

群杭基礎の非線形杭周地盤抵抗の評価式と地震応答解析モデル

大阪大学大学院 工学研究科
地球総合工学専攻 宮本研究室

廣瀬 榛名

1. はじめに

日本は地震多発国である。最近では、2016年4月に熊本地震、2011年3月に東北地方太平洋沖地震といった建築基準法で設定された耐震設計のレベルをはるかに超える大地震が発生した。一方、都市圏においては近い将来大地震の発生が逼迫しており、過去の地震を凌ぐ莫大な人的および経済的な被害が懸念されている。このような避けることができない地震への対策として、耐震技術をより向上させ、その成果を建築物の耐震設計に早急に反映させていく必要がある。

建物は自然地盤の上に建っているため、地震時には自ずと地盤の影響を受ける。特に軟弱地盤で杭基礎に支持された建物では、地盤の不確定要素が大きく、地震の揺れ方も大きく異なる。不確定要素としては地盤の塑性化が挙げられ、特に、群杭基礎においては杭と杭が干渉しあうことにより、杭周辺地盤の塑性化状況が複雑となる。そこで本研究では、大地震時に群杭基礎の周辺地盤が塑性化することで、建物や杭がどのような非線形応答をするのかを解明することを目的とした。

研究方法として、模型群杭建物の振動台実験を行い、現象解明と群杭の杭周辺地盤抵抗を取り込んだ地震応答解析モデルを構築してシミュレーション解析を行った。そして、群杭の杭周辺地盤抵抗の算定式を提案し、杭基礎の耐震設計モデルに反映させることを目指した。

模型群杭建物の振動台実験では、入力地震動のレベルを変えて行い、群杭建物の地震応答性状、杭位置による杭応答の差異について詳細に分析した。解析シミュレーションでは、杭位置で異なる地盤抵抗を三次元有限要素法を用いて評価し、それを基にして簡易な設計用モデルに取り込んだ。この解析モデルは、入力レベルにより異なる群杭建物の地震応答や、杭位置により異なる杭応答を良くシミュレーションすることを確認し、本研究で提案した設計用モデルの妥当性を検証した。また、実務設計に活かせるよう、図1に示すような方針で三次元有限要素法に基づき群杭の杭周地盤抵抗を簡易に評価できる算

定式を提案した。

$$p_i(u,z) = \underbrace{N_p \cdot p_s(u,z)}_{\text{杭集約モデルに用いる杭周地盤ばね}} \times \underbrace{\frac{\sum_i p_i(u,z)}{N_p \cdot p_s(u,z)}}_{\text{群杭係数}} \times \underbrace{\frac{p_i(u,z)}{\sum_i p_i(u,z)}}_{\text{分担率}}$$

杭全体モデルに用いる杭周地盤ばね

図1 群杭の杭周地盤ばねの評価

2. 模型群杭建物の振動台実験

2.1 実験概要

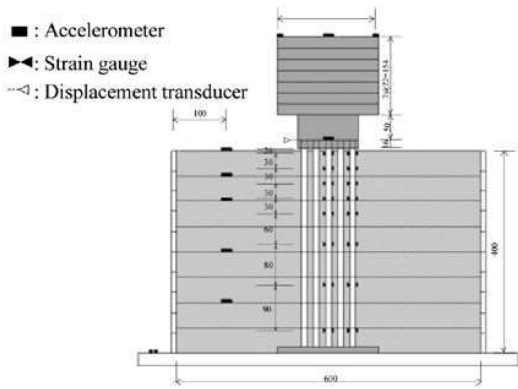
図2に振動台実験の試験体と測定点位置を示す。表層地盤は豊浦標準砂を用いて、相対密度を60%になるように作製した。杭はアクリル製円柱杭(φ12mm)で、杭間隔は24mmである。杭配置は、5×5の正方配置かつ杭間隔・杭径比は2.0で、群杭効果を検証するために杭間距離が小さな試験体とした。上部構造の総重量は54.2kgである。

入力地震動は、ランダム位相の人工波(ART)と兵庫県南部地震波(Hyogo)を、最大速度が50(cm/s)になるように補正し、時間軸を1/5倍した波形を基準とした。加振実験は、振幅を0.4倍、1.0倍、2.0倍したものを、Hyogo波、ART波の順に入力した。

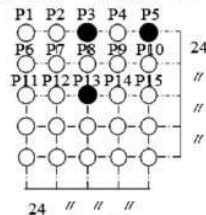
2.2 実験結果

ART波の入力に対する上部質量のフーリエスペクトル比と、地表面のフーリエスペクトル比を図3(a)と(b)に示す。入力に対する上部質量と地表面のスペクトル比をみると、加振振幅が大きくなるにつれてピーク振動数、ピーク値が小さくなっている。これは杭の外周地盤が非線形化することで水平地盤抵抗が低下し、履歴減衰が増大したことが影響したと考えられる。

図4にART波の杭の最大曲げモーメント分布を示す。いずれの加振振幅においても、杭位置の違いが明瞭に現れ、杭頭の最大モーメントは隅杭(P5)が最も大きく、次いで側面杭(P3)、中央杭(P13)の順に小さい。



(a)試験体と計測位置

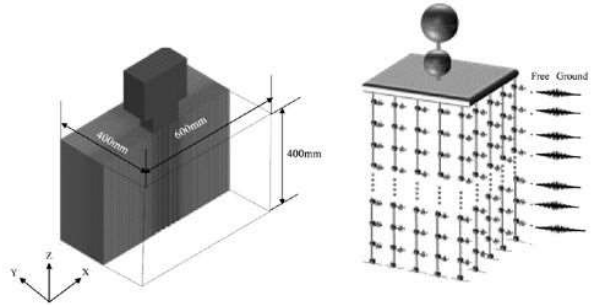


(b)杭配位置

図2 試験体の概要

表1 解析諸元

| | | | |
|----|-----------|-------------------|--------------|
| 上部 | 剛体 | 密度(g/cm^3) | 7.8 |
| | | ヤング係数(N/mm^2) | 205000 |
| 杭 | 弾性 | 密度(g/cm^3) | 1.2 |
| | | ヤング係数(N/mm^2) | 3500 |
| 地盤 | 多直線 近似 | 密度(g/cm^3) | 1.5 |
| | | ポアソン比 | 0.4 |
| | | 内部摩擦角(deg) | 40 |
| | | せん断波速度(m/s) | $59H^{0.25}$ |



(a)3D-FEM

(b)杭全体モデル

図6 解析モデルの概要

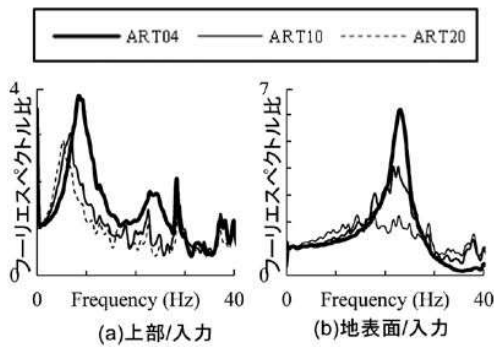


図3 フーリエスペクトル比

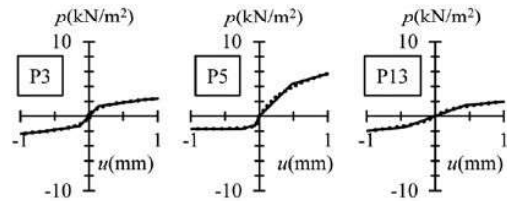


図7 モデル化した杭周地盤ばね

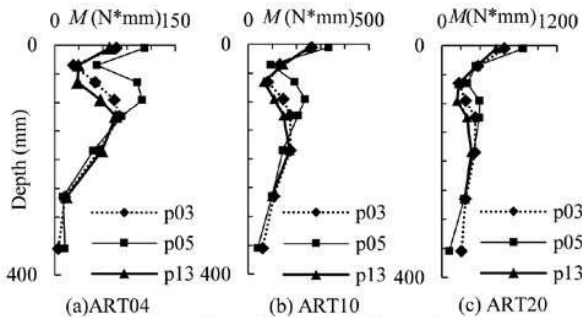


図4 杭の最大曲げモーメント

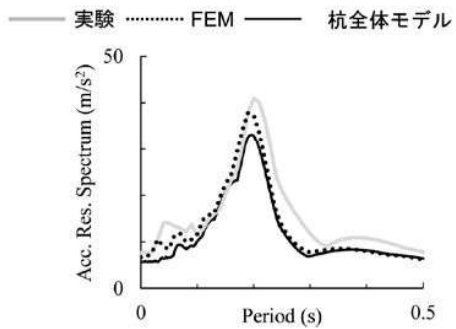


図8 上部構造の加速度応答スペクトル (Hyogo20)

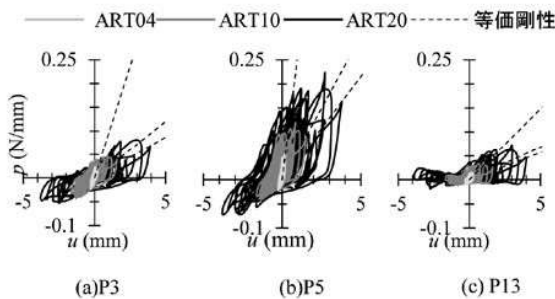


図5 地盤反力—杭変位関係 (GL-65mm)

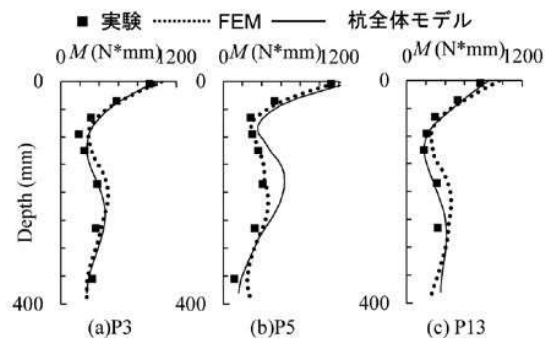


図9 杭の最大曲げモーメント分布 (Hyogo20)

以上のように、群杭の杭位置により杭周地盤ばねの荷重-変形関係が大きく異なることがわかる。

3. 実験結果のシミュレーション解析

実験結果のシミュレーション解析を、図6に示す3次元非線形FEMと、群杭の杭周地盤ばねをモデル化した質点系の杭全体モデルで行った。

3.1 解析モデル

3次元FEMモデル (LS-DYNA) の解析諸元を、表1に示す。上部構造、杭と地盤はソリッド要素でモデル化し、地盤のせん断応力-ひずみ関係は、多折れ線モデルを用いた非線形性を考慮した。

杭全体モデルの群杭の水平地盤抵抗は3次元FEMを用いて、杭ごと、深さごとの杭周地盤ばねを算出した。3次元FEMでは、杭はシェル要素と地盤はソリッド要素でモデル化した。各杭の水平地盤ばねの荷重-変形関係は、杭に深さ方向で一様な水平方向の強制変位を全杭に与え、強制変位 u を漸増させることで算定し、近似関数を用いてモデル化した¹⁾。モデル化した各杭の杭周地盤ばねを、図7に示す。

3.2 解析結果と実験結果の比較

Hyogo波2.0倍加振時の両解析結果と実験結果を比較して、図8に上部構造加速度応答スペクトル ($h=0.05$) を、図9にP3(側面杭)、P5(隅杭)、P13(中央杭)の最大曲げモーメント分布を示す。全体モデルの解析結果は上部構造の応答をやや小さく与えるが、杭位置によって異なる最大曲げモーメント分布は、いずれの加振振幅においても実験結果に良く対応している。

4. 杭集約モデルの杭周地盤ばねの評価式

ここでは、3次元FEMにより算出した杭周地盤ばねを用いて、単杭の杭周地盤ばねと群杭係数の評価式を提案し、杭集約モデルのモデル化法を示す。

4.1 解析条件

砂質土に打設された杭を解析対象とする。表2に、杭と地盤の解析諸元を示す。地盤のせん断剛性をパラメータとして、地盤をソリッド要素で、塑性条件にはMohr-Coulomb条件に従う完全弾塑性モデルを用いる。

4.2 単杭の杭周地盤ばねの評価式

図10に、杭変位を杭径で基準化し、地盤のせん断剛性 G (kN/m^2) を乗じた地盤反力-変位関係を示す。いずれの深さにおいても基準化した地盤反力-変位関係は非常に良く対応している。次に、基準化できた $p-u^*G/B$ 関係を式(1)に示すように、 u^*G/B の対数を取り、2次の対数関数で近似する。

表2 解析諸元

| | | |
|----|------------------------|-------------|
| 杭 | 杭径(mm) | 600 |
| | 杭長(m) | 11 |
| 地盤 | 層厚(m) | 11 |
| | 密度(t/m^3) | 1.8 |
| | せん断波速度(m/s) | 110、200、300 |
| | 内部摩擦角(deg) | 32 |
| | ポアソン比 | 0.33 |
| | 粘着力(N/mm^2) | 0.001 |

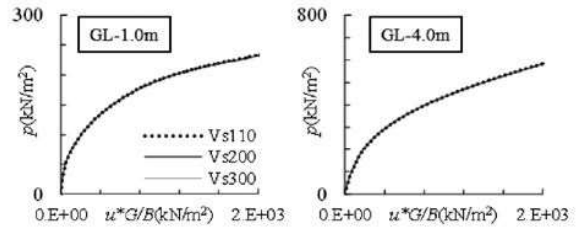


図10 杭周地盤ばねのせん断波速度に関する基準化

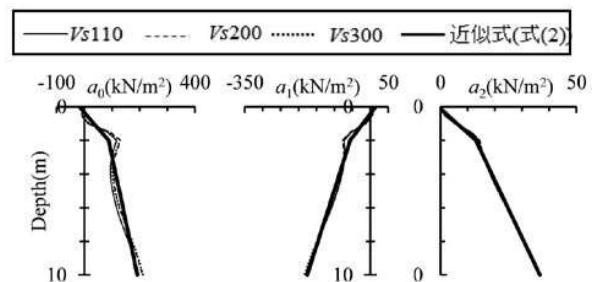


図11 式(1)中の各係数 $a_0 \sim a_2$ と近似式(2)の比較

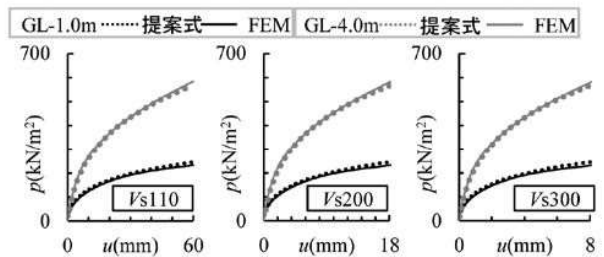


図12 評価式とFEM解析による杭周地盤ばねの比較

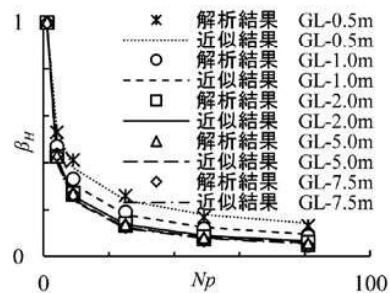


図13 杭集約地盤ばねの群杭係数 β_H と杭本数 N_p の関係

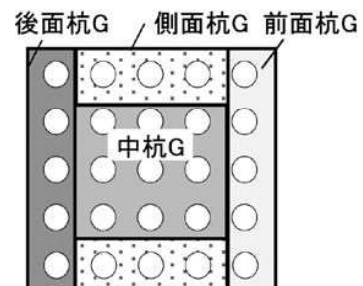


図14 群杭のグルーピング

$$p = \sum_{k=0}^2 a_k (\ln(u * G/B))^k \quad (1)$$

ここで、 p ：地盤反力 (kN/m²)、 u ：変位 (mm)、 B ：杭径 (mm)、 G ：せん断剛性 (kN/m²)

式 (1) で近似して算出された深さごとの $a_0 \sim a_2$ の係数を、図11に示す。GL~GL-2.0m、GL-2.0m~GL-10mの区間に分けて係数の平均値を取り、それぞれを深さZ(m)に関する1次関数で、GL-2.0mで連続となるように最小2乗法で近似した。得られた各係数を近似した1次関数を、式 (2) に示す。

$$a_0 = \begin{cases} 53 \cdot Z - 18 & (Z \leq 2.0) \\ 13 \cdot Z + 62 & (Z > 2.0) \end{cases} \quad (2-a)$$

$$a_1 = \begin{cases} -36 \cdot Z + 15 & (Z \leq 2.0) \\ -15 \cdot Z - 27 & (Z > 2.0) \end{cases} \quad (2-b)$$

$$a_2 = \begin{cases} 6.8 \cdot Z - 0.61 & (Z \leq 2.0) \\ 3.0 \cdot Z + 7.1 & (Z > 2.0) \end{cases} \quad (2-c)$$

ここで、 Z ：深さをmで表した無次元化数値、係数 $a_0 \sim a_2$ の単位は (kN/m²)

式 (1)、式 (2) を用いた評価式の妥当性を確認するため、評価式を用いて算定した杭周地盤ばねとFEMの結果の比較を図12に示す。せん断波速度と深さで異なる杭周地盤ばねを、提案した評価式はFEMの結果と良い対応を示すことが確認できる。

4.3 杭集約地盤ばねの群杭係数

群杭を1本にした杭集約モデルの杭周地盤ばねの群杭係数を (3) 式で与え、深さで異なる影響を (4) 式で近似する。なお、杭変位が群杭係数に与える影響はほとんど無いことを確認している。

$$\beta_H(u, z) = \frac{\sum_i p_i(u, z)}{N_p \cdot p_s(u, z)} \quad (3)$$

$$\beta_H(z) = N_p^\alpha \quad (4)$$

ここで、 $p_i(u, z)$ ：群杭 i 杭の深さ z 位置における杭周地盤反力、 N_p ：杭本数、 $p_s(u, z)$ ：単杭の杭周地盤反力、 β_H ：群杭係数

地盤は $V_s = 110$ (m/s)、 $S/B = 2.5$ の正方形配置の群杭において、杭本数が群杭係数に与える影響を図13に示す。また、同図には式 (3) と式 (4) で近似して得られた α を用いて評価した近似結果も示す。深さで異なる群杭係数を提案式は良く対応している。なお、 α は式 (5) に示すように、GL~GL-2.0mを一定値でGL-2.0m以深を一次関数で近似したものである。

$$\alpha = \begin{cases} -0.13 \cdot Z - 0.38 & (Z \leq 2.0) \\ -0.65 & (Z > 2.0) \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 Z ：深さをmで表した無次元化数値

5 群杭の分担率

5×5、杭間隔杭径比2.5の群杭を代表として、杭位置、地盤反力によりグルーピングし、グループごとの分担率と杭本数を算定式を提案する。

群杭の分担率を次式で与える。

$$\text{分担率} = \frac{p_i(u, z)}{\sum_i p_i(u, z)} \quad (6)$$

ここで、 $p_i(u, z)$ ：群杭 i 杭の深さ杭周地盤反力

杭位置と地盤反力により、大まかにグループ分けをした結果を図14に示す。前面杭Gと後面杭G分担率の和 DR_{FB} 、側面杭Gの分担率 DR_S を図15に示す。いずれの分担率も変位によらず概ね一定であることが確認できる。そこで、全変位の平均値の分担率と杭本数の関係を図16に示す。分担率と杭本数の関係を深さごとに求めてその係数を関数近似することで次式を提案した。

$$DR_{FB} = 0.81 \cdot 0.99^{N_p} \quad (7)$$

$$DR_S = \begin{cases} (-0.035Z + 0.13) \cdot N_p^{0.20Z - 0.0081} & (Z \leq 2.0) \\ 0.064 \cdot N_p^{0.39} & (Z > 2.0) \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 Z ：深さをmで表した無次元化数値、

N_p ：杭本数、

また、前面杭Gと後面杭G分担率の和 $DR_{FB} (= DR_F + DR_B)$ を再分配することで各々の分担率を算定する。具体的には、図17に示す $DR_F / (DR_F + DR_B)$ を算定することでそれぞれの分担率を評価することができる。

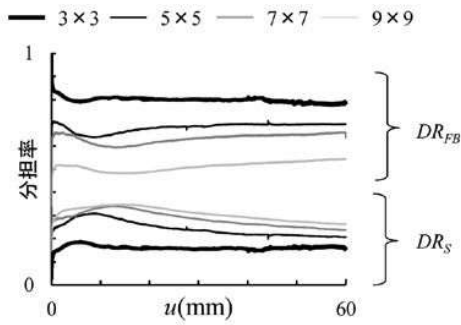


図15 分担率—変位関係

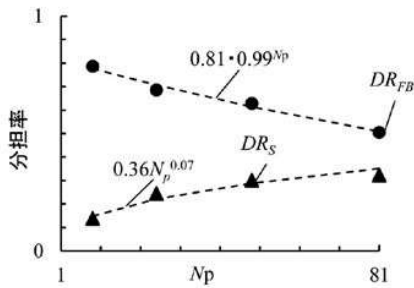


図16 分担率—杭本数関係

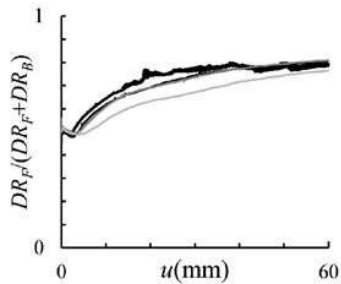


図17 $DR_F / (DR_F + DR_B)$ —杭本数関係

5. まとめ

本研究での成果を以下に示す。

- ① 振動台実験より、群杭建物の地震応答性状を把握した。

- ② 振動台実験のシミュレーション解析により、提案した地震応答解析モデル、3D-FEMにより算出した杭周地盤ばねの妥当性を確認した。
- ③ 単杭の杭周地盤ばねの評価式(式(1)、式(2))、群杭係数の評価式(式(4)、式(5))を提案することで、群杭集約モデルに用いる杭周地盤ばねのモデル化を可能とした。
- ④ 群杭を杭位置と地盤反力でグルーピングした。そして、各グループの分担率の評価式(式(7)、式(8))を提案することで、杭全体モデルに用いる杭周地盤ばねのモデル化を可能とした。

6. 参考文献

- 1) 廣瀬榛名, 中野尊治, 宮本裕司: 杭位置の違いによる群杭の非線形水平地盤抵抗のモデル化, 日本建築学会構造系論文集第726号, pp.1233-1241, 2016.8



現在は、株式会社 大林組にて勤務しております。
 今後は、会社に貢献するような研究・開発ができるよう積極的に業務に取り組んでいきたいです。