

群杭の水平載荷試験およびシミュレーション解析

HORIZONTAL LOADING TESTS OF GROUP PILES AND ITS SIMULATION ANALYSIS

岡原 美知夫* 木村 嘉富**

By Michio Okahara, Yoshitomi Kimura,

高木 繁*** 大堀 裕康****

Shigeru Takagi and Hiroyasu Ohori

At present, design standards used for structures is shifting from the working stress design method hitherto in use to the limit states design method. In order to apply the limit states design method to pile foundations, it is necessary to define limit states that shall be checked in the design process and to establish models for analysis which represent such limit states. In this paper, the authors make a report on results of horizontal loading tests of model group piles in sandy ground and results of its simulation analysis in order to clarify behavior of pile foundations during large deformation exceeding elastic limit, ground reaction, and effect of pile group.

1. はじめに

現在、道路橋示方書Ⅳ下部構造編¹⁾（以下、「道示」と称す）における杭基礎の変位量などの計算は、杭頭変位量を基礎の挙動が弾性的と見なすことのできる許容変位量内に制限し、線形弾性解析により行われている。これは基礎に有害な残留変位を生じさせないという設計思想に基づくものであり、計算の簡便さを考慮すると実設計においては合理性の高いものと考えられる。

一方で、様々な規準類の設計体系が限界状態設計法に移行する趨勢にあることから、道路橋の設計においてもその導入に向けての研究が進められている²⁾。杭基礎の設計に限界状態設計法を導入するためには、杭基礎の水平方向の保有耐力の評価法、および、設計において照査すべき各種限界状態の定義を明確にすることが必要であり、そのために、弾性限界を超える変位領域での杭基礎の挙動を把握する必要がある。

大変形時の杭基礎の挙動においては、地盤抵抗の非線形性、杭体の曲げ剛性の低下および群杭による影響などが顕著となり、設計法の確立のためにはこれらの影響を定量的に把握する必要がある。このため、群杭模型や実大規模による載荷試験が行われつつあるが^{3) 4) 5)}、いまだ定量的な評価には至っていない。

* 工博	建設省土木研究所	構造橋梁部	基礎研究室長	(〒305 茨城県つくば市大字旭1番地)
**	建設省土木研究所	構造橋梁部	基礎研究室	(同 上)
***	同	上		(同 上)
****	同	上		(同 上)

このため、筆者らは試験土層に作成した砂地盤において直径10cmの鋼管杭を用いた一連の群杭模型の載荷試験を行い、群杭の水平抵抗に関する定性的傾向を把握した。本報告は、これらの水平方向載荷実験、およびその結果に基づいた杭基礎の大変形時の安定計算法に関する検討結果について述べるものである。

2. 模型実験

2. 1 実験方法

実験は建設省土木研究所内にある深層土槽内において行った。図-2.1に全体概要を示す。

試験杭は、外径101.6mm、肉厚11.75mm、長さ5.0mの鋼管を用いた。各杭には試験中の杭体ひずみを測定するために、地盤面から1.5mまでは100mm間隔、それ以深に対しては200～300mm間隔で杭外側（載荷方向前後）にひずみゲージを貼付している。各杭の頭部は鋼製フーチングに剛結され、さらにフーチングの回転を拘束するようフーチングをパンタグラフに連結した（写真-2.1）。また、杭先端での境界条件が固定となるよう、杭先端を固定金具により固定板に結合している。

地盤は試験杭を設置し土槽内を満水にした後、グラブバケットにてグレーチングを介して砂（鹿島砂； $G_s = 2.67$ ，最大粒径4.76mm，細粒分0%，均等係数2.54）を落下する方法で作成した。試験後に行った土質調査結果によるとばらつきも小さくほぼ均一地盤であることが確認されている（ $\gamma_t = 1.68 \text{ tf/m}^3$ ， $\phi_u = 35^\circ$ ）。載荷試験による周辺地盤の変形を把握するため、試験地盤作成後、写真-2.2のように地表面にメッシュを描くとともに、所定の位置において地盤中に色砂を注入し、長さ1mの色砂柱を作成した。

実験は表-2.1に示すように、単杭，並列杭，直列杭，および9本組杭の6ケースについて行った。杭の中心間隔は、通常の橋梁基礎に準じて各ケースとも杭径の2.5倍（254mm）とした。載荷は一方向多サイクル荷重制御方式とし、隣接している水平載荷槽よりP C鋼棒を介してフーチング中央部を加力した。載荷中の荷重はセンターホール型ロードセルで、フーチングの水平変位および回転は変位計により測定した。また、試験地盤の変形については、上方に設置したカメラによりメッシュの水平移動を撮影するとともに、スタッフにより各点の地表面鉛直変位量を測定した。さらに、実験終了後、試験地盤を掘削して色砂の変状を観察し、全体挙動把握の参考とした。

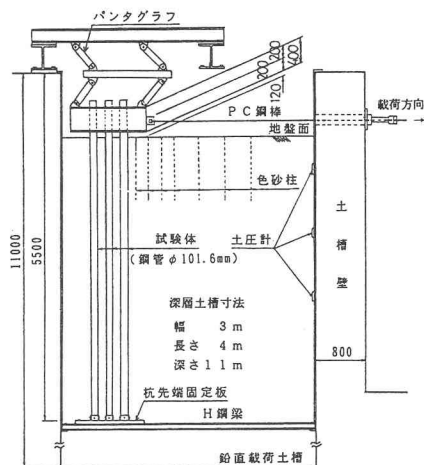


図-2.1 実験概要図

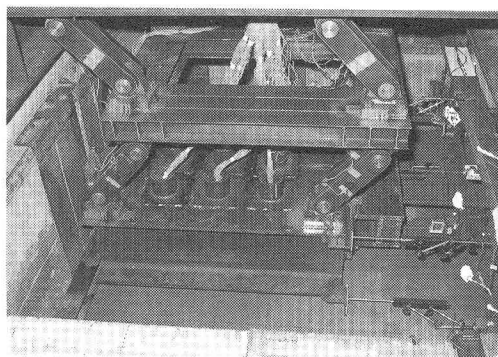


写真-2.1 杭頭部のパンタグラフ装置



写真-2.2 完成した実験地盤

2. 2 実験結果

(1) 載荷荷重～フーチング変位量曲線

図-2.2 に各実験ケースの処女荷重時における平均載荷荷重（杭1本当たりの平均荷重）～フーチング水平変位量曲線を示す。図より、変位量が多い範囲では組杭の荷重-変位量曲線はいずれも単杭の曲線の下方にある。その影響度合いは9本組杭が一番大きく、次いで3本直列、2本直列、3本並列、2本並列の順となっている。これらより、杭本数が多いほど、また同じ杭本数であっても載荷軸方向の杭本数が多いほど各杭相互の地盤抵抗の干渉度合いは大きくなるものと考えられる。

(2) 杭頭の水平反力分担比

図-2.3～2.5 に3本並列杭、3本直列杭および9本組杭での実験より得られた各杭の杭頭における水平反力を示す。ここで、各杭頭の水平反力は地上突出部2断面に取り付けたひずみゲージによる曲げモーメント差から算出した。

図-2.3 に示す3本並列杭では、側方、中央によらず各々の杭の杭頭水平反力はほぼ同程度である。これに対し、図-2.4 の3本直列杭では、前方杭が大きな荷重を分担し、中央杭、後方杭となるに従って小さくなっており、載荷軸方向に対する杭の位置によって、各々の杭が分担する水平反力が顕著に異なることがわかる。また、この傾向はフーチングの変位量が大きくなるのに従って顕著になっている。

9本組杭の各杭の荷重分担は、図-2.5 に示すように3本並列杭および3本直列杭の傾向を合成したものとになっていることが認められるが、杭位置によ

表-2.1 水平載荷試験ケース

ケース	杭配列	略称	杭材諸元
1	1本杭	単杭	材質：STK540
2	載荷方向2本杭	2本直列杭	外径：101.6(mm)
3	載荷方向3本杭	3本直列杭	肉厚：11.75(mm)
4	載荷直角方向2本杭	2本並列杭	断面積：33.2(cm ²)
5	載荷直角方向3本杭	3本並列杭	試験長：4.4(m)
6	9本（3×3本）平方配列杭	9本組杭	降伏点：62(kgf/mm ²)

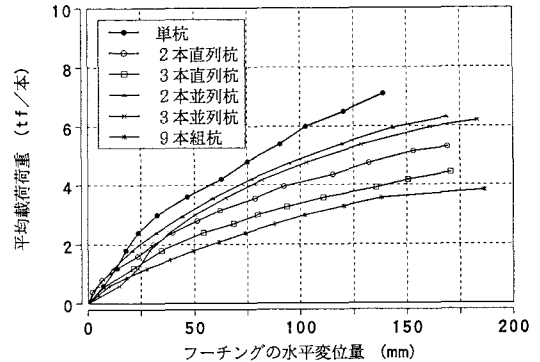


図-2.2 平均載荷荷重～水平変位量曲線

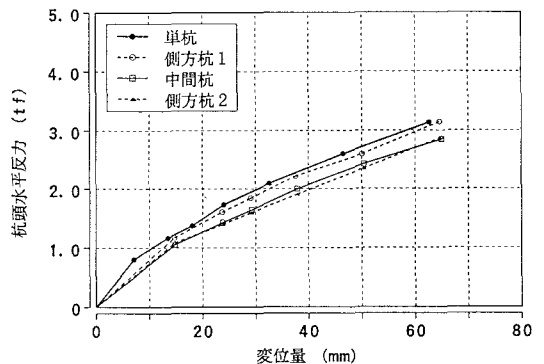


図-2.3 杭頭水平反力～変位量曲線（3本並列杭）

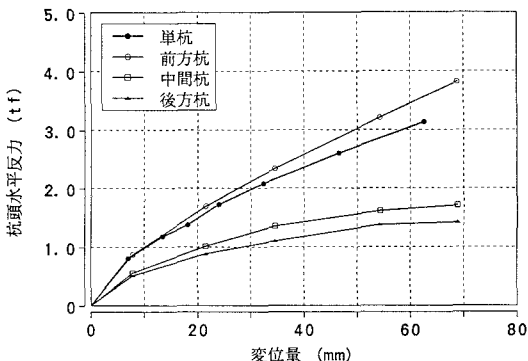


図-2.4 杭頭水平反力～変位量曲線（3本直列杭）

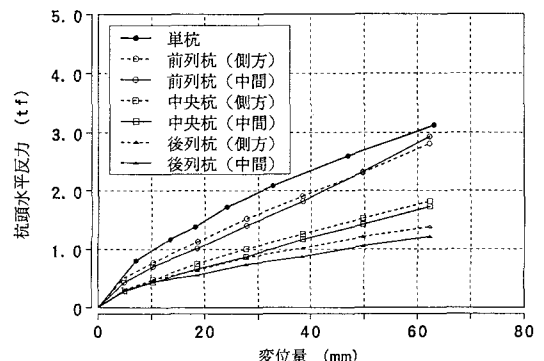


図-2.5 杭頭水平反力～変位量曲線（9本組杭）

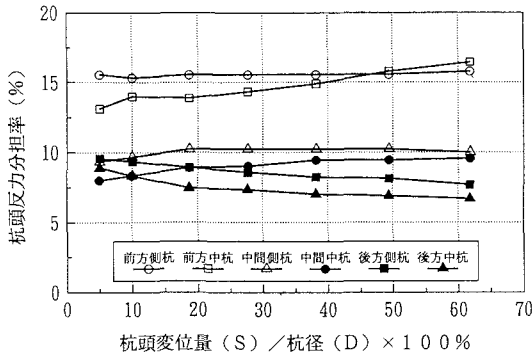


図-2.6 杭頭水平反力の分担比

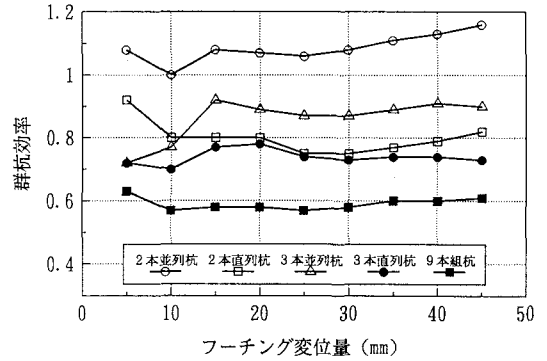
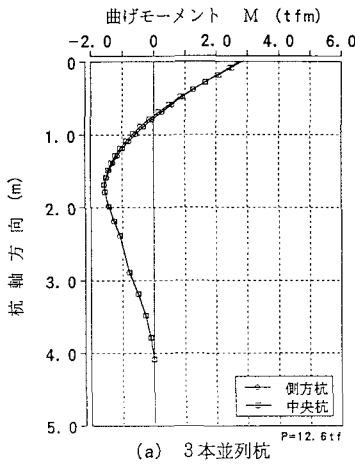
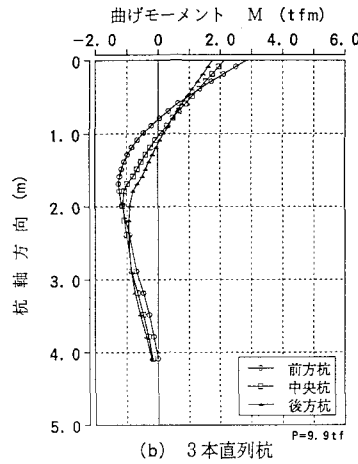


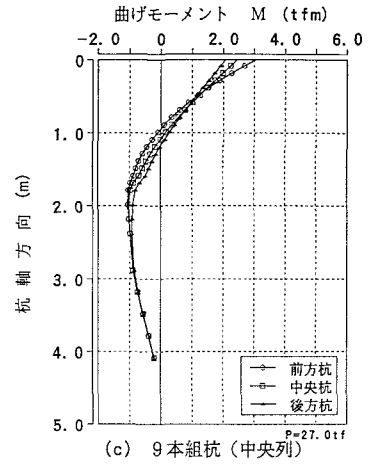
図-2.7 群杭効率



(a) 3本並列杭



(b) 3本直列杭



(c) 9本組杭(中央列)

図-2.8 曲げモーメント分布図

る差が小さくなっている。図-2.6 は9本組杭における、各杭の杭頭反力の分担比を示している。

同一変位量における群杭の杭1本当たりの平均反力と単杭の水平反力との比を群杭効率 (E_f) として取り扱うと、 E_f は次式で表される⁶⁾。

$$E_f = \frac{\text{群杭の1本当たりの平均反力}}{\text{単杭の反力}}$$

(変位量は同一)

図-2.7は本実験における群杭効率(E_f)を示したものである。群杭による影響は載荷の初期段階(変位が杭径の約5%)から発現しており、その値は変位が進行してもほぼ一定となっていた。群杭効率は並列杭、直列杭、組杭の順で低下している。

(3) 曲げモーメント分布

図-2.8 は3本並列杭、3本直列杭、及び9本組杭について、各々の杭体に取り付けたひずみゲージから曲げモーメントの分布を求めたものである。ここでは、曲線はそれぞれ前方杭本体が降伏する直前の荷重状態での分布を示している。なお、実測値のばらつきをスプライン関数によって平衡化処理を行った⁷⁾。

並列杭では、杭位置によらず同程度の曲げモーメント分布となっているが、直列杭では地中部最大曲げモーメントの値(M_{max})が後方になるにしたがって低下し、また M_{max} の発生位置も深くなっていることがわかる。9本組杭についても同様の傾向がみられるが、前方杭と後方杭の差異が3本直列杭に比べて小さくなっている。

(4) 杭体変位分布

図-2.9 は、3本並列杭、3本直列杭、及び9本組杭について同一地表面変位量が生じるときの杭体変位分布を比較したものである。ここで杭体の水平変位分布は曲げモーメントの値を積分処理することにより算定した。並列杭では各杭の変形形状は同一であり単杭の形状とほぼ一致している。これに対し直列杭では載荷最前方の杭の変形形状は単杭の形状と一致するものの、後方杭の曲がり小さくなっている。これは、後方杭前面地盤の抵抗が小さいことによるものと思われる。一方、9本組杭では中央杭、後方杭は直列杭と同様の傾向を示すが、前方杭の曲率は単杭に比べて小さく地盤抵抗が小さいことがわかる。また、前方杭と後方杭の差も直列杭に比べると比較的小さく、全体が一体として挙動している様子が表れている。

(5) 地盤反力度

各杭における地盤抵抗を把握するため曲げモーメントの値を2回微分処理することにより杭体に作用する地盤反力度分布を算出した。

図-2.10に、3本並列杭、3本直列杭および9本組杭の前杭本体が降伏する直前の水平地盤反力度分布を示す。3本並列杭では各杭に作用する水平地盤反力度 (p) は杭位置によらず同程度であり、単杭における

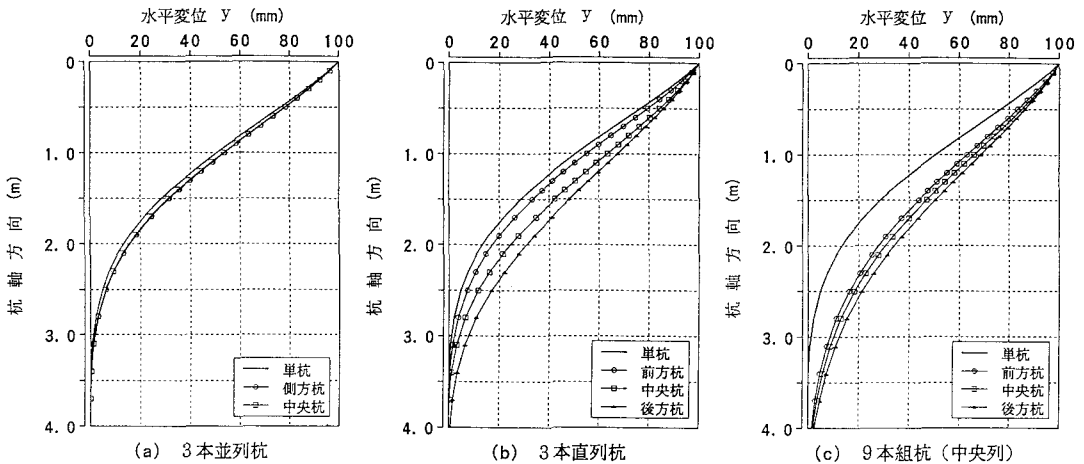


図-2.9 変位分布図【地表面変位100mm時】

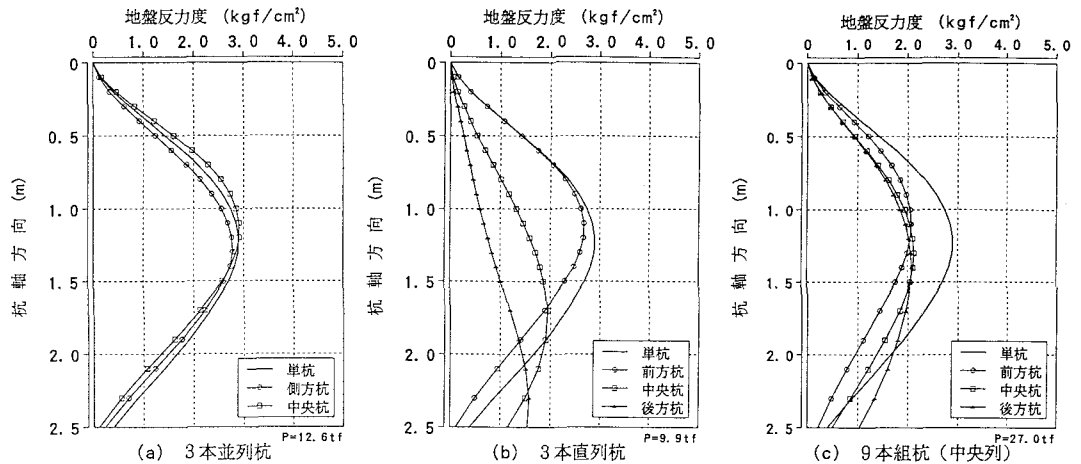


図-2.10 地盤反力度分布図

値とほぼ一致している。一方、3本直列杭では水平地盤反力度は前方杭が最も大きく、単杭および並列配置杭群と同程度の値となっているが、後方になるに従い小さくなる傾向にある。また地盤反力度の最大値の発生深度（ z_p ）は後方に位置するに従って深くなる傾向にある。

9本組杭における p および z_p は上記の3本並列杭および3本直列杭を合成した傾向を示すものの、前方杭群と後方杭群における発生傾向の差異は3本直列杭ほどは明瞭でなく、また前方杭の p は単杭と比較して小さい値となっている。

（6）地盤反力度～変位量関係

前述したように直列杭、9本組杭では杭位置によって杭頭の水平反力および地盤反力度の値や分布形状が異なることが認められたが、これは、杭間の地盤が杭によって干渉を受け、地盤の抵抗特性が異なることに起因しているものと考えられる。各杭前面地盤の抵抗特性を把握するために、（4）の水平変位量分布および（5）の地盤反力度分布をもとに、各深度における水平地盤反力度（ p ）と水平変位量（ y ）との関係を求めた。図-2.11に、各杭列の杭で得られた地盤反力度～変位量曲線（割線勾配は地盤反力係数に相当）と単杭での曲線の比較を示す。ここで、 $p-y$ 曲線は深度により異なるが、同図は杭体に作用する地盤反力度が概ね最大となる深度1mにおける関係を示している。

並列配置杭群においては、（a）に示すように各杭前面地盤の曲線形状は杭位置によらず同様であり、単杭実験結果より若干小さい値となっていることがわかる。

一方、直列配置杭群においては、（b）のように載荷最前方杭の曲線形状は変位量によらず単杭実験結果とほぼ一致するものの、後方杭における曲線の勾配は前方杭位置に比べて小さく、また地盤反力度が上限値に達していることがわかる。

9本組杭では、3本直列杭と同様に各杭前面の地盤反力特性は前方杭で最大となり後方になるにしたがって低くなる傾向を示すものの、前方杭における最大値は単杭実験結果と比較して低い値となっている（同図（c））。

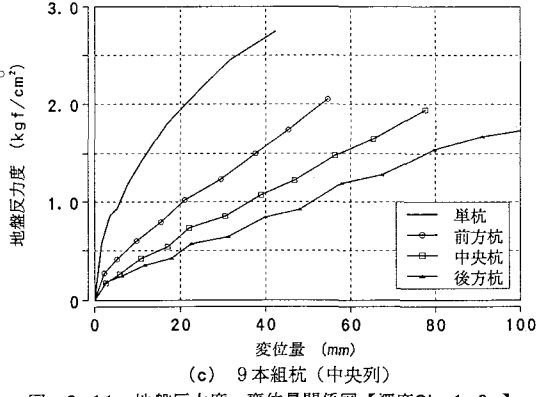
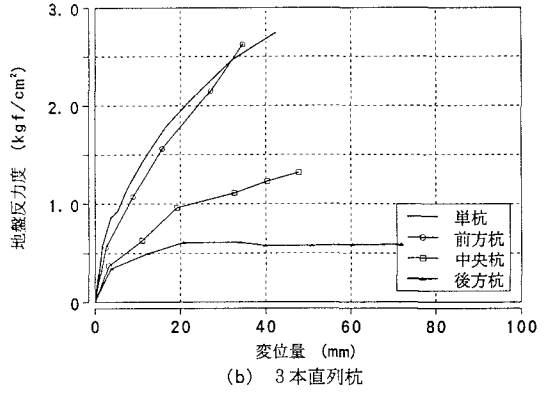
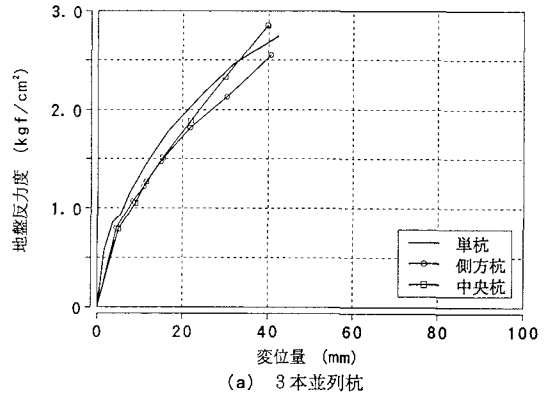


図-2.11 地盤反力度～変位量関係図【深度GL-1.0m】

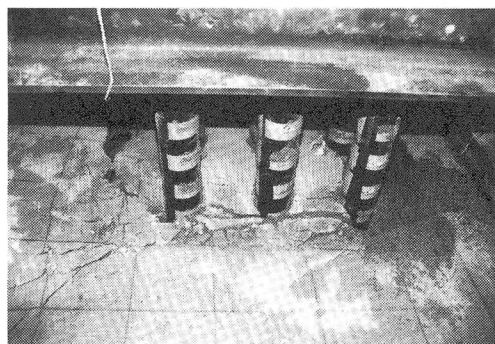


写真-2.3 載荷後の地盤の破壊状況

(7) 地盤変状

実験終了後の地盤の破壊状況（地表面ひび割れ、地盤の隆起、色砂柱のせん断）を観察した結果、地盤の隆起は並列杭が直列杭に比べて広範囲にわたっていることが認められた（図-2.12）。これは、杭間の土がアーチ効果によって杭の変位に追従したため、見かけ上載荷面積が広がったためと考えられる。また、9本組杭においては、載荷に伴い組杭前面地盤が大きく隆起しているとともに、杭間の土はあまり乱れておらず杭とともに土も一体として杭の変位に追従したことがわかる（同図(c), 写真-2.3）。

3. 実験結果の解析

3.1 解析手法

2. に示した砂質土地盤における一連の群杭模型実験で得られた結果をもとに、杭基礎の大変形時の挙動を説明できる安定計算モデルについて検討を行う。

一般に、杭基礎のような弾性体基礎の水平方向の安定計算法は地盤反力度の取扱いにより極限地盤反力法、弾性地盤反力法、複合地盤反力法に分類される。これらの手法のうち、変位量の計算が出来ない極限地盤反力法を除き、以下に示す3つの安定計算モデルについて実験結果に対する適用性を調べる（図-3.1参照）。

①線形弾性地盤反力法（水平方向地盤反力係数 k_H ，基準変位量 δ_0 は杭径の10%とする）

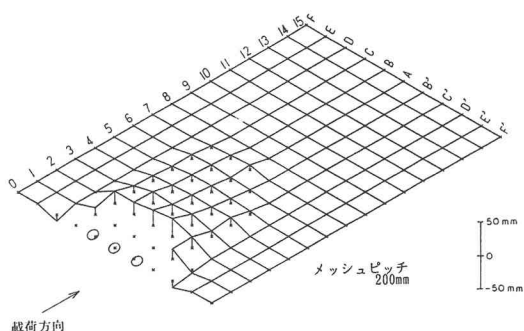
②線形弾性地盤反力法（ $k_H = k_0 (\delta / \delta_0)^\alpha$ ， $\alpha = -1/2, -2/3, -3/4, \dots$ ，

k_0 ； δ_0 における水平方向地盤反力係数， δ ；地表面における杭の変位量）

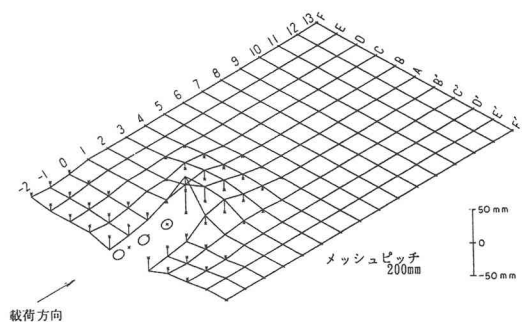
③複合地盤反力法（バイリニア型モデル）

安定計算モデルの検証項目として、以下に示す4項目について実験値と解析値の適合度を調べる。

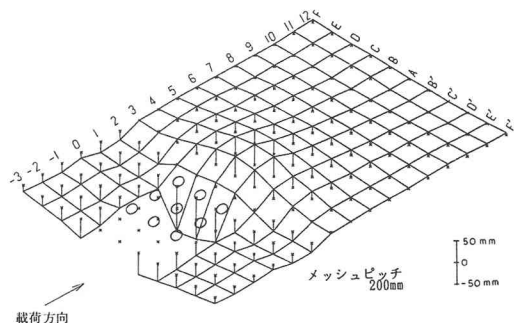
- ・フーチングの荷重～変位量曲線
- ・杭体変位分布
- ・杭体の曲げモーメント分布
- ・地盤反力度分布



(a) 3本並列杭



(b) 3本直列杭



(c) 9本組杭

図-2.12 地表面変化観察図

解析の検証としてフーチングの荷重～変位量曲線に加えて、杭体の曲げモーメント分布などにも着目しているため、解析の対象領域は実験においてひずみゲージが有効である降伏点以下とする。よって、解析においては杭体の抵抗は線形とし、地盤抵抗のみ非線形性を考慮する。

解析条件としては、実験においてフーチング上にパンタグラフを設け、杭頭の回転を拘束させることを目的としているため、回転拘束を基本とした。しかしながら、荷重作用方向に杭が並ぶ直列杭や9本組杭では、構造上完全な杭頭回転拘束とはならない（エポキシ樹脂で固定しているが樹脂の弾性変形が考えられる）ため、回転を許すものとする。さらに、水平力が作用しても構造上杭体

への軸方向力はほとんど作用しないことが確認されているので、解析では軸方向力は考慮しないものとする。杭先端は2.1に示したように回転を拘束する形で土層下面にボルト締め（2方向）で固定されていることや、構造上も $\beta l > 3.0$ を満足しており杭先端の条件が解析結果に及ぼす影響は小さいことなどから、解析では全てのケースに対して杭先端固定とする。

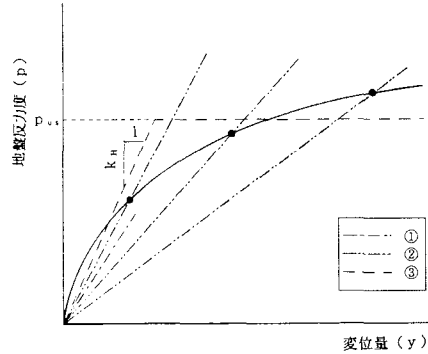


図-3.1 各安定計算モデルの地盤抵抗特性

3. 2 解析結果

(1) 単杭における各安定計算モデルの適用性評価

杭基礎の抵抗特性を検討するには、まず単杭の地盤抵抗特性を把握する必要がある。ここでは、実験による単杭の大変形領域までの挙動について3.1に示した各計算モデルを適用し、その妥当性を評価する。

線形弾性地盤反力法に用いる逆算 k_H を算定する場合、基準変位量を定める必要がある。道路橋示方書における k_H は基準変位量を杭径の1%として定められているが、実験値では変位量が杭径の1%レベルでのデータの信頼性が低いため、ここでは実験値の信頼性が確保される杭径の10%を基準変位量（ δ_0 ）として k_H を設定した。フーチングの荷重～変位量曲線を図-3.2に、杭の変位、曲げモーメント、地盤反力度分布を図-3.3に示す。図-3.2において、 k_H を設定した変形領域（杭径の10%）では実験値に適合するものの、変形が大きい領域になると地盤抵抗の非線形性をモデル上考慮していないことに起因し、実験値の追従ができなくなる。

このように、大変形時までフーチングの荷重～変位量曲線を追従するには地盤抵抗の非線形性を考慮できる解析法が要求される。ここで 計算の簡便性を重視し、地表面の変位量（ δ ）に応じて地盤反力係数を低減する $k_H = k \cdot (\delta / \delta_0)^\alpha$ を用いる。この手法によれば図のようにフーチングの荷重～変位量曲線を表すことは可能であるが、地表面の水平変位量に応じて地中部全体の k_H を一様に低減するため、深い位置での地盤反力度を過小評価し、変形量が実測値に比べて大きくなる。また、地盤抵抗は線形であり塑性化を考慮していないため、(c)に示すように地表面付近の地盤反力度が過大評価され、曲げモーメントは実測値に対し小さく評価されてしまう。このため、地盤の塑性化を評価できる手法を適用する必要性が生じてくる。

一般に地盤の弾性係数は拘束圧効果の影響などにより深度方向に増加することが知られている。弾性係数と密接な関係をもつ水平方向地盤反力係数についても深度方向に一定の値にはならず土研での模型実験においても深度方向に増加する結果が得られている。また、実際の地盤の $p-y$ 関係は曲率をもった連続的な挙動を示し、水平方向地盤反力係数はひずみ依存性も知られている。

基礎の挙動を精度よく表すにはこのような地盤反力特性を忠実にモデル化した $p-y$ 曲線法^{8) 9)} などがよめるのが望ましいが、実設計における地盤調査の精度や計算の簡便さを考慮すると、この方法は一般的な設計手法としては望ましいものとは言えない。したがって、ここでは下記に示すとおり地盤抵抗特性をバイリニアとしてモデル化した複合地盤反力法により、実験値に対しシミュレーション解析を行う。

バイリニア型の地盤定数としては地盤反力度の上限値 (p_{us})、および水平方向地盤反力係数 (k_H) が必要であるが、ここでは次のように設定する (図-3.1 参照)。

- ・地盤反力度の上限値 $p_{us} = \alpha_p \times$ (Coulombの受働土圧強度 p_p)
- ・水平方向地盤反力係数 $k_H = \alpha_k \times$ (逆算 k_H : $\delta_0 = D/10$)

ここで逆算 k_H の算定にあたっては、前述のとおり基準変位量を杭径の10%としており、道示と異なっている。しかしながら、本解析においては杭配置の変化による α_p 、 α_k の相対的な変化に着目しているため、基準値の絶対量はその比には影響を及ぼさない。また、 p_p の算定において、せん断抵抗角 ϕ は三軸圧縮試験により求めた 35° とし、杭と地盤の摩擦角 δ は道示のケーソン基礎の設計に規定されている常時の値 ($\delta = \phi/3$) を用いることとする。

この α_p 、 α_k をパラメータとして試行錯誤的に地盤抵抗特性 (p_{us} 、 k_H) を設定し、

- ① フーチングの荷重～変位量曲線
- ② 杭体変位分布
- ③ 杭体曲げモーメント分布
- ④ 地盤反力度分布

の4項目について実測値と解析値が最もよく適合するような α_p 、 α_k の値を選定する。

α_p 、 α_k の設定手順は以下のとおりである。

- 1) 実験結果から求まる地盤の荷重～変位曲線をもとに α_k の設定を試みだが、微小変位領域での初期勾配が深度方向にもばらついており設定が困難であるため、まず $\alpha_k = 1.0$ と仮定し、 α_p をパラメータとして荷重～変位量曲線における大変形時の勾配に対して適合度の良い α_p を設定する。
- 2) 1) で最も適合度の良い α_p を用いて、 α_k をパラメータとしてシミュレーションを行う。

上記の手順で解析を行った結果、単杭については最

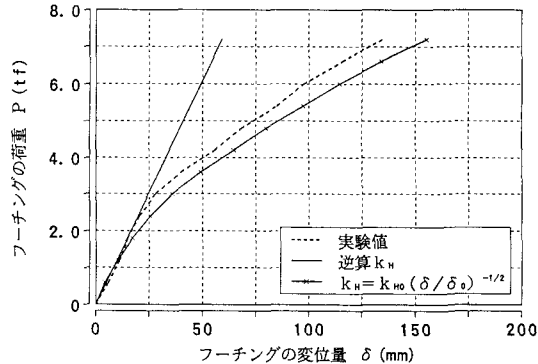


図-3.2 フーチングの荷重～変位量関係図 (単杭)

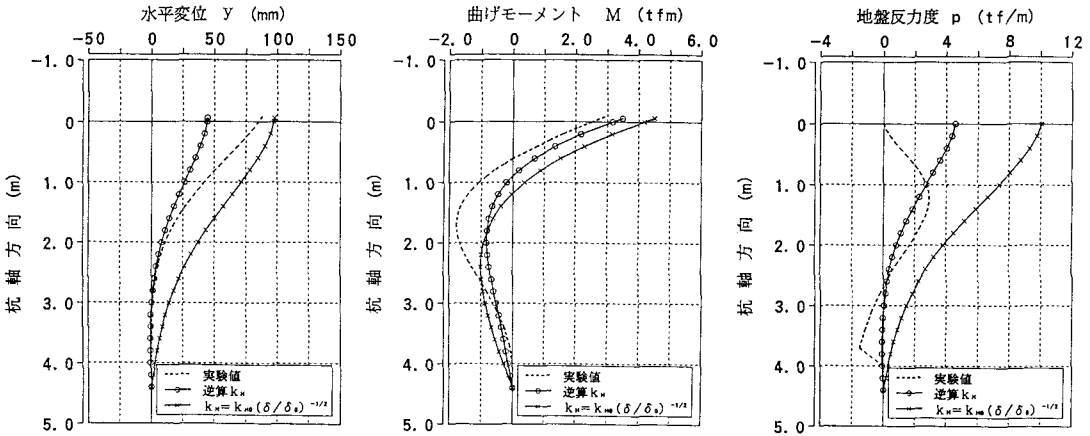


図-3.3 単杭の解析結果 ($P=5.4 \text{ tf}$)

も適合度の良いパラメータとして $\alpha_p=3.0$, $\alpha_k=1.5$ を得た(図-3.4参照)。ここで、 α_p は地盤抵抗の3次元的な広がりや荷重の分担幅を評価するものであり、本来は深さによって異なると考えられる。しかし、今回対象とした範囲では塑性化深さは1~2m程度であり、この部分の平均的な値としてとらえられる。また、 α_k は初期バネの程度を評価するものであり、地盤抵抗のひずみ依存性に基づくと、杭径の10%におけるバネに対して小さいひずみレベルに相当していることがわかる。

また、この場合の杭体変位、曲げモーメント、地盤反力も各変位(荷重)レベルにおいて、それぞれ実験値に対し良い適合をしていることが確認された。実験において、杭体に取り付けられていたひずみゲージの測定結果をもとに得られた地盤反力度分布は精度の問題を有しているものの、Coulomb の受働土圧の約3倍程度の大きさとなっていることから、実験値との整合もとれていることがわかる。

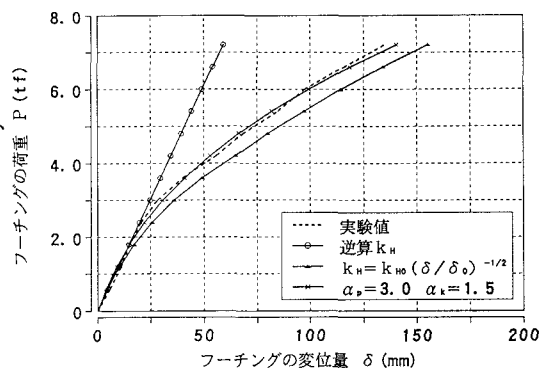


図-3.4 フーチングの荷重～変位量関係図(単杭)

(2) 群杭における各安定計算モデルの適用性評価

(1) で単杭についての検討を行った結果、弾性地盤反力法では大変形時までの基礎の挙動の追従が困難であることがわかった。よって群杭については弾性地盤反力法の適用は行わず、バイリニアモデルによる α_p , α_k についてパラメータ解析を行うものとする。ここで、解析上以下の仮定を行っている。

- ① α_k は杭位置によらず各杭とも同じ値とする。
- ② α_p は荷重作用方向に並ぶ杭すなわち直列方向については変化させ、荷重作用直角方向に並ぶ杭すなわち並列方向には同じ値とする。

地盤反力係数は一般に深度方向には増加し、隣接する杭の影響により杭位置によっても変化するものと思われるが、各杭位置において地盤は同一であることや、定数推定上の精度と計算の簡便さを考慮し、地盤反力係数を杭位置ごとに変化させないものとし①の仮定を行った。一方、地盤反力度の上限値は各杭ごとの抵抗範囲が他の杭と重なり合うことにより干渉されて受働抵抗が減少するものと思われる。これは直列方向に並ぶ杭位置関係ほど顕著であるため、②の仮定を行った。

以下に、各検討ケースの α_p , α_k の設定手順および結果を示す。

1) 直列2本杭

前方杭は杭前面の地盤条件が単杭と異ならないので、 α_p , α_k とも単杭で良い適合度を示した値 ($\alpha_p=3.0$, $\alpha_k=1.5$) を用いる。後方杭の α_k は上記の①の仮定にもとづき前方杭と同じ値とし、 α_p についてパラメータ解析を行う。P- δ 関係において実測値と適合度の良い $\alpha_p=3.0$ (前方杭), 1.0 (後方杭)、および $\alpha_k=1.5$ を用いた場合、杭体の変位分布、曲げモーメント、および地盤反力度分布においても、それぞれ実験値に対し、良い適合を示していることが確認された。

ここで α_p については荷重作用方向の各杭位置における値が実験値に対応できることがわかったので、以下のケースにおいては、 α_p は実験値を参考にしながら設定するものとする。

2) 直列3本杭

α_k は直列2本杭の解析結果をもとに、単杭と同じ $\alpha_k=1.5$ を用いる。

α_p は実験値より前方から後方になるにしたがい低下する傾向がみられるので、前方杭で単杭と同じ $\alpha_p=3.0$ を用い、後方ではこれをもとに低減してパラメータ解析を行う。

その結果、 $\alpha_k=1.5$ のままであるフォーチングの荷重～変位曲線にて初期の勾配を合わせることができないため、実験値に対し変位の後半部で適合度の良い $\alpha_p=3.0$ （前方杭）、 1.0 （中間杭）、 0.5 （後方杭）を用いて α_k を低減し、シミュレートを行う（図-3.5 参照）。ここで最終的に適合度の良い $\alpha_p=3.0$ （前方杭）、 1.0 （中間杭）、 0.5 （後方杭）、および $\alpha_k=1.0$ を用いた場合、変位分布、曲げモーメント分布、地盤反力度分布においても、それぞれ実測値に対しよい適合を示していることが確認された。

3) 並列2本杭，並列3本杭

杭が荷重方向に対して並列に並ぶ場合、見かけ上の基礎の荷重幅が大きくなることにより地盤反力係数は低下するものと思われるので、 α_p については実験値を参考に 2.5 に設定し、 α_k のパラメータ解析を行う（図-3.6（3本杭の場合）参照）。

その結果、適合度の良いパラメータとして2本杭で $\alpha_k=1.0$ 、3本杭で $\alpha_k=0.75$ を得た。

それぞれの変位分布、曲げモーメント分布、地盤反力度分布においても、実験値に対しよい適合を示していることが確認された。

4) 9本組杭

9本組杭については、直列杭，並列杭での解析結果を参考に検討する。 α_p については実験値を参考に荷重作用方向に前方から後方に向けて順に $2.5, 1.0, 1.0$ に低減し、 α_k のパラメータ解析を行う（図-3.7参照）。ここで適合度の良い $\alpha_k=0.35$ を用いた場合の、最大荷重レベルでの前方杭，後方杭の変位分布，曲げモーメント分布を図-3.8，3.9，3.10に示す。いずれも実測値に対し、よい適合を示していることが確認される。

上記の手順により各ケースの実験結果に適合する地盤の非線形パラメータ α_p ， α_k を整理して実験値と比較した結果を表-3.1に示す。

以上の解析結果より、まず荷重荷重方向（直列杭）における杭相互の影響は主として α_p すなわちバイリニアモデルにおける地盤抵抗の上限値が影響を

及ぼしており、これは各杭の抵抗範囲が前面の杭と重なり合うことにより干渉され、受働抵抗が減少することによるものと思われる（図-3.11参照）。図-3.13に単杭と群杭の受働抵抗の比（ α_p/α_{p0} （ α_{p0} ：単杭の α_p ））を示すが、後方になるにしたがって α_p が低減される傾向がみられる。

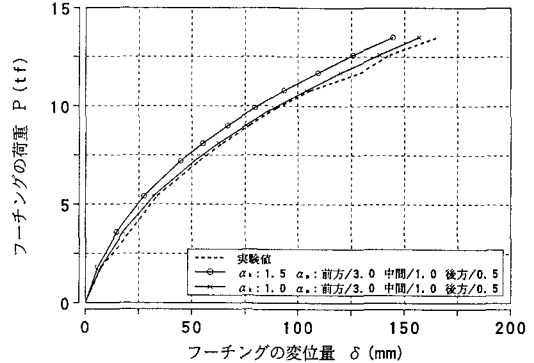


図-3.5 フーチングの荷重～変位量関係図（3本直列杭）

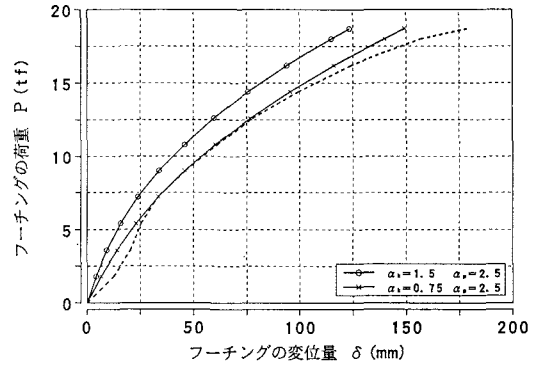


図-3.6 フーチングの荷重～変位量関係図（3本並列杭）

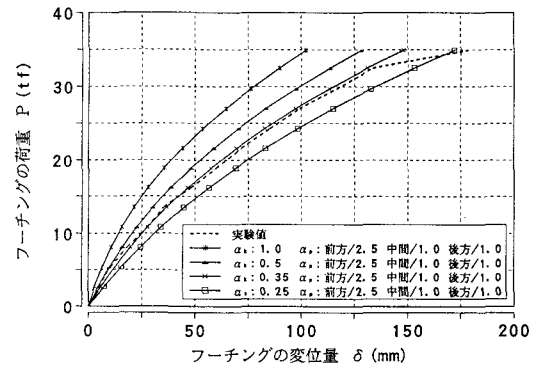
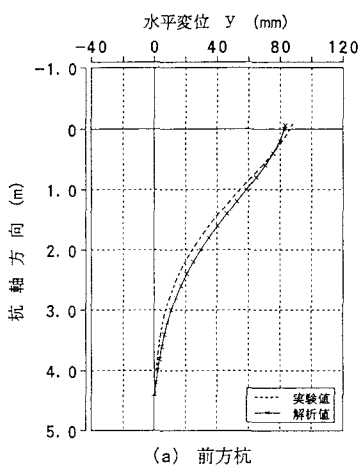
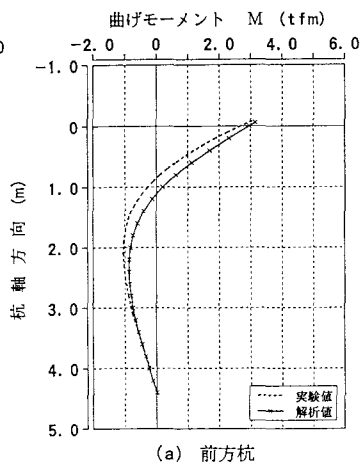


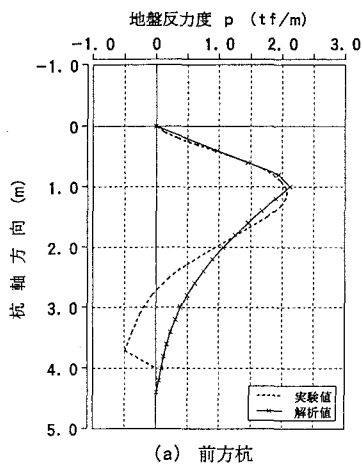
図-3.7 フーチングの荷重～変位量関係図（9本組杭）



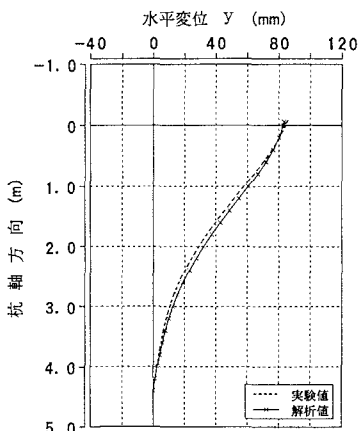
(a) 前方杭



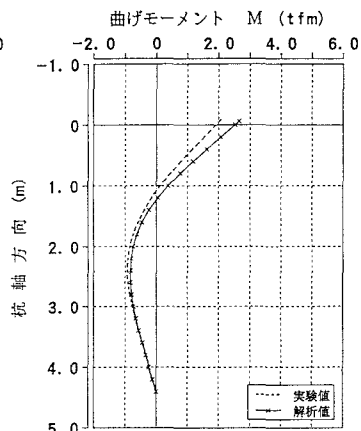
(a) 前方杭



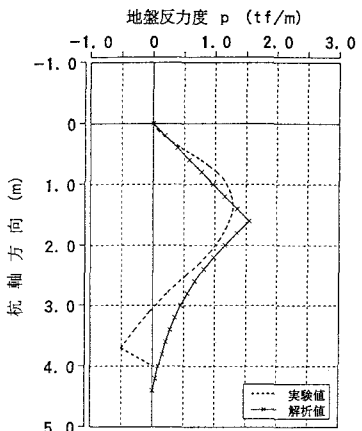
(a) 前方杭



(b) 後方杭



(b) 後方杭



(b) 後方杭

図-3.8 変位分布図(9本組杭)

図-3.9 曲げモーメント図(9本組杭)

図-3.10 地盤反力度分布図(9本組杭)

つぎに、荷重載荷直角方向(並列杭)における杭相互の影響は主として α_k すなわちバイリニアモデルにおける初期勾配に影響を及ぼしており、これは隣接する杭の影響により見かけ上の換算載荷幅が増大することによるものと思われる(図-3.12参照)。また α_k については、並列3本杭と9本組杭の場合の比較でわかるように荷重載荷方向における杭相互関係によっても影響されていることがわかる。これは、荷重載荷方向の間隙土も含めた基礎全体としての側面抵抗が見かけ上の換算載荷幅に影響を及ぼしているものと思われる¹⁰⁾。また、単杭と群杭での地盤反力係数の比(α_k/α_{k0} (α_{k0} ; 単杭の α_k))により群杭効率を表した場合、本解析結果では9本組杭での群杭効率は、直列3本杭と並列3本杭の群杭効率のかけ合わせた値より小さくなっている(図-3.14参照)。

表-3.1 適合性が得られた α_p , α_k

ケース	杭配置	解析値		
		実験値	α_p	α_k
単杭		3.0	3.0	1.50
2本直列杭	前方杭	3.0	3.0	1.50
	後方杭	0.8	1.0	
3本直列杭	前方杭	3.0	3.0	1.00
	中間杭	1.3	1.0	
2本並列杭	前方杭	3.0	3.0	1.00
	後方杭	0.8	0.5	
3本並列杭	前方杭	2.5	2.5	0.75
	中間杭	1.3	1.0	
9本組杭	前方杭	2.5	2.5	0.35
	中間杭	1.6	1.0	
9本組杭	後方杭	1.3	1.0	0.35
	側方杭	1.2	1.0	

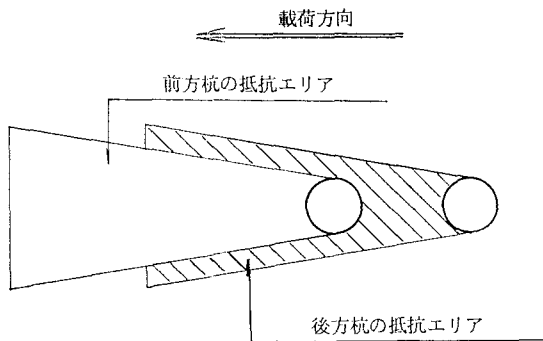


図-3.11 地盤抵抗の杭相互関係

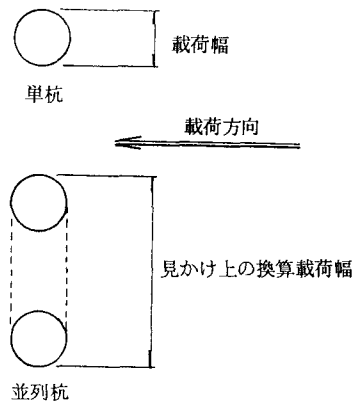


図-3.12 見かけ上の換算載荷幅

6. おわりに

杭基礎の大変形時の挙動を把握するために、試験土槽内に作成した砂地盤において、鋼管を用いた群杭模型の大変形水平載荷実験を行った。その結果、以下の事項が明らかになった。

- ① 組杭における杭1本当りの平均荷重に対するフーチングの変位量は、いずれも単杭の結果より大きな変位量となっている。この傾向は、9本組杭で一番大きく、直列杭、並列杭と続いている。
- ② フーチングに作用する水平力による杭頭の水平反力は各杭で均等に発生するのではなく、群杭を構成する各杭の位置に応じて異なる。すなわち、載荷軸前面に位置する杭に最も大きな水平反力が生じ、後方に位置するに従って反力は小さくなる傾向がある。また、載荷軸直角方向には、杭位置の違いによる水平反力の大きな差異は認められない。
- ③ ②の原因として、後方杭ではその抵抗範囲が前方の杭と重複し、地盤の抵抗特性が低下したためと考えられる。
- ④ 杭の中心間隔が杭径の2.5倍の方形群杭では、杭に囲まれた土が杭との拘束力によって仮想ケーソンのような挙動を示し、前方杭においても地盤抵抗が低下する。

上記実験結果に対し、弾性地盤反力法、複合地盤反力法（パイリニアモデル）によるシミュレーション解析を行い、以下の結果を得た。

- ① 線形弾性地盤反力法では、地盤反力係数のひずみ依存性および極限地盤反力度が考慮されていないことから、 $p \sim \delta$ 関係図において変形の初期段階の弾性範囲をこえると実測値の追従が困難となる。また、地表面での地盤反力係数のひずみ依存性を考慮すると、 $p \sim \delta$ 関係図の追従は可能なものの、断面力は実測

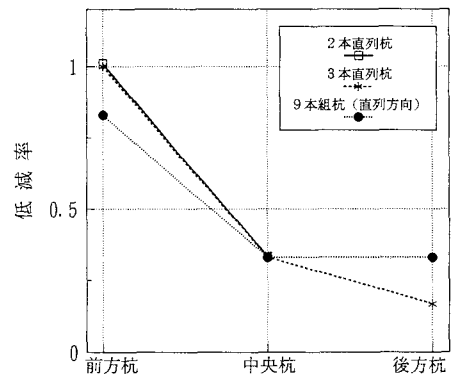


図-3.13 α_0 の低減率

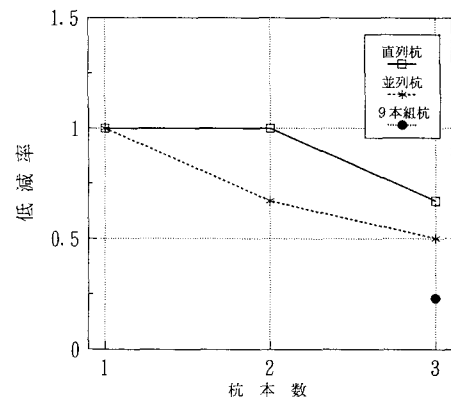


図-3.14 α_x の低減率

値と合わなくなる。

②複合地盤反力法（バイリニアモデル）によるシミュレーション解析結果を以下にまとめる。

- 1) 単杭に関しては $\alpha_p=3.0$ 、 $\alpha_k=1.5$ となり、実験から得られた最大地盤反力度と同程度となることがわかった。その際の変位分布、曲げモーメント分布、地盤反力度分布においても実測値との整合がとれることが確認された。
- 2) 直列杭に関しては単杭の解析で得られた α_p 、 α_k を前方杭にそのまま適用し、中間及び後方の杭については α_p のみ低減させることにより挙動を精度良く再現することができた。しかし、直列3本杭になると単杭で得られた α_k をそのまま適用することはできず、低減する必要があった。
- 3) 並列杭に関しては単杭の解析で得られた α_k を低減し、かつ α_p に関してもやや低減する必要があった。
- 4) 9本組杭に関しては直列杭及び並列杭で得られた傾向をもとに α_p 、 α_k の低減を行ったが、 α_k についてはそれ以上に低減する必要があった。

設計レベルで適用可能な簡易な安定計算モデルということで、今回地盤抵抗をバイリニアモデル化する手法の適用性が認められた。今回の解析では杭体降伏までの荷重レベルを対象としたものであるが、照査する限界状態の設定を行うためのデータの収集という観点からすると、杭体降伏以降の挙動についても照査を必要とすると思われる。また、今回の模型実験では杭先端を土層の底面に固定しているが、実構造物においては杭軸方向のバネについても考慮する必要がある。今回は砂地盤における大変形時の挙動に限った実験と解析であるが、設計に用いる解析モデルの確立のためには、粘性土地盤についても挙動の把握およびその結果に対するシミュレーション解析が必要である。

なお、本実験は鋼管杭協会との共同研究で行われており、解析においては日本道路協会の下部構造小委員会における限界状態設計法に関するWGおよび阪神高速道路管理技術センターの杭の水平抵抗に関する調査研究会の委員の方々より多大な協力を頂きました。また、本稿のとりまとめにおいては(株)建設技術研究所伊藤恭平氏の助力を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1)日本道路協会：道路橋示方書（IV下部構造編）・同解説，1990.
- 2)（財）国土開発技術研究センター：道路橋基礎構造物の限界状態設計法に関する調査研究（その3）報告書，1991.
- 3)山肩邦男，富永晃司，小椋仁志：砂地盤中の模型群グイの水平加力試験結果（クイ間隔との関係），第11回土質工学研究発表会講演集，1976.
- 4)玉置修，三橋晃司，今井常雄：水平抵抗における群杭効果の研究，土木学会論文集，第192号，1971.
- 5)小笠原政文，飯古道則，五瀬伸吾，川口光雄：杭基礎の耐力に関する研究，構造工学論文集，Vol. 37A，1991.
- 6)土質工学会：杭基礎の設計法とその解説，1985.
- 7)吉村和美，高山文雄：パソコンによるスプライン関数，東京電気大学出版局，1988.
- 8)Det Norske Veritas：Rule for the Design, Construction and Inspection of Offshore Structures，1977.
- 9)American Petroleum Institute：API Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms，15th edition，1984.
- 10)岡原美知夫，高木章次，茶林一彦：地中連続壁基礎の支持機構，構造工学論文集 Vol. 35A，1989.

（1991年9月21日受付）