

## 節付き場所打ち杭の鉛直載荷試験と沈下挙動解析

鈴木直子 関 崇夫 須藤敏己

(本社特殊工法部)

福本義之 西村勝尚

(大阪本店構造設計部)

(大阪本店構造設計部)

### Vertical Load Test and Settlement Analysis of Cast-in-Place Concrete Nodular Piles

Naoko Suzuki Takao Seki Toshimi Sudo  
Yoshiyuki Fukumoto Katsuhisa Nishimura

#### Abstract

This paper describes full-scale pile load tests and 3D FEM settlement analyses of cast-in-place concrete nodular piles used in the design of a high-rise building's foundation. The nodular piles had bulbs on their shafts in order to increase pile resistance. Pile load tests were carried out at the site of the high-rise building. The purpose of the tests was to confirm the settlement behavior of single nodular pile and the resistance of the bulb. Given the settlement behavior of the bulb, we attempted to normalize the relationship between the bearing pressure and the settlement. Furthermore, 3D FEM analyses were conducted on pile group under sustained loading and earthquake loading. These analyses were based on the simulation analyses of the pile load tests. We analytically examined the behavior of the pile group foundation and the influence of pile group effect on resistance of the bulb.

#### 概要

超高層建物を支持する基礎として、柱軸力が大きなエリアに節付き場所打ち杭(節付き杭)を配置した杭基礎を採用した。節付き杭は、杭の軸部を拡幅して節を設けることによって、杭の支持力および引抜き抵抗力の増加を図った杭である。節付き杭の建物への適用にあたっては、建設地において実大の節付き杭を用いて鉛直載荷試験を実施し、その沈下挙動と節部抵抗力を確認した。節部抵抗力に関しては、鉛直載荷試験の結果に基づき、節部抵抗力～変位関係の評価法を提案した。さらに、単杭としての節付き杭の鉛直載荷試験の挙動をFEMで良好にシミュレートできることを確認した上で、同手法を適用した常時および大地震時における群杭基礎の沈下挙動解析を行い、基礎全体の挙動および群杭効果が節部抵抗力に与える影響について解析的に検討した。

#### 1. はじめに

近年、建物の超高層化によって建物の基礎に作用する常時および地震時荷重は増加傾向にあり、基礎には大きな抵抗力が要求されている。これに対応して、Photo 1に示すような、場所打ち杭の軸部に節を設けることにより、杭の支持力および引抜き抵抗力を増大させた節付き場所打ち杭(以下、節付き杭)が開発されている<sup>1) 2)</sup>。

節付き杭の節部抵抗力に関しては、既往の研究<sup>3) 4)</sup>において模型実験に基づく極限抵抗力の理論式や実用的な評価式が提案されているものの、節部抵抗力～変位の関係式には言及されていない。

超高層建物を支持する杭基礎の沈下挙動に関しては、群杭基礎として検討した事例報告は、常時荷重に対しては既に多くなされている。しかし、杭に押し込みおよび引抜き荷重が作用する地震時挙動については、実施設計では支持力や引抜き抵抗力の強度の検討が一般的であり、群杭として検討した例は少ない<sup>5)</sup>。

そこで本報では、超高層建物を支持する基礎として、

柱軸力が大きなエリアに節付き杭を用いた群杭基礎を採用した実物件について、①建設地で実施した実大杭を用いた節付き杭の鉛直載荷試験、②鉛直載荷試験のシミュレーション解析、③鉛直載荷試験の結果に基づく節部抵



Photo 1 節付き場所打ち杭<sup>2)</sup>  
Cast-in-Place Concrete Nodular Pile

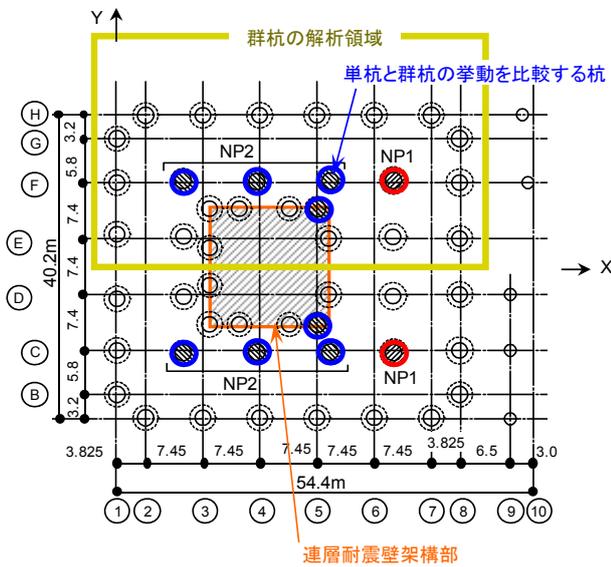
抗力～変位関係の評価法の提案, ④常時および地震時荷重に対する群杭基礎の沈下解析について示す。

鉛直載荷試験は、建設地である大阪地域の代表的な沖積および洪積砂礫層の両方で節部抵抗力を確認することを目的とし、節部を沖積砂礫層に設けた杭に対する交番試験と、節部を洪積砂礫層に設けた杭に対する引抜き試験を行った。

群杭解析は3次元非線形FEMを用いて、群杭効果と基礎梁の荷重再配分効果を考慮した沈下挙動を把握するために実施した。解析モデルは、単杭としての試験杭の挙動をFEMで良好にシミュレートできることを確認した上で、単杭の解析に準じて設定した。この際、群杭効果が節部抵抗力に与える影響についても検討した。

## 2. 建物・地盤概要と基礎構造の計画

杭配置図をFig. 1, 建物の断面図をFig. 2に示す。建物は地上45階、地下1階の鉄筋コンクリート造の超高層集合住宅である。平面形状は40m×45mの矩形で、軒高は148m, 建物の高さ幅比は3.3～3.7, 基礎底面における平均荷重密度は528kN/m<sup>2</sup>である。建物は、中央に吹抜けのあるロの字型平面の主体架構と、吹抜け内にある剛性の高い連層耐震架構で構成され、2つの架構は制振装置で連結されている。このように一つの建物内に剛性の異なる二つの構造体を構築し、両構造体を制振装置で連結する制振



記号	名称	軸径(m)	節部径(m)	拡底径(m)
	節付き拡底杭 (NP1)	2.2	3.2	3.6
	節付き拡底杭 (NP2)	2.2	3.2	3.2
	拡底杭	2.1~2.2	-	3.3~3.6
	ストレート杭	1.6	-	-

Fig. 1 杭配置図  
Pile Location Plan of Building

構造システムはデュアルフレームシステム(Dual Frame System)と称する大林組の制振技術の一つである<sup>6)</sup>。

地層構成図と、実際の建物で用いた杭の設置深度をFig. 3に示す。地盤は、地表面から深さ25m付近まで砂礫層が主体の沖積層で、その下に層厚10m程度の砂質土の段丘層があり、それ以深は調査深度の76mまで粘性土と砂質土の互層からなる大阪層群が堆積している。拡底杭の先端は、42m～52m以深に傾斜して堆積するN値50以上の砂質土層(Os2層)である。この支持層は建物の平面範囲で10m程度傾斜しており、杭先端深度もこれに合わせて異なっている。節付き杭は、常時および地震時に大きな杭頭荷重が作用する10カ所に配置した(Fig. 1)。節部の設置深度は、押し込み荷重に対して節部抵抗力を十分に発揮

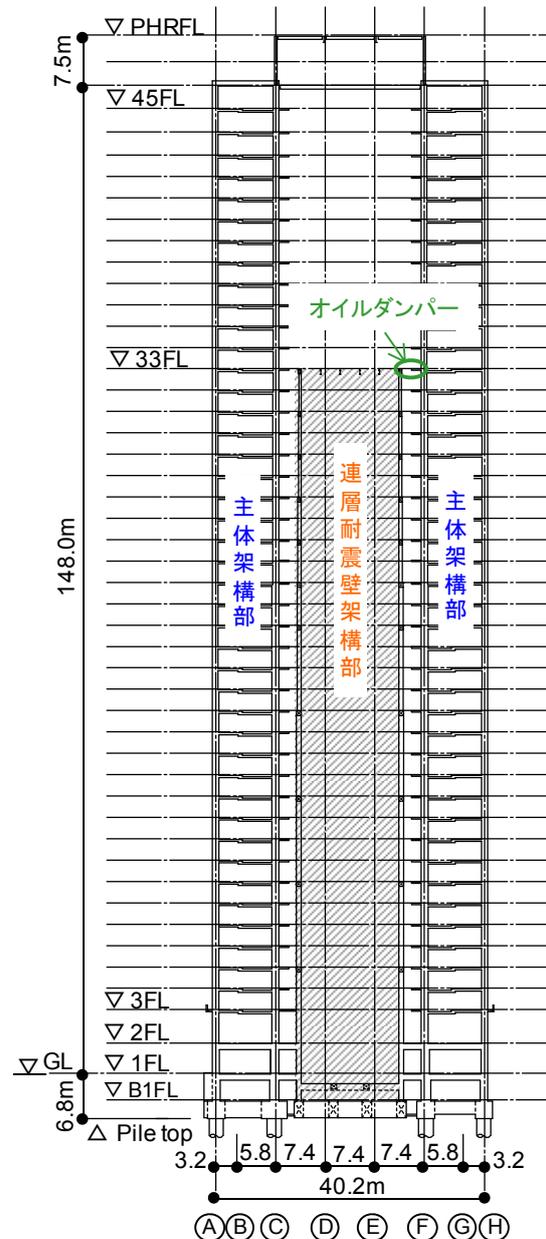


Fig. 2 建物の断面図  
Cross Section of Building

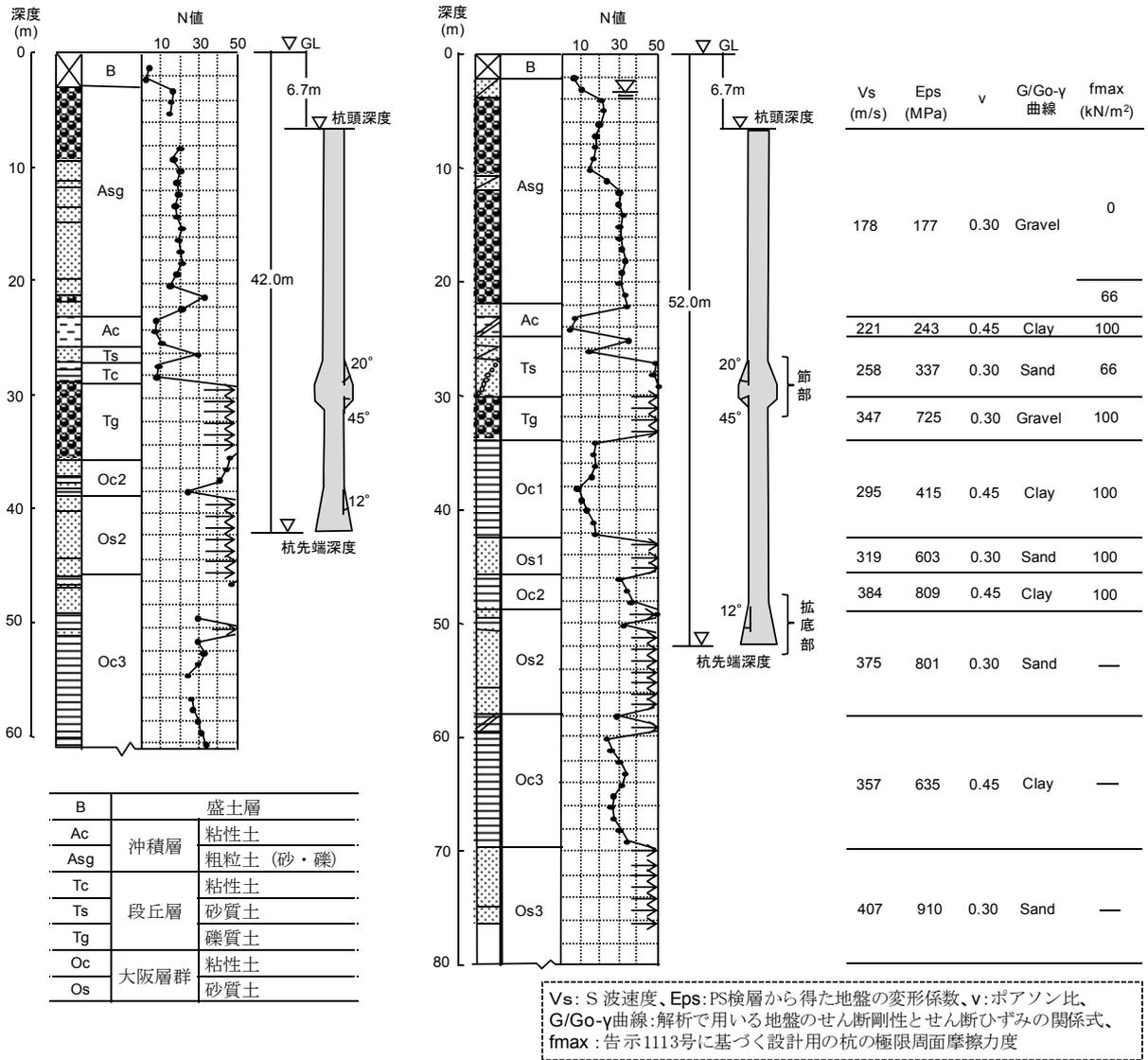


Fig. 3 地層構成図と建物で使用した節付き杭の設置深度  
Soil Profile, Soil Properties and Installed Depth of Nodular Piles in Building

させるため、節部底面を深さ30m付近のN値40~50の段丘層(Tg層)とした。

### 3. 節部抵抗力の評価法

節部抵抗力の評価方法として、節部の水平投影面積であるリング状の支圧面を想定し、支圧面における単位面積あたりの抵抗力を支圧力度として評価する方法を用いた<sup>7)</sup>。評価法の模式図をFig. 4に、評価式を式(1)に示す。

$$P_v = p_v \times A_v \quad (1)$$

$P_v$ : 節部支圧力

$p_v$ : 節部支圧力度

$A_v$ : 支圧面積

押し込み荷重時と引抜き荷重時の節部抵抗力は、荷重方向の影響に関係なく同等とみなし、式(1)で評価した。引抜き荷重時の拡底部の抵抗力についても、節部の引抜き

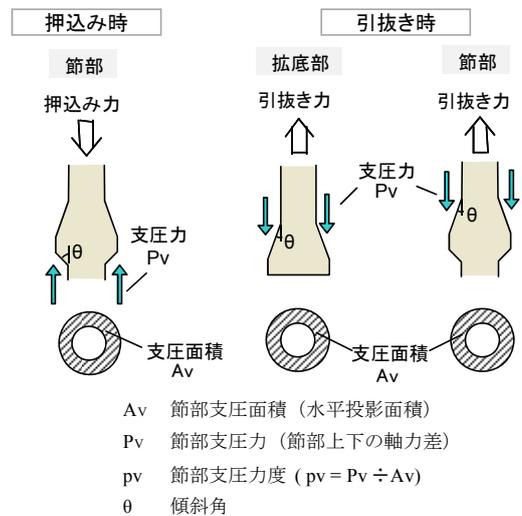


Fig. 4 支圧力度による節部抵抗力の評価法  
Evaluation Method of Bearing Pressure

抵抗力と地盤の支持機構が同じであるので、節部の引抜き抵抗力と同一として式(1)で評価した。なお、押し込み時の拡底部の先端支持力は、一般の場所打ち杭と同様、国土交通省告示1113号(平成13年)に基づき評価した。

#### 4. 節付き場所打ち杭の鉛直載荷試験とシミュレーション解析

##### 4.1 鉛直載荷試験の概要

**4.1.1 試験杭** 試験杭は、鉛直交番載荷試験用と引抜き試験用の2種類である。各杭の仕様をFig. 5に、最大試験荷重をTable 1に示す。

交番試験杭は、節部をN値が20程度の沖積砂礫層に、杭先端をN値が40程度の洪積砂礫層に支持させ、押し込み時には節部と杭先端部の抵抗力の発現状況を調査した。地表面から深さ11m付近までフリクションカット用のケーシングを設置し、表層のゆるい沖積層の影響を除去し

た。なお、沖積砂礫層は削孔後に孔壁が崩れやすい地盤で、試験結果の整理とシミュレーション解析では、施工時に生じた孔壁の崩れを考慮した径を用いた(Fig. 5)。

引抜き試験杭は、実際に建物で用いる節付き杭と同様、節部をN値が45前後の洪積砂礫層に設置した。杭長は、計画荷重の範囲内で節部の最大抵抗力を確認できるように、6.8mと短めに設定した。したがって、GL-25.7mを杭頭とし、杭頭以浅には試験杭を引っ張るためのPC鋼棒と、それらを保護するゲル化した安定液を満たしたケーシングを孔壁崩壊の防止とフリクションカットの目的で設置した。

**4.1.2 試験方法** 試験方法は、地盤工学会の「杭の鉛直載荷試験方法・同解説(平成14年)」に準拠した。荷重サイクルをFig. 6に示す。荷重方法には多サイクルの段階荷重を採用しており、荷重途中で繰返し荷重および4日間の長期荷重を行った。

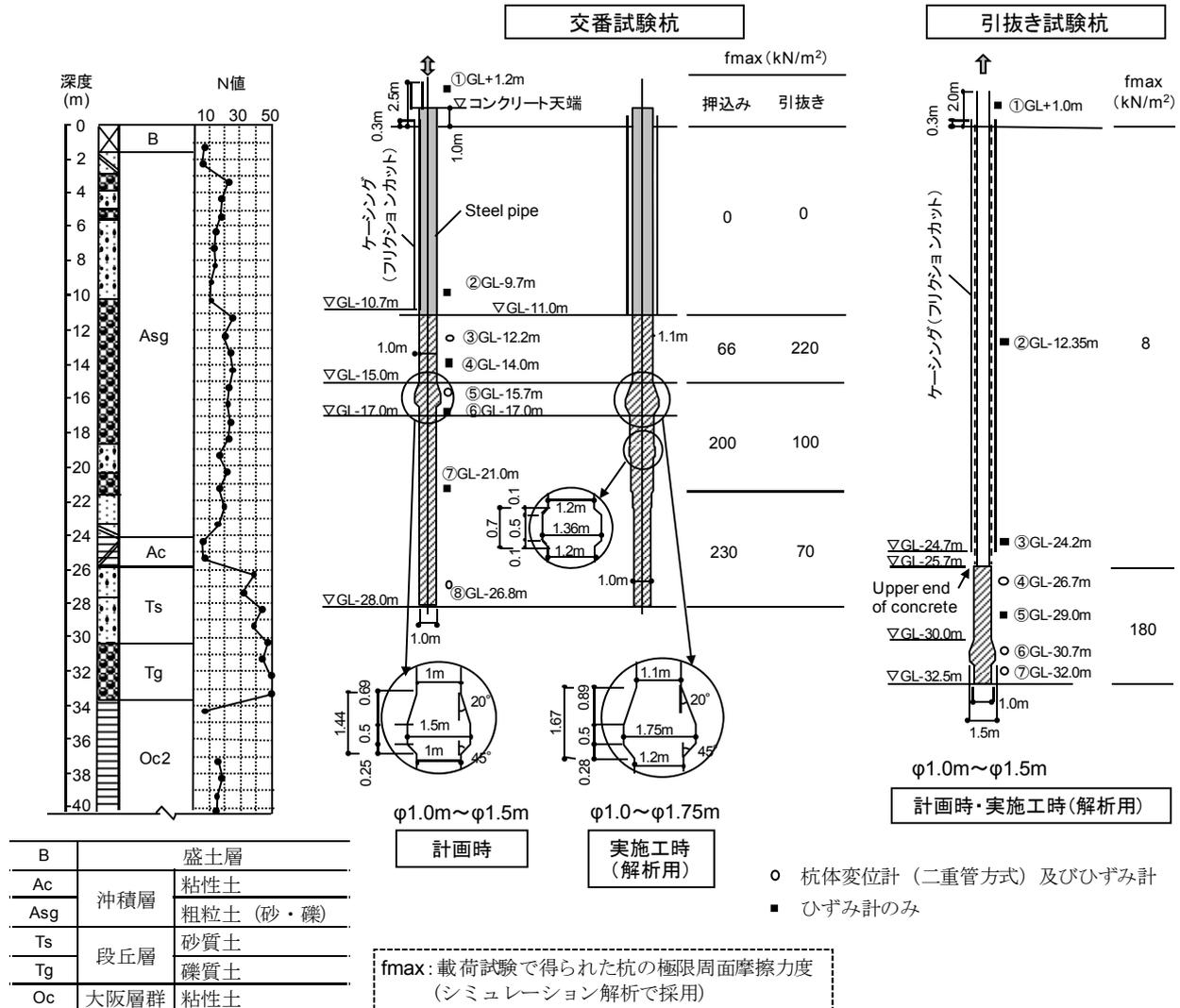


Fig. 5 地層構成図と試験杭の設置深度

Soil Profile, Soil Properties and Installed Depth of Nodular Piles in Load Tests

Table 1 試験杭の仕様および最大荷重  
Specifications of Test Pile and Maximum Load

	軸部径(m)	節部径(m)	杭頭深度(m)	杭先端深度(m)	最大押込み荷重(kN)	最大引抜き荷重(kN)
交番試験杭	1.0	1.5	11.0	28.0	16,000 (9,000)*	9,990 (5,500)*
引抜き試験杭	1.0	1.5	25.7	32.5	—	10,000 (5,000)*

(\*試験前の想定最大抵抗力)

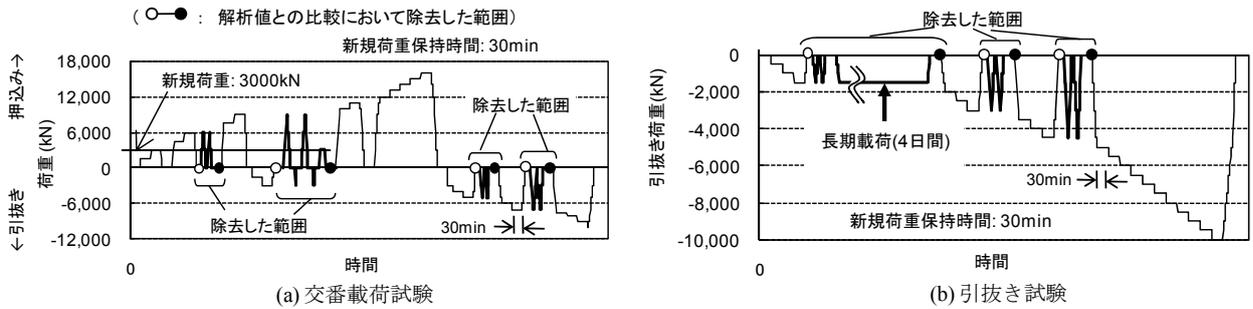


Fig. 6 載荷試験の荷重サイクルと解析対象範囲

Load-Time Relationship of Load Tests and excluded Range for Comparison with Analysis Result

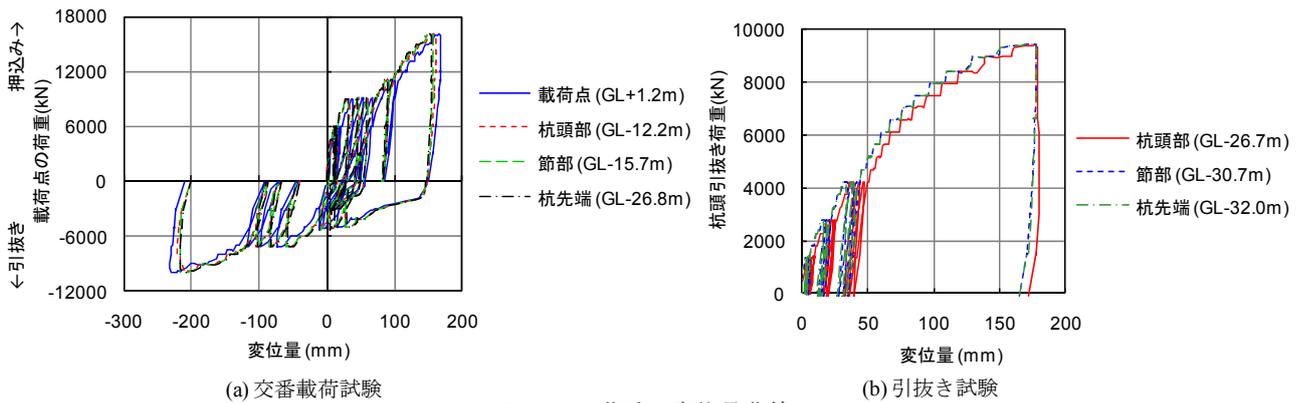


Fig. 7 荷重～変位置曲線

Relationship between Load and Displacement of Each Part

4.1.3 試験結果 鉛直交番載荷試験と引抜き試験から得られた載荷点の荷重～杭体各部の変位の関係をFig. 7に示す。両試験で実測された最大荷重は、試験前の想定最大荷重の約2倍であった(Table 1)。これは、杭軸部において孔壁の崩れなどの影響により想定よりも大きな周面摩擦力が発揮されたこと、実際の節部抵抗力が想定よりも大きかったことによる。

両試験で得た最大支圧力 $p_v$ と節部支持層の平均 $N$ 値との関係を、過去に実施された拡底部の引抜き試験結果とともにFig. 8に示す。Fig. 8より、設計で用いる砂質土における極限節部支圧力 $p_{vu}$ は、試験で得た最大支圧力 $p_v$ の下限值を与える次式で評価する。

$$p_{vu} = 100N (N \leq 60, p_{vu} \leq 6000 \text{ kN/m}^2) \quad (2)$$

ここに、 $N$ は節部付近の平均 $N$ 値である。

なお、杭の軸力分布に対する繰返し載荷や長期載荷の影響は微小であった。その他の試験結果は、解析結果と

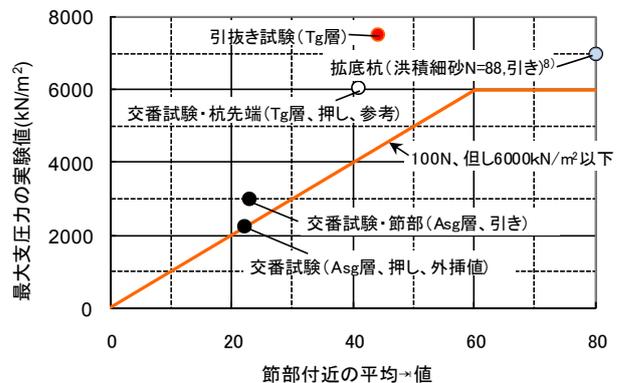


Fig. 8 最大支圧力～ $N$ 値関係 (砂質土)  
Relationship between Maximum Bearing Pressure and  $N$ -Value (Sand)

ともに4.2節に示す。

## 4.2 鉛直載荷試験のシミュレーション解析

**4.2.1 解析モデル** 解析モデルをFig. 9に示す。解析は、汎用FEMソフトSoilPlus<sup>9)</sup>を用いて実施した。後に単杭のシミュレーション解析に準じて大規模な群杭解析を実施するため、解析モデルは1/4対称モデルとし、メッシュ粗さは群杭解析と同程度とした。地盤は非線形ソリッド要素で、初期変形係数はPS検層から得た微小ひずみレベルにおける変形係数Eps、地盤のひずみ依存性は建築学会基礎指針のG/Go $\sim$  $\gamma$ 関係<sup>10)</sup>を用いた。杭は、押し込み時は線形ソリッド要素、引抜き時は、実験値から求めたコンクリートのひび割れを考慮した応力 $\sim$ ひずみ関係<sup>11)</sup>を設定した非線形ソリッド要素とした。杭の軸径および節部径は、計画時と実施工時の寸法の差異を吟味し、交番試験時は実施工時、引抜き試験時は計画時の値を採用した(Fig. 5)。ただし、引抜き試験杭の地表面から杭頭の間は、PC鋼棒のみでコンクリートが打設されていないため、PC鋼棒と等価な軸剛性となる密実な弾性ソリッド要素とした。杭周面の摩擦抵抗は、杭周面に最大周面摩擦力度に達したとき滑りを生じるインターフェース要素を設け、最大周面摩擦力度 $f_{max}$ はFig. 5に示す載荷試験結果で得た値とした。周面摩擦力度と杭 $\sim$ 地盤間の変位量の関係( $f-\delta$ 曲線)は、交番試験時は剛塑性としたが、引抜き試験時ではGL-26.7m $\sim$ GL-29.0mの区間において、実験値の $f-\delta$ 曲線の形状がやや特異で最大摩擦力度到達時の変位が180mmと非常に大きいため、これを模擬するためにバイリニア型とした。節上下傾斜部のインターフェース要素は、押し込み時には節上傾斜部、引抜き時には節下傾斜部の剥離を考慮し、杭先端も引抜き時には剥離するよう設定した。

解析における荷重ステップは最大荷重までの漸増荷重で、交番試験の押し込み時と引抜き時については、それぞれ荷重ゼロの状態を初期状態として個別に解析した。

**4.2.2 実験値と解析値の比較** 鉛直交番載荷試験と引抜き試験について実験値と解析値を比較した結果をFigs. 10 $\sim$ 15に示す。杭頭荷重 $\sim$ 変位関係および支圧力度 $\sim$ 変位関係のシミュレーションでは、繰返し載荷に伴う変位の増加を評価することが難しいため、実測結果から繰返しの影響を除去した修正曲線を解析値の比較対象とした(Fig. 6)

Fig. 12の鉛直交番載荷試験の軸力深度分布と軸力 $\sim$ 変位曲線では、引抜き側は荷重が大きくなるにしたがって軸部上下の軸力差が大きく、明確に節部抵抗力が発現していることがわかるが、押し込み側において実験値のGL-15m以深の軸力分布がほぼ直線で節部効果が明確ではない。これは節部以深において、孔壁の崩れで形成された突起の影響で最大押し込み荷重時には220kN/m<sup>2</sup>と大きな周面摩擦力が発揮されたことが原因と考えられる。解析ではその突起も忠実に再現した杭形状を用いたところ、

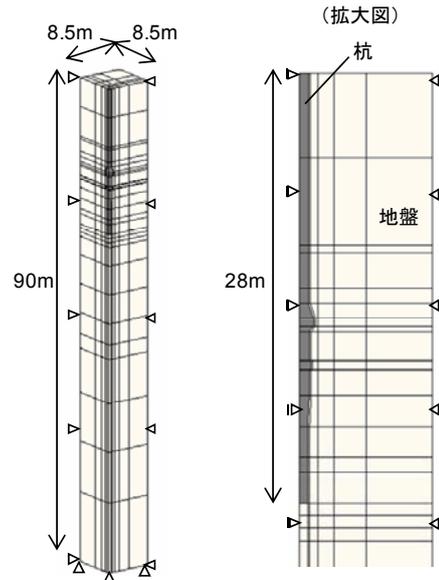


Fig. 9 鉛直交番載荷試験の解析モデル図  
FEM Model for Simulation Analysis of Compressive and Tensile Load Test

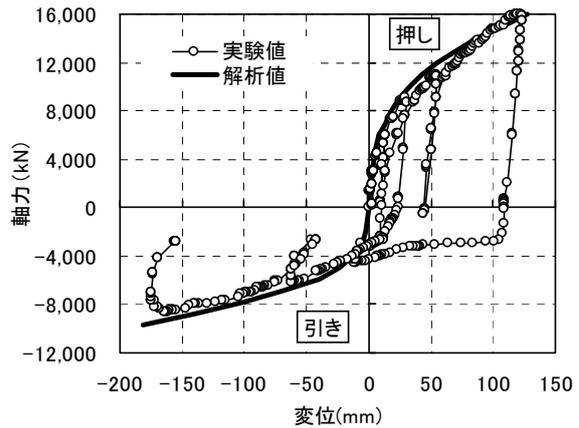


Fig. 10 杭頭軸力 $\sim$ 杭頭変位曲線 (交番載荷試験)  
Axial Force versus Displacement at Pile Head : GL-10m  
(Compressive and Tensile Test)

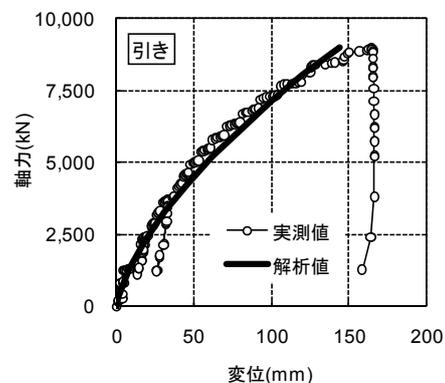


Fig. 11 杭頭軸力 $\sim$ 杭頭変位曲線 (引抜き試験)  
Axial Force versus Displacement at Pile Head  
(Tensile Test)

実験値と解析値が良好な対応を示した。一方、鉛直交番載荷試験の節部の支圧力度～変位曲線に関しては、引抜き時に節部の支圧力度が小さな部分で実験値の支圧力度が解析値よりも小さい(Fig. 14)。これは、交番試験とはいえ、引抜き载荷の大半が杭の大変位を生じるまで押込んだ後になされたため、押込み時の節部周辺の地盤の乱れが引抜き時の挙動に影響を与えたと推測されるが、解析ではその影響を考慮できないことが原因と考えられる。これに対して、一方向の引抜き試験杭では、軸力深度分布、軸力～変位曲線、節部の支圧力度～変位曲線において実験値と解析値は概ねよく対応している(Fig. 11,13,15)。引抜き試験の軸力深度分布では、GL-29m～32mの節部区間を、軸部と同様に区間の軸力差を軸部表面積で除した周面摩擦力度として評価した場合、軸部と節部はほぼ同一の洪積砂礫層に位置するものの、節部の周面摩擦力度は軸部の約5倍と著しく大きい値となった。

### 5. 節部抵抗力と変位関係の評価法

正規化された既往の場所打ち杭の先端支持力と沈下量の関係<sup>1)2)13)</sup>をFig. 16に示す。節付き杭の引抜きでは、軸部の存在により地盤に対してリング状の载荷となる点で、円形载荷となる杭先端の押し込みと差異がある。しかし、ここでは、上述の提案で採用している先端支持力度、先端沈下量の正規化手法を下記のように拡底部・節部の支圧力度と変位の関係に準用した検討を試みた。

支圧力度比( $p/p_u$ )～変位量比( $S/D$ )の関係

$p$  : 拡底部・節部の支圧力度( $\text{kN}/\text{m}^2$ )

$S$  : 拡底部・節部の変位( $\text{mm}$ )

$D$  : 拡底径または節径( $\text{mm}$ )

$p_u$  : 拡底部・節部の極限支圧力度( $\text{kN}/\text{m}^2$ )で、 $S$ が $D$ の10%に達するときの支圧力度

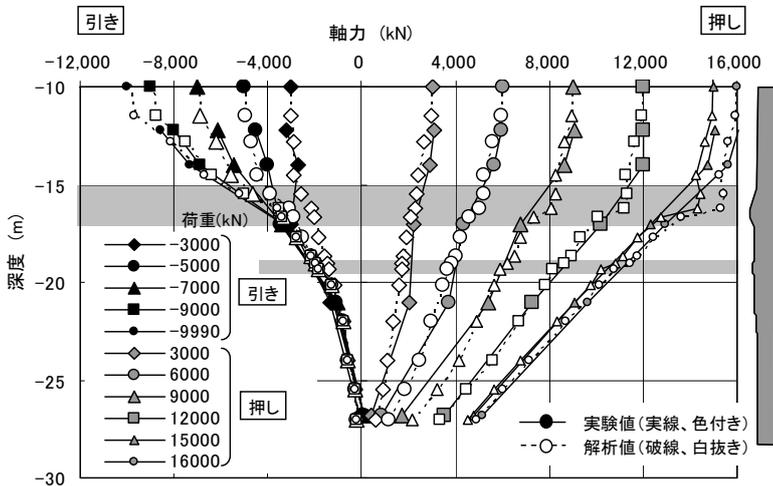


Fig. 12 軸力深度分布図 (交番載荷試験)  
Distribution of Axial Forces of Pile with Depth  
(Compressive and Tensile Test)

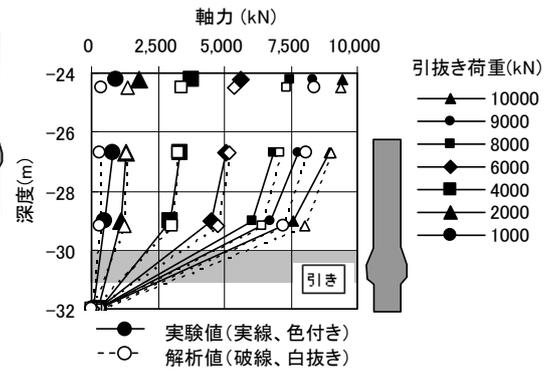


Fig. 13 軸力深度分布図 (引抜き試験)  
Distribution of Axial Forces of Pile with  
Depth (Tensile Test)

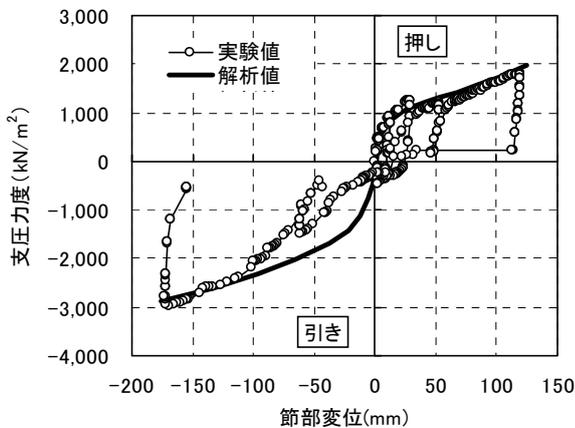


Fig. 14 節部支圧力度～節部変位曲線 (交番載荷試験)  
Bearing Pressure versus Displacement of Bulb  
(Compressive and Tensile Test)

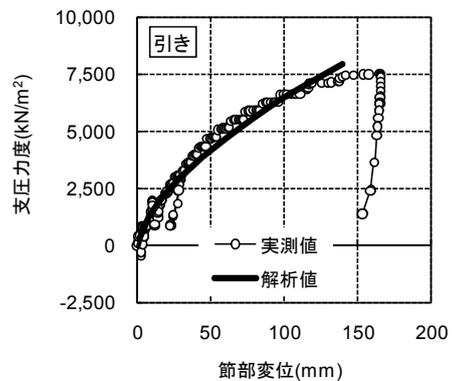


Fig. 15 節部支圧力度～節部変位曲線 (引抜き試験)  
Bearing Pressure versus Displacement of Bulb  
(Tensile Test)

検討は、4.1節で示した2つの鉛直載荷試験のうち次の2ケースについて行い、検討結果をFig. 16に示した。

- a) 鉛直交番載荷試験の試験結果のうち、押し込み時の支圧力度～変位曲線
- b) 引抜き試験における支圧力度～変位曲線

なお、節部を設置した地層は、ケース(a)は沖積砂礫層、ケース(b)は洪積砂礫層である。

ケース(a)については、節部最大変位Sが節部径の10%(175mm)に達していないため、 $S=175\text{mm}$ における支圧力度を2次式で近似して算定した。

Fig. 16において、ケース(a)の曲線では、 $S/D=0.35$ の時に繰返し載荷の影響と思われる折れ曲がりが生じている。しかしながら、ケース(a) (b)ともに、既往の杭先端の支圧力度比～変位量比に関する既往の3つの関係式の範囲に概ね位置している。このことから、節部における支圧力度比～変位量比の関係は、既往の場所打ち杭の先端における支持力度比～変位量比の正規化手法を準用して評価できると考えられる。

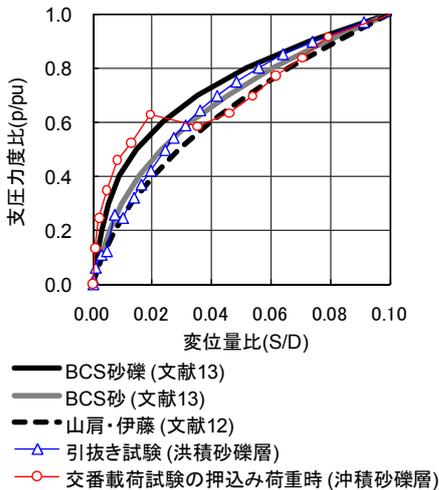


Fig. 16 節部支圧力度比～変位量比の関係式  
Normalized Relationship between Bearing Pressure and Pile Displacement

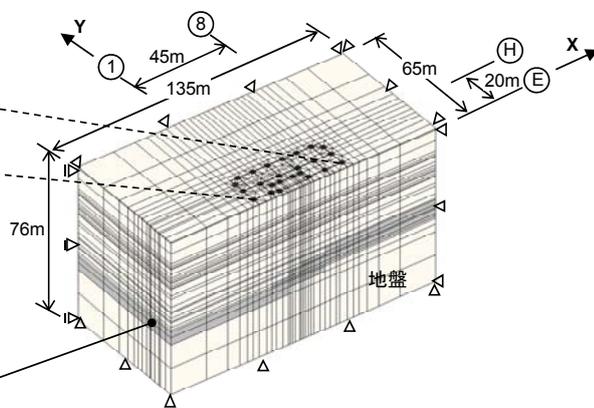
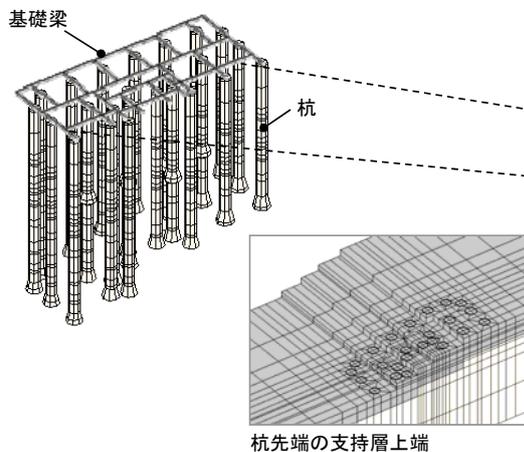


Fig. 17 群杭解析のモデル図  
FEM Model of Pile Group Foundation and Ground

## 6. 常時および大地震時における群杭基礎の沈下挙動解析

4.2節で示したように、単杭の載荷試験結果を三次元非線形FEM解析によって概ね良好にシミュレートできた。そこで、同手法をFig. 1, Fig. 3に示した実構造物の杭配置および地層構成に適用し、群杭基礎の常時および大地震時における即時沈下解析を行った。

### 6.1 解析モデル

群杭解析のモデル図をFig. 17に示す。建物の平面形状がほぼ対称であることから、1/2対称モデルを用いた。杭先端の支持層の上端深度は、実情に合わせて⑧通りから①通りに向かってGL-42m～52mと徐々に深くした。

地盤は、載荷試験のシミュレーションと同様の非線形ソリッド要素とした。

杭は線形ソリッド要素とした。これは、大地震時には建物中央部に引抜き荷重が作用するものの、基礎梁による荷重の再配分効果によって荷重が均され、杭体にひび割れが生じるような引張応力が作用しないとの判断による。なお、この判断が妥当であることは後述の解析において確認している。基礎梁は弾性のビーム要素とし、曲げ剛性とせん断剛性には、地下階耐震壁の剛性も考慮した。基礎梁と地盤の間にはインターフェース要素を設けて地盤と基礎梁を切り離し、基礎梁から地盤に荷重が伝達しないようにした。

杭周面の摩擦抵抗は、杭周面に最大周面摩擦力度 $f_{max}$ に達したとき滑りを生じるインターフェース要素を設け、 $f-\delta$ 曲線は剛塑性とした。 $f_{max}$ は、Fig. 3に示す国土交通省告示1113号(平成13年)に基づく設計値とした。設計では、大地震時に液状化の可能性のあるGL-20mまでの砂礫層の周面摩擦力を無視しているため、群杭解析においても常時荷重時・地震時ともにこの層の周面摩擦力は無視した。節上下傾斜部と拡底部のインターフェース要素は、

面に垂直に作用する応力に応じて剥離するように設定した。

荷重条件は常時および大地震時の2ケースで、大地震時の荷重も静的荷重として扱った。なお、ここでいう大地震時とは、極めて稀に発生する地震動時より大きな変形を生じる架構設計変形時を対象としており、解析に用いる加力方向は、最も大きい杭頭軸力が発生するX+方向を採用した。大地震時の杭頭荷重は、杭の無い上部架構の解析モデルにおいて、杭頭位置に設置したピン支点に生じる反力とした。その際、水平外力は多質点モデルを用いた非線形の地震応答解析から評価した。地震応答解析から得た等価な水平荷重および転倒モーメントは77.5MNと3945.7MNm、層せん断力係数 $C_i=0.091$ である。

杭頭荷重分布図をFig. 18に示す。大地震時における負の値は引抜き荷重を示している。本建物の構造上、大きな地震時軸力は建物中央の連層耐震壁架構部に作用することがわかる。

### 6.2 解析結果

杭頭変位分布図をFig. 19に示す。沈下分布は杭頭荷重の平面的なばらつきによらず、基礎梁による荷重再配分効果で滑らかな形状で、常時および大地震時ともに全ての杭で沈下を生じている。杭頭軸力の杭頭荷重に対する比をFig. 20に示す。杭頭荷重は基礎梁の上から作用させる荷重、その解析で杭頭に発生する軸力が杭頭軸力である。常時と大地震時のいずれも、耐震壁を含む基礎梁の剛性が大きな建物中央部付近において値が-0.7~1.5と、荷重の再配分効果が大いことがわかる。特に大地震時は、その比が負の値となっており、杭頭荷重が引抜き側にも関わらず杭頭軸力は押し込み側に転じている。このような荷重の再配分によって、すべての杭で杭頭軸力が押し込み側となり、杭の浮上りが生じなかったと考えられる。

なお、最大沈下量および最大変形角は、常時で24mmと1/1780、大地震時で38mmと1/690となった。

### 6.3 群杭効果

節部抵抗力への群杭効果の影響程度を把握するため、節付き杭が単独に存在し単杭として挙動するときの軸力深度分布および杭頭荷重~沈下量曲線(P- $\delta$ 曲線)を別途FEMによって求め、群杭解析における結果と比較した。比較対象とする群杭解析における杭は、Fig. 1に示す建物中央部の節付き杭(以下、比較対象杭)である。単杭の解析における杭頭荷重は、群杭の解析から得られた比較対象杭の杭頭軸力と同一の値とし、常時と大地震時、それぞれについて軸力深度分布を求めた。

比較対象杭における軸力深度分布の単杭と群杭の比較結果をFig. 21に示す。当初、建物中央部は最小杭間隔が節部径の1.2倍と近接しているため、節付き拡底杭の節部の抵抗力が発揮されないことが懸念された。しかし、群

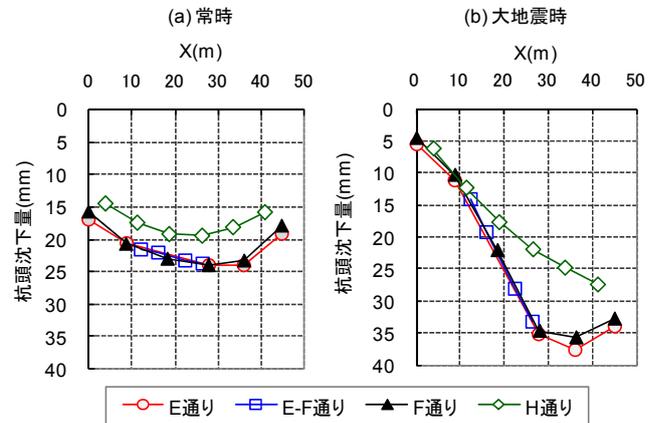


Fig. 19 杭頭沈下量分布図  
Distributions of Displacement at Pile Top

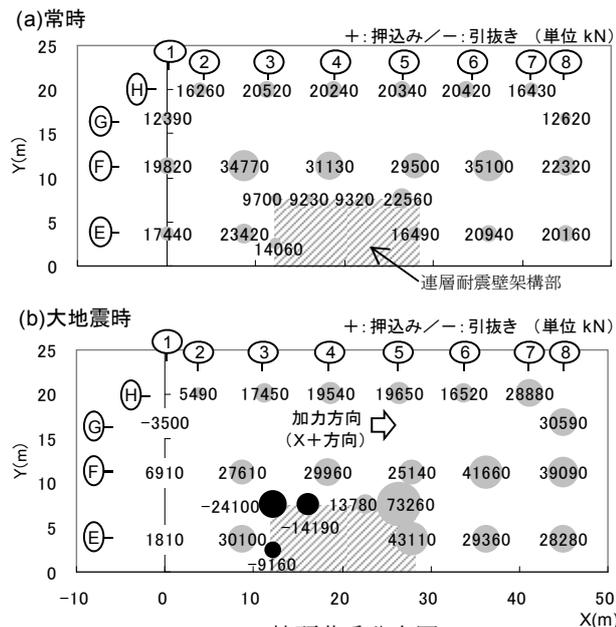


Fig. 18 杭頭荷重分布図  
Distributions of Load at Pile Top

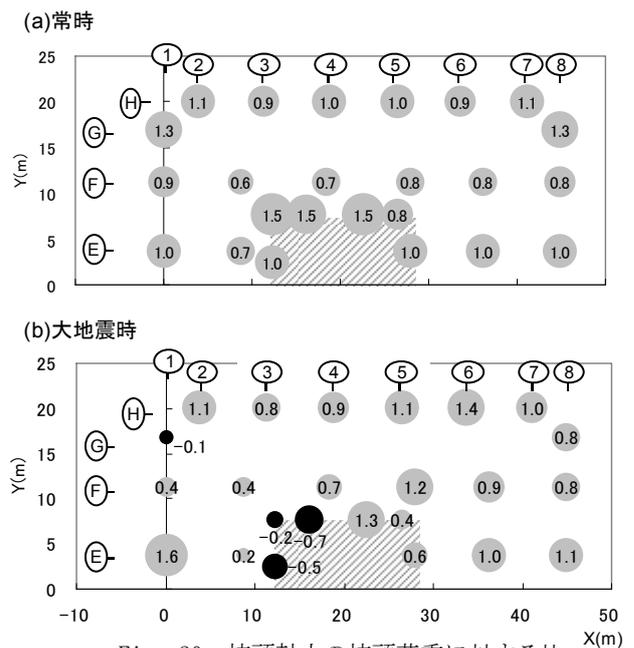


Fig. 20 杭頭軸力の杭頭荷重に対する比  
Ratio of Axial Force to Load at Pile Top

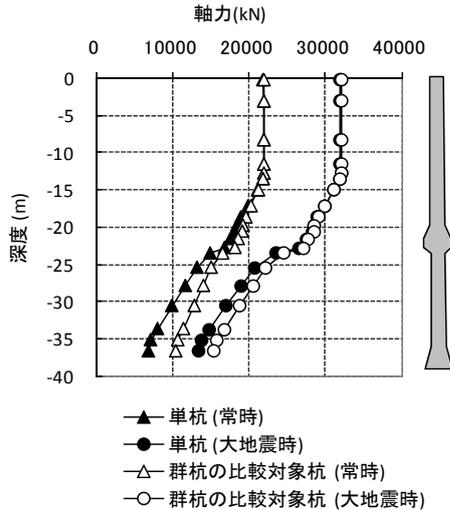


Fig. 21 軸力深度分布図  
Distributions of Axial Force along Pile

杭の節部上下の軸力差は常時および地震時のいずれも、同じ杭頭荷重における単杭の軸力差の8割であり、群杭においても節部の抵抗力に期待できることを確認した。

比較対象杭におけるP- $\delta$ 曲線について、単杭と群杭の比較結果をFig. 22に示す。常時および大地震時の杭頭変位は、群杭において24mmと35mm、単杭において9mmと15mmであった。いずれの荷重ケースも、群杭の杭頭変位は群杭効果によって単杭よりも2.5倍程度大きい。

## 7. まとめ

以下に、本報で得られた知見を示す。

- 1) 実大の節付き杭を用いた鉛直交番荷試験と引抜き荷試験から、砂質土における極限節部支圧力度 $p_{vu}$ の評価式として、 $p_{vu}=100N(N \leq 60, p_{vu} \leq 6000 \text{ kN/m}^2)$ を得た。
- 2) 荷試験における節付き杭の押込み時と引抜き時の挙動は、3次元FEMによって良好にシミュレートできる。
- 3) 節部における支圧力度比～変位量比の関係は、既往の場所打ち杭の先端における支持力度比～変位量比の正規化手法を準用して評価できると考えられる。
- 4) 3次元FEMによる群杭沈下解析では、杭頭荷重は基礎躯体の剛性による荷重再配分効果によって均される傾向にあり、特に大地震時にその傾向が顕著である。基礎の設計にあたっては、このような荷重再配分にもなる杭頭軸力の変化や、基礎梁・耐震壁に作用する大きな応力に対する断面設計に留意が必要である。
- 5) 群杭解析の結果によれば、最小杭間隔が節部径の1.2倍と近接している建物中央部の節付き杭におい

ても、単杭の8割の節部抵抗力が発揮される。

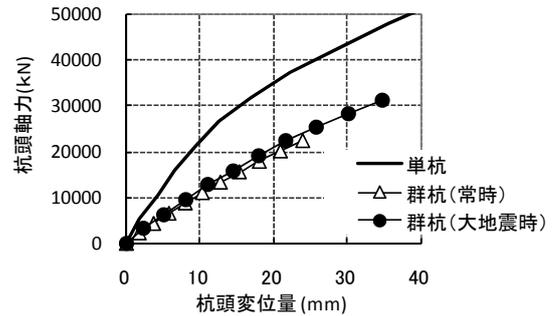


Fig. 22 杭頭変位～杭頭沈下量曲線  
Axial Force versus Displacement Curves at Pile Head

## 参考文献

- 1) 平井芳雄, 他: 拡径部を有する場所打ちコンクリート杭の引抜き抵抗性状に関する原位置引抜き試験, 構造工学論文集, vol.54B, pp.59~66, 2008.3
- 2) 須藤敏己, 他: 場所打ち節付き杭の鉛直交番荷試験(その1~その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1分冊, pp.579~584, 2005
- 3) 秋野矩之, 他: 深い拡底基礎の極限引抜き抵抗機構, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系分冊, pp.2673~2674, 1983
- 4) 八尾真太郎, 他: 節付き場所打ちコンクリート杭の節部底面支持力算定式, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.79~84, 2002.6
- 5) 鈴木直子, 他: 地震時変動軸力の大きな高層建物を支持するパイルド・ラフト基礎, 日本建築学会技術報告集, 第29号, pp.89~94, 2009
- 6) 西村勝尚, 他: 連結制振構造を適用した超高層RC建造物の応答性状(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.859~860, 2008
- 7) 須藤敏己, 他: 場所打ち節付き杭の鉛直交番荷試験および引抜き試験(その1~その5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造I, pp.567~576, 2008
- 8) 平井芳雄, 他: 多段拡径場所打ちコンクリート杭の原位置引抜き試験結果(その2), 日本建築学会学術講演梗概集, 構造I, pp.547~548, 2003
- 9) SoilPlus "Theory Manual of SoilPlus Static", 伊藤忠テクノソリューションズ(株), 2008
- 10) 日本建築学会編: 建築基礎構造設計指針, p.142, 2001
- 11) 長沼一洋, 他: 面内せん断応力下におけるテンションスティフニング特性のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C分冊, pp.649~650, 1990
- 12) 山肩邦男, 他: 場所打ちコンクリート杭の極限先端荷重および先端荷重～先端沈下量特性に関する統計的研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.423, p.p.137~146, 1991
- 13) 持田悟, 他: 場所打ちコンクリート杭の支持力性能(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1分冊, pp.725~726, 2000