

# 湾岸開発地域に建設される超高層免震タワーの群杭基礎システムに関する地震被害予測とその最適プロポーション選定法の研究

## Optimal Proportion of Pile Foundations Supporting Isolated High-Rise Buildings in Waterfront Area

プロジェクト代表者：齊藤正人（工学部建設工学科・助手）

Masato SAITOH

### 1. はじめに

ここ数年、都市部の再開発地域や湾岸開発地域において、21世紀の未来型建築である超高層タワーの建設がラッシュである。これらの超大型建築物は、幹線道路や鉄道など国の主要施設と同様に、その大半は群杭基礎システムによって支持されている現状にある。その理由は、都市部や湾岸開発地域が、そうした超大型建築物を支持するには、あまりに軟弱な地盤であるからである。群杭基礎システムが軟弱地盤上の構造物に果たす役割は明快であり、鉛直荷重を支持し、軟弱地盤に沈下させないためである。そのため、いかなる状況にあっても、システムが支持機能を失うことがあってはならないのである。

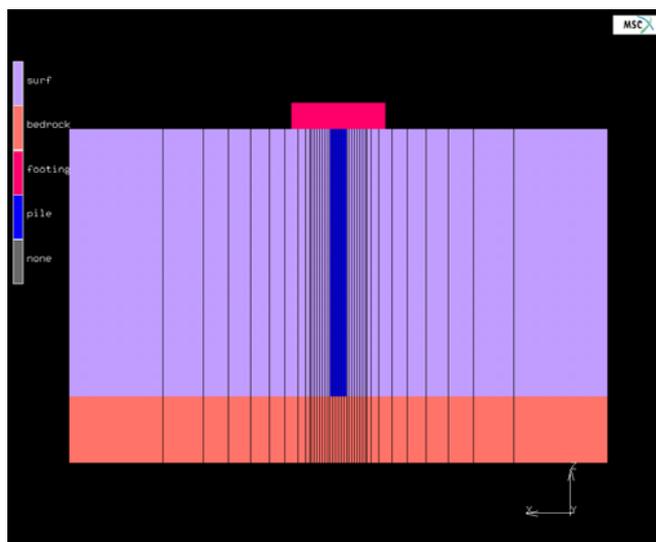
最も群杭基礎システムの支持機能を失う可能性があるのは、やはり地震による被害であろう。実は近年の研究により、軟弱地盤中の杭基礎が損傷するのは、主に地震時に働く以下の2つの外的要因によることが明らかにされている。第1に、建築物の慣性力が水平力となって、杭に作用し損傷が生じる場合である。第2に、軟弱地盤の変形が杭に作用し損傷が生じる場合である。後者の地盤変形による杭への損傷という概念は、比較的新しい考え方であり、その影響は、建築物の慣性力を上回るとも言われている。最近の超高層タワーでは免震構造が取り入れられており、タワー本体の地震応答は抑制できるだろうが、地盤変形による杭の損傷は一切抑制できていないのである。よって、一見すると壊れていないタワーも、実は、杭基礎は壊滅的に損傷しており、数年内には支持機能が終局状態に陥り、タワーの傾斜や沈下が顕著に現れる可能性は否定できない。

そこで本研究は、免震装置を有する超高層タワーにおいて、そうした軟弱地盤特有の外力に対して、いかなる杭の断面諸元が超高層免震タワーの群杭基礎システムとして最適なのか把握することを目的とする。

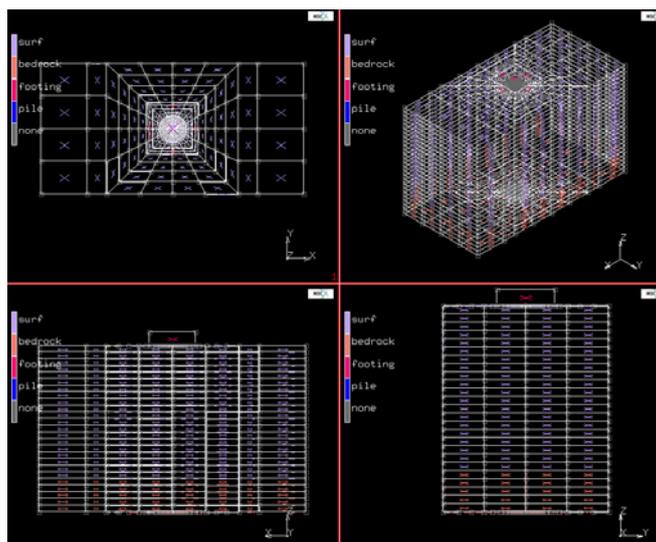
現在、本研究プロジェクトの第1段階として、免震装置によってタワーの慣性力が相当量緩和された状況を想定し、地盤変形のみが作用した際の杭基礎の動的挙動について検討を実施している。著者による既往の研究<sup>1)</sup>、<sup>2)</sup>では、表層地盤の固有振動特性が卓越し、地盤変形が過大となる1次卓越振動数と同じ振動数成分を有する基盤入力動を想定した際の、杭体の損傷特性について検討を行ってきた。しかし、これらの研究は3次元弾性波動論に基づく理論解を基底とした評価であることから、種々の振動数成分を有する実地震動については、その特性を評価するに至らなかった。そこで本研究は、3次元有限要素法に基づく離散化モデルを構築し、種々の地震動に対する杭体の損傷と杭径の関係について、時刻歴動的解析を実施しその評価を行うことを目的とする。本報告はそれらの成果を速報として提示するものである。

### 2. 解析概要

本研究では、構造体のディテールまでモデル化ができる 3次元有限要素法を適用する。また本解析は、埼玉大学総合情報処理センターにある Marc (3次元非線形有限要素法解析ソルバー) を利用した。杭体は通常、1次元梁モデルにより等価に置換されるが、本検討では杭径寸法を検討パラメータにしていることから、8節点ソリッド要素によりモデル化を行う。杭の境界条件としては、標準的かつ単純である杭頭回転拘束を満足させるため、フーチングの回転変位を拘束し、杭先端は基盤層に貫入させる。地盤は弾性体として、杭体と同じ8節点ソリッド要素で構築する。Fig.1に解析モデルを示す。本解析では、基盤層下部から地震動を入力し、杭体に生じる曲げひずみ(杭頭・杭先端)の最大値とその際に表層地盤に生じた平均せん断ひずみを算出する。著者による3次元弾性波動論に基づいた検討の結果<sup>1)</sup>、杭体の曲げひずみを表層地盤に生じる平均的なせん断ひずみで正規化することにより、想定される種々のパラメータ(杭径、杭長、地盤変形量、杭と地盤の剛性比等)を統一的に整理できることが判明している。本検討においても、同様に整理



(a) Three-dimensional Finite Element Model  
(Cross section)



(b) Three-dimensional Finite Element Model  
(Multi-views)

Fig.1 Three-dimensional Finite Element Model used in this study

を行い、杭体の損傷と杭の断面寸法の関係について把握することにした。

本解析で用いる時刻歴波形は、種々の振動数成分に対して検討することを目的とするため、既往の観測地震の応答スペクトルから、その周波数特性が異なるものを数種類選択した。当該地震動は、1) El Centro NS (1940)、2) Kobe JMA NS (1995)、3) Hachinohe EW (1968)の3種類である。加えて、既往の研究と同様に、表層地盤の1次卓越振動数と同じ振動数成分を持つ調和振動波形を入力地震動として選択した。本解析では、杭の径長比 $a/H$ を0.01、0.02、0.03、0.04、0.05、0.07、0.10の7種類とし、また地盤と杭の剛性比 $E_s/E_p$ は0.0005、0.001、0.005の3種類とした。また地盤の密度 $\rho$ 、ポアソン比 $\nu$ 、減衰定数 $h_g$ はそれぞれ1.8、0.45、0.05を仮定した。上記の値は、実際に使用されている杭基礎の諸元に基づいて定めている。減衰係数については、Rayleigh減衰を仮定し、表層地盤の1次と2次の卓越振動数領域において一定値となるように設定した。また本解析では、数値積分法としてNewmarkの $\beta$ 法を用いた( $\beta = 0.25$ )。

### 3. 解析結果と考察

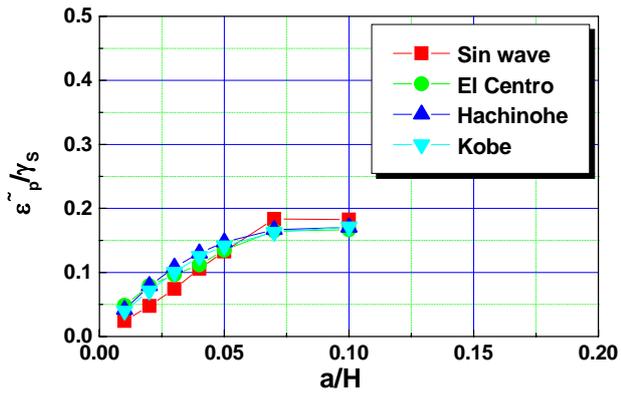
Fig.2に、本解析によって得られた正規化曲げひずみ $\bar{\epsilon}_p/\gamma_s$ （杭体の最大曲げひずみを表層地盤に生じる平均的なせん断ひずみで正規化）と基礎径長比 $a/H$ の関係を示す。杭体の曲げひずみは、杭頭と杭先端において増加する傾向にあるが、その特性は杭体の回転拘束条件に起因する。Fig.2によれば、調和振動を入力した場合の正規化曲げひずみの特性と、3種の異なる実地震動を各々入力した場合の特性が良好に一致することがわかる。この要因として、表層地盤の伝達関数が一種の帯域フィルターとして作用したことによると考えられる。これらの特徴は、基礎径長比 $a/H$ が小さいほど、免震構造を有する（慣性力がおよそ無視し得る）上部構造物を支持する杭基礎システムは有利であること、また反対に、基礎径長比 $a/H$ が大きくなると、杭の曲げひずみがコンクリートの許容曲げひずみを超える可能性があり、危険であると解釈できる。この特性は構造物の慣性力を主たる外力としてきた既往の設計思想と真っ向から反する特性である。つまり、従来の設計思想は構造物の慣性力についてのみ検討されてきた経緯があり、一般に、杭径を大きくすることが、損傷を抑制する手段であったためである。

### 4. 終わりに

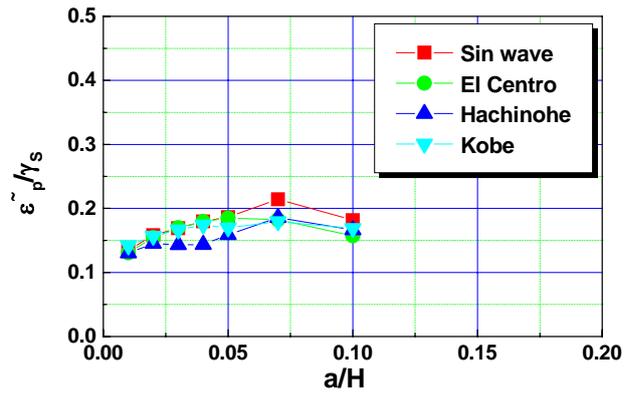
本研究は埼玉大学21世紀総合研究機構の「21世紀総合研究機構研究プロジェクト（平成16年度採用）」の一環として実施したものである。また研究成果の一部は学術論文として出版<sup>3)</sup>もしくは出版を予定している<sup>4)</sup>。今後、より実証的な研究成果として、材料非線形性の影響など踏まえた解析を継続的に実施していく予定である。

### 参考文献

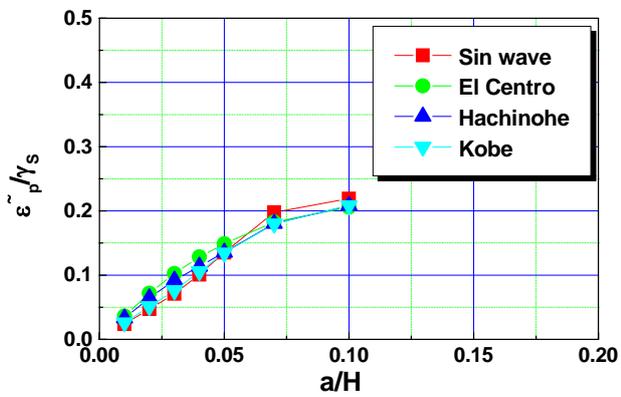
- 1) 齊藤正人, 地盤変形を受ける杭基礎の杭径寸法が杭体の損傷に及ぼす影響について, 土木学会論文集, No. 766/I-68, pp. 175-189, 2004
- 2) 齊藤正人, 応答変位法に基づいた地盤変位を受ける杭基礎の最適杭径に関する考察, 土木学会地震工学論文集, CD-ROM, pp. 1-4, 2003
- 3) 齊藤正人, 地盤変形と慣性力を同時に受ける杭基礎の損傷低減のための最適杭径に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No. 787/I-71, pp. 161-175 2005. 4.
- 4) Saitoh, M., Fixed-Head Pile Bending by Kinematic Interaction and Criteria for its Minimization at Optimal Pile Radius, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, (accepted in 2005 and now in press)



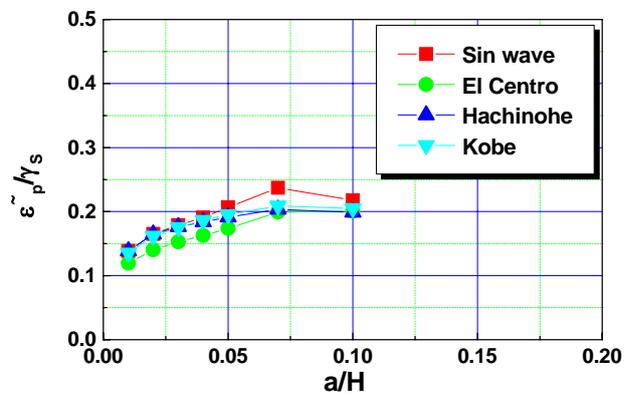
(a-1)  $E_s/E_p = 0.0005$  (at pile head)



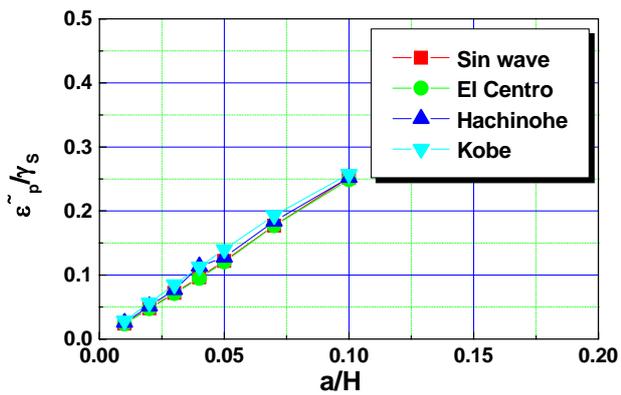
(b-1)  $E_s/E_p = 0.0005$  (at pile tip)



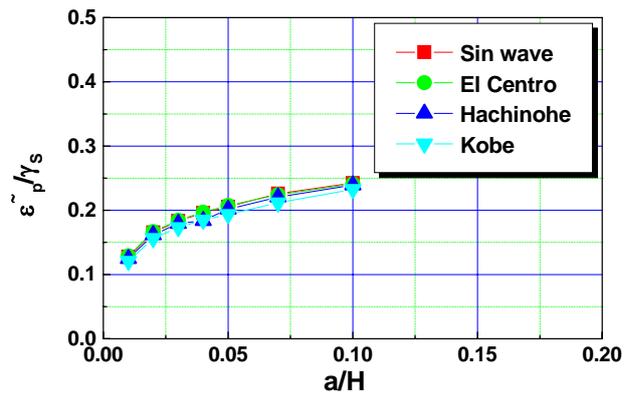
(a-2)  $E_s/E_p = 0.001$  (at pile head)



(b-2)  $E_s/E_p = 0.001$  (at pile tip)



(a-3)  $E_s/E_p = 0.005$  (at pile head)



(b-3)  $E_s/E_p = 0.005$  (at pile tip)

Fig.2 Variation of normalized bending strains with slenderness ratio  $a/H$