

損傷抑制型杭頭結合方式を用いた杭基礎構造の地震時挙動に関する数値実験

中央大学  
東海旅客鉄道  
鉄道総合技術研究所

正会員○西岡 英俊  
正会員 岩田 秀治  
正会員 佐名川 太亮

学生会員 沼尾 健太郎  
正会員 高橋 佑斗  
正会員 村田 和哉

1. はじめに

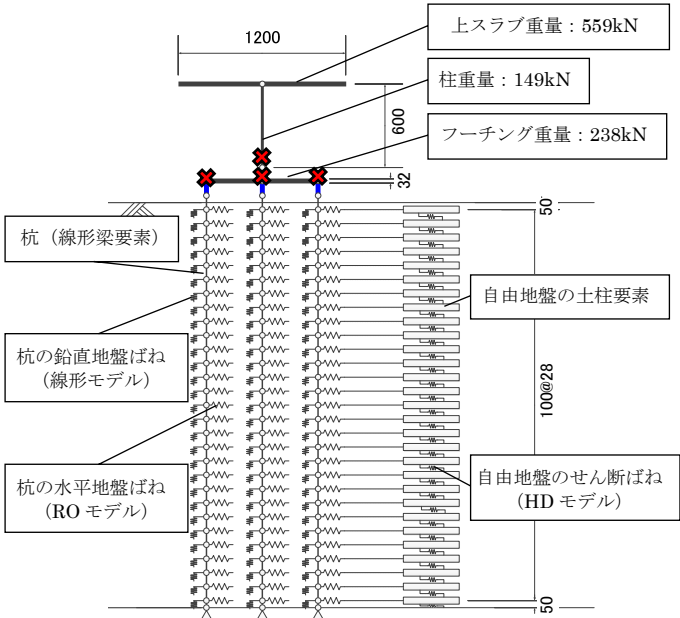
損傷抑制型杭頭結合方式は、復旧性を確保しながら杭頭結合部を積極的に塑性化させてエネルギー吸収を行う構造形式である<sup>1)</sup>。これまで3×2列群杭の大型模型振動実験の再現解析<sup>2)</sup>において、柱基部と杭頭部のそれぞれが単独に損傷する2ケースの比較に基づく検討が行われているが、これらでは模型製作の都合上、固有振動数の違いによる共振特性の違いが除外できておらず、柱基部と杭頭部が両方塑性化するケースや地盤の卓越振動数の違いによる評価を実施できていなかった。そこで本研究では、柱基部と杭頭部の両方が塑性化するケースを追加するとともに、それらの固有振動数・降伏震度を一致させた数値実験により杭頭部の塑性ヒンジ化の有無が地震時挙動に及ぼす影響について検討した。

2. 数値実験の概要

本研究では、大型模型振動実験の再現解析<sup>2)</sup>で検証済みの骨組み解析モデル(図-1)を用いた時刻歴応答解析をベースとした。なお、基盤への入力地震波は鉄道構造物の設計で用いられる内陸活断層による直下型のレベル2地震動(最大加速度624gal)である。

ただし、ベースとなる再現解析結果は実験結果と同様に各模型の固有振動数および降伏震度が異なるため、再現解析の杭頭部塑性化モデル(柱基部は剛域)に対して柱基部にも塑性ヒンジ(非線形要素、図-1の×印)を設けた「柱基部と杭頭部の両方を塑性化させるケース(ケースA)」を基本ケースとした数値実験を行った。ここで、杭頭部の塑性ヒンジの強度については、強度を0.1倍刻みでパラメトリックに低減させて杭が先行して塑性化するように再現解析での強度の0.3倍に設定した。また、ケースAとの比較対象として、ケースAの各塑性ヒンジを剛性は同一のまま強度のみ無限大としたものに置き換えた表-1に示す「ケースB~D」を行った(これらをSTEP1とする)。いずれのケースも上部構造物の固有振動数 $f_s$ は $f_s=3.3\text{Hz}$ 、地盤の固有振動数 $f_g$ は $f_g=8.2\text{Hz}$ である。

また、STEP2として、STEP1をベースに自由地盤の土柱要素同士をつなぐせん断ばねの初期剛性を低下させて地盤が軟弱となった場合を模擬した数値実験を行った。せん断ばねの初期剛性の低下率は、地盤の固有振動数 $f_g$ が $f_g=4.5\text{Hz}$ 、 $3.3\text{Hz}$ および $2.0\text{Hz}$ (STEP1の上部構造物の固有振動数 $f_s=3.3\text{Hz}$ と同一およびその上下1Hz程度)となるように設定した。なお、STEP2では、ケースAの効果をより明瞭に視覚化するために、従来の一般的な設計思想として基礎の塑性化を許容しないケースBのみを比較対象とした。



(単位: mm)

杭 : 外径 100mm, 肉厚 3.0mm, 全長 2883mm  
地盤 : 気乾状態の東北珪砂 6号  
× : 塑性ヒンジ (修正武田モデル)

図-1 骨組み解析モデル概要

表-1 STEP1 の検討ケース一覧

|       |                     |
|-------|---------------------|
| ケース A | 柱基部塑性ヒンジ + 杭頭部塑性ヒンジ |
| ケース B | 柱基部塑性ヒンジ + 杭頭部線形    |
| ケース C | 柱基部線形 + 杭頭部塑性ヒンジ    |
| ケース D | 柱基部線形 + 杭頭部線形       |

キーワード 動的解析, 骨組み解析, 杭基礎, 群杭構造, 応答変位法, 動的相互作用

連絡先 : 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部都市環境学科基礎・地下構造研究室 TEL 03-3817-1804

### 3. 解析結果

STEP1 の天端加速度および変位の時刻歴波形を図-2 に、杭最大曲げモーメント分布を図-3 に示す。ケース B→A (実線同士) およびケース D→C (点線同士) に着目して杭頭部の塑性化の有無による影響を比較すると、天端応答 (図-2) は変化しないのに対し、杭体モーメント (図-3) は杭頭部の塑性化に伴い杭頭部で低減し、地中部で増加した。逆に、ケース C→A およびケース D→B (同系色同士) で柱基部の塑性化による影響を比較すると、天端応答は大きく変化したのに対し、杭体モーメントの分布傾向は概ね一致した。すなわち、天端応答は柱基部の塑性化が支配的で、杭体モーメント分布は杭頭部の塑性化が支配的であることがわかる。

STEP2 の地盤の固有振動数  $f_g$  に応じた杭体モーメント分布を図-4 に示し、図-5 に各応答値の杭頭部の塑性化 (ケース B→A) による低減倍率を示す。これらより、杭頭部の塑性化による杭頭モーメント低減効果は地盤の固有振動数によらず期待でき、天端応答の増加も生じないことがわかった。

### 4. おわりに

固有振動数を一致させることで共振特性の違いを除外した数値実験により、杭地中部が塑性化しない限り杭頭部の塑性化が上部構造物の応答に悪影響を及ぼす可能性は低く、杭頭部の最大曲げモーメントの低減効果が期待できることが確認できた。また、その効果が地盤の固有振動数によって大きく変化することはなかった。よって、損傷抑制型杭頭結合方式を用いることで設計を合理化 (経済化) できる可能性があるのは、通常の杭頭剛結合とした場合に杭頭部の曲げモーメントが杭体の諸元 (杭径・鉄筋量等) を決定する主要因となるような事例であり、またその設計に際しては、地盤条件の変化が損傷抑制型杭頭構造導入効果に及ぼす影響は比較的小さいことから、代表的な地盤条件での構造解析に基づいて杭体設計を行い、地盤調査の不確実性に対する安全余裕は通常の設計と同程度を確保すればよいと考えられる。

### 参考文献

- 1) 岩田秀治, 鈴木亨, 伊藤太郎, 西岡英俊: 杭頭部の半剛結化の载荷実験, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2019.
- 2) 佐名川太亮, 村田和哉, 西岡英俊, 岩田秀治, 鈴木亨, 高橋佑斗: 損傷抑制型結合方式を用いた杭基礎構造の地震時挙動 その 3 模型振動実験の再現解析, 土木学会第 74 回年次学術講演会, 2019.

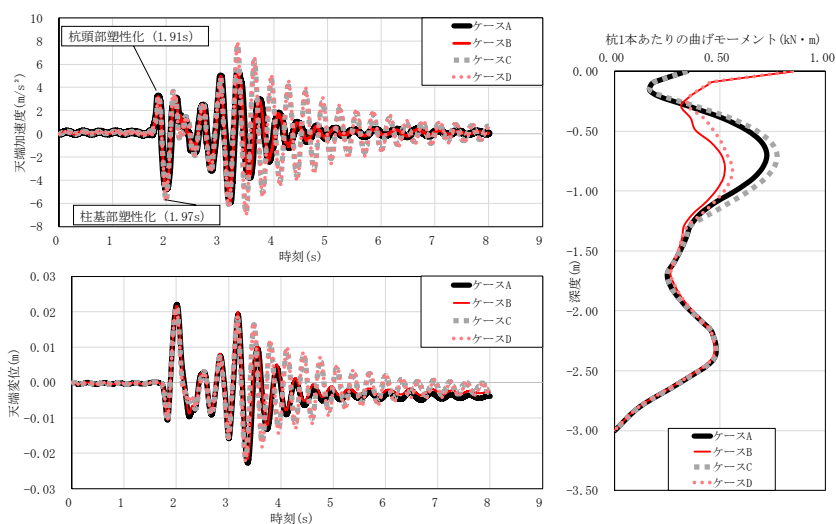


図-2 天端応答の時刻歴波形 (STEP1)

図-3 杭最大曲げモーメントの深度分布 (STEP1)

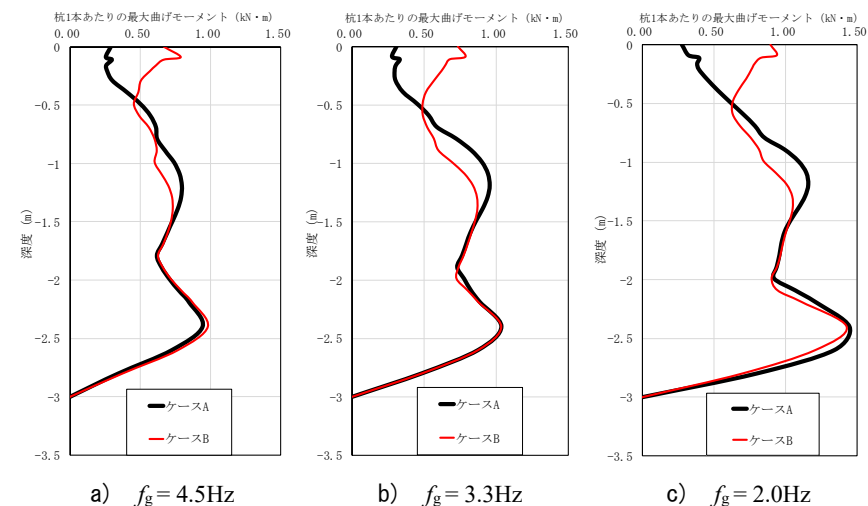


図-4 地盤の固有振動数  $f_g$  の違いによる杭最大曲げモーメント分布 (STEP2)

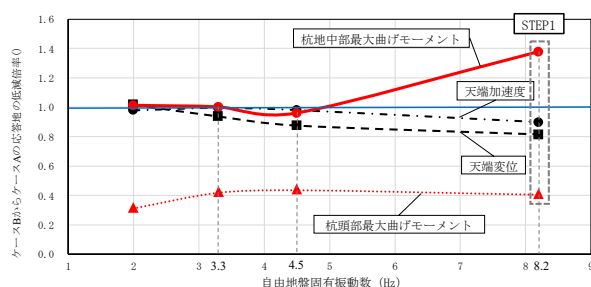


図-5 杭頭部塑性化による各要素の応答値低減倍率