

## 大型振動台を用いた杭基礎一体型鋼管集成橋脚の耐震性能評価（再現解析）

北海道大学大学院  
 阪神高速道路株式会社 杉山裕樹（正），篠原聖二（正），小林寛（正）  
 京都大学大学院 木村亮（正），澤村康生（正），光吉泰生（学）

○磯部公一（正）

### 1. はじめに

本研究では、鋼管集成橋脚に対し、フーチングを省略した杭基礎一体型鋼管集成橋脚<sup>1)</sup>を提案し、従来のフーチング形式の地震時挙動と比較することで、その構造成立性を検討している。一連の研究<sup>2),3)</sup>では、実構造物の1/20サイズで作製した杭基礎一体型鋼管集成橋脚模型とフーチング型鋼管集成橋脚模型に対し大型振動台実験を実施し、その耐震性能の評価を行っている。本稿その3では、これらの実験結果を三次元動的弾塑性有限要素解析により再現し、杭基礎一体型鋼管集成橋脚構造の地震時応答特性および変形メカニズムを詳細に把握する。

### 2. 数値解析の概要

実験模型および地盤条件は、その<sup>1)2)</sup>、その<sup>2)3)</sup>に詳述しているので参考にされたい。本稿では、液状化地盤中の杭基礎一体型（以後、L-Sと呼称）およびフーチング型（以後、L-Fと呼称）の鋼管集成橋脚構造に対する加振結果について再現解析を行う。

本解析では、鋼管柱をバイリニア型の梁要素で、せん断パネルをバイリニア型の梁要素とバイリニア型のばね要素を3方向に配置することでモデル化する。鋼管杭のモデル化には、Zhang et al.により提案されたハイブリッド要素<sup>4)</sup>を用いる。表-1にパラメータを示す。

土の構成式には、下負荷面および上負荷面の概念に基づいて、土の力学挙動に大きく影響を与える過圧密、構造、応力誘導異方性を統一的に表現できる弾塑性構成式Cyclic mobility model<sup>5)</sup>を用いる。地盤パラメータは模型実験と同じ東北珪砂6号を用い、相対密度40%、80%に調整した供試体に対する等方圧密試験、圧密排水三軸圧縮試験、繰返し三軸試験の結果に基づき決定した。不足する情報については粒度分布が近い豊浦珪砂の値を準用した。地盤パラメータを表-2に示す。

解析領域は、構造物と載荷荷重の対称性を考慮し、図-1に示す半断面領域とした。節点数および要素数は15423、要素数は13464である。境界条件は、底面の節点は全方向固定、側面はローラー支持とし、剛

土層の側方境界の影響を和らげる目的で設置したクッション材（ヤング率 0.05 GPa, ポアソン比0.49, 密度: 0.07 g/cm<sup>3</sup>）も弾性ソリッド要素でモデル化する。上部工死荷重(52.6 kN)は橋脚天端に設けた質点でモデル化する。時間増分を実験でのサンプリング間隔と同じ0.005秒とし、時間積分はニューマークβ法で行い、粘性減衰モデルは剛性比例型を採用する。模型地盤と構造物全体の減衰定数および固有周期は、乾燥地盤の本実験前に行ったランダム波入力に対する結果および構造物が弾性挙動を示した乾燥地盤の本実験1回目加振の結果<sup>2)</sup>を用いて求めた。入力波は振動台で観測された加速度時刻歴を用いる。

表-1 構造体パラメータ

	杭	柱
材質	STK400	STK400
外径 (mm)	89.1	76.3
板厚 (mm)	2.8	2.8
断面剛性 (kN)	1.5×10 <sup>5</sup>	1.3×10 <sup>5</sup>
曲げ剛性 (kN-m <sup>2</sup> )	1.4×10 <sup>2</sup>	8.7×10
降伏モーメント (kN-m)	3.73	2.69

表-2 地盤パラメータ

	共通		Dr 80%	Dr 40%
$\lambda$	0.0500	$R_0^*$	0.9	0.7
$\kappa$	0.0064	$1/R_0$	5.07	1.19
$R_f$	3.290	$\xi_0$	0.00	0.00
$N$	0.74	$k$	1.00×10 <sup>-4</sup>	1.00×10 <sup>-4</sup>
$\nu$	0.30	$\gamma_{sat}$	2.01 (g/cm <sup>3</sup> )	1.93 (g/cm <sup>3</sup> )
$m$	0.01	$\gamma'$	1.01 (g/cm <sup>3</sup> )	0.93 (g/cm <sup>3</sup> )
$a$	2.20			
$b_r$	1.50			

### 3. 解析結果

図-2に入力波と橋脚天端の応答加速度の時刻歴を示す。加振直後からL-F、L-Sともに応答の遅れが見られ、その傾向はL-Sにおいて顕著である。また、加振3波目まではL-Sの方がL-Fよりも大きな応答を示すのに対し、4波目以降にはL-Fが逆転する傾向が見られた。この傾向は模型実験の結果と同様で、実験結果を正しく再現している。図-3に橋脚天端の応答加速度と応答変位の関係を実験結果と併せて示す。これより、両者ともに実験結果とほぼ同等の初期剛性を示した。また、L-Fは履歴ループが大きく、非線

キーワード 損傷制御, 橋梁, 杭基礎, 振動台実験, 液状化, FEM

連絡先 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学大学院工学研究院 地盤環境解析学研究室

形性を示すのに対し、L-Sでは履歴ループが小さく弾性挙動に近いことを示した。定量的な評価にはやや課題を残すものの、概ね実験結果を再現できている。**図-4**に橋脚天端の応答加速度と上段せん断パネルに発生するせん断ひずみの関係を示す。両者ともに実験結果とよく近似しており、L-Sにおいてせん断ひずみが小さくなる傾向を示した。

一方、**図-5**の地盤の過剰間隙水圧比の時刻歴および**図-6**の最大変位時の曲げモーメントの深度方向分布では、非液化化層(G.L. -1.5 m)および杭先端の挙動が実験結果<sup>2)</sup>とやや乖離している。これは、解析で非液化化層の剛性を過小評価したためと考えられる。低拘束圧下の地盤材料の剛性に関する評価については今後の課題である。

4. まとめ

杭基礎一体型鋼管集成橋脚構造の地震時応答特性の把握を目的に実施した振動台実験の結果を、三次元動的弾塑性有限要素解析により概ね再現することができた。また、杭基礎一体型は従来のフーチング型以上に優れた変形能を有することが示された。

参考文献

- 1) 篠原ら：杭基礎一体型鋼管集成橋脚の構造提案と地震時応答解析，土木学会論文集C（地圏工学），Vol. 69, No. 3, pp. 312-325, 2013.
- 2) 曾我ら：杭基礎一体型鋼管集成橋脚の耐震性能評価 その1 乾燥砂地盤，第70回土木学会年次学術講演会講演概要集，2015（印刷中）.
- 3) 光吉ら：杭基礎一体型鋼管集成橋脚の耐震性能評価 その2 液化化地盤，第70回土木学会年次学術講演会講演概要集，2015（印刷中）.
- 4) Zhang, F., et al.: Mechanical behavior of pile foundations subjected to cyclic lateral loading up to the ultimate state, Soils and Foundations, Vol.40, No.5, pp.1-17, 2000.
- 5) Zhang, F. et al.: Explanation of cyclic mobility of soils: Approach by stress-induced anisotropy, Soils and Foundations, Soils and Foundations, Vol.47, No.4, pp.635-648, 2007.

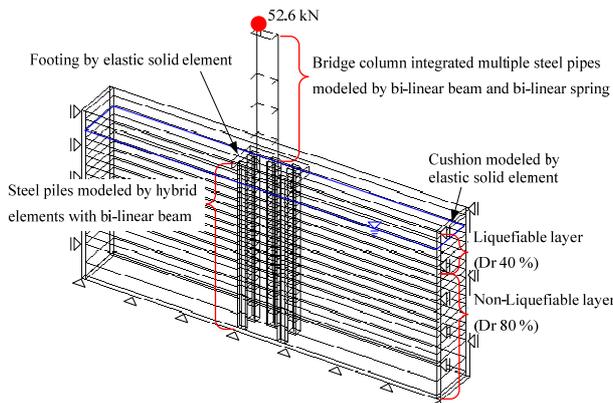


図-1 解析メッシュ (L-F)

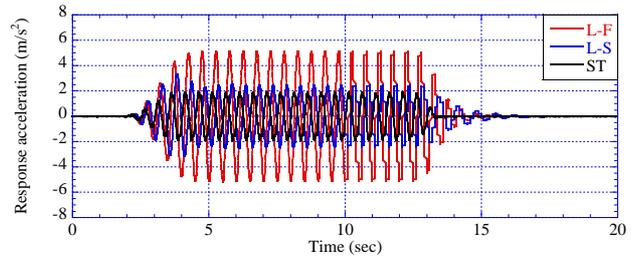


図-2 入力波と橋脚天端の応答加速度の時刻歴

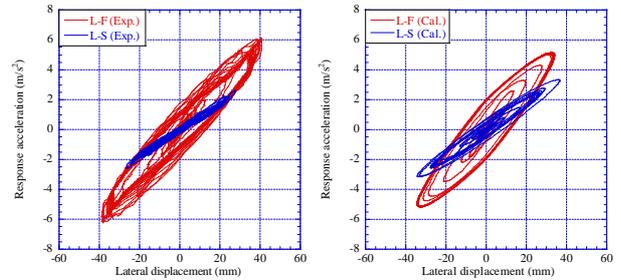


図-3 橋脚天端の応答加速度と変位の関係

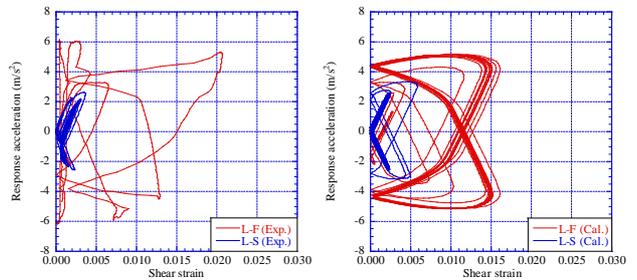


図-4 橋脚天端の応答加速度と上段せん断パネルに発生するせん断ひずみの関係

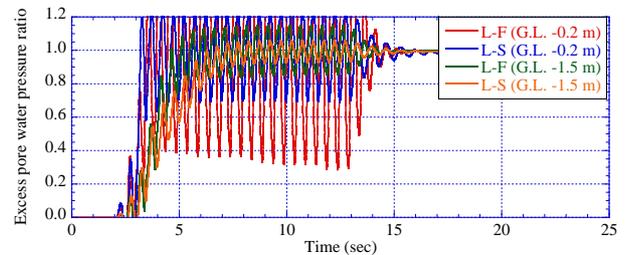


図-5 地盤の過剰間隙水圧比の時刻歴

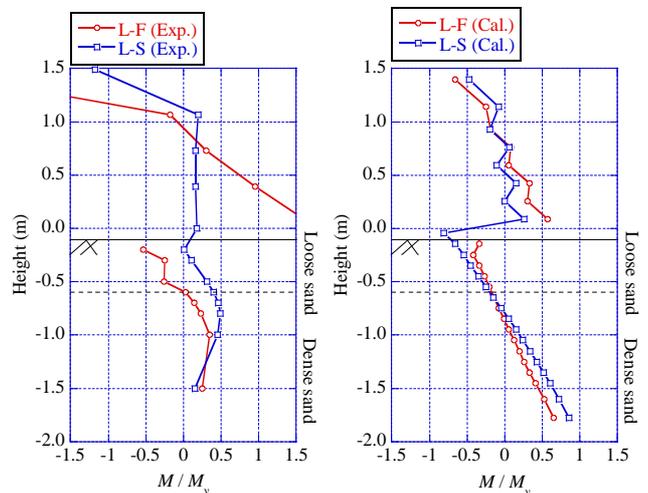


図-6 最大変位時の曲げモーメントの深度方向分布