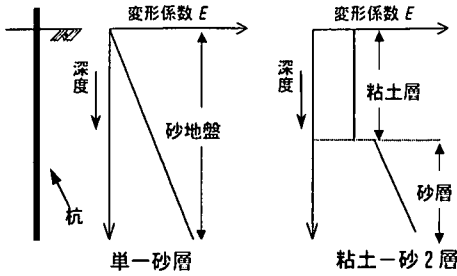


図-1 検討対象地盤

準は、建築基礎構造設計指針⁹⁾で Reese-Matlock の有効性を指摘しているが、その詳細な記述がない。また、これまでの実用例も少なく Chang の方法で援用することが多く、実用的には杭の特性値の逆数(1/β)までの平均的な変形係数を用いて⁸⁾水平地盤反力係数を求めている。なお、Reese-Matlock と Chang の支配方程式を、式(1)、(2)に記す。

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

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k_h By = 0 \quad (2)$$

ここで x は深度、 y はたわみ、 E は杭の弾性係数、 I は杭の断面二次モーメント、 k_h は水平地盤反力係数、 B は杭径、 n_h は $k_h B$ の深度方向への増加率である。

富永⁷⁾は、数多くの現場実験の結果を基にして、砂地盤のように深度とともに地盤剛性が增大する地盤の場合には、 k_h を一定とした Chang の方法を用いると、杭に発生する曲げ応力が大きくなり杭に対しては危険側になることを示した。このような地盤を対象にする場合には、Reese-Matlock による水平地盤反力増加率(n_h)を用いるべきであると結論付けている。

一方、複雑な互層地盤では、杭部材を分割して弾性床上の梁部材の剛性マトリクスを用いた計算⁸⁾により、各層の水平地盤反力係数を評価する方法(以下、多層地盤バネ法という)なども実務では容易に行なわれるようになってきている。

2. 検討概要

本研究では、図-1 に示すような地盤条件で検討を行った。すなわち、深さ方向に地盤剛性(変形係数)が増加する地盤と、地表面からある深さまでは地盤剛性(変形係数)が一定の値を示す地盤での水平抵抗を対象とした。

表-1 実験材料の物理特性

	豊浦砂	川崎粘土
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.654	2.698
最大粒径 D_{max} (mm)	0.425	0.425
平均粒径 D_{50} (mm)	0.175	—
均等係数 U_c	1.273	—
最大乾燥密度 $\rho_{d,max}$ (g/cm ³)	1.652	—
最小乾燥密度 $\rho_{d,min}$ (g/cm ³)	1.334	—
液性限界 w_L (%)	—	53.3
塑性限界 w_P (%)	—	28.9
塑性指数 I_p	—	24.4

深さ方向に変形係数が増加する地盤は、砂地盤とし、深さ方向に変形係数が増加しない地盤は、過圧密な粘土地盤とした。実験は、何れも遠心加速度場で行うことで、砂層の応力依存性を考慮した。

実験の結果は、まず砂地盤でこれまで積極的に用いられることのなかった Reese-Matlock の方法により水平地盤反力係数増加率(n_h)で評価した。

次に多層地盤バネ法を用いて模型実験結果と対比した。なお、応力依存性を評価するためには三軸圧縮試験で得られた応力-ひずみ関係を双曲線近似し、Duncan-Chang⁹⁾の方法で得た双曲線パラメータにより水平地盤反力係数を算出した。

粘土-砂2層地盤では、粘土層厚を変えた実験を行い、従来の Chang の方法に加え、多層地盤バネ法を用い、その有効性を検討した。

3. 地盤材料

本実験に用いた地盤材料は、空気乾燥した豊浦砂と川崎港の浚渫粘土(以下、川崎粘土という)を用いた。これらの物理特性を表-1 に示す。

模型地盤は、砂地盤の場合に、相対密度を 80~85% とした。また、粘土地盤の場合には遠心加速度場で粘土層が全て過圧密領域になるようにするために圧密荷重は 215kN/m² とした。

これらの地盤条件における強度・変形特性を把握するために、豊浦砂を相対密度が 80% になるように調整して三軸圧縮試験(CD)を実施した。また、粘土は 215kN/m² で予備圧密して供試体を作成し、三軸圧縮試験(UU)を実施した。それぞれの実験結果を、応力-ひずみ関係に表し、図-2、3 に示す。

砂の場合には、拘束圧の増大とともに強度が増加しており、せん断抵抗角(ϕ)は 40.2° である。

粘土は、全て過圧密領域での試験であり、強度ならびに変形特性にほとんど変化がない。

三軸圧縮試験の結果は、応力-ひずみ関係を双曲

表-2 想定した杭とモデル化した杭の諸量

材質	模型 (1/50)		
	鉄筋コンクリート	鋼製プレート	アルミニウム製パイプ
弾性係数 (E)	$2.6 \times 10^8 \text{ N/m}^2$	$2.1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$	$7.2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$
形状・寸法	$\phi 1000\text{mm}$	幅 $B=20\text{mm}$ 厚さ $t=8.4\text{mm}$	外径 20mm 内径 18.2mm
曲げ剛性 (EI)	$1.3 \times 10^7 \text{ N}\cdot\text{m}^2$	$2.1 \text{ N}\cdot\text{m}^2$	$2.1 \text{ N}\cdot\text{m}^2$

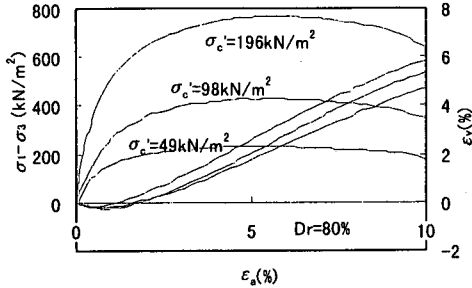


図-2 豊浦砂の三軸圧縮試験 (CD) 結果

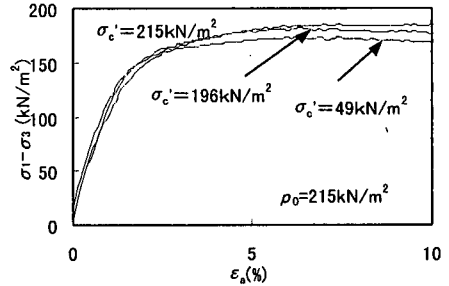


図-3 川崎粘土の三軸圧縮試験 (UU) 結果

線近似し、Duncan-Chang の双曲線パラメータを求め、水平地盤反力係数を算出するのに用いた。これらの双曲線パラメータは、6. 考察 2) 応力依存性を考慮した地盤の水平抵抗評価法で記す。

4. 実験方法

実験は、実物の 1/50 に縮尺した杭を模型地盤に設置し、 490.5 m/sec^2 (重力加速度の 50 倍: 50G, 以下 G を用いる) の遠心加速度の下で、杭の水平載荷実験を行った。模型実験のシステム並びに模型杭のモデル化について記す。

(1) 遠心模型実験装置

本実験で用いた遠心模型実験装置は、回転半径 3.0m (回転中心からスイングプラットフォームまでの距離) であり、最大回転数 260rpm, 最大搭載質量 1000kg (100G の場合), 550kg (200G の場合) の能力を有。実験中のデータ計測は、各チャンネル毎にメモリーを搭載したアンプを用い、データの同時性を図って記録している。なお、今回の実験では、32チャンネルの計測を 1 秒間隔で行った。

(2) 杭のモデル化

本実験では、直径 1m の場所打ち鉄筋コンクリート杭を想定した。モデル化は、実際と同一材料を用いれば寸法のみを縮小することで可能である。しかし、模型杭の品質管理上から鉄筋コンクリートを 1/50 に縮尺するのは困難である。そこで、実験を容易に進めるために鋼製プレートを用いた。このモデル化

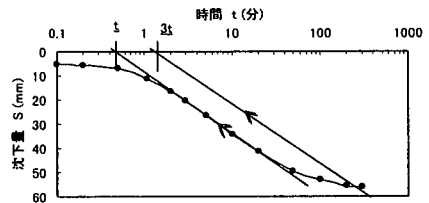


図-4 粘土地盤の圧密終了確認

に際し留意した点は、杭の曲げ剛性と投影面積である。

今回の模型実験で用いた杭は、幅 20mm, 厚さ 8.4mm の矩形断面とした。しかし、現実の場所打ち杭は、通常円形断面である。そこで円形断面と矩形断面の相違について検討する必要がある。

篠原、久保ら¹⁰⁾は、砂地盤において実施した数多くの現場実験の結果から、杭の形状の影響は少ないと結論している。しかし、対象とした杭径が比較的小さい (約 300mm) 点で十分な吟味が不足していると考えられる。そこで本研究では、予備実験として砂地盤を対象として矩形杭と円形杭の挙動の相違点についても検討した。

今回の実験で使用した杭の模型並びに実物の諸元を表-2 に示す。

本実験では、鋼製プレートの載荷面とその裏側にひずみゲージを 20~40mm 間隔で同一位置に貼り付け、水平載荷実験時における杭のひずみ分布を把握した。さらにひずみゲージを貼り付けた杭の表面には、豊浦砂を貼り付け、地盤との摩擦も考慮した。

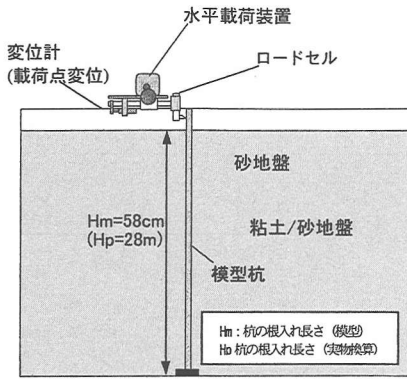


図-5 実験システム概要

表-3 実験条件一覧

地盤材料	豊浦砂	川崎粘土
地盤の密度	1.58	1.80
層厚 (cm)	58	58
粘土層厚 (cm)	-	24
圧密荷重 (kN/m ²)	-	216

(3) 地盤作成方法・実験システム

a) 地盤作成方法

模型杭は、予め試料容器の底にクランプで固定した後、砂地盤の場合には、空中落下法により砂を堆積させ、地表面を成形して平坦に仕上げた。

粘土/砂2層地盤では、まず砂層を上記と同様の方法で作成した。次に、容器の底面から注水し、砂地盤を飽和、水浸させ、そこに液性限界の約1.5倍の含水比に調整したスラリー状の粘土を投入した。その後、段階的に圧密荷重を増加させ、最終段階では、3 σ 法¹¹⁾、すなわち図-4に示すように、時間-沈下量関係(片対数目盛)において最急勾配線を引き、これを時間的に3倍だけ右に平行移動させた時間と交差する時間まで圧密を行なった。さらに所定の層厚になるように地表面を成形して模型地盤とした。

b) 水平載荷実験装置

水平載荷実験装置は、電動モーターによる変位制御方式である。今回実施した一連の実験では、杭頭の載荷位置における変位速度を0.6mm/minとした。

水平載荷実験における杭頭の荷重は、載荷装置に取り付けたカンチレバー型のロードセルにより計測した。また、載荷点の水平変位は、載荷ロッドに取り付けた変位計によりロッドの移動量を計測した。

実験時の杭の条件は、杭頭「自由」で杭先端は十分に長いと考え、「固定」としている。なお、杭が十分に長い条件を満たしているか否かについては、載荷実験時の杭の曲げモーメント分布により検討した。この点については、実験結果の項で記す。

今回実施した実験システムを図-5に示す。

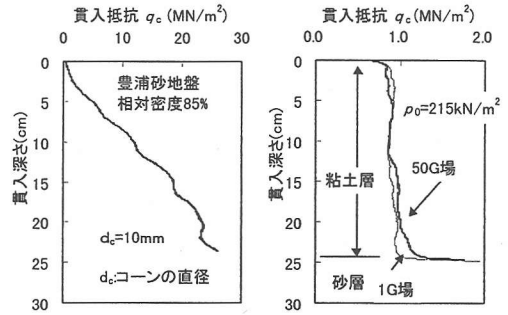


図-6 コーン貫入試験結果

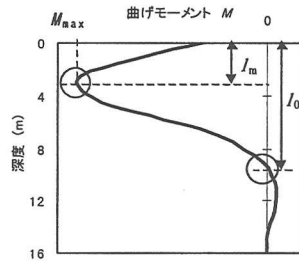


図-7 曲げモーメント分布の着目点

(4) 模型地盤の特性

地盤の強度分布を確認するために、50Gの遠心加速度場でコーン貫入試験を実施した。

実験に用いたコーンの形状は、直径10~11mm、コーン先端角60°で、貫入速度は14mm/minである。

コーン貫入試験の結果を図-6に示す。

砂地盤の場合には、深さ方向に貫入抵抗が単調に増加することを示し、応力依存性が顕著に表れている。一方、粘土地盤の場合には、貫入抵抗は深さ方向に一定の値を示し、砂層との境界付近で急増している。また、両地盤の貫入抵抗値を比較すると、粘土層の場合では、地表面から $q_c=0.9\text{MN/m}^2$ を示しているものの、砂層の場合には、地表面が $q_c=0$ であり、深さ方向に増加し、約15mm付近で $q_c=0.9\text{MN/m}^2$ を上回ることが明らかである。この点で砂地盤の場合には、地表面付近では地盤の水平抵抗が粘土地盤の場合を下回ることが容易に推察できる。この点が、粘土地盤と砂地盤との大きな相違点である。また、水平抵抗を考える場合の重要な特徴でもある。

(5) 実験条件

実験は、実物の地盤を1/50に縮尺し、50Gの遠心加速度で杭の水平載荷実験を行った。実験条件の一覧を表-3に示す。

なお、実験の結果は、応力状態が実物に相当することから各物理量は実物に換算して示す。

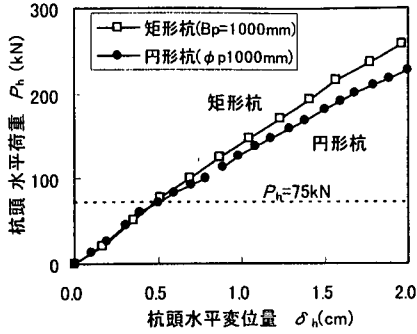


図-8 杭形状の相違による杭頭の荷重-水平変位量関係

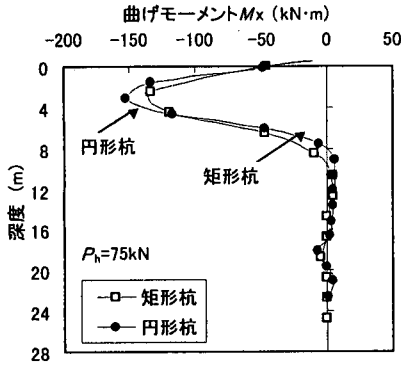


図-9 杭形状の違いによる曲げモーメント分布

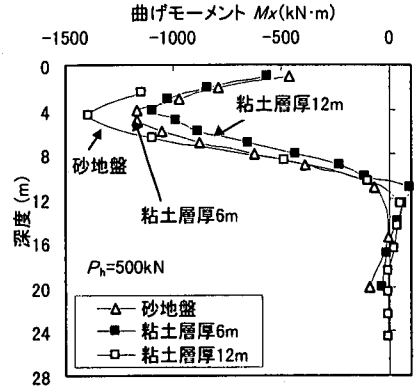


図-10 杭長の影響

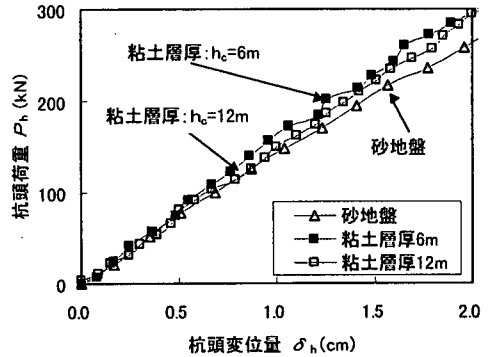


図-11 水平地盤反力の深度特性 地層構成の異なる地盤における杭頭の荷重-水平変位量関係

5. 実験結果

杭の応力状態を把握する上で曲げモーメント分布は、杭の挙動ならびに地盤を評価するための重要な指標である。そこで、実験結果、あるいは計算結果の曲げモーメントを比較する時に図-7 に示すような、最大曲げモーメント (M_{max})、 M_{max} の発生深度 (l_m)、曲げモーメント第一零点通過深度 (l_0) に着目して評価することにする。

(1) 杭の形状の影響

本実験に先立ち、円形杭と矩形杭の挙動の相違点に着目して砂地盤において水平載荷実験を行った。

実験の結果は、杭頭の荷重-水平変位量関係を表し、図-8 に示す。

同図に示すように、杭頭水平変位が 1cm 以下の変形領域の場合には、杭頭の荷重-水平変位量関係はほとんど一致している。ただし、これ以上の変形が生じると円形杭の水平抵抗が矩形を下回ることが明らかである。

次に杭全体の挙動を把握するために、杭頭の荷重

—水平変位量関係でほとんど一致している杭頭荷重が 75kN の場合の曲げモーメント分布に着目してみる。

図-9 に杭頭荷重 75kN の時の曲げモーメント分布を示す。

矩形杭の曲げモーメント分布は、円形杭と比較すると l_m はほぼ等しく、また M_{max} の差は約 10% であった。また、 l_0 は約 1m 矩形杭が深くになっている程度でほぼ一致していると判断できる。以上の結果から低荷重領域では、形状の影響が僅かであると判断し、矩形の鋼製プレートを用いて実験を進めた。

(2) 杭の長さに対する検討

本実験では、まず今回用いた実験条件が半無限長の杭に相当するかについて検討した。

図-10 は、砂の単一層と粘土層厚が 6m と 12m の地盤において実施した水平載荷実験結果の内、杭頭荷重 500kN (杭頭の水平変位は約 4cm) の曲げモーメント分布である。

同図によると杭頭荷重が 500kN の時は、 l_0 が約 12m

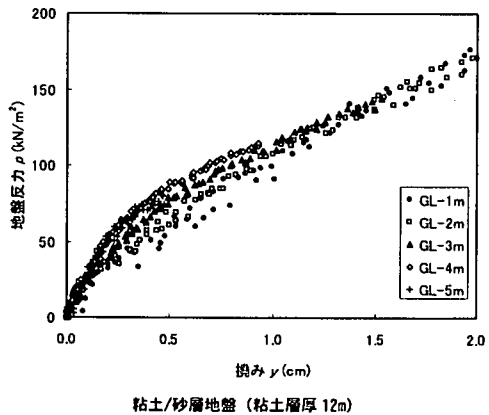
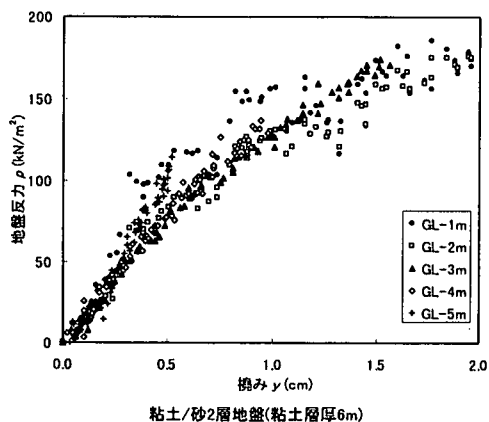
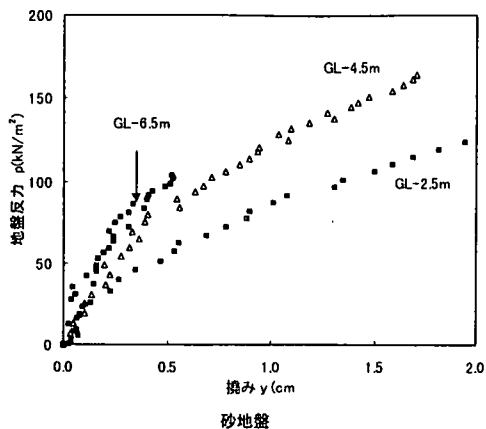


図-12 地盤中の p - y 関係

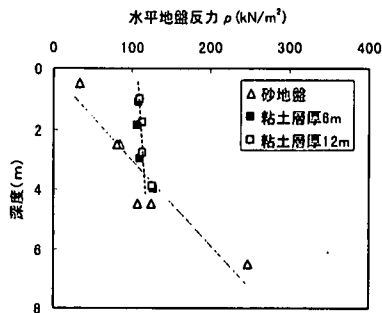


図-13 地盤反力の深度分布

(3) 地層構成の異なる場合の杭頭の荷重変位関係

粘土/砂2層地盤において粘土層厚が地盤の水平抵抗に及ぼす影響ならびに、砂の単一地盤とどのように異なるかについて検討する。

図-11には、粘土層厚 (h_c) が6mと12mの場合と砂の単一地盤における杭頭の荷重-水平変位量の関係を示す。

同図に示すように杭頭の荷重-水平変位量関係を見る限りにおいて、杭頭水平変位量が1cm程度までは、粘土層厚が6m、12mの粘土/砂2層地盤と砂の単一地盤の間で明瞭な相違点が認められない。しかし、1cmを超える付近から砂地盤での同一荷重における杭頭水平変位量が2層地盤に比べると大きくなっている。

一方、粘土層厚の影響は杭頭変位が2cm程度では認められない。この点については、さらに杭全体の挙動を把握することで検討を進めることにする。

杭の応力状態で粘土/砂2層地盤の層厚ならびに砂地盤との相違点を把握するために、地盤反力 (p) と杭の撓み (y) の関係に着目する。

撓み (y) は、杭の曲げモーメント分布を2回数値積分して求めた。また、地盤反力は、連続する3点を2次の関数として数値微分を2回して求めた。

これらの関係を地盤条件別に図-12に示す。なお、深度6mよりも深くなると曲げひずみがほとんど発生していない。したがって、これよりも深い位置での地盤反力の算出は、精度に問題があるので実施していない。

同図によると砂地盤の場合には、深くなるとともに同一撓みにおける地盤反力が大きくなる。この点で砂地盤内の地盤反力は、土被り圧、すなわち応力に依存することが顕著に表れることが示されている。

粘土/砂2層地盤の場合は、深度によらず p - y 関係が同一曲線上でほぼ一致しており、拘束圧の影響がほとんどないことが示されている。

杭頭の荷重-水平変位量関係では、砂地盤と粘土/

であり、GL-18mより深くなるとほとんど曲げモーメントが発生していない。篠原、久保らも、 l_0 の1.5倍以上の杭長であれば半無限長の杭として取り扱うことができるとしている。

本研究では、全長28mの杭を用いており、逆算すると $2.3 \times l_0$ に相当するので、今回の実験は、 $1.5 \times l_0$ の条件を十分満足している。以上の点から本研究の実験条件は半無限長の杭として取り扱う。

表-4 水平地盤反力係数総括表

砂地盤	粘土地盤
$n_h=4.6\text{MN}/\text{m}^3$	$k_h=7.1\text{MN}/\text{m}^3$
$\eta=3.2 \times 10^{-3}\text{cm}^{-1}$	$\beta=1.9 \times 10^{-3}\text{cm}^{-1}$

砂 2 層地盤において、ほとんど差異が認められなかったが、 p - y 関係は、特徴ある相違点が認められた。

水平地盤反力係数の深度分布の相違点を把握するため、撓み (y) が 1cm の時の地盤反力 (p) と深度の関係を図-13 に示す。

同図に示すように、砂地盤の場合には、深さ方向に p が増加することが明らかであり、一方、粘土地盤では、深さ方向に p が変化しないことが明らかである。また、深さ 3m までの p は、粘土地盤が砂地盤のそれを上回っていることが明らかである。

以上の点で砂地盤の水平地盤反力係数を粘土地盤と同様の手法で評価することは問題があるといえる。

6. 考察

(1) 水平地盤反力係数の算出

模型実験から、砂地盤と粘土地盤の水平地盤反力の挙動に差異が認められることを示した。

本研究では、粘土層での水平地盤反力係数と砂の単一層における水平地盤反力係数を把握するために弾性地盤反力法による水平地盤反力係数を求めた。

一方、このような地盤を対象にして既往の Chang あるいは Reese-Matlock による方法で検討した場合には、どの程度の異なる結果が得られるのかを把握するために、以下の方法により曲げモーメント分布の比較検討をした。

算出方法は、以下のように行った。

- ① 杭頭の荷重-水平変位量関係により Chang の方法あるいは Reese-Matlock の方法により杭頭変位が 1cm の時の水平地盤反力係数 (k_h)、あるいは水平地盤反力係数増加率 (n_h) を算出する。
- ② それぞれの k_h 並びに n_h を用いて曲げモーメント分布を算出し、実験結果と比較する。

この方法で求めた k_h 、 n_h 並びに杭の特性値 (β 、 η) をまとめて表-4 に示す。また、実験と計算の結果を併記して図-14~15 に示す。なお、 β 、 η は、次式により求められる。

$$\beta = 4 \sqrt{\frac{k_h B}{4EI}} \quad (3)$$

$$\eta = 5 \sqrt{\frac{n_h}{EI}} \quad (4)$$

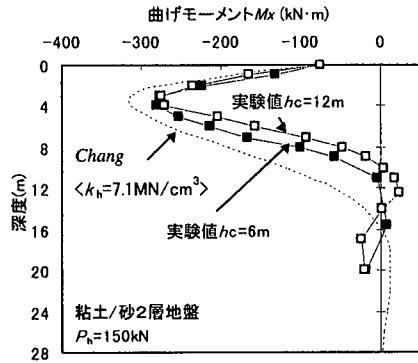


図-14 Chang 式により求めた曲げモーメント分布 (粘土/砂 2 層地盤: 粘土層厚 6m, 12m)

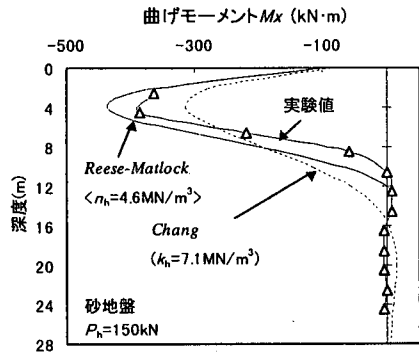


図-15 Reese-Matlock による n_h から求めた曲げモーメント分布 (砂地盤)

図-14 に示すように、粘土/砂 2 層地盤は粘土層厚が 6m と 12m でほぼ同一の曲げひずみ関係を示している。この要因としては、図-13 でも記したように粘土層内の k_h が一定値である点と、同実験条件の $1/\beta$ が、5.2m であり粘土層厚 (6m, 12m) が $1/\beta$ よりも厚いことによるものと考えられる。すなわち、地盤の水平抵抗は、地表面から $1/\beta$ の間に支配されることを示している。

Chang の式で求めた値と実験結果を比較すると、計算値が実験値に比べて約 10% 大きな値を示すが、 l_m はほぼ一致している。以上の点から、深さ方向に k_h の変化しない粘土地盤では、 $1/\beta$ よりも深い位置で地層の変化があったとしても実用上、Chang の式を用いることで評価できるといえる。

砂地盤での挙動は、Reese-Matlock の方法によると、 M_{max} は計算結果の方が約 10% 大きな値、 l_0 は 1m 程度深い程度で、類似した形状である。

一方、参考のために求めた Chang の方法によると、曲げモーメント分布では、 M_{max} が実験値に比べると 25% 過小となっている。さらに l_m はほぼ一致しているものの、 l_0 は約 6m 深くなっており、曲げモーメン

ト分布は一致していないと判断できる。

以上の結果からも明らかなように、砂地盤では、地表面付近で水平抵抗を評価することが期待できない。この点が粘土地盤と大きく異なる点であり、砂地盤のように地表面付近で水平抵抗を発揮しない地盤では、Changの方法では、杭に対して危険側の評価を与える。地表面から応力に依存する地盤の場合、すなわち深さ方向に比例して強度が増加するような場合には、Reese-Matlockの方法は有効な手段である。

(2) 応力依存性を考慮した地盤の水平抵抗評価法

先に述べたように、杭の水平挙動を把握するためには、 $1/\beta$ 程度までの地盤の水平抵抗を評価する必要があることを示し、粘土地盤の場合には、Changの方法で評価できることを示した。しかし、砂地盤のような場合には、水平地盤反力係数増加率(n_h)で評価する必要がある。水平地盤反力係数(k_h)は、土質試験やN値からの評価方法があるのに対し、 n_h の評価方法は富永がN値を用いた方法を提案している程度で殆ど見られない。

そこで砂地盤は、単一層であるが強度-変形特性の観点から、深さ方向に地盤剛性(変形特性)が増加する多層地盤であると考え、多層地盤バネ法を用いることにした。

一方、地盤の応力依存性は、三軸圧縮試験で得られた応力-ひずみ関係をDuncan-Changの双曲線パラメータを用いて検討した。

各層の k_h の算出方法は、以下の通りであり、地層の分割厚は1mとした。なお、分割層厚を0.5mでも曲げモーメント分布には変化がないことを確認している。

①地盤の変形係数は、双曲線パラメータを用いると式(5)の関係で表されるとする。

$$E = K \times Pa \left(\frac{\sigma_m}{Pa} \right)^n \quad (5)$$

ここに E は変形係数、 σ_0 は平均有効拘束圧、 K, n はそれぞれ拘束圧による係数、 Pa は大気圧である。

ここで K は、三軸圧縮試験で求めた初期の接線勾配に基づいて求めた値である。一方、杭頭の水平変位が杭径の1%に相当するような変形量を対象にした場合には、相対的に大きな変形量¹²⁾が対象となる。したがって k_h は、三軸圧縮試験の割線勾配から求める必要がある。

双曲線パラメータで求めた初期の接線勾配(E_i)と、割線勾配(E_0)との関係は、以下の関係が成り立つとして式(6)を得る。

$$E_0 = \frac{1}{2} E_i \quad (6)$$

また、 σ_m は、平均有効拘束圧であることから、式(7)で示される。

$$\sigma_m = \frac{1+2K_0}{3} \gamma_i \times H \quad (7)$$

ここで H は深さ、 γ_i は地盤の密度、 K_0 は静止土圧係数である。

$K_0=0.5$ と仮定すると式(8)が得られる。

$$\sigma_m = \frac{2}{3} \gamma_i \times H \quad (8)$$

以上をまとめるて式(5)に代入すると地盤の変形係数は、式(9)で示される。

$$E_0 = \frac{K}{2} Pa \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{nH}{Pa} \right)^n \quad (9)$$

一方、水平地盤反力係数 k_h は、地盤の変形係数との関係として式(9)が与えられている⁹⁾。

$$k_{h0} = \alpha_1 \cdot E_0^{\alpha_2} \cdot B^{\alpha_3} \quad (10)$$

ここに $\alpha_1 \sim \alpha_3$ は定数、 E_0 は変形係数、 B は杭幅である。

$\alpha_1 \sim \alpha_3$ は、各種の推定方法により異なるが、ここでは $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$ 、 $\alpha_3 = -1$ とする。

式(10)に式(9)を代入し、式(11)が得られる。

$$k_{h0} = \frac{K}{2} Pa \left(\frac{2}{3} \cdot \frac{nH}{Pa} \right)^n \cdot B^{-1} \quad (11)$$

②水平地盤反力係数がたわみに依存することを考慮して式(12)のようにする⁵⁾。

$$k_h = k_{h0} \times (y/y_0)^m \quad (12)$$

ここで k_h は水平地盤反力係数、 k_{h0} はたわみが y_0 の時の初期水平地盤反力係数、 y はたわみ、 m は定数である。

この時の m は $-0.5 \sim -1.0$ であるが、ここでは -0.75 を採用する。

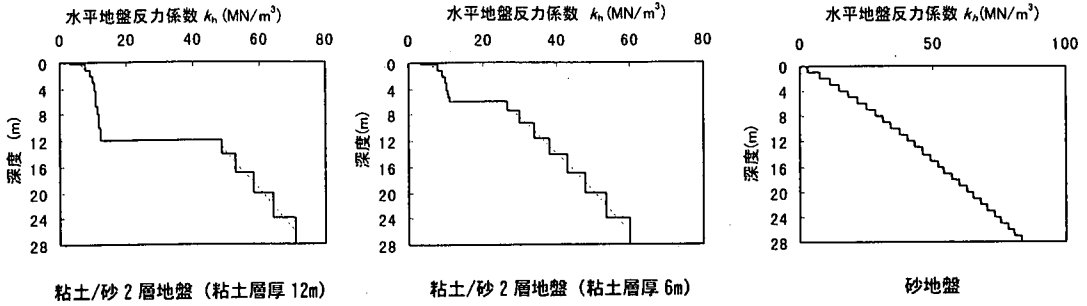


図-16 計算で用いた水平地盤反力係数

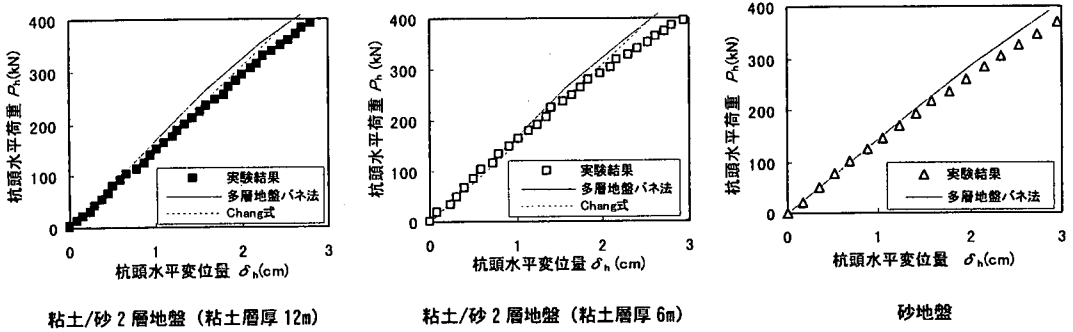


図-17 多層地盤バネ法で計算した杭頭の荷重-水平変位量関係

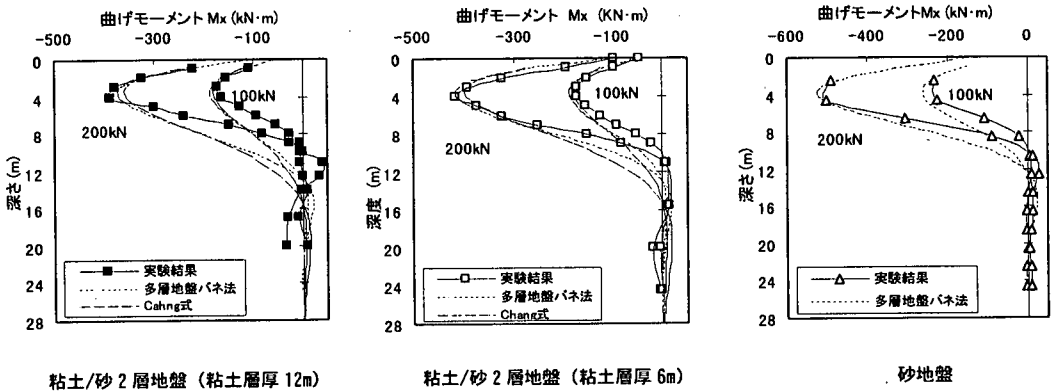


図-18 多層地盤バネ法で計算した曲げモーメント分布

表-5 計算に用いたパラメーター

材料名	川崎粘土	豊浦砂
予備圧密圧力	215kN/m ²	—
圧密圧力の範囲	49~196kN/m ²	49~196kN/m ²
実験条件	UU	CD
K	244	722
n	0.15	0.83

③各地層における水平地盤反力係数を求め、多層地盤バネ法により杭の応力状態を計算する。なお、計算における境界条件は、実験条件と同様で杭頭は自由であり、杭先端は、実験の結果から十分に長いと判断したため、ヒンジとしている。

先に、地盤材料の特性で示した豊浦砂の三軸圧縮

試験 (CD) 並びに、川崎粘土の三軸圧縮試験 (UU) の結果を基に、応力依存性に関する双曲線パラメータ K , n を算出して表-5 に示す。

表-5 に示すように砂地盤の場合には、 $n=0.83$ で応力依存性が顕著に表れている。逆に粘土地盤の場合には $n=0.15$ である。

計算に用いた各地層の水平地盤反力係数を図-16 に、計算の結果は実験結果とともに図-17, 18 に比較をして示す。

計算の結果と実験結果に比べることで以下の知見を得た。

①砂地盤の場合には計算結果の M_{max} が約 5% 大きな値を示しているが l_m はほぼ一致している。

②粘土／砂2層地盤の場合には、粘土層厚が12mの場合には、 l_0 は計算結果のほうが深いことが特徴的に表れている。

③粘土層が6mの場合は、非常に実験値に近い曲げモーメント分布になっている。また、Changの方法から求めた結果を同様に示したが、曲げモーメントの最大値よりも深いところでの形状が実験結果と大きく異なる。

Duncan-Changの双曲線パラメータを用いることで砂地盤の場合には、概ね杭の曲げ挙動を把握することが可能である。

以上のように、Duncan-Changの双曲線近似で水平地盤反力係数を与え、多層地盤バネ法を用いることは、実際の杭の挙動を把握する上で有効な方法である。

7. 結論

本研究は、砂地盤と粘土／砂2層地盤において杭頭自由の条件の下で長い杭を対象にした水平載荷実験を行い、その挙動を把握した。

研究成果を要約して以下に示す。

- ①粘土層が杭の特性値の逆数($1/\theta$)よりも厚い場合には、水平地盤反力係数が一定としてChangの方法を用いて計算しても計算結果と実験結果は、ほぼ一致する。
- ②砂地盤の場合には、深さ方向に水平地盤反力係数が増加することと、地表面付近では、粘土地盤のような水平地盤反力係数が期待できないために、杭頭に荷重が作用した場合には、杭頭の変位が同一であっても、砂地盤の方が粘土地盤に比べて大きな曲げモーメントが発生する。
- ③砂地盤における水平抵抗は、Reese-Matlockの方法で求めると杭には安全側で計算することができる。
- ④Reese-Matlockの方法の代わりに、多層地盤バネ法と三軸圧縮試験結果から求めたDuncan-Changの双曲線パラメータを用いて応力依存性を考慮することで、杭の応力状態を把握することができる。

今回対象とした地盤は、地層条件ならびに地盤条件ともに特別な条件である。しかし、沖積地盤のように、深さ方向に強度が増加するような地盤における杭の水平抵抗問題については、同方法を用いた検討が有効であると考えられる。

参考文献

- 1) Chang, Y. L. : Discussion on "Lateral Pile-Loading Tests" by L. B. Feagin, *Trans. ASCE*, Vol. 102, 1937.
- 2) 建造物設計標準解説 基礎構造物・土構造物 土木学会編。
- 3) Reese, L.C. and Matlock, H.: Non-dimensional Solutions for Laterally Loaded Piles with Soil Modulus Assumed Proportional to Depth, *Proc. 8th Texas Conf. SMFE*, The Univ. of Texas, Austin, Paper No.7, 1956.
- 4) 港湾振興協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1989.
- 5) 建築基礎構造設計指針：日本建築学会, 1988.
- 6) 道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編Ⅳ下部構造編：社団法人日本道路協会, 1996年。
- 7) 富永晃司：砂地盤中杭の横方向地盤反力係数の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第446号, pp. 67~72, 1993.
- 8) 杭基礎設計便覧, 社団法人日本道路協会, 1992年。
- 9) Duncan, J. M. and Chang, C. Y.: Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils, *A.S.C.E*, Vol. 96 SM5, September 1970.
- 10) 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), 運輸技術研究所報告, 第11巻, 第6号, 1961.
- 11) 土質試験の方法と解釈(第1回改訂版)：地盤工学会, 2000年3月。
- 12) 平山英喜, 福田悦治：土のひずみレベルを考慮したN値からの割線弾性係数の推定, 第23回土質工学研究発表会, pp. 1247~1250, 1988. 6.

(1999. 10. 7 受付)

AN EVALUATION METHOD LATERAL RESISTANCE OF PILES IN THE GROUND HAVING INCREASE OF STIFFNESS WITH DEPTH

Norihisa KATAKAMI, Kunio SAITOH, Tsukasa YOSHIFUKU,
Yutaka SATOH, Syoichi FURUYAMA and Michio KURIYAMA

In various design standards, the method is recommended for Chang on the design of piles. The assumption in the method of Chang is that the lateral resistance (k_n) is constant in spite of the direction of depth. In the existing grounds, such a ground is not general, but the k_n in the ground changes with depth.

In this paper to confirm the applicability of the methods of Chang and Reese-Matlock, the lateral loading tests of the pile in the sandy and clay/sand layered grounds were performed using a geotechnical centrifuge. Moreover, the new method to certain the stress condition of pile, which used the k_n distribution determined by triaxial compression tests and stiffness matrix of beam member, was proposed.