

# 群杭の急速載荷模型実験による支持力発生 メカニズムの解明と合理的設計法の構築

(課題番号 15560424)

平成15年度～平成16年度  
科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)）  
研究成果報告書



平成17年3月

研究代表者 木村 亮  
(京都大学大学院 工学研究科 助教授)

科研

2004

273

# 群杭の急速載荷模型実験による支持力発生 メカニズムの解明と合理的設計法の構築

(課題番号 15560424)

平成15年度～平成16年度  
科学研究費補助金（基盤研究(C)(2)）  
研究成果報告書

平成17年3月

研究代表者 木村 亮  
(京都大学大学院 工学研究科 助教授)

## は し が き

杭の静的な鉛直支持力を求める経済的な試験法として、急速載荷試験（スタナミック試験）が近年実施されている。しかし通常は単杭を対象としており、群杭基礎やパイルド・ラフト基礎に対する試験はほとんど行われていない。そこで、本研究では従来のスタナミック試験の動力源である推進剤の代わりに、圧縮空気を用いた急速載荷模型装置によって、群杭およびパイルド・ラフトに対して模型急速載荷試験を実施した。急速載荷試験の解釈法として最も一般的である除荷点法のパイルド・ラフトへの適用性を検討し、急速載荷試験におけるラフトの支持力分担や群杭効果、パイルド・ラフトの支持メカニズムについて考察している。

本研究の結果、周面摩擦力が降伏しない範囲の変位レベルにおいて、群杭基礎およびパイルド・ラフト基礎に対する急速載荷試験の適用性はかなり高いことがわかった。均質な砂地盤において行われた本模型実験の定性的な検討は、今後の群杭基礎、パイルド・ラフト基礎に対する急速載荷試験法確立への一つの材料になるものと考えられる。さらに、静的載荷については杭周面のすべりも考慮に入れて実験結果を検討した。一方で急速載荷においては周面摩擦力が降伏するまでの沈下量に限定して実験および考察を行った。そのため、次のステップとして、急速載荷における杭周辺地盤の塑性化や杭周面と地盤のすべりを考慮に入れた解釈法を確立する必要がある。

## 研究組織

### 平成 15 年度

研究代表者 : 木村 亮 (京都大学 工学研究科 助教授)  
研究分担者 : 建山 和由 (京都大学 工学研究科 助教授)  
研究分担者 : 岸田 潔 (京都大学 工学研究科 助教授)

### 平成 16 年度

研究代表者 : 木村 亮 (京都大学 工学研究科 助教授)  
研究分担者 : 岸田 潔 (京都大学 工学研究科 助教授)  
研究分担者 : 建山 和由 (立命館大学 理工学部 教授)

## 交付決定額 (配分額)

(金額単位：千円)

	直接経費	間接経費	合計
平成 15 年度	2,300	0	2,300
平成 16 年度	1,400	0	1,400
総計	3,700	0	3,700

## 研究発表

- (1) 学会誌等（発表者名，テーマ名，学会誌名，巻号，年月日）  
木村 亮，長谷川雅：模型急速載荷試験による群杭およびパイル・ラフトの鉛直支持力特性の検討，土木学会論文集，No.778/III-69，pp.29-39，2004.
- (2) 口頭発表（発表者名，テーマ名，学会誌名，巻号，年月日）  
該当なし
- (3) 出版物（著者名，書名，出版社名，年月日）  
該当なし

## 研究成果による工業所有権の出願・取得状況

該当無し

# 【目 次】

第1章 序 論	1
第2章 実験概要	3
第3章 実験結果と考察	7
3.1 単杭の鉛直支持力特性	7
3.2 模型急速載荷試験 (STN) 結果の整理	8
3.3 除荷点法の適用	9
3.4 静的載荷試験における群杭効果の検討	11
3.4.1 杭～杭の相互作用 (Gr)	11
3.4.2 ラフトが周面摩擦力に及ぼす影響 (Gr-1, Pr-1)	12
3.4.3 ラフト～杭～地盤の相互作用 (Pr)	13
3.5 急速載荷試験における群杭効果	15
3.5.1 杭～杭の相互作用	15
3.5.2 ラフト～杭～地盤の相互作用	15
3.5.3 全パターンにおける周面摩擦力の整理	16
3.5.4 動的効果の検討	16
3.6 ラフトの支持力分担	17
第4章 結 論	19
参考文献	21

# 第1章 序 論

近年、基礎構造物の設計は「性能規定設計」を目指す方向に移行しつつあり、杭の性能を予測する手法として、あるいは安全性の定量的評価の手段として、載荷試験の持つ役割はますます重要になってきている。しかし、従来の静的載荷試験では、その実施に多くの費用や時間を要することから、杭の施工本数に比べて十分な数の試験が実施されていないのが現状である。これに対し、簡易で経済的な載荷試験法として注目されているのが急速載荷試験である。急速載荷試験は、静的な荷重による静的載荷試験とハンマー打撃力による衝撃載荷試験の、中間的な杭～地盤系の挙動を発現する載荷試験として開発された。現在、急速載荷試験は鉛直載荷試験方法の一つとして基準化されている<sup>1)</sup>。急速載荷試験の特徴は以下の通りである。

- (1) 載荷時間が衝撃載荷試験と比べて数倍長く、載荷時の杭体の応力状態は、静的載荷とほぼ等しい。そのため杭体の波動現象をほぼ無視できる。
- (2) 杭体、地盤の動的効果を考慮しなければならない。
- (3) 反力杭を必要としない。
- (4) 試験時間が短く、現場の拘束時間が短い。

急速載荷試験の中でも、杭頭に載せた反力マスを推進剤の燃焼ガス圧によって打ち上げ、反力マスの慣性反力を杭頭に載荷するスタナミック試験が1989年に開発された<sup>2)</sup>。日本においては、1992年にスタナミック試験が導入されて以来、様々な試験条件で数多くのスタナミック試験が行われてきた<sup>3)</sup>。スタナミック試験の目的は杭の静的な支持力を求めることであり、そのための解釈法についての研究が活発に行われてきた<sup>3)</sup>。加藤ら<sup>4)</sup>は、同一地盤に施工された複数の単杭にスタナミック試験と静的載荷試験を実施し、それらの試験結果に種々のスタナミック試験の解釈法（簡用計算法<sup>5)</sup>、除荷点法<sup>6)</sup>、一次元波動解析法<sup>7)</sup>、FEM解析法<sup>8)</sup>）を適用することにより、それらの長所と短所を体系化した。木村らはスタナミック試験を模擬した空気圧による室内急速載荷模型実験装置を開発し<sup>9)</sup>、乾燥した砂地盤中の摩擦杭および支持杭に対して急速載荷模型実験を行った。それらの実験結果において単杭における除荷点法の適用性を検討するとともに、3次元動的FEM解析プログラム(DYSC)<sup>10)</sup>を開発し、急速載荷時の単杭の鉛直支持力特性を詳細に検討した。これらの解釈法のうち、本研究では、スタナミック試験の最も一般的な解釈法である除荷点法を群杭およびパイルド・ラフトに適用し、降伏荷重以前の静的な荷重-変位関係を推定する。

従来、載荷試験は単杭に対して行われるのが普通である。しかし通常の構造物は、群杭に

よって支持されていることが多く、群杭の鉛直支持力は単純に単杭の支持力の重ね合わせとはならないことが知られている。しかし、群杭効果のメカニズムを模型実験によって検討した例<sup>1)1)</sup>は数少なく、模型実験による群杭効果のデータ蓄積により、定性的に群杭効果の傾向を把握する必要がある。

一方、パイルド・ラフト基礎とは、直接基礎に杭を併用した基礎形式であり、直接基礎と杭が一体となって荷重を支持するものをいう。この場合の杭の役割は、上部構造の荷重の一部を杭体を通じてより深部の地盤に伝達することにより、基礎としての沈下量もしくは不同沈下量を低減させることである<sup>1)2)</sup>。パイルド・ラフト基礎の有効性については1977年の第9回国際土質基礎工学会議で Burland ら<sup>1)3)</sup>が報告している。Burland らは、杭を直接基礎の沈下抑止のために用いるという概念を述べ、設計において杭と地盤とラフトの相互作用を考慮した変形を評価することにより、最小限の杭本数を決定することが重要であると述べている。

以上に示した急速載荷試験の経済性とパイルド・ラフト基礎の有効性に着目し、本研究ではパイルド・ラフト基礎に対する急速載荷試験の適用性を考える。パイルド・ラフト基礎の設計支持力を確認する手段として載荷試験が最適であるが、支持力が大きいパイルド・ラフト基礎に対して静的載荷試験を行うのは、多くの反力杭を必要とするため困難である。しかし、スタナミック試験では反力杭を必要としないため、パイルド・ラフト基礎に実施することは十分可能である。スタナミック試験によって、パイルド・ラフト基礎の静的な支持力や、ラフトの支持力分担を知ることができれば、非常に合理的かつ経済的な試験法といえる。

本研究ではパイルド・ラフト基礎に対する急速載荷試験の適用性を把握することを目的として、群杭、パイルド・ラフトに対して模型実験（静的載荷、急速載荷）をそれぞれ行い、それらの静的および動的な鉛直支持力特性を把握する。なお、急速載荷模型試験では、木村らが開発した装置<sup>9)</sup>を用いる。この装置の概要は後述する。

## 第2章 実験概要

図-1 に急速载荷模型実験装置を示す。この実験装置では、従来のスタナミック試験の動力源である推進剤の燃焼の代りに、圧縮空気を用いることによってスタナミック試験をモデル化する。電磁弁を開くと、コンプレッサにより圧縮された空気がシリンダに瞬時に流れ込み、装置上部が浮き上がると同時に、慣性反力が生じてピストンが杭頭に载荷する。

実験に用いた模型杭の諸元を表-1 に示す。杭先端はキャップで閉塞している。本実験では摩擦杭によって構成される群杭基礎およびパイルド・ラフト基礎を対象としている。そのため杭周面に接着剤を用いて均一に砂を塗り付け、周面摩擦力を増加させる。

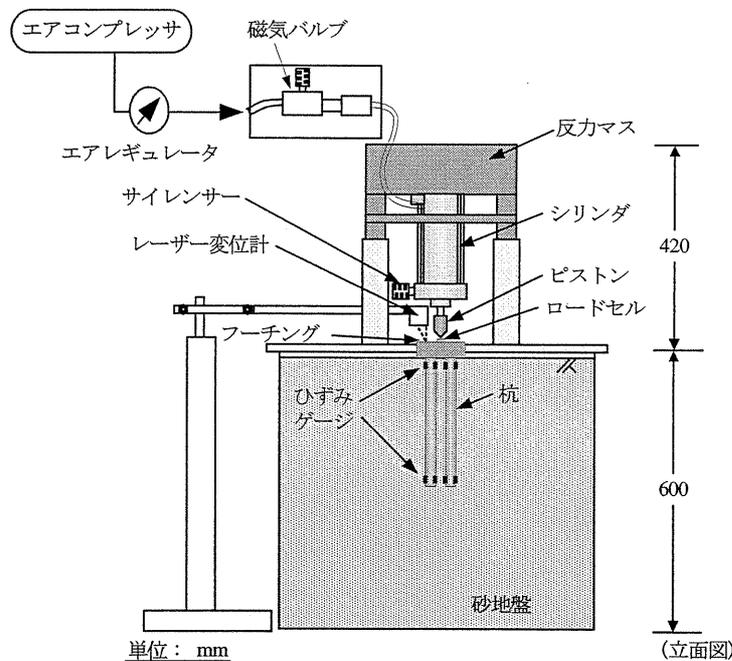


図-1 急速载荷模型実験装置

表-1 杭の諸元

材料	真鍮
杭径 (mm)	30.0
肉厚 (mm)	1.0
根入れ長さ (mm)	280.0
ヤング率 (MPa)	$8.5 \times 10^4$

フーチング（ラフト）は図-2に示すように、杭間隔が75 mm（2.5 D，Dは杭径）の正方形であり、杭1本あたりのフーチングの接地面積はすべて等しい。また、フーチングには杭が30 mm 貫入する。

模型地盤の物性値を表-2に示す。地盤材料には硅砂6号を用いた。地盤作成方法は、土槽縁部にセットした梁に模型杭を固定し、気中落下装置を用いて砂を落下させ、相対密度が88.5%となる密な地盤を作成する。本模型実験では、図-3に示すように载荷前にフーチングが地表面に接した状態にセットしたものをパイルド・ラフトとし、フーチングと地表面に隙間のある状態にしたものを群杭（自立群杭）と呼ぶ。パイルド・ラフトの場合は、フーチングが地表面に接する高さまで地盤を作製し、地表面を平らに整えてフーチングを杭に被せる。このとき、図-3に示すようにフーチングと杭をネジで固定する。なお、群杭の場合には、フーチングと地表面に5.0 mmの隙間ができる高さまで地盤を作製し、フーチングを被せる。

計測項目は载荷荷重、フーチングの鉛直変位、杭体のひずみであり、急速载荷試験では1秒間に5000個の計測データをサンプリングする。载荷荷重はフーチング上面にセットされたロードセルによって計測する。フーチングの鉛直変位はレーザー変位計によって計測する。杭体のひずみ計測については、図-3に示すように杭頭と杭先端部にひずみゲージを貼付し、

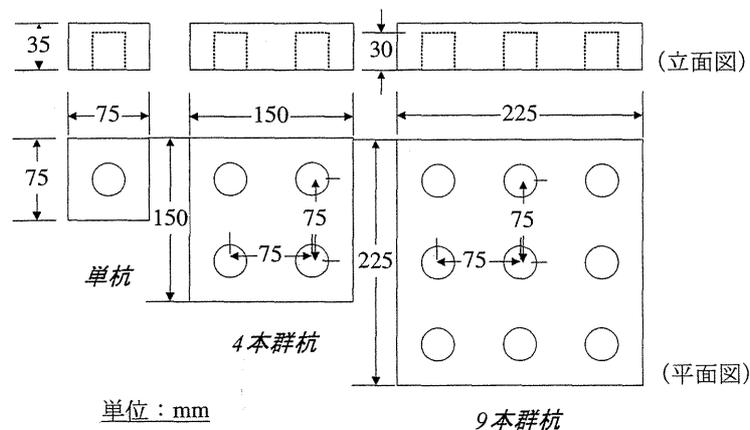


図-2 フーチング（ラフト）

表-2 模型地盤の物性値

最大間隙比	1.03
最小間隙比	0.64
含水比	0.30 %
密度	1,561 kg/m <sup>3</sup>
相対密度	88.5 %
内部摩擦角	45°
D <sub>60</sub>	310 μm
D <sub>10</sub>	120 μm

杭頭軸力と杭先端軸力を算定する。例としてパイルド・ラフト単杭における支持力分担の算定方法を以下に示す。

- 先端支持力 = 杭先端軸力 (1)
- 周面摩擦力 = 杭頭軸力 - 杭先端軸力 (2)
- ラフトの支持力 = 載荷荷重 - 杭頭軸力 (3)

複数杭の場合は、杭先端軸力と杭頭軸力は杭一本あたりの平均値を用いる。

実験パターンは表-3 に示すように計 12 パターンである。本実験の主な目的はパイルド・ラフトの力学特性を調べることであるが、杭～地盤～杭の相互作用を検討するためにラフトが浮いた状態の模型群杭（自立群杭）に対しても実験を行った。以降はパイルド・ラフトを Pr、群杭を Gr と記す。また、急速載荷時の支持力特性を静的な支持力特性と比較するために、各パターンで急速載荷試験と静的載荷試験を行った。以降は、急速載荷試験を STN、静的載荷試験を SLT と略す。SLT では一方向連続載荷であり、載荷速度を 1.0 mm/min とした。

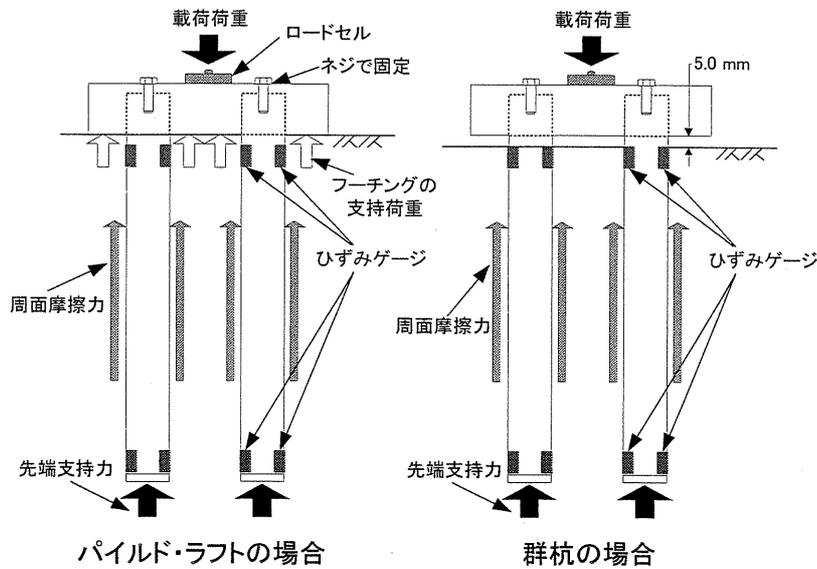


図-3 模型杭の概要

表-3 実験パターン

杭本数	1本	4本	9本
群杭	Gr-1 (STN)	Gr-4 (STN)	Gr-9 (STN)
	Gr-1 (SLT)	Gr-4 (SLT)	Gr-9 (SLT)
パイルド・ラフト	Pr-1 (STN)	Pr-4 (STN)	Pr-9 (STN)
	Pr-1 (SLT)	Pr-4 (SLT)	Pr-9 (SLT)

STN = 急速載荷試験, SLT = 静的載荷試験

< Memo >

---

## 第3章 実験結果と考察

以下に示す実験結果において、変位  $\delta$  は全て杭径  $D$  で除して規準化した値を用いる。

### 3.1 単杭の鉛直支持力特性

まず、本実験で用いた杭の静的な鉛直支持力特性を確認する。図-4 に、単杭 (Gr-1) における支持力分担を示す。これを見ると、周面摩擦力が杭頭荷重の約 85% を分担しており、本模型杭が摩擦杭の特性を持つことを確認できる。また、先端支持力は変位 2.2% で降伏した後変位 5.0% 付近で再び増加し始める。ここで、降伏変位は log P-log S 法によって判定したものである。本模型実験では、気中落下によって模型地盤を作成したために杭直下に砂が入りにくく、杭直下の地盤密度が低いことが考えられる。一方周面摩擦力は変位 4.2% で降伏している。

過去の模型実験結果<sup>10)</sup> より、乾燥した砂地盤中の摩擦杭において STN 試験の最大沈下量が降伏変位を上回るとき、除荷点と静的載荷曲線は一致しないことが分かっている。このときの荷重-変位関係の概略を図-5 に示す。加藤ら<sup>4)</sup> は、除荷点法、1次元波動解析法、FEM 解析法によって推定した静的な荷重-変位関係は、いずれも降伏荷重までは SLT 試験結果と一致するが、降伏荷重以後は算定精度が悪くなることを報告している。これらの研究結果から、現段階で STN 試験から摩擦杭の降伏荷重以降の静的な荷重-変位関係を推定することは困難

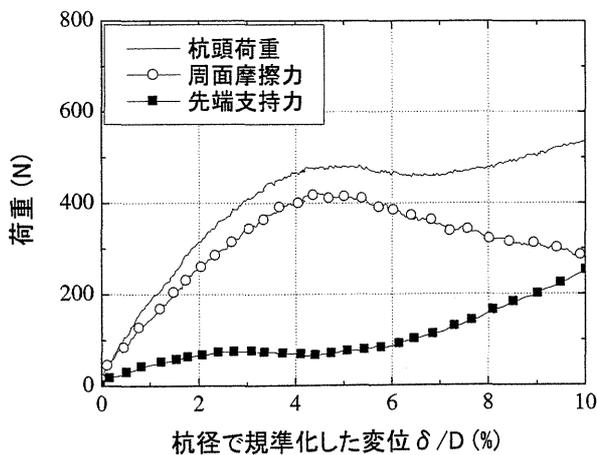


図-4 単杭における支持力分担

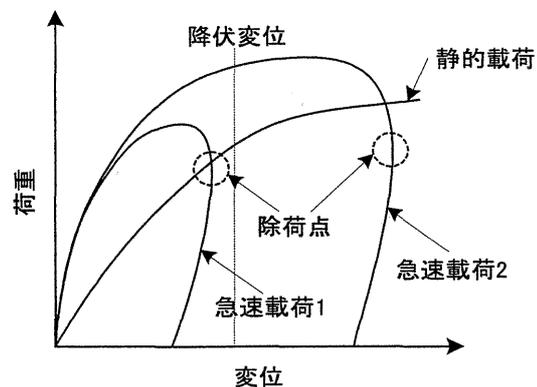


図-5 過去の模型実験結果 (概略図)

であるといえる。したがって本研究では、STN 試験における最大沈下量が周面摩擦力の降伏変位 4.2% よりも小さくなるように空気圧を設定し、周面摩擦力が降伏する以前の動的な鉛直支持力特性を検討する。

### 3.2 模型急速載荷試験 (STN) 結果の整理

急速載荷試験は杭体に生じる波動現象を無視できる試験方法と定義されている<sup>1)</sup>。したがって、本模型急速載荷試験においても波動現象を無視できるのかどうかを検討する必要がある。学会基準<sup>1)</sup>では載荷時間による杭体の波動現象を評価する指標として、相対載荷時間  $T_r$  が採用されている。

$$T_r = \frac{t_L}{2L/c} \tag{4}$$

ここに、 $T_r$ : 相対載荷時間

$t_L$ : 載荷時間

$L$ : 杭長

$c$ : 縦波伝播速度

相対載荷時間が大きいほど、すなわち、載荷時間内に応力が杭体を往復する回数が多いほど

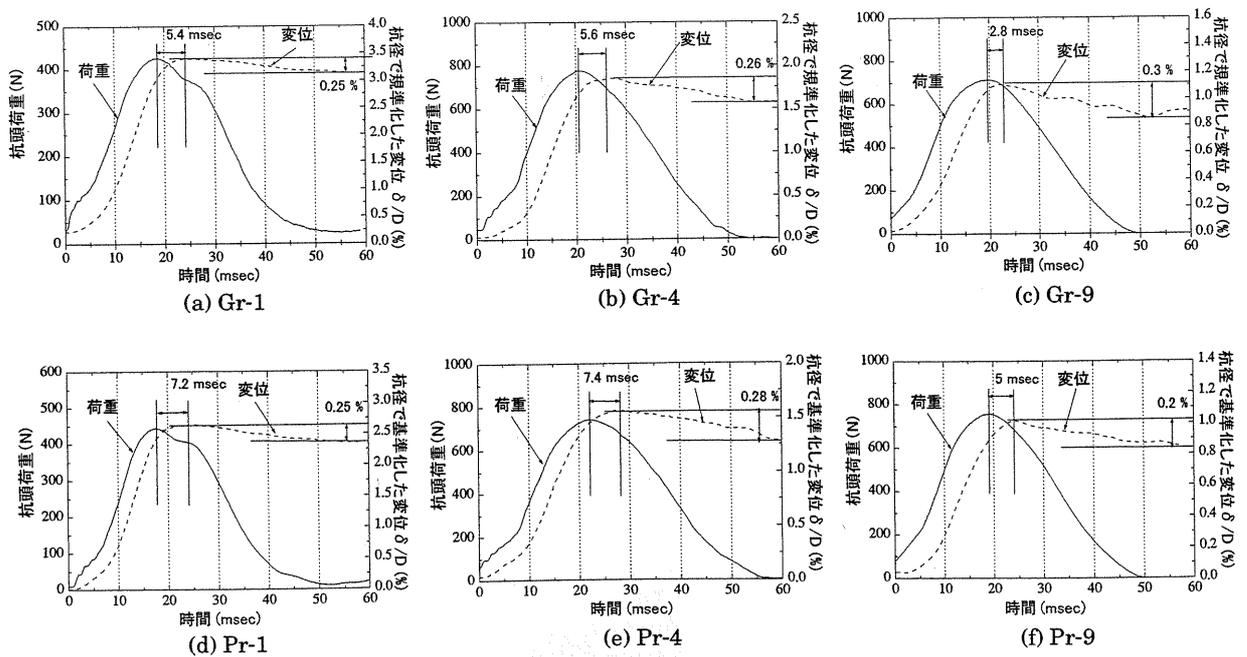


図-6 荷重および変位の時刻歴 (STN)

ど、杭体に生ずる波動現象の影響は小さくなる。衝撃載荷試験と急速載荷試験の境界を表す相対載荷時間として、 $T_r=5$  が採用されている。

図-6 に本模型急速載荷試験における荷重と変位の時刻歴を全実験パターンについて示す。空気圧は Gr-1, Pr-1 では 0.3 MPa, その他は全て 0.7 MPa である。これらの図では、載荷が開始された時刻をゼロとしている。スタナミック試験の載荷時間は約 100 msec とされているが、本実験ではどのパターンも約 50 msec である。L = 0.3 m, c = 973 m/sec としたとき、 $T_r = 81$  となり、杭体における波動現象を無視できることが確認された。一般的にスタナミック試験では動的効果により変位の最大値は荷重の最大値よりも遅れて生じる傾向があるが、図-6 より本模型試験においても同様の傾向が見られる。荷重と変位は基礎の種類によらず、ほぼ同様の時刻歴を示している。

### 3.3 除荷点法の適用

除荷点法は、図-7 に示すように杭～地盤系を一質点系モデルで表し、急速載荷荷重  $F_{stm}$  から杭体の慣性力  $F_a$  と地盤のひずみ速度に比例した粘性抵抗  $F_v$  を簡易的に差し引くことにより、静的抵抗  $F_{slt}$  を算定する方法である。図-8 に除荷点法の概要を示す。式で表すと、

$$F_{stm} = F_{slt} + F_v + F_a \tag{5}$$

$$= F_{slt} + Cv + m \alpha \tag{6}$$

$$F_{soil} = F_{slt} + F_v \tag{7}$$

となり、静的抵抗  $F_{slt}$  は

$$F_{slt} = F_{stm} - Cv - m \alpha \tag{8}$$

と表される。ここで、 $C$  はダンピング係数、

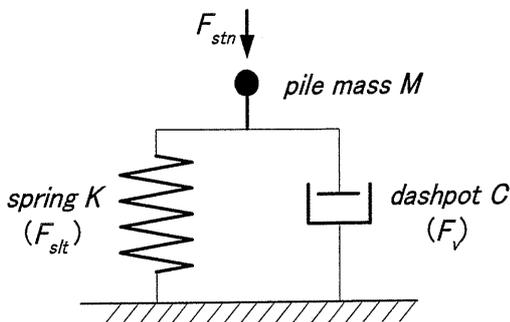


図-7 一質点系モデル

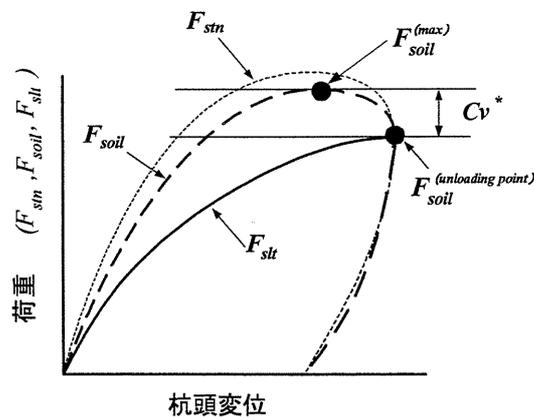


図-8 除荷点法の概要<sup>7)</sup>

$v$ は杭体の速度である. 杭の速度  $v$  と加速度  $a$  は各時刻において計測された変位を微分して求める. 杭の最大変位点である除荷点 (unloading point) において杭体の速度は0であるから,

$$F_{soil}^{(unloading\ point)} = F_{st}^{(unloading\ point)} = F_{stm} - m a \tag{9}$$

となり, 除荷点での杭の静的抵抗が求められる. このとき, 粘性係数  $C$  は次のように定められる.

$$C = \frac{F_{soil}^{(max)} - F_{soil}^{(unloading\ point)}}{v^*} \tag{10}$$

ただし,  $F_{soil}^{(max)}$  は  $F_{soil}$  の最大値であり,  $v^*$  はその時の杭体の速度である. このようにして求めた粘性係数  $C$  を式(8)に代入して静的抵抗  $F_{st}$  を算定する.

この除荷点法を用いて, Gr-1~Gr-9 および Pr-1~Pr-9 の急速載荷試験における荷重-変位関係から静的な荷重-変位関係を算定した. 図-9(a)~(f)に急速載荷試験の荷重-変位関係および除荷点法の算定結果, 静的載荷時の荷重-変位関係を示す. これらを見ると, 全体的に除荷点法による算定曲線が静的載荷試験結果をやや下回る傾向があるものの, ほぼ一致しているといえる.

これらの結果より, 群杭およびパイルド・ラフトにおいても一質点系モデルを用いた除荷点法を用いて, 載荷初期における静的な荷重-変位関係を十分な精度で算定できることがわかる.

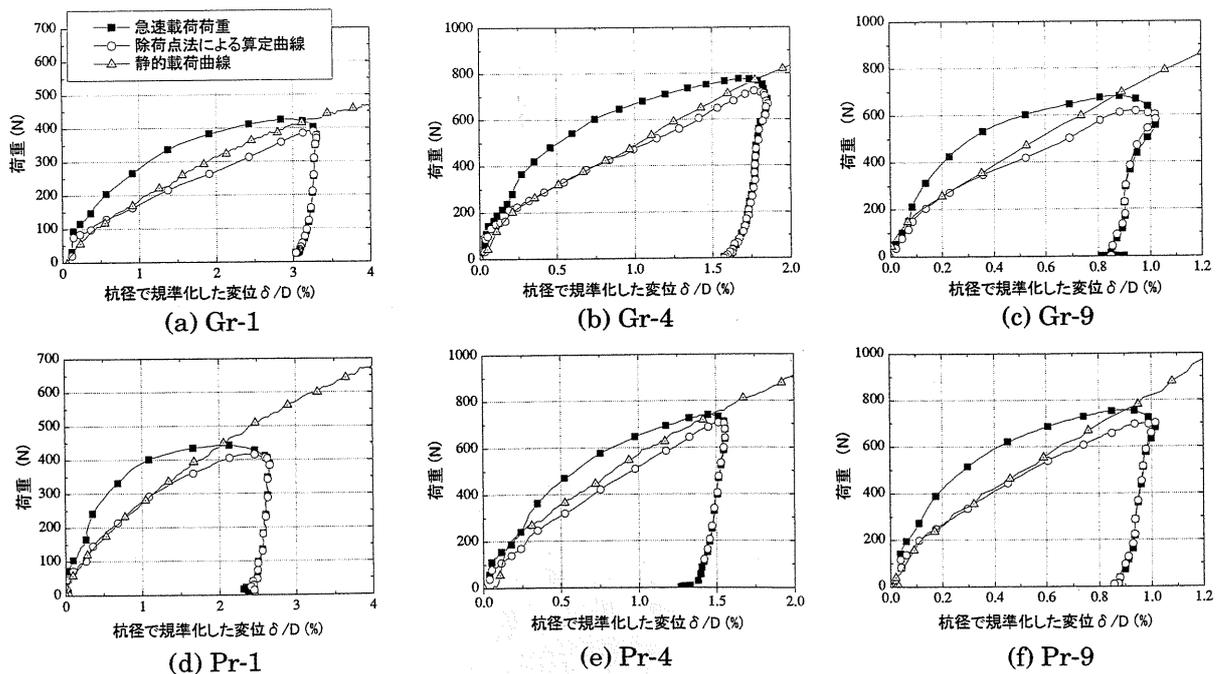


図-9 除荷点法の適用性

### 3.4 静的載荷試験における群杭効果の検討

#### 3.4.1 杭～杭の相互作用 (Gr)

ここでは、群杭およびパイルド・ラフトにおける静的な群杭効果を考える。図-10、図-11に、群杭およびパイルド・ラフトの静的載荷試験における荷重-変位関係を示す。ここで、荷重は杭本数で除して規準化している。これらの図を見ると、群杭、パイルド・ラフトの両方において、杭本数が増えるほど荷重-変位関係の初期剛性が減少するという群杭効果を示している。図-12および図-13に杭一本あたりの周面摩擦力-変位関係を示す。図-12においてGr-1では変位4.2%において杭周面のすべりにより、ピーク荷重410Nを示している。一方で、Gr-4、Gr-9では周面摩擦力の増加勾配がGr-1よりも小さく、Gr-1のようなピーク荷重を示していない。図-14に示すように複数杭では杭で囲まれた地盤の部分が周辺の杭に追従して沈下する。そのため杭と地盤の相対変位が小さくなり、杭周面のすべりが生じにくいと考えられる。

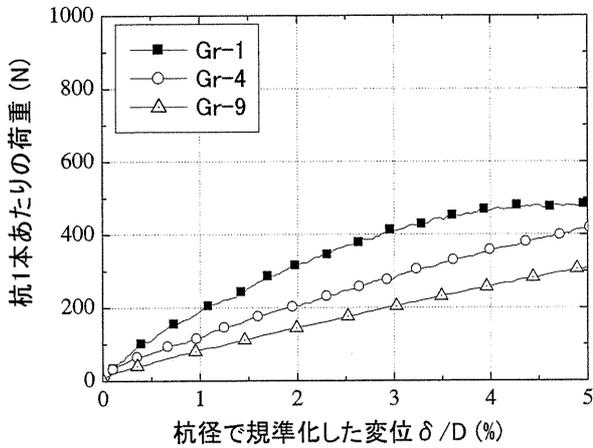


図-10 静的載荷時の荷重-変位関係 (SLT-Gr)

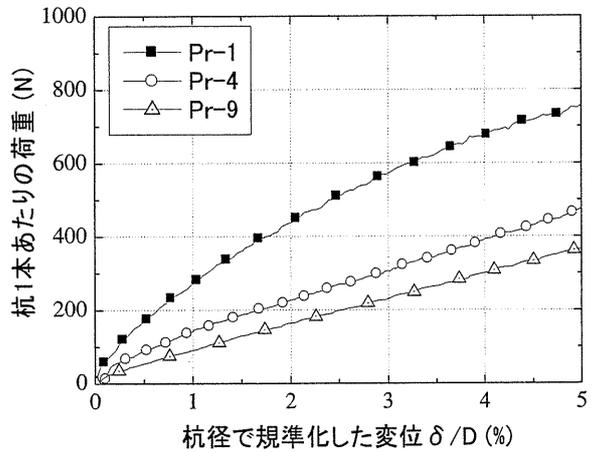


図-11 静的載荷時の荷重-変位関係 (SLT-Pr)

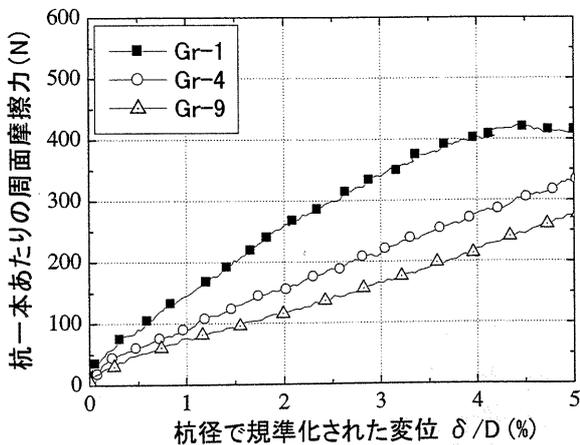


図-12 静的載荷時の周面摩擦力 (SLT-Gr)

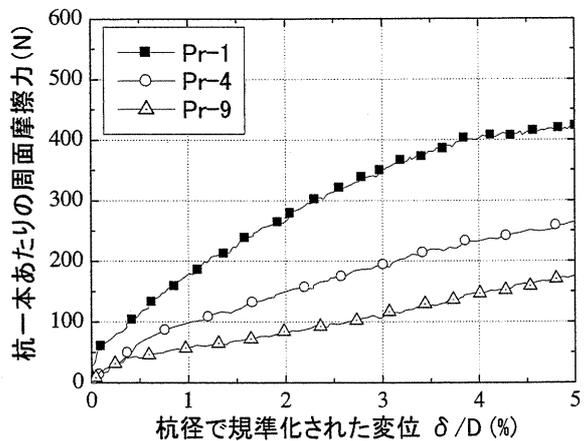


図-13 静的載荷時の周面摩擦力 (SLT-Pr)

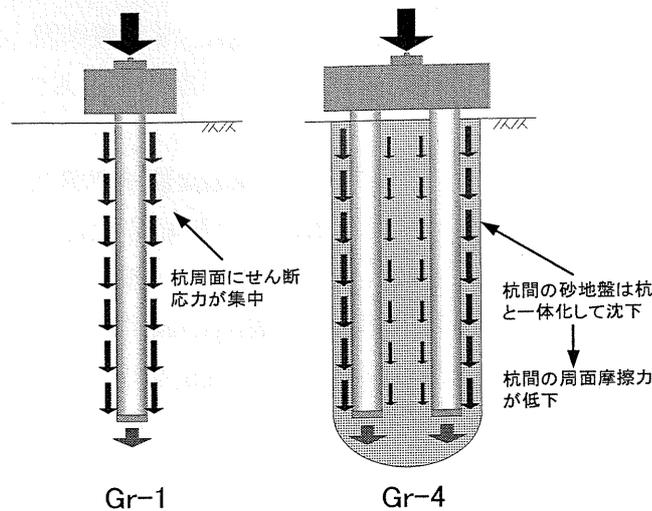


図-14 群杭効果のメカニズム (Gr)

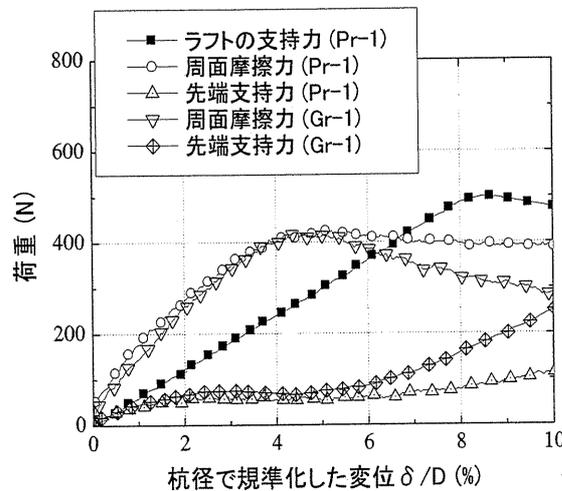


図-15 Pr-1 と Gr-1 の支持力分担 (SLT)

### 3.4.2 ラフトが周面摩擦力に及ぼす影響 (Gr-1, Pr-1)

図-15 に Gr-1 と Pr-1 の支持力分担を示す。杭周面ですべりが生じる変位 4.2% までは、Gr-1 と Pr-1 において、ほとんど等しい周面摩擦力と先端支持力を示す。このことは、杭同士の相互作用が存在しない単杭の場合は、周面摩擦力の降伏以前において、ラフトの支持力が周面摩擦力および先端支持力に及ぼす影響を考慮する必要が無いことを意味する。Gr-1 では変位 5.0% 以降に周面摩擦力が大幅に減少し始めるが、Pr-1 では変位 5.0% 以降の周面摩擦力の減少勾配が Gr-1 より小さい。これは、ラフトが地表面に接している場合、ラフト直下の杭周面地盤の拘束圧が大きいため、杭周面と砂地盤にすべりが生じた後の周面摩擦力の低下が相対的に小さくなることが考えられる。

### 3.4.3 ラフト～杭～地盤の相互作用 (Pr)

図-13を見ると、PrにおいてもGrと同様に、杭本数が増えると周面摩擦力の増加勾配が減少している。また、その減少量はGrの場合よりも大きい。これは、ラフトの影響により杭同士の相互作用が大きくなることを示している。

直接基礎（ラフト）の鉛直支持力特性を把握するために、図-16に示したような3つの模型直接基礎に対してSLTをそれぞれ実施した。これらの模型直接基礎は図-2に示すフーチングと同じ寸法である。図-17に直接基礎の単位面積あたりの荷重-変位関係を示す。この図より、直接基礎の面積が大きくなると、単位面積あたりのラフトの初期剛性は低減することを確認できる。一方、SLTにおけるPrのラフトの単位面積あたりの支持荷重-変位関係を図-18に示す。ラフトの単位面積あたりの支持荷重とは、式(3)によって求めたラフトの支持荷重を、ラフトの接地面積（ラフト面積－杭断面積）で除して規準化したものである。図-17と図-18を比較すると、ラフトに複数杭がつけられることによって、単位面積あたりのラフトの支持力の低減が大きくなることがわかる。これは、図-19に示すように、杭間の砂地盤が杭と一体化して沈下することにより、ラフト直下の砂地盤の圧縮変形が抑えられ、ラフトの支持荷重

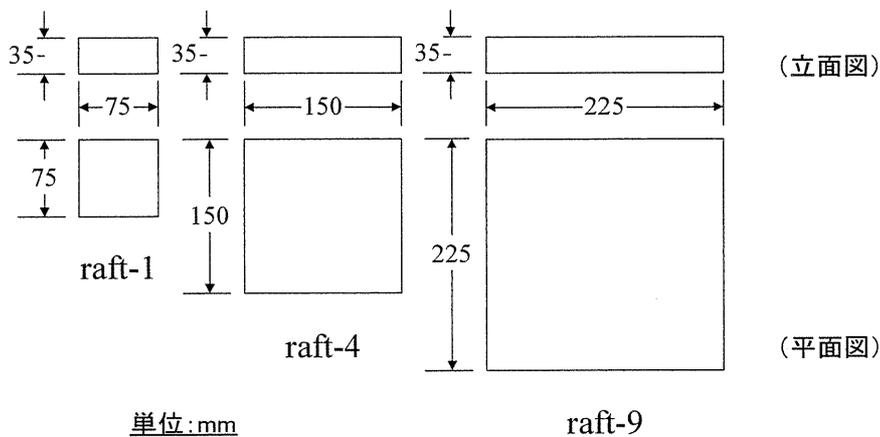


図-16 模型直接基礎（ラフト）

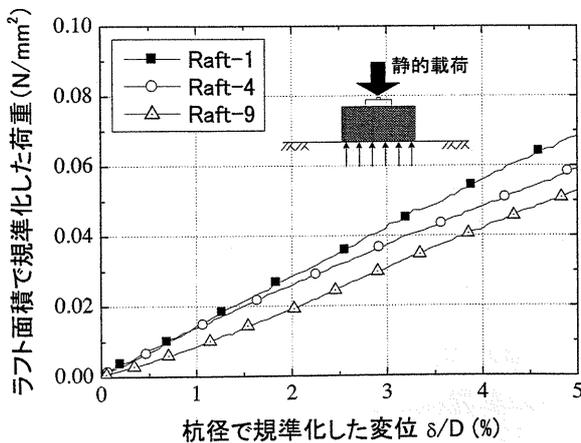


図-17 直接基礎における荷重-変位関係 (SLT-raft)

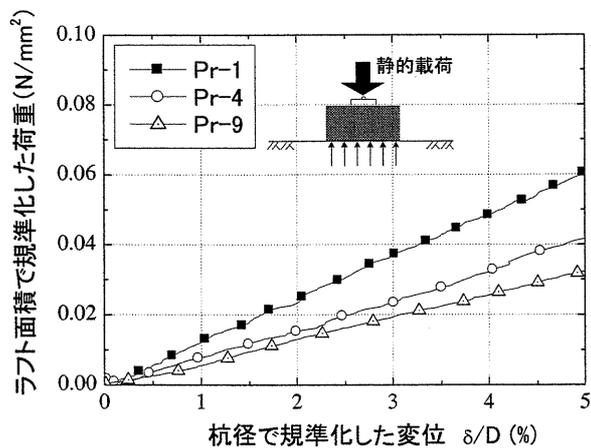


図-18 Prにおけるラフトの支持荷重 (SLT-Pr)

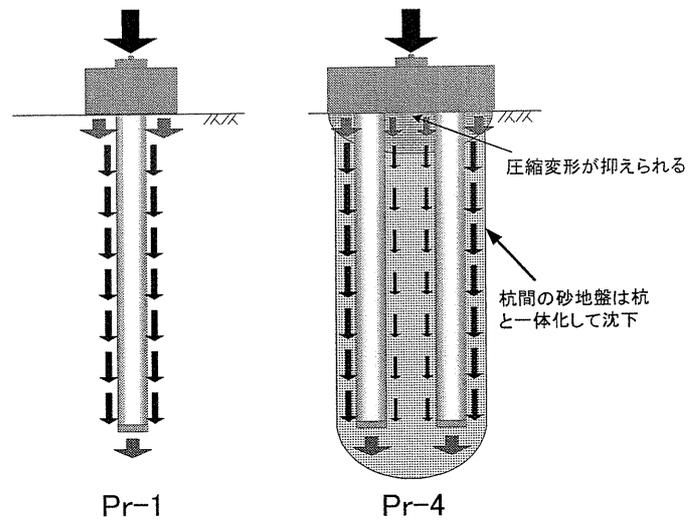


図-19 ラフトの支持荷重低減のメカニズム

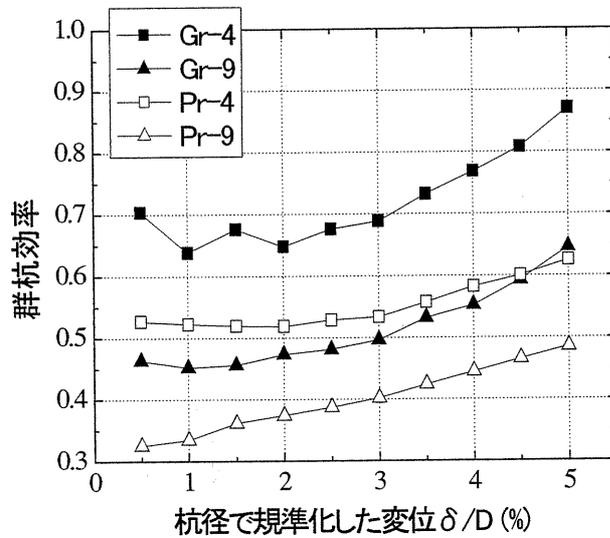


図-20 群杭効率 (SLT)

が低減するためと考えられる。

群杭効果を定量的に評価するために、同一変位において、Gr-1 の荷重を規準としたときの Gr 群杭, Pr-1 の荷重を基準としたときの Pr 群杭の杭 1 本あたりの荷重を群杭効率とし、図-20 に示す。これより、沈下が進むにつれて群杭効率が上がっていくという結果が得られた。この傾向は中井ら<sup>11)</sup>の行った群杭の実験的研究や、小坪ら<sup>14)</sup>の杭周面のすべりを考慮した群杭の数値解析結果にも現れている。図-20 より、この傾向はパイルド・ラフトにおいても同様に現れている。また、パイルド・ラフトではラフトの影響により、群杭の場合よりも群杭効率が低くなっている。

### 3.5 急速載荷試験における群杭効果

#### 3.5.1 杭～杭の相互作用

図-21, 図-22 に STN 試験における Gr, Pr の荷重-変位関係を示す. ここで荷重は杭本数で除している. これらの図より, SLT の場合と同様に, 同一変位における荷重は杭本数が増えると減少する傾向がある.

STN における群杭効果を詳細に検討するために, 周面摩擦力に着目する. Gr および Pr における杭一本あたりの周面摩擦力-変位関係を図-23, 図-24 に示す. これらの図から, Gr および Pr において SLT の場合と同様に杭本数が増えるとき周面摩擦力の初期剛性が低減することがわかる.

#### 3.5.2 ラフト～杭～地盤の相互作用

ここでは, STN においてラフトが杭～杭の相互作用 (群杭効果) に及ぼす影響について考察する. 図-23 と図-24 を比較すると, 同一変位において, Pr-1, Pr-4 における周面摩擦力は Gr-1, Gr-4 における周面摩擦力よりも若干小さい.

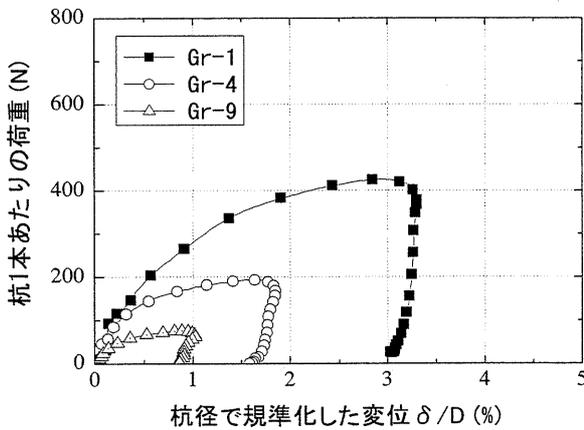


図-21 荷重-変位関係 (STN-Gr)

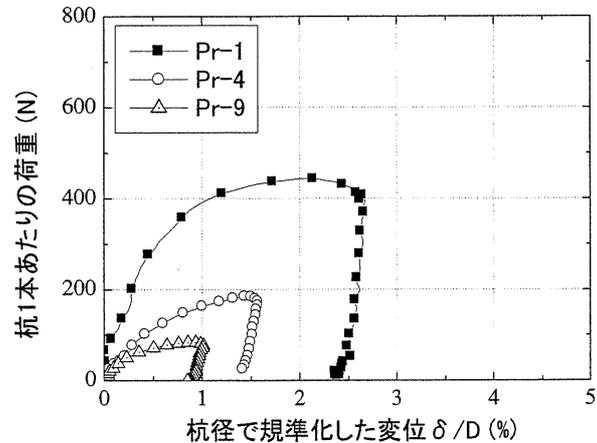


図-22 荷重-変位関係 (STN-Pr)

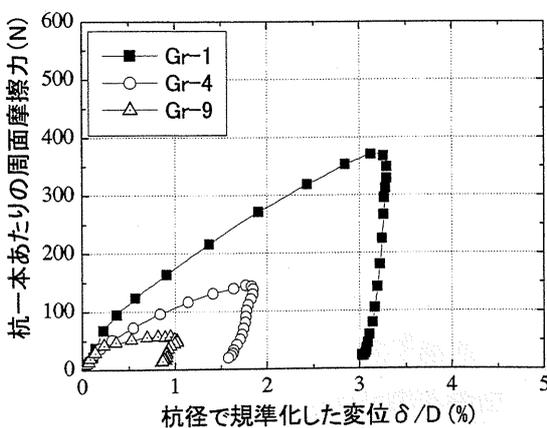


図-23 周面摩擦力 (STN-Gr)

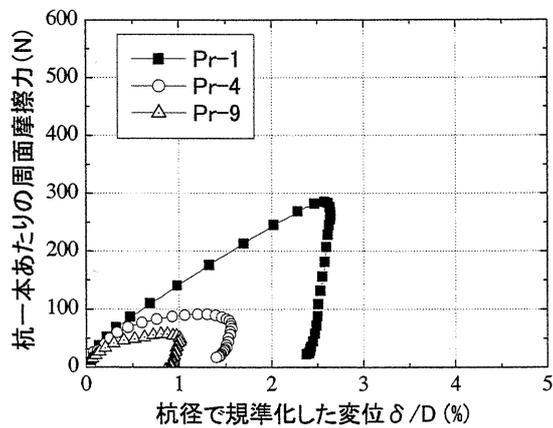


図-24 周面摩擦力 (STN-Pr)

### 3.5.3 全パターンにおける周面摩擦力の整理

図-25 に、全パターンの周面摩擦応力度と杭本数の関係を示す。ここで、周面摩擦応力度は変位 1.0 %における周面摩擦力を杭の周面積で除したものである。いずれのパターンでも杭本数が増えるにしたがって、ほぼ同様な周面摩擦応力度の低減が現れている。このことから、杭～杭の相互作用（周面摩擦力の低減）はラフトの支持荷重の有無や載荷速度よりも、杭本数に強く影響を受けることがわかる。

### 3.5.4 動的効果の検討

図-9 に示したように、杭本数が複数になっても除荷点法の適用性は保たれる。これは、複数杭を一質点とみなして除荷点法を適用した際に、動的効果を適切に取り除くことができることを意味する。図-26 に除荷点法によって算定した粘性係数  $C$  と杭本数の関係を示す。この図より、粘性係数は杭本数が増えるにしたがって増加していくことがわかる。また、Pr における粘性係数は Gr よりも大きい。このことから、周辺地盤の粘性係数  $C$  は基礎の形状（杭本数、ラフトの有無）に大きく影響を受けることがわかる。

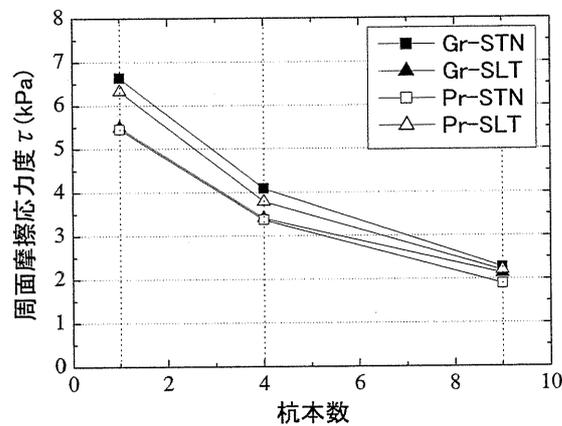


図-25 周面摩擦応力度～杭本数関係

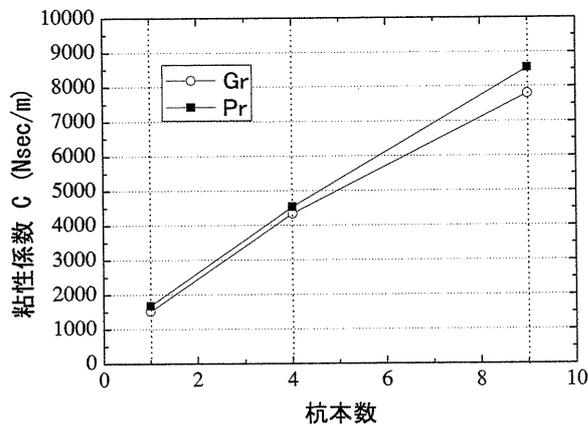


図-26 粘性係数-杭本数関係

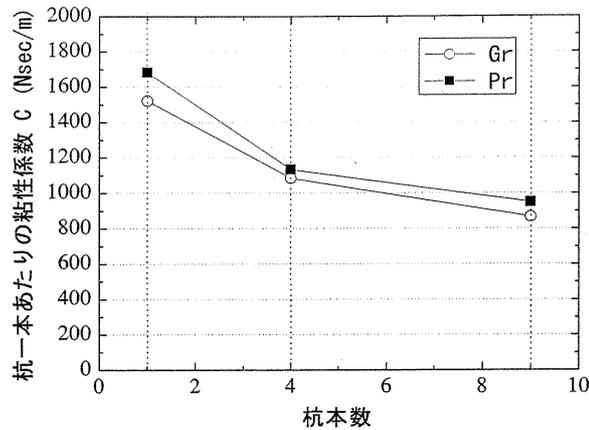


図-27 杭一本あたりの粘性係数-杭本数関係

図-27 に杭一本あたりの粘性係数  $C$  と杭本数の関係を示す。この図から、杭本数が増える  
と、杭一本あたりの粘性係数が減少している傾向が見られる。すなわち、複数杭の粘性係数  
は単杭の重ね合わせにはならないことが分かる。

### 3.6 ラフトの支持力分担

パイルド・ラフト基礎に STN 試験を実施することによって、ラフトの支持力分担を知ること  
ができれば、設計法を確認できるとともに、より合理的な設計をすることが可能になる。  
本模型実験では、STN 試験によりラフトの支持力分担をどの程度推定できるのかを調査する。  
また、実際の設計で用いられている簡易計算式の適用性を模型実験結果を用いて検討する。  
パイルド・ラフトにおけるラフトの支持力分担については、Clancy and Randolph<sup>15)</sup> が提案し  
た弾性論に基づくラフトと杭の相互作用を考慮した簡易な計算手法がある。この計算手法は  
杭～ラフトの相互作用の評価に Mindlin 解を用いた手法である。この簡易計算式を以下に示す。

$$\frac{P_r}{P_r + P_p} = \frac{(1 - \alpha_{rp})k_r}{k_p + k_r(1 - 2\alpha_{rp})} \quad (11)$$

ここに、 $P_r$ ：ラフトの支持荷重

$P_p$ ：群杭の支持荷重

$\alpha_{rp}$ ：杭とラフトの相互作用係数

$k_p$ ：群杭の平均的な沈下剛性

$k_r$ ：ラフトの平均的な沈下剛性

本研究では、模型実験結果を用いて、この計算手法の算定精度を検討する。ラフトと杭の相互作用係数 $\alpha_{rp}$ は杭本数、杭中心間隔、杭と地盤の剛性比などを考慮に入れて計算された定数<sup>1.6)</sup>であり、Pr-1では0.7、Pr-4、Pr-9では0.8を用いる<sup>1.6)</sup>。また、 $k_p$ はラフトが浮いた状態の模型群杭(Gr)におけるSLTから算出し、 $k_r$ はラフトのみ(Raft)に対するSLTから算出した。ここで、これらの模型実験における荷重～変位関係の変位1.0%における割線勾配を平均的な沈下剛性とした。これらの値と算出したラフトの支持力分担率を表-4に示す。

図-28(a)～(c)にラフトの支持力分担率を示す。模型実験結果から算出したラフトの支持力分担率とは、式(3)によって求めたラフトの支持荷重を、同一変位における載荷荷重で除して(式(11)の左辺と同様)百分率にしたものである。これらの図より、除荷点(最大沈下量を示す変位)において、STNとSLTは近い値を示しており、STNによってラフトの支持荷重をある程度推定することが可能であることがわかる。また、この図に簡易計算式(11)によって算出したラフトの支持力分担率を示す。これより、簡易算定式を用いて算出したラフトの支持荷重はSLTにおけるそれよりも小さく、ラフトの支持力の観点からは安全側の評価となっている。本研究では沈下剛性を模型実験結果から算出したが、実際の設計では群杭の沈下剛性を精度良く算出することは困難である。よって、急速載荷試験によってラフトの支持力分担を確認する方法がより有効であるといえる。

表-4 ラフトの支持力分担算定式に用いる定数

	Pr-1	Pr-4	Pr-9
相互作用係数 $\alpha_{rp}$	0.7	0.8	0.8
群杭の沈下剛性 $k_p$ (N/mm)	607	1633	2537
ラフトの沈下剛性 $k_r$ (N/mm)	274	1033	1613
ラフトの支持力分担率(%)	16.5	20.4	20.6

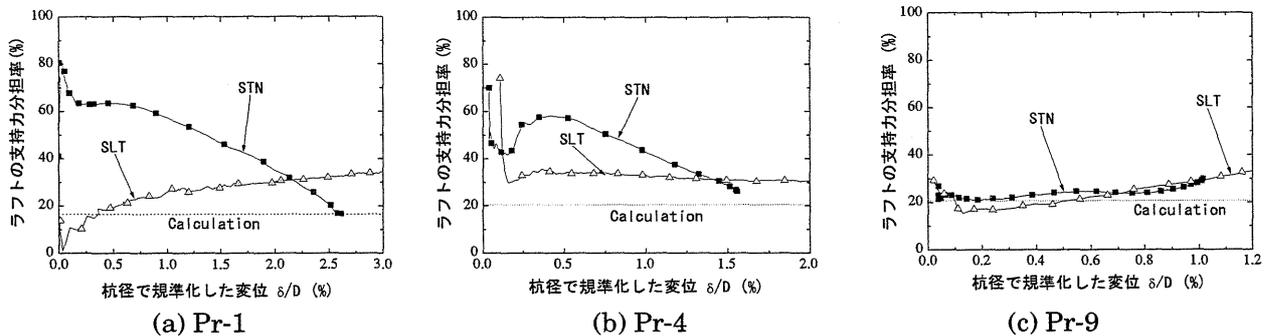


図-28 ラフトの支持力分担率 (Pr-STN, SLT)

## 第4章 結 論

群杭およびパイルド・ラフトに対して急速載荷模型試験と静的載荷模型試験を実施した。それらの結果をもとに群杭とパイルド・ラフトの鉛直支持力特性を検討し、得られた知見を以下に示す。

- (1) 全パターンに除荷点法を適用し、載荷初期の荷重-変位関係を算定した。それより、全ての群杭とパイルド・ラフトにおいて、除荷点法による算定結果は、十分精度が高いといえる。
- (2) 杭～杭の相互作用およびラフト～杭～地盤の相互作用を静的載荷と急速載荷についてそれぞれ検討した。その結果、杭本数が増えると杭一本あたりの周面摩擦力が減少するという傾向が、静的載荷と急速載荷の両方に現れることがわかった。また、杭～杭の相互作用（周面摩擦力の低減）はラフトの支持荷重の有無や載荷速度よりも、杭本数に強く影響を受けることがわかった。
- (3) 急速載荷試験によりラフトの支持力分担をどの程度推定できるのかを調べた。その結果、除荷点において、急速載荷と静的載荷のラフトの支持力分担率は近い値を示しており、急速載荷試験によってラフトの支持荷重をある程度推定することが可能であることを確認した。

本研究では、群杭およびパイルド・ラフトに対する急速載荷試験の適用性を検討した。その結果、周面摩擦力が降伏しない範囲の変位レベルにおいて、それらの基礎に対する急速載荷試験の適用性はかなり高いことがわかった。均質な砂地盤において行われた本模型実験の定性的な検討は、今後の群杭基礎、パイルド・ラフト基礎に対する急速載荷試験法確立への一つの材料になるものと考ええる。

本論文では、静的載荷については杭周面のすべりも考慮に入れて実験結果を検討した。一方で急速載荷においては周面摩擦力が降伏するまでの沈下量に限定して実験および考察を行った。そのため、次のステップとして、急速載荷における杭周辺地盤の塑性化や杭周面と地盤のすべりを考慮に入れた解釈法を確立する必要がある。今後は本実験を3次元動的FEMプログラム<sup>10)</sup>を用いて解析し、より詳細に鉛直支持力特性を考察していく予定である。同時に、本模型実験結果と解析結果を比較することによって本プログラムの実大基礎への適用を考える。

< Memo >

---

## 【参考文献】

- 1) 地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説，2002.
- 2) Bermingham, P. and Janes, M. : An innovative approach to load testing of high capacity piles, Proc. of the International Conference on Piling and Deep Foudations, London, pp.409-413, 1989.
- 3) 地盤工学会：杭の急速載荷試験法研究委員会：杭の急速載荷試験の載荷メカニズムと適用性, 1999.
- 4) 加藤一志，堀越研一，松本樹典，日下部治：杭のスタナミック試験結果の解釈法，土木学会論文集，No.624/III-47, pp.267-282, 1999.
- 5) Horvath, R. G. : STATNAMIC Load Tests on Drilled Shaft Foundations in Sand, Prepared for Berming-hammer Co. Ltd. (Report #9209), October, 1992.
- 6) Horvath, R. G., Bermingham, P. and Middendorp, P. : The equilibrium point method of analysis for the STATNAMIC loading test with supporting case histories, Proc. The Deep Foundation Conf., Pittsburgh, pp.18-20, 1993.
- 7) Nishimura, S. and Matsumoto, T. : Wave propagation analysis during statnamic loading of a steel pipe pile, Proc.of 1st Statnamic Seminer, pp.23-33, 1995.
- 8) 椿原康則，山下 清，加倉井正昭：場所打ちコンクリート杭の急速載荷試験例，土と基礎，Vol.43, No.5, pp.22-24, 1995.
- 9) 木村 亮，足立紀尚，Tirawat Boonyatee，吉田 敦：空気圧を用いた杭の急速載荷模型装置の開発，第33回地盤工学研究発表会講演集，pp.137-138, 1998.
- 10) Kimura, M. and Tirawat, B. : Statnamic load test on model piles and their 3D-elastoplastic FEM analyses, Soils and Foundations Vol.42, No.1, pp.71-87, 2002.
- 11) 中井直人，国府田誠，佐藤秀人，山下利夫，斎藤英明，笹沼美和，田村昌仁：群杭の鉛直支持力に関する実験的研究，第36回地盤工学研究発表会講演集，pp.1629-1630, 2001.
- 12) 山下 清，堀越研一：解析による群杭およびパイルド・ラフトの荷重～変位特性の評価方法（その1），講座「杭基礎の鉛直荷重～変位特性の評価法入門4」，土と基礎，Vol.47, No.12, pp.55-60, 1999.
- 13) Burland, J. B., Broms, B. B. and de Mello, V. F. B. : Behavior of foundations and structures on soft ground, Proc.9th ICSMFE, Tokyo, Vol. 2, pp.495-546, 1977.
- 14) 小坪清真，高西照彦，成富 勝：杭周面のすべりを考慮した杭基礎の鉛直方向群杭効率，土木学会論文集，No.374/ I -6, pp.567-574, 1986.
- 15) Clancy, P. and Randolph, M. F. : Simple design tools for piled raft foundations, Géotechnique, Vol.46, No.2, pp.313-328, 1996.
- 16) Clancy, P. and Randolph, M. F. : An approximate analysis procedure for piled raft foundations, Int. Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol.17, pp.849-869, 1993.