

杭基礎の群杭効果における杭の並列および直列効果に関する解析的研究

Pile-group effects by piles spacing in the direction and in the direction perpendicular to loading

橋本至^{*}・林川俊郎^{**}・寿楽和也^{***}

Itaru Hashimoto, Toshiro Hayashikawa, Kazuya Juraku

^{*}工修 株式会社ドーコン 構造部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央 1 条 5 丁目)^{**}工博 北海道大学大学院工学研究科 (〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目)^{***}株式会社ドーコン 構造部 (〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央 1 条 5 丁目)

This study aims to assess the pile-group effect of pile spacing and pile parallel-spacing to the direction of loading in large displacement analytically. The analytical modeling used in this study is 2-D FEM model for the ground in consideration of the nonlinear characteristics. Major findings are as follows: (1) Pile-group effect occurs by forming the isolated single pile a line in a parallel direction. The influence becomes remarkable in less than 5 times of pile diameter. (2) In the loading direction, it occurs by forming the isolated single pile in more than 10 times of pile diameter. The lateral resistance of lead pile is larger than subsequent piles, and it's larger than the isolated single pile. (3) The pile-group effects depend on a pile-soil-pile interaction.

Key Words: *pile space effects, pile group, pile-soil-pile interaction, large displacement***キーワード:** 杭間隔, 群杭効果, 杭と地盤との相互作用, 大水平変位

1. はじめに

道路橋など地上構造物の耐震性を適切に照査するには、構造物の損傷過程に立ち入った照査を行うだけでなく、地盤のひずみレベルの増大にともなう基礎-地盤系の非線形挙動を反映する必要があると考えられる¹⁾。

道路橋の基礎とし、杭基礎は一般に群杭として用いられ、直接基礎に次いで多用されている。レベル 2 地震動と呼ばれる強震動下において、杭基礎は大きな変位応答を呈し、地盤を介した群杭を構成する各杭の相互干渉による影響(群杭効果)は顕著となり、その評価が基礎の安定や部材の断面照査だけでなく、杭基礎で支持される構造物全体の地震時挙動の照査にも重要であると考えられる。また、近年、コスト縮減などの要請から高性能杭を採用するケースが多くなり、限定的ではあるが、杭基礎の許容水平変位量を緩和する方向²⁾にある。これらは杭基礎の地震時における変位量が従前に比較して大きくなる方向にあることを意味する。

筆者らは杭基礎で支持される道路橋を対象とし、杭-地盤間の三次元挙動を考慮した相互作用バネを導入した簡易三次元 FEM モデル^{3), 4)}を用いて構造物-基礎-地盤系の動的相互作用解析などを行い、杭基礎の並列方向の杭間隔が基礎剛性や各杭の水平力分担に影響を与えるだけでなく、基礎の変形モードにも影響を与え、橋梁構造全体系の応答にも影響すること等を報告^{5), 6), 7)}している。

水平変位時において、群杭基礎の種々挙動は各杭が地盤から受ける復元力を得る過程で杭周辺地盤の応力が変化し、その変化が復元力を変化させる *Pile-Soil-Pile* 相互作用の影響が考えられる。杭基礎の剛性や耐力は各杭による地盤応力や地盤変形の相互干渉に因って、単杭のそれらの単純和とならないこと、また基礎変位が大きくなると群杭効果がより顕著になることは周知となっている。現行の道路橋示方書(以後、道示と呼ぶ)⁸⁾においても、レベル 2 地震動に対する杭基礎の照査法の中で、群杭効果を反映するために、単杭の *p-y* 関係に地盤反力度の上限値に低減係数 (*p-multiplier*) を乗じて群杭の *p-y* 関係とする方法を採用している。それら種々係数は国内で実施された実大や模型の杭基礎における大変位水平載荷実験など^{9), 10), 11)}をバックデータとして設定されている。しかし、杭基礎の群杭効果のメカニズムやそれを表すパラメータの設定に関して未解明な点も多く、基本となる単杭の大変位時における土性や変位モードと復元力特性に関する実験的研究が現在も進められている^{12), 13)}など。

本研究では、組基礎の大水平変位時における群杭効果において、各杭が地盤から受ける復元力等を杭周辺地盤の変位や応力に着目し、地盤の 2 次元水平断面モデルを用いて、杭の間隔をパラメータとする非線形載荷解析を行い、杭間隔と地盤からの復元力の検討を行う。具体的には、初めに、杭が変位と直角方向(以下、「並列方向」)に並ぶことによる地中応力の「重なり合う」による影

響、次に、杭が変位方向（以下、「直列方向」）並ぶことによる地中応力の「影になる」による影響をそれぞれ杭間隔との関係において解析・考察を行う。また、杭が「直列方向」と「並列方向」に並ぶ群杭における「影になる」かつ「重なり合う」ことによる水平変位～復元力関係等を解析し、杭-地盤-杭の相互作用の観点から杭基礎の大変位時における群杭効果を考察する（図-1）。

2. 解析条件および方法

2.1 検討対象とする杭基礎構造と地盤

対象とする杭基礎構造および地盤条件⁷⁾を図-2に、地盤の物性値を表-1に示す。これは多径間連続桁橋の杭基礎で支持された一基の橋脚を取り出したものである。基礎杭は鋼管ソイルセメント杭であり、杭径 $\phi 800$ 、板厚 $t=12\text{mm}$ 、固化体径 $\phi 1000$ である。地盤と杭との相対剛性

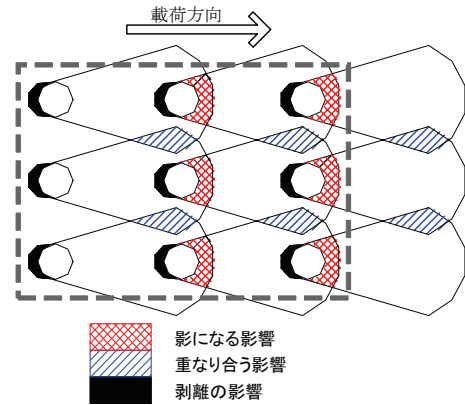


図-1 群杭における地盤応力の干渉イメージ

を表す特性値 β は 0.301m^{-1} であり、 βl は 3.6 ($=0.301 \times 12.0\text{m}$) となり長杭の範囲にある。

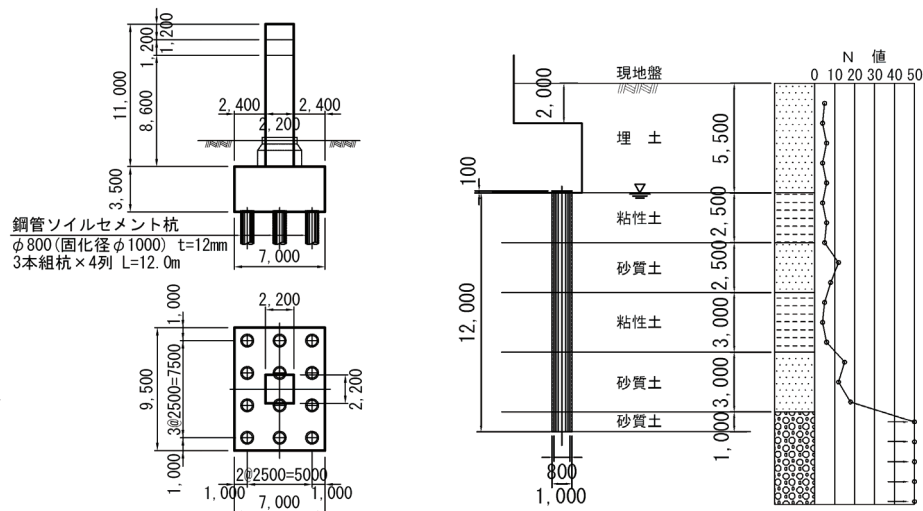


図-2 対象とする杭基礎構造諸元と地盤

表-1 地盤の種々パラメータ値

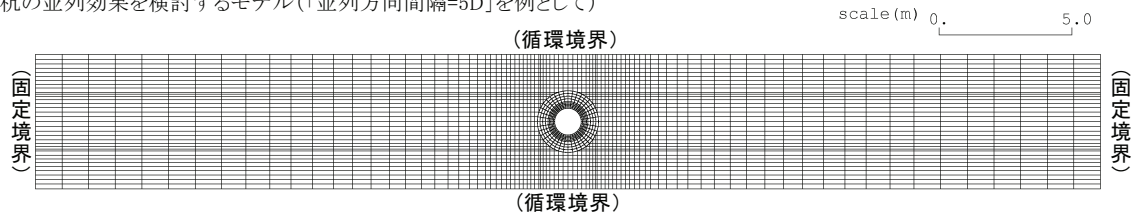
	単位	埋土	第1層 ^{注1}	第2層	第3層 ^{注1}	第4層	第5層
土性	-	砂質土	粘性土	砂質土	粘性土	砂質土	砂質土
層厚	m	5.50	2.50	2.50	3.00	3.00	3.00
N値	-	5	5	10	5	15	50
基準有効拘束圧 σ_{ma}'	kN/m^2	98.0	77.6	98.0	109.1	98.0	98.0
σ_{ma}' に対応する初期せん断剛性 G_{ma}	kN/m^2	60,600	50,700	69,100	50,700	79,400	176,000
σ_{ma}' に対応する体積弾性係数 K_{ma}	kN/m^2	158,000	132,000	180,000	132,000	207,000	460,000
パラメータ m_K, m_G	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
ポアソン比 ν	-	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
質量密度 ρ_t	t/m^3	1.73	1.73	1.73	1.73	1.94	1.94
間隙率 n	-	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45	0.45
粘着力 c	kN/m^2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
内部摩擦角 ϕ_t	$^\circ$	39	30	39	30	39	43

注1. 粘性土は、そのせん断強度に等価な内部摩擦角で表すものとした。

注2. 任意の有効拘束圧 σ_m' に対する初期せん断剛性 G_0 および初期体積弾性係数 K_0 は、次式により評価する。

$$G_0 = G_{ma} (\sigma_m' / \sigma_{ma}')^{m_G} \quad K_0 = K_{ma} (\sigma_m' / \sigma_{ma}')^{m_K}$$

(a) 杭の並列効果を検討するモデル(「並列方向間隔=5D」を例として)



(b) 杭の直列効果を検討するモデル(「並列方向間隔=5D」, 「直列方向間隔=2.5D」を例として)

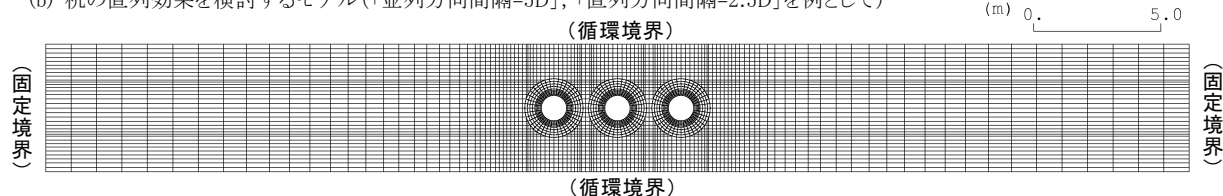


図-3 検討に用いる2次元FEMモデル

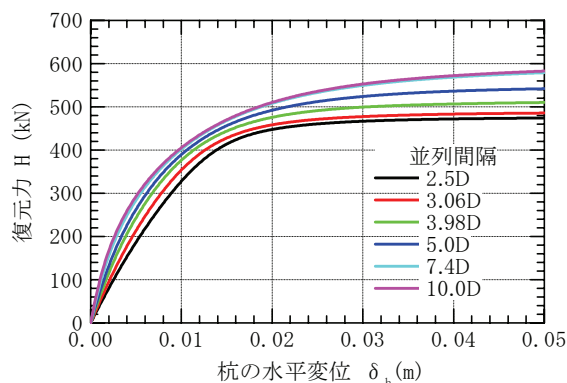


図-4 杭の水平力と復元力の関係

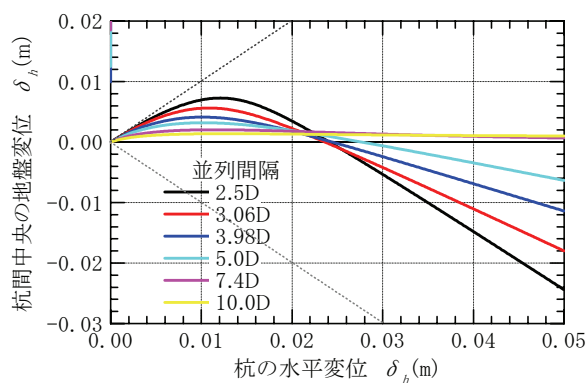


図-5 杭の水平力と隣接杭との中間地盤の変位

水平力を受ける杭に作用する極限地盤反力を評価する方法として、i) 地表面付近では杭前面の楔状のすべり土塊が押し上げられる受働破壊(I-zone)を、ii) 地盤深部では杭に直交する面内における水平方向の支持力破壊(II-zone)を仮定する研究(例えば、岸田ら¹⁴⁾)がある。この2領域の境界深さ(限界深さ)を、表-1等の諸定数から試算すると地表から約4mである。本基礎の杭頭位置は地表から5.5mの深さ(図-2)にあり、本杭基礎の水平抵抗は地表面の影響が小さく、杭に直交する面内の土中応力～ひずみ関係が支配的であると考えられる。

2.2 解析モデルと検討方法

(1) 解析モデル

検討に用いたモデルの一例を図-3に示す。本モデルは杭頭付近(杭頭から50cm下方)における地盤の水平断面を想定した平面ひずみモデルである。また、図-3(a)は杭の並列効果を検討するためのモデルであり、図-3(b)は直列効果を検討するためのモデルである。モデルの境界条件は図-3(a), (b)ともに左右端を完全固定とし、上下端を並列方向に隣接する杭挙動の影響が反映されるように循環境界とした。

モデルのx方向幅は杭中心から左右境界まで杭径の20倍とした。従って、モデルの総幅は図-3(a)において40m、図-3(b)において「(杭直列間隔+杭径の20倍)×2」となる。y方向幅は杭の並行方向間隔とし、検討する並行間隔に応じて地盤メッシュ要素数を増減させる。図-3(a), (b)の白抜き部分(実モデルは格子メッシュであるが線が幅狭するため省略)は杭を想定する円板であり、地盤に比較して十分な剛性を有する線形要素でモデル化した。それ以外は地盤要素であり、土の応力-ひずみ関係はマルチスプリングモデル¹⁵⁾を用い、各々のスプリングの応力～ひずみ関係は双曲線モデルを、そのせん断強度はモール・クーロンの破壊基準に従うものとした。

また、地盤と杭との境界は、既往の実験の解析研究において杭径程度の水平変位までの範囲では水平力～復元力関係に境界の剥離による影響が小さいとされており、本研究で検討する水平変位量が最大で杭径の5%程度であり、完全付着条件とした。

(2) 検討方法(載荷方法)

変位載荷解析を行う前に、杭頭から50cm深さの地盤上載圧 σ_v に相応する拘束圧 σ_m ($=((1+K_0)/2)\sigma_v$, K_0 :静止土圧係数=0.5)で等方圧密解析を行い、地盤の応力や剛

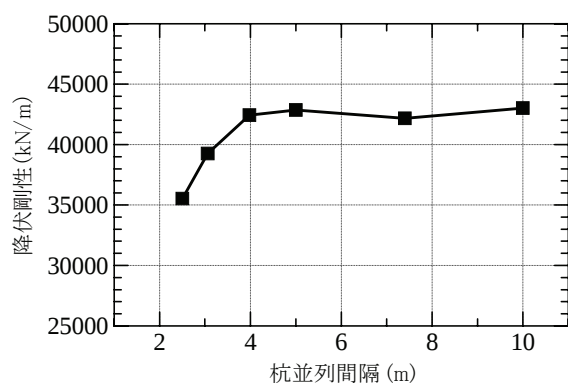


図-6 杭並列間隔と降伏剛性

性等の初期値を算定した。次に、杭を想定する円盤中心点を x 方向に変位させる手法を用い、変位制御方式で最大 50mm（杭径の 5%）まで一方向に載荷した。

3. 単杭と杭の並列化による群杭効果

3.1 水平変位と復元力

(1) 水平変位－復元力関係

モデルの y 方向幅（高さ）を 2.5D, 3.06D, 3.98D, 5.0D, 7.4D, 及び 10D（D：杭径）とする図-3(a)のモデルを作成し、杭中心を水平方向（ x 方向）に最大 50mm まで強制変位する載荷解析を実施した。杭の水平変位と杭が地盤から受ける復元力の関係を算定し、並行方向の杭間隔による影響を検討した。図-4 に杭の各並行方向間隔における杭の水平変位と復元力の関係を、図-5 に杭の水平変位と並行方向に隣接する杭との中間地盤（図-3(a)における循環境界位置）の x 方向変位との関係を示す。

水平変位と復元力との関係は小さな変位から非線形性を示し、水平変位 10mm 程度から非線形性が顕著となり、水平変位 50mm においては概ね終局に向かう。また、復元力は並行方向間隔が大きくなるとともに大きくなるが、並列間隔が 7.4D と 10D において収斂し概ね同一の関係を示す。これは、杭の水平変位と並行方向に隣接する杭との中間地盤の水平変位の関係（図-5）においても分かり、

表-2 ワイブル分布曲線による近似

並列間隔	Pmax (kN)	1/Sy (m ⁻¹)	Sy (m)	Py (kN)	kh=Py/Sy (kN/m)
2.5D	478.2	117.6	0.00851	302.3	35539.4
3.06D	488.7	127.1	0.00787	308.9	39263.7
3.98D	512.5	130.9	0.00764	324.0	42421.2
5.0D	544.1	124.6	0.00802	343.9	42864.1
7.4D	583.4	114.4	0.00874	368.8	42177.7
10.0D	586.5	116.0	0.00862	370.8	43023.9

$$P = P_{\max} (1 - e^{-S/S_y}) \quad (1)$$

ここに、 P : 荷重, $P_{\max}$: 極限荷重

S : 変位, S_y : 降伏変位

P_y : 降伏荷重 (= $0.632 \cdot P_{\max}$)

並列間隔が 7.4D と 10D において杭の水平変位が増大しても、概ね地盤変位が生じていない。これから、本モデルにおいて、杭の並行方向間隔が 7D 程度以上であれば、並行方向に隣接する杭の干渉がなくなる（並行方向の群杭効果がない）と考えられる。（以下、並列方向間隔を 10D とした状態を「単杭」と呼ぶ）

また、図-5 には、杭の水平変位と並行方向の杭間中央地盤の水平変位の値が同値となる正負勾配の 2 つの線を記した。杭の並行方向間隔が 7D 未満において、並行方向に隣接する杭との中間地盤は杭の変位が小さい場合において杭と同方向に同じ変位を示し、大きい場合において杭と逆方向に同じ変位を示す。特に、並行方向間隔が小さい 2.5D では、杭の変位が大きい場合において杭と逆方向に同じ変位増加を示す。

(2) 降伏剛性と杭の並行方向間隔

設計実務上重要である¹⁶⁾など水平変位と復元力の関係における降伏点を算定するため、図-4 の水平変位－復元力関係をワイブル分布曲線式(式-(1))を用いて近似する。表-2 にその算定結果を、図-6 に降伏復元力 P_y を降伏変位 S_y で除した降伏剛性 k_h を示す。

降伏変位は並列間隔に対してやや変動するが、0.008m

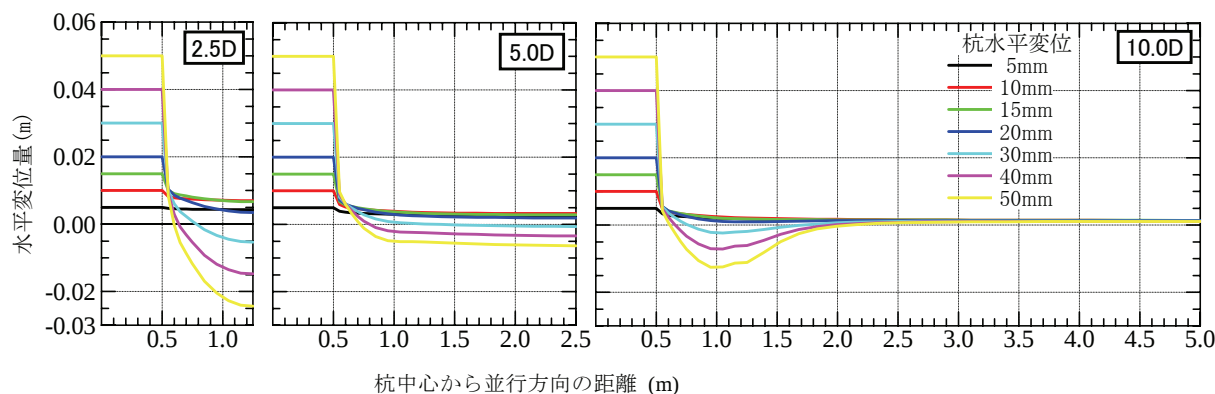


図-7 杭の水平変位と杭並行方向の地盤水平変位

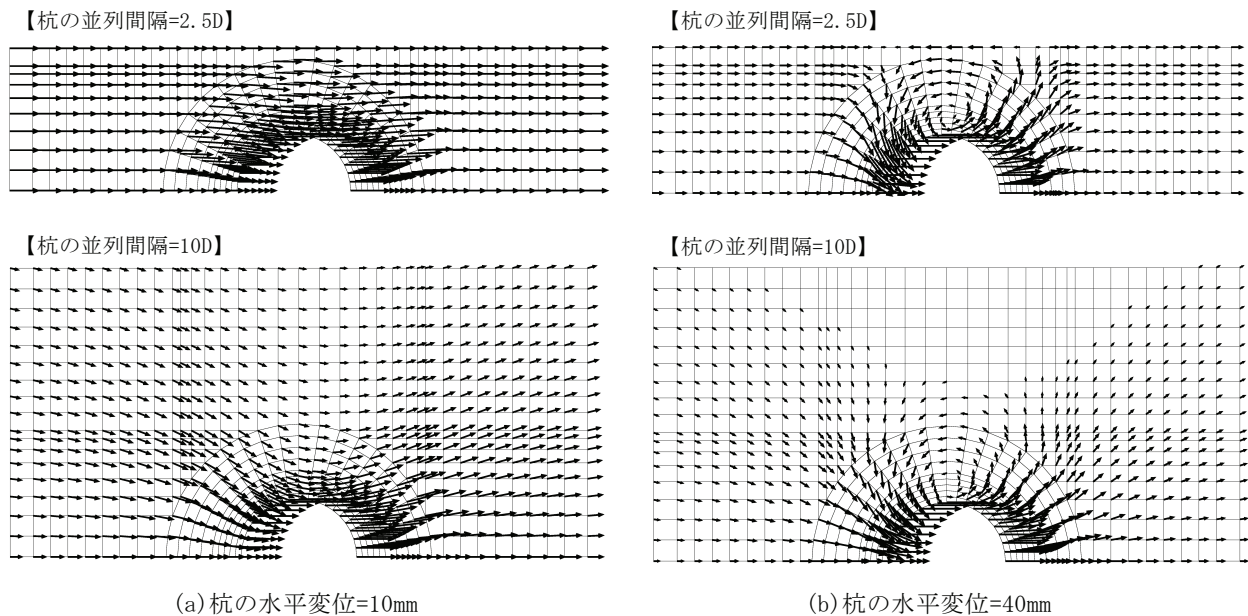


図-8 杭周辺地盤の変位ベクトル（ベクトル長は杭の水平変位で規準化）

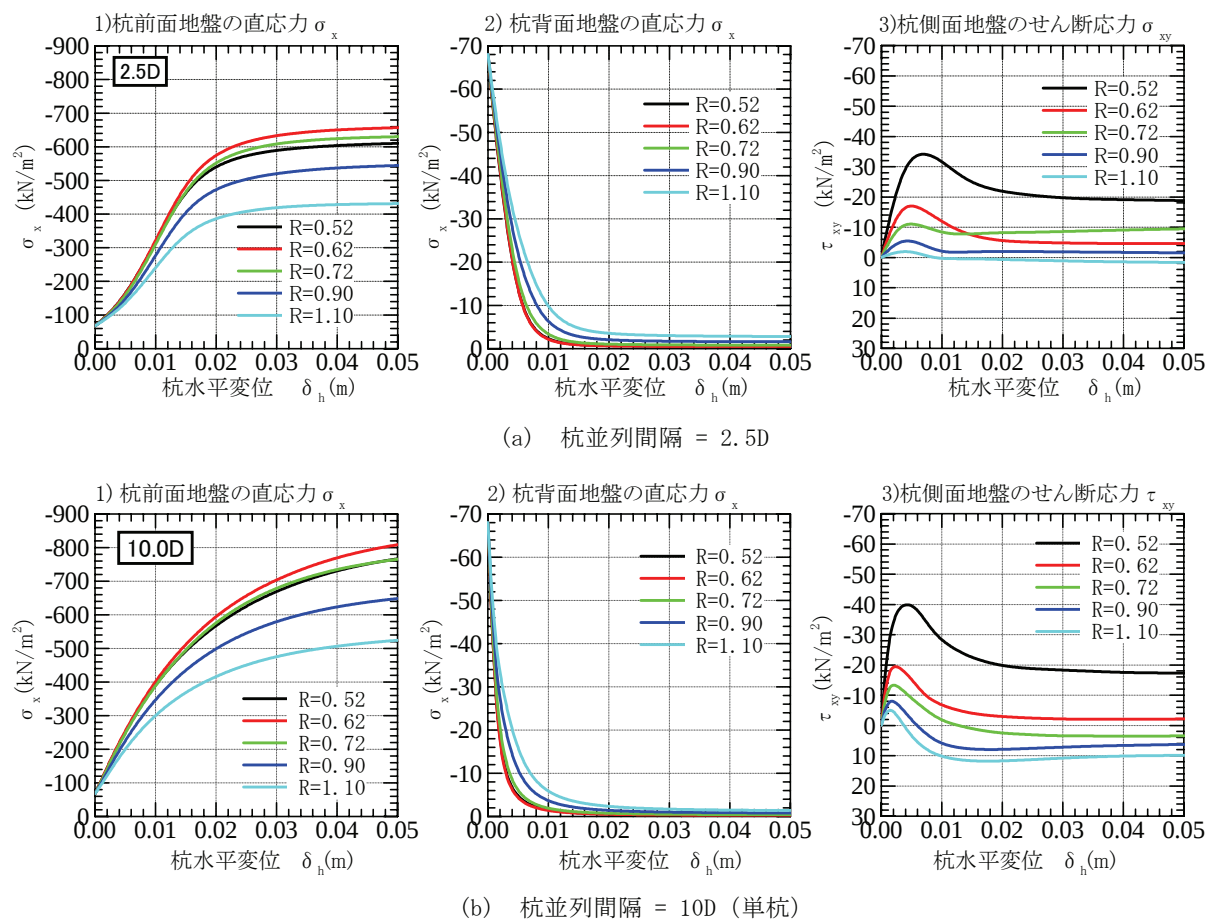


図-9 杭の前面および背面地盤の直応力，側面地盤のせん断応力

～0.009m（杭径の0.8%～0.9%）である。降伏復元力は並列間隔の増大とともに増加する傾向にある。一方，降伏剛性（図-6）は，並列間隔が5D以上で概ね一定となり，並列間隔が4D以下で明らかに低下する。

3.2 杭周辺の地盤変位，地盤応力

(1) 杭周辺の地盤変位

杭の変位に伴う並列方向杭間地盤のx方向変位を並列間隔2.5D，5Dおよび単杭について図-7に示す。また，

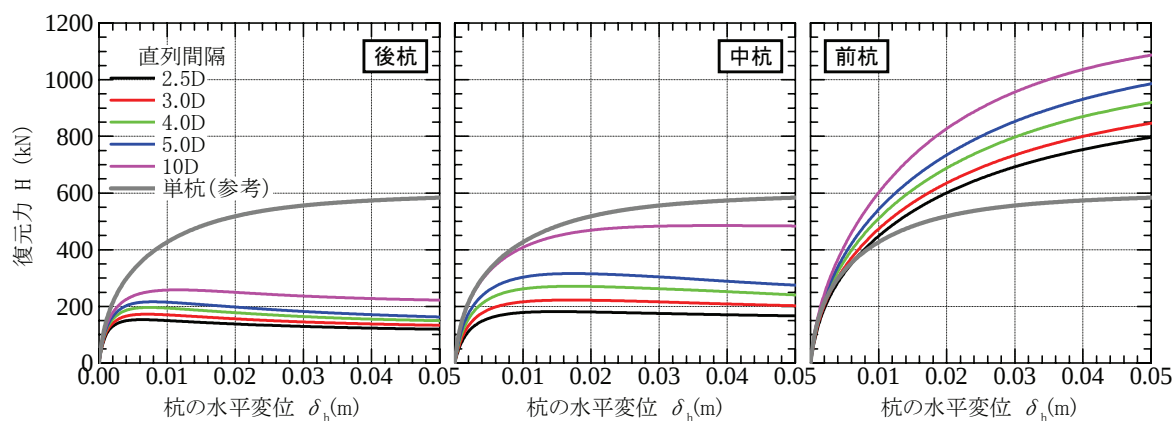


図-10 杭の直列間隔と各杭の水平変位～復元力関係

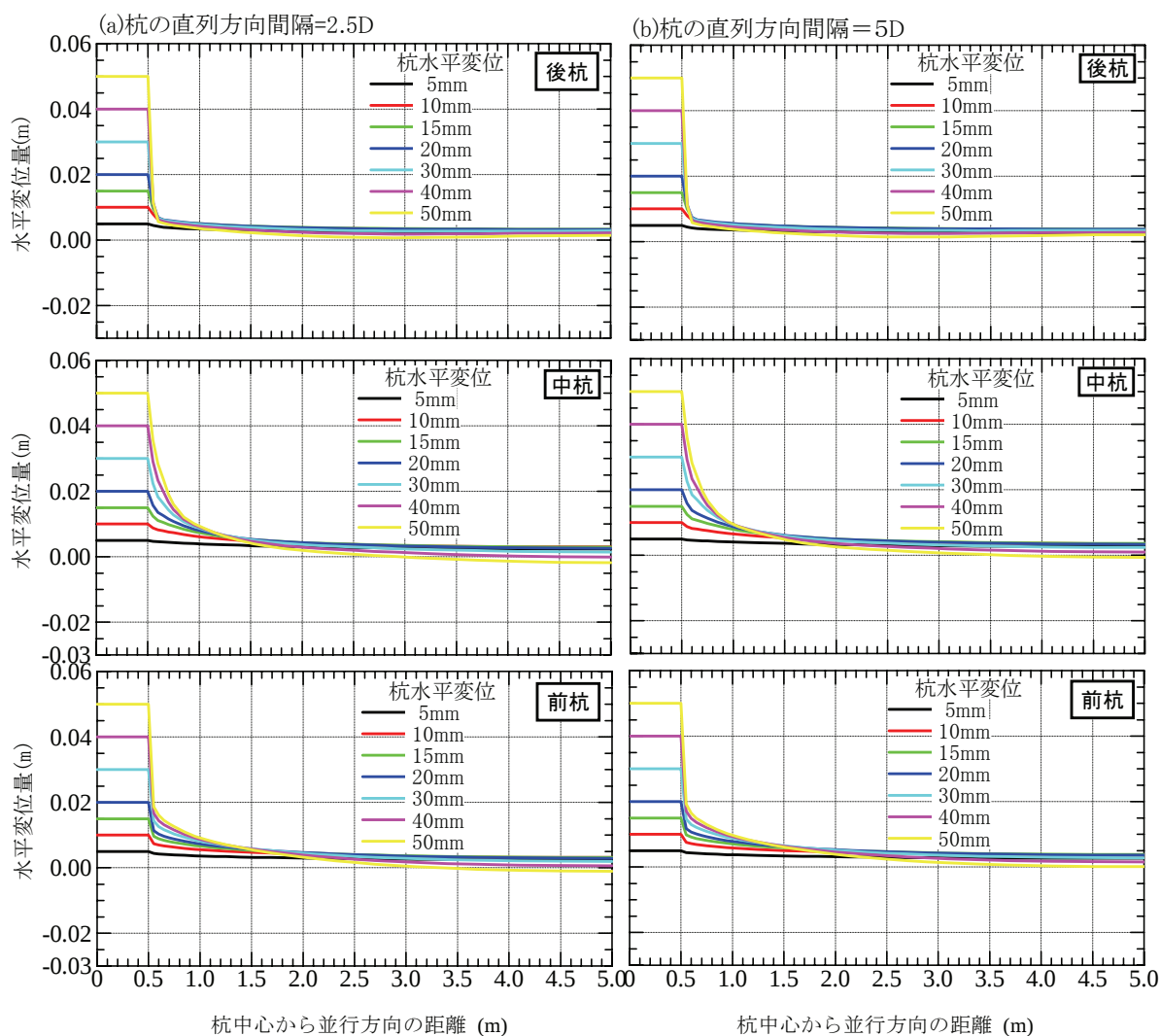


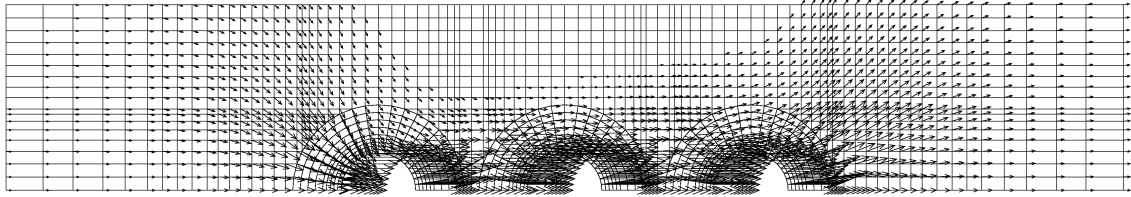
図-11 杭の水平変位と杭並行方向の地盤水平変位

杭周辺 (x 方向で杭中心から-2.5D～+2.5D 範囲、並列間隔 2.5D の y 方向は杭中心から循環境界 (1.25D) まで、並列間隔 10D の y 方向は杭中心から 2.5D まで) の地盤変位ベクトルを水平変位～復元力関係において概ね降伏点にある杭の水平変位が 10mm、また、大きく非線形化してい

る 40mm について、並列間隔 2.5D と単杭のケースを図-8 に示す。

杭の水平変位が 10mm において、杭周辺地盤は杭の並列間隔に係わらず杭の変位方向と同方向に変位する。単杭においては、前面側で地盤を押し広げ、また、背面側で

【杭の直列間隔=2.5D】



【杭の直列間隔=5D】

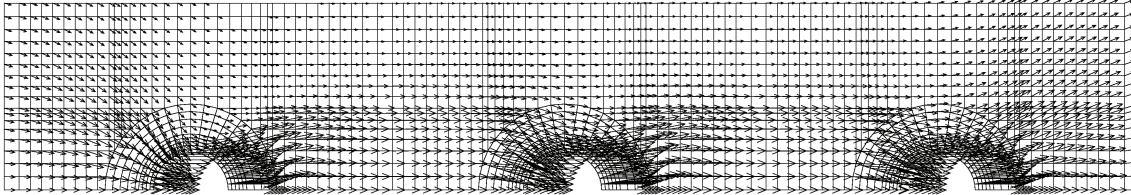


図-12 杭周辺地盤の変位ベクトル（杭の並列間隔=10D，杭の水平変位=40mm）
（尚、ベクトル長は杭の水平変位で規準化）

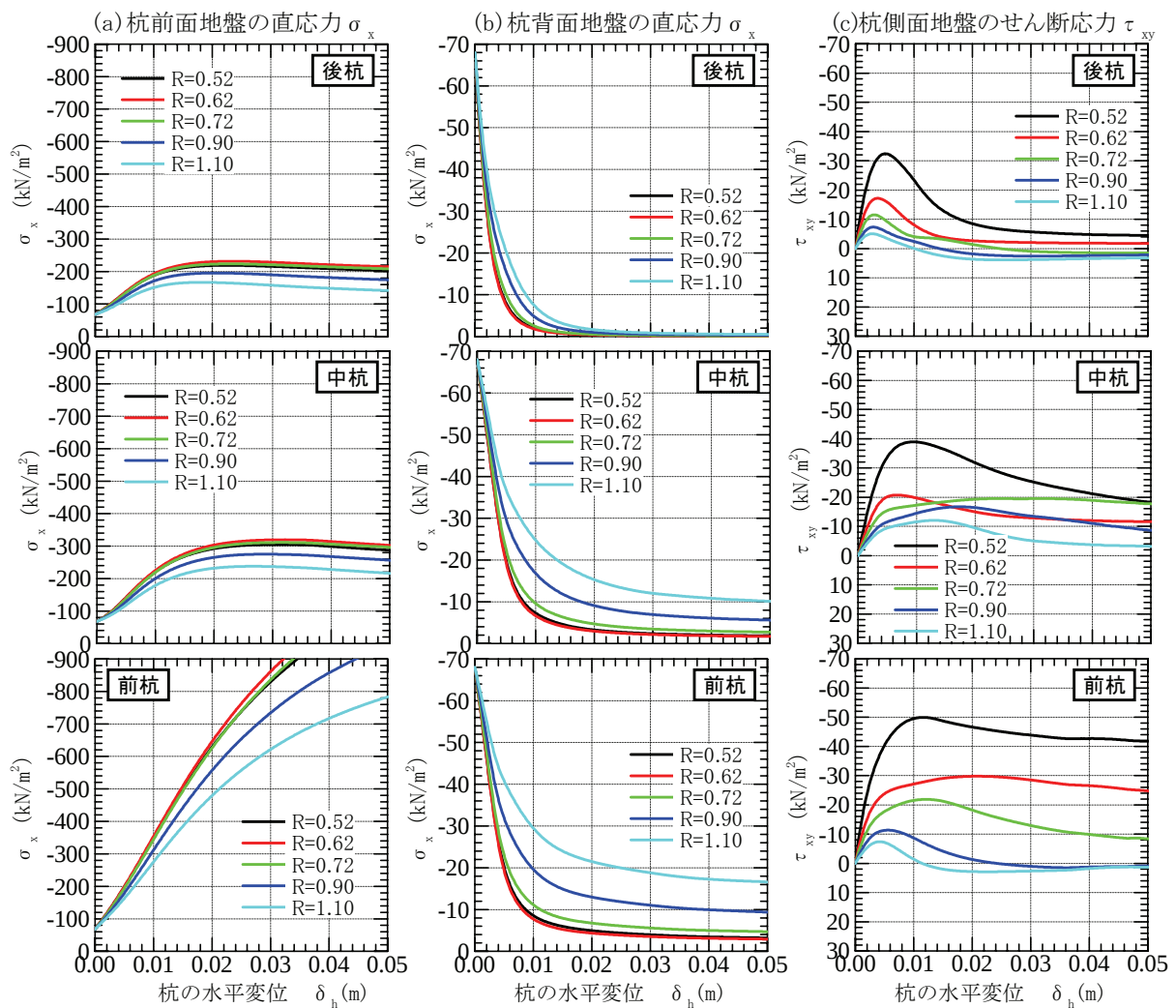


図-13 杭の前面および背面地盤の直応力，側面地盤のせん断応力

引き込む変位が生じるために杭に隣接する地盤において並列方向（y 方向）変位成分が生じる。一方，並列間隔=2.5D においては，並列方向に隣接する杭の影響により

地盤の並列方向変位成分が拘束され，前面側，背面側，および並列方向の側面側ともに x 方向変位が主である。

杭の水平変位が 40mm において，杭の前面側および背面

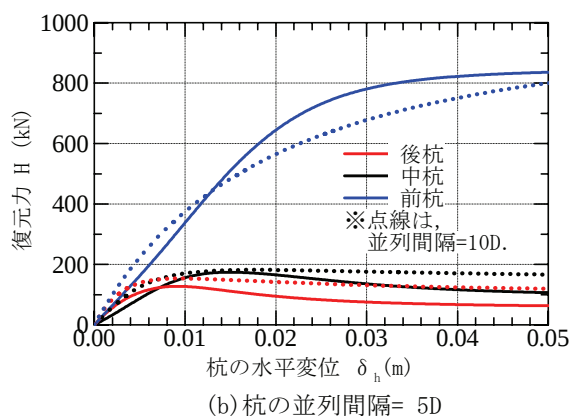
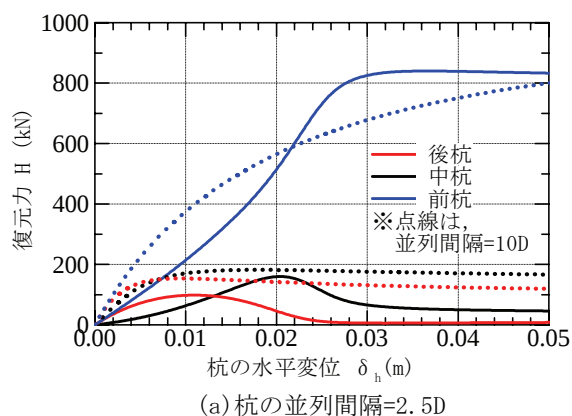


図-14 杭の水平変位と各杭の復元力

側地盤の変位は杭の水平変位が10mmの場合と同じ分布を示す。しかし、並列方向の側面地盤は杭変位と逆方向の変位ベクトルを示し、全体として渦状の変位ベクトルを呈している。この変位分布は杭が前面方向に変位するに伴い、杭前面側で押し広げられた地盤が非線形化した側面地盤を介して杭背面側へ移動することによって考えられる。

(2) 杭周辺の地盤応力

杭の変位に伴う杭前面および背面地盤の直応力 σ_x 、並列方向地盤のせん断応力 τ_{xy} を杭中心から $R=1.10\text{m}$ (杭側面から 0.6m) 範囲について、杭の並列間隔=2.5D、および単杭のケースを図-9に示す (本文では、応力、ひずみの符号を伸張を正、圧縮を負とする)。

杭前面側および背面側地盤の σ_x は、杭の変位がゼロにおいて 2.2(2) で述べた地盤応力の初期値 ($\sigma_x=68\text{kN/m}^2$) からスタートし、前面側地盤においては杭の変位が増大するとともに増加し、背面側地盤においては急速に減少する。また、並行方向地盤の τ_{xy} は杭の変位が増大するとともに増加し、ピークを示したあと一定値に向かう。これは密な砂地盤の応力～ひずみ関係におけるひずみ軟化現象によるものと考えている。

並列間隔 2.5D、および単杭のケースを比較すると、杭前面側地盤の σ_x は単杭が並列間隔 2.5D に比べて大きく、3.1(1) で述べた復元力の差異につながると考えられる。前面側地盤の σ_x は単杭が並列間隔 2.5D に比べてその減少速度がやや大きい傾向が見られる。また、並行方向地盤の τ_{xy} は単杭が並列間隔 2.5D に比べて大きく、より小さい杭の水平変位でピークを示す。

4 単杭の直列化による群杭効果

4.1 水平変位と復元力

モデルの y 方向幅 (高さ) を 10D、両端の杭からモデルの左右固定境界までの距離を杭径の 20 倍とし、杭の直列間隔を 2.5D、3D、4D、5D、および 10D とする図-3(b)

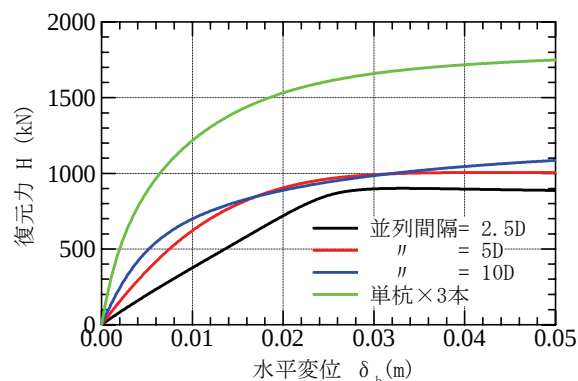


図-15 杭基礎としての水平変位と復元力

のモデルを作成し (杭の直列方向間隔によってモデルの x 方向幅が異なる)、3 本の杭中心を同時に水平方向 (x 方向) に最大 50mm まで変位载荷を行い、杭の水平変位と各杭が地盤から受ける復元力の関係を算定する。図-10 に各直列方向間隔における各杭の水平変位と復元力の関係を示した。同図には、3.1(1) の単杭における水平変位と復元力の関係も並記している。(以下、変位方向の前方に位置する杭を「前杭」、後方に位置する杭を「後杭」、間に位置する杭を「中杭」と呼ぶ)

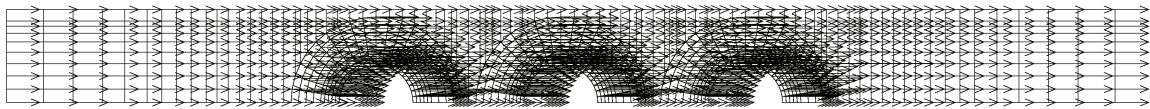
水平変位と復元力との関係は 3.1(1) と同様、小さな変位のレベルから非線形を示す。各杭の復元力を比較すると、前杭は中杭および後杭より大きく、直列方向間隔を 10D とする場合であっても後方に位置する杭にとって前方に位置する杭の挙動が影になる影響があると考えられる。また、全ての杭において杭の直列方向間隔が大きくなると復元力も大きくなるが、後杭は直列方向間隔に対する増加率が小さい。

4.2 杭周辺の地盤変位、地盤応力

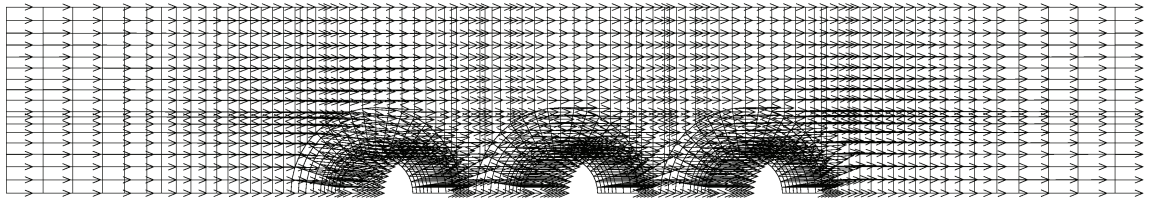
(1) 杭周辺の地盤変位

杭の水平変位に伴う各杭の並列方向地盤の x 方向変位を直列間隔 2.5D、5D について図-11 に示す。また、杭周囲 (x 方向は杭中心から $-7.5\text{D} \sim +7.5\text{D}$ 範囲、y 方向は杭

【杭の並列間隔=2.5D】

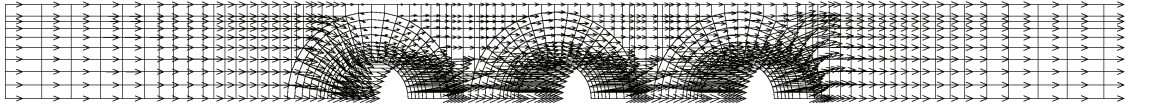


【杭の並列間隔=5D】

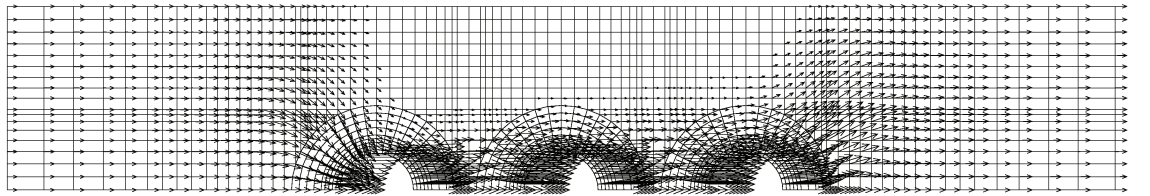


(a) 杭の水平変位=10mm

【杭の並列間隔=2.5D】



【杭の並列間隔=5D】



(b) 杭の水平変位=40mm

図-16 杭周辺地盤の変位ベクトル（杭の直列間隔=2.5D, 尚、ベクトル長は杭の水平変位で規準化）

中心から 2.5D まで) の変位ベクトルを杭の水平変位が 40mm について、直列間隔 2.5D と 5D のケースを図-12 に示す。

本節の検討で使用したモデルは並列方向間隔が 10D であり、3.1(1)における単杭の結果と比較して考察するものとする。杭の水平変位に伴う各杭の並列方向側面地盤の x 方向変位は、直列方向間隔に関わりなく、杭の変位が増加しても杭変位と逆方向に変位する特徴が見られない(図-11)。即ち、杭側面に隣接する地盤要素で大きなせん断変形が生じるものの、並行方向側面地盤は杭変位と同方向の変位ベクトルを示し、単杭において見られた杭と逆向きや渦状の変位ベクトルは生じていない。これは後方杭の前面側が地盤を前方に押し出して変位するため、すり抜け変位を抑止するためであると考えられる。

また、杭の直列間隔が 2.5D において、前杭の前方地盤は単杭の前面地盤の、また、後杭の後方地盤は単杭の後方地盤の変位ベクトルに類似している。杭の直列間隔が 5D においては、前杭の後方地盤に単杭の後方地盤の、後杭の前方地盤に単杭の前方地盤の変位ベクトルの傾向がわずかに現れる。

(2) 杭周辺の地盤応力

杭の水平変位に伴う各杭の前面側および背面側地盤の直応力 σ_x 、並列方向地盤のせん断応力 τ_{xy} を杭中心から $R=1.10\text{m}$ (杭側面から 0.6m) 範囲について、並列間隔 5D

のケースを図-13 に示す。

各杭における前面側および背面側地盤の σ_x は、杭の変位がゼロにおいて、2.2(2)で述べた初期応力 ($\sigma_x=68\text{kN/m}^2$) からスタートし、前面側の地盤において杭の変位が増大するとともに増加し、一方、背面側地盤において減少する。これらは単杭と同様であるが、図-9 上段と比較し、前杭の前面地盤の σ_x は単杭に比較して大きく、中杭および後杭のそれは小さい。また、後杭の背面地盤の σ_x は単杭と同様に比較して急速に減少する。前杭および中杭の背面地盤の σ_x は後杭のそれと比較し減少する速度が緩慢である。これは前方に位置する杭の背面地盤の直応力の減少が後方に位置する杭の前面地盤の直応力により相殺されるためであり、杭の前面地盤に形成される直応力の増加する領域が大きいことによるものと考えられる。

単杭においては一つの杭において前面地盤から正の復元力、背面地盤から負の復元力を得ており、直列方向に並んだ前杭の復元力は負の復元力が小さい分、単杭のそれより大きくなると考えられる。

5. 杭基礎における群杭効果

杭基礎の群杭効果は、4. において述べた直列方向に並ぶ“単杭の群”が、3. において述べた並列方向の“単杭の群”と干渉することによって生じるものと考えられる。

そこで、4. で用いたモデルの y 方向幅（高さ）を、5D および 2.5D に縮小したモデルを作成し、4. と同様の解析を行う。

杭の直列方向間隔を 2.5D とし、その並列方向間隔を 2.5D および 5D における杭の水平変位と各杭の復元力関係を図-14 に示す。同図には 4. における並列方向間隔 10D（図-10 における黒線）も並記した。また、杭基礎としての水平変位と復元力の関係を見るため、各杭の復元力の合計と水平変位の関係を図-15 に示す。同図には単杭の復元力を 3 倍したものを並記した。また、杭の水平変位が 10mm および 40mm について、杭周辺の地盤変位ベクトルを図-16 に示す。

各杭の水平変位と復元力関係は、杭の並列間隔が 5D と 10D において概ね同じであり、中杭および後杭は杭の水平変位が 10mm 程度で降伏状態に達するのに対して、前杭は杭の水平変位が増加すると共に復元力が増加する

（図-14(b)）。その結果、中杭および後杭の復元力は前杭の復元力に対して、杭の水平変位 10mm において約 50%、杭の水平変位 50mm において 20%未満となる。

一方、並列間隔が 2.5D において、前杭の水平変位と復元力関係は並列間隔が 10D と異なるモードを呈する。また、中杭および後杭においては杭の水平変位の過程でその復元力がピークを示した後、減少するモードを呈する。特に、後杭においては杭の水平変位が 10mm 程度でピークを示した後、杭の水平変位が大きくなるとともに復元力が消失する（図-14(a)）。

杭基礎としての水平変位と復元力は、並列方向間隔が 5D と 10D において、単杭の復元力を 3 倍した値の約 60% の関係を示す。さらに、並列方向間隔が 2.5D において、水平変位と復元力関係が小さくなるだけでなく、3.1(2) で述べた降伏剛性も低下することが分かる。

6. まとめ

杭基礎の群杭効果について「影になる」影響を単杭を直列方向に並べたモデルを用いて、「重なり合う」影響を単杭を並列方向に並べたモデルを用いて、また、「影になる」影響と「重なり合う」影響を単杭を直列および並列方向に並べたモデルを用いて行った载荷解析を通して得られた知見は以下のようなものである。

- (1) 単杭の復元力は水平変位時における杭前面側の地盤応力、背面側の地盤応力、および側面地盤のせん断応力の変化により得られ、それら地盤応力が変化する過程で、杭周囲の地盤は変位する。杭の大変位時においては、杭前面側で押し広げられた地盤が杭側面に沿って背面に引き込まれる変位が生じ、杭側面地盤のせん断応力はその強度の上限値に達すると考えられる。単杭の水平変位と復元力関係から算定した降伏変位は、杭の側面地盤のせん断応力が上限値

に達する変位と概ね同じである。

- (2) 単杭を並列方向に並べたモデルにおいて、杭の並列方向間隔が杭径の 7 倍以上あれば、単杭としての挙動に近似する。一方、並列方向間隔が小さくなると、復元力は小さくなり、大変位時に顕著となる。これは大変位時において杭の側面側地盤のせん断応力の非線形化が隣接する杭のそれと重複し、側面地盤のすり抜けに伴う負の復元力が杭に作用するためによると考えられる。
- (3) 単杭を直列方向に並べたモデルにおいて、水平変位と復元力の関係は直列方向間隔を 10D とする場合であっても後方に位置する杭にとって前方に位置する杭が影になる影響がある。一方、単杭で見られる側面地盤の後方への変位は見られず、これは後方に位置する杭の前面側が地盤を前方に押し出すため、すり抜け変位を抑止するためであると考えられる。
- (4) 単杭が並列方向および直列方向に並んだ杭基礎において、その群杭効果は杭が直列方向に並ぶことにより後方に位置する杭にとって前方に位置する杭が「影になる」影響がより大きいと考えられる。また、並列方向に並ぶことによる「重なり合う」影響は小さいものの、「影になる」影響を促進し、これには並列方向の杭間の地盤のすり抜けが原因すると考えられる。

本研究では、一つの地盤および杭基礎モデルを対象とし、一方向の変位载荷による特定深度の水平方向変位のみに着目して検討したものである。実際には地盤の深度方向にも地盤応力が変化し、ひずみや変位を伴うだけでなく地震時には繰り返し载荷となる。さらには、杭の地盤からの復元力が不同となることにより杭相互の離れも変化するものと考えられる。また、実基礎は並列方向に有限の列数であり、端の列における群杭効果も考慮する必要がある。今後、地盤応力の深度方向分布や深度方向変位、杭基礎の変形モード、杭の三次元配置などを考慮した解析により、これらの影響を検討する必要がある。

謝辞：本研究においては、モデル作成や解析テクニックなどについて、(財)沿岸技術研究センターに設置されて

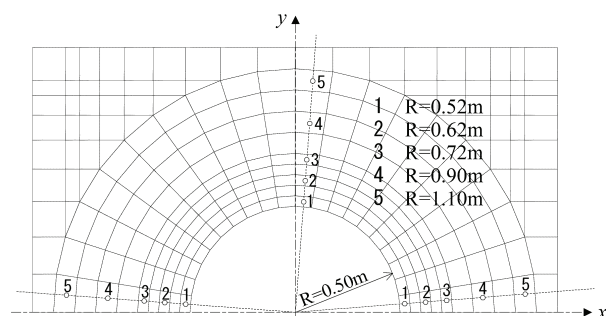


図-A 要素割と要素応力出力位置

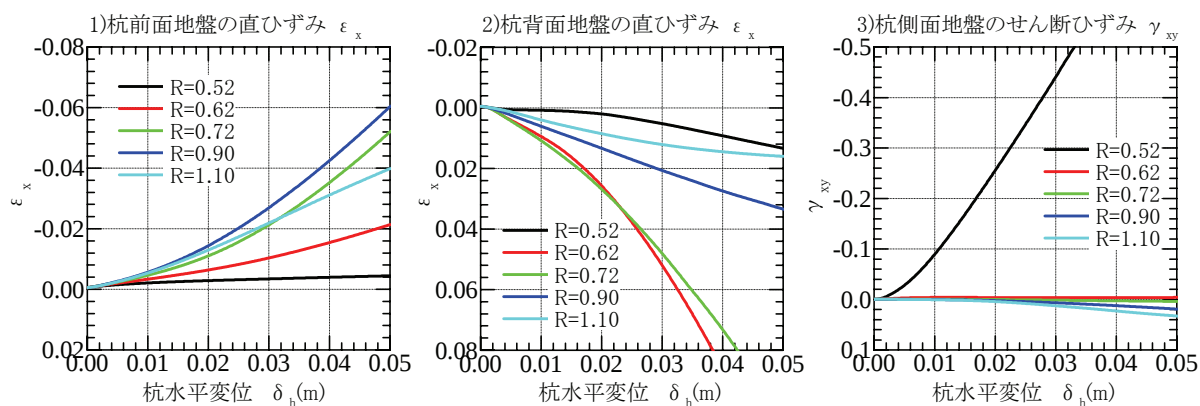


図-B 杭の前面および背面地盤の直ひずみ，側面地盤のせん断ひずみ（杭並列間隔=10D（単杭））

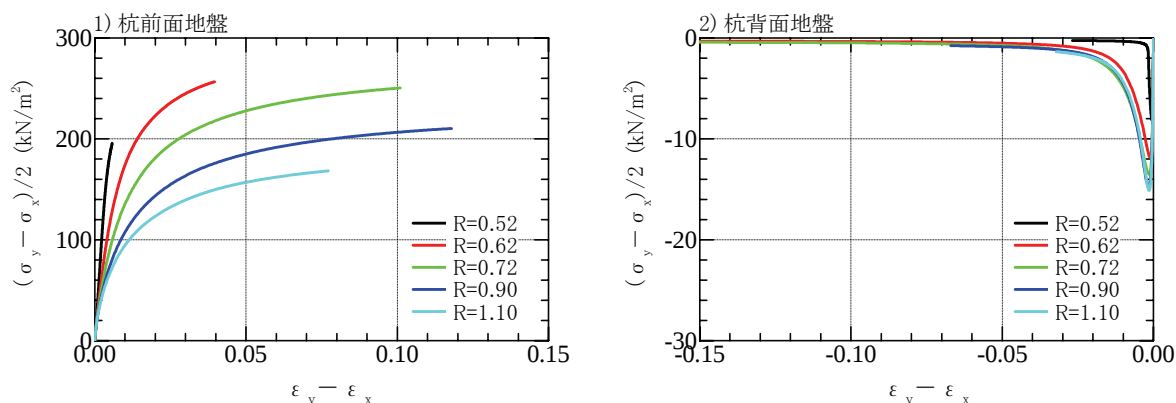


図-C 杭の前面および背面地盤の軸差応力～軸差ひずみ関係（杭並列間隔=10D（単杭））

ているFLIP研究会の中で活動する杭基礎WGにおける議論や検討過程での多くの知見を参考としている。関係各位には深甚な謝意を表する次第である。

付 録

ここでは解析モデルにおける地盤要素割りと地盤応力出力位置による影響，および，杭と地盤との剥離の問題に触れる。

杭に隣接する地盤のモデル要素割りの詳細と要素応力の出力位置を図-Aに示す。図-9(b)に対応する杭の前面および背面地盤の直ひずみ，側面地盤のせん断ひずみを図-Bに，また，図-Bにおける杭の前面地盤および背面地盤の軸差応力（ $(\sigma_y - \sigma_x)/2$ ）～軸差ひずみ（ $\epsilon_y - \epsilon_x$ ）関係を図-Cに示す。

図-9(a)，(b)において，杭に隣接する前面地盤要素（ $R=0.52$ ）の直応力はそれより離れた要素の直応力に比較して小さい。これは杭前面地盤要素における直応力出力が要素中央（要素の平均応力）であり，x軸から $90^\circ/2$ （杭の円は，40分割多角形で近似）ずれている（図-A）ことにより要素のひずみ差が生じる（図-C 左図）。その直ひずみ自体は小さい（図-B 左図）が，相対的に高応力状態にある要素であり，多角形で近似したことによる局所的

なせん断破壊による変形によるものと考えられる。

次に，杭の背面側地盤の引っ張りと剥離について考察する。杭に隣接する背面地盤要素（ $R=0.52$ ）の直ひずみは杭の水平変位が15mmまで概ね生じず，杭の水平変位が50mmにおいて0.015程度である（図-B 中央図）。仮に，杭背面地盤要素が杭要素を引っ張っている場合には，要素のひずみ差が顕著に生じる（図-C 右図）ものとする。本研究で想定した杭の水平変位は50mm（杭径の5%）であり，局所的な地盤応力に影響があると考えられるが，地盤から受ける杭の復元力には小さいと考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説，2000。
- 2) 西谷雅弘，龍田昌毅：水平変位の制限を緩和した杭基礎の設計例，基礎工，Vol.30, No.5, pp.55-57, 2002。
- 3) 寿楽和也，一井康二，篠崎晴彦ほか：2次元解析における杭－地盤相互作用ばねを用いた群杭効果の評価手法の検討，第58回土木学会年次学術講演会，2003。

- 4) 地盤工学会 液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関する研究委員会：液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム 発表論文集(委員会報告 4. 液状化地盤中の杭の実用的解析) , 2004.
- 5) 橋本至, 林川俊郎, 小幡卓司：鋼製橋脚における高性能杭を用いた組杭の群杭効果に係る解析検討, 鋼構造年次論文報告集, 第 13 巻, pp.17-24, 2005.
- 6) 橋本至, 林川俊郎, 小幡卓司, 寿楽和也：レベル 2 地震動下における杭基礎の群杭効果に関する解析的考察, 応用力学論文集, Vol.8, pp.1027-1036, 2005.
- 7) 橋本至, 林川俊郎, 小幡卓司, 寿楽和也：地震時における杭基礎で支持された構造物の群杭効果に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.52A, pp.489-498, 2006.
- 8) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編, 2002.
- 9) 岡原美智夫, 木村嘉富, 高木繁, 大堀裕康：群杭の水平載荷試験およびシミュレーション解析, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1371-1384, 1993.
- 10) 木村亮, 幸左賢二, 伊藤恭平, 坂本眞徳：場所打ち杭の大変形水平挙動に関する研究, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.1385-1394, 1993.
- 11) 幸左賢二, 鈴木直人, 木村亮, 木村嘉富, 森田悠紀夫：終局挙動に着目した実物大杭基礎の水平載荷試験, 土木学会論文集, No.596/III-43, pp.249-260, 1998.
- 12) 佐藤博, 大矢孝, 松島学：杭頭回転固定条件による実物大単杭の大変形水平載荷実験, 土木学会論文集, No.714/VI-56, pp.95-109, 2002.
- 13) 佐藤博, 大矢孝, 松島学：実物大単杭の水平載荷実験における砂質土地盤および粘性土地盤の挙動：土木学会論文集, No.715/III-60, pp.357-367, 2002.
- 14) 岸田英明, 中井正一：地盤の破壊を考慮した杭の水平抵抗, 建築学会論文集, No.281, pp.41~55, 1979.
- 15) Towhata, I., Ishihara, K. : Modeling soil behaviour under principle stress axes rotation, Proc. 5th International conference on numerical method in geomechanics, Nagoya, Vol.1, pp.523-530, 1985.
- 16) 日本道路協会：杭基礎設計便覧, 2007.

(2007 年 9 月 18 日受付)