三次元弾塑性有限要素解析による杭基礎一体型鋼管集成橋脚の耐震性能評価

北海道大学大学院　正会員　○磯部　公一，西井　優
京都大学大学院　正会員　澤村　康生，木村　亮
阪神高速道路㈱　正会員　曽我　恭匡，杉山　裕樹，篠原　聖二

１．目的

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[1)]．本稿では，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

実験条件，地盤条件は，文献[1)]に詳述しているので参考にされたい．本稿では，乾燥砂地盤中の杭基礎一体型（以後，D-S と呼称）およびフーチング型（以後，D-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い，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検証する．

本解析では，土・水連成 3 次元弾塑性動的有限要素解析「DBLEAVES」を用いて微小変形理論に基づく数値解析を行った．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 を用いる．地盤パラメータは模型実験と同じ東北硅砂 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．なお，振動台実験では三軸試験よりも拘束圧が小さいことなどの影響は初期過圧密比 $1/R_0$ を変化させることで考慮した．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，側面は鉛直方向にローラー支持とする．なお，境界の影響を緩和するために設置したクッション材はソリッド要素でモデル化した．クッション材の物性は，先述の通りである．上部工死荷重は 52.6 kN の質点でモデル化した．解析における時間増分を 0.005 秒，時間積分はニューマークβ法を用いた．本解析の粘性減衰モデルには初期剛性比例型を採用し，各ケースの構造物と地盤全体としての減衰定数および固有周期は，本実験前に実施したランダム波および各加振ステップでの加振後の橋脚天端の自由振動領域の波形から算出し，設定した．加振中にパネルが塑性化することで，減衰定数および固有周期は変動することが想定されるが，本解析では解析の終了まで一定にしている．

３．解析結果

乾燥砂地盤の第 1，3 加振に対する再現解析で得られた橋脚天端の応答加速度と水平変位の関係を実験結果と比較して**図−2** に示す．これらより，第 1 加振においては最大加速度および最大変位ともに D-F の方が D-S よりも大きい値を示しており，実験結果とも整合する．また，D-S の結果では実験結果と比べ剛性およびヒステリススループをやや過大評価しているものの，いずれのケースにおいても概ね実験結果を再現できており，定量的にも十分な精度で再現できていることがわかる．また，先述の実験結果と同様に，第 3 加振では第 1 加振とは異なり，D-F と D-S の最大加速度，最大水平変位の大小関係が逆転する現象を再現できている．

キーワード　杭基礎，フーチングレス，損傷制御設計，数値解析，振動台実験
連絡先　〒060-8628　北海道札幌市北 13 条西 8 丁目　北海道大学大学院工学研究院　ＴＥＬ011-706-6201

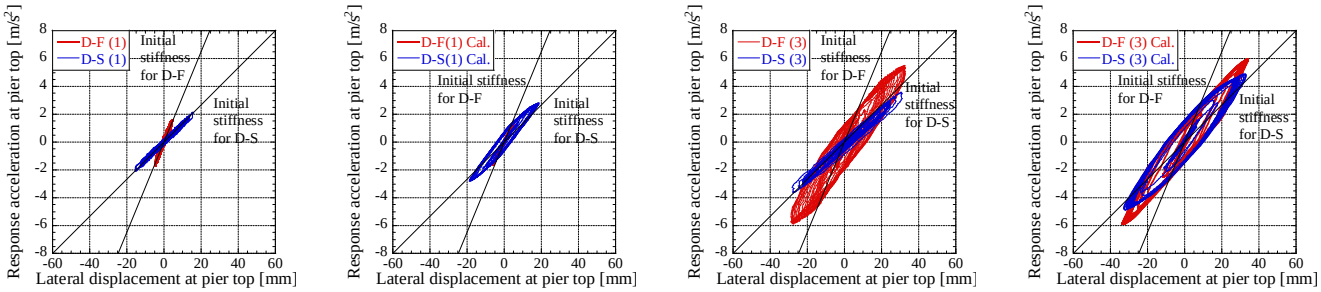
次に，D-F と D-S の最大加速度および最大水平変位の大小関係が逆転した第 3 加振のケースに対象を絞り，構造体および地盤の変形状況から地震時応答特性および変形メカニズムについて考察する．**図−2** に橋脚天端で最大水平変位が生じた時の杭および橋脚（柱）に発生した曲げモーメントの深度方向分布および水平変位の分布を示す．これらの図より，柱基部では D-F の方が大きな曲げモーメントを，杭部では D-S の方が大きな曲げモーメントを示す傾向を再現できており，杭先端の曲げモーメントは収束する傾向を示している．また，杭頭では杭基礎一体型の方が大きい変位量を，橋脚天端ではフーチング型の方が大きい変位量を示し，フーチング型の方が柱部でより大きなせん断変形を示す傾向も再現できており，先述のせん断パネルの挙動と調和的である．

表−1 構造体パラメータ

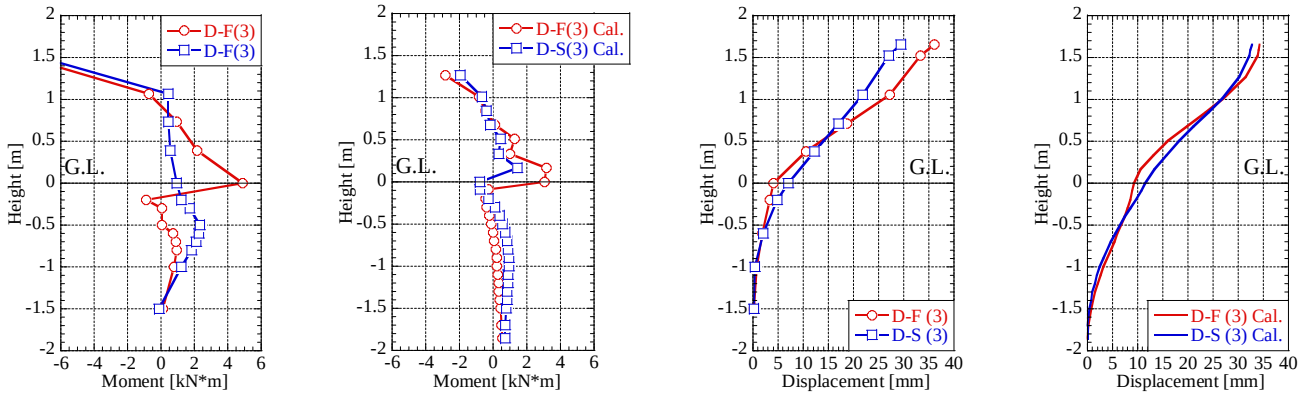
	杭	柱
材質	STK400	STK400
外径 (mm)	89.1	76.3
板厚 (mm)	2.8	2.8
断面剛性 (kN)	1.5×10^5	1.3×10^5
曲げ剛性 (kN-m^2)	1.4×10^2	8.7×10
降伏モーメント (kN-m)	3.73	2.69

表−2 地盤パラメータ

		Dr 40%	Dr 80%
Compression index	λ	0.036	0.036
Swelling index	κ	0.005	0.005
Stress ratio at critical state	R_f	3.924	4.812
Void ratio (p' = 98 kPa on N.C.L)	N	0.700	0.700
Poisson's ratio	ν	0.300	0.300
Degradation parameter of overconsolidation state	m	1.000	1.000
Degradation parameter of structure	a	2.200	2.200
Evolution parameter of anisotropy	br	1.500	1.500
Initial mean effective stress [kPa]	p'	0.48~3.61	0.48~19.1
Initial degree of structure	$R_0{}^*$	0.400	0.900
Initial degree of overconsolidation	$1/R_0$	vary according to p'	
Initial anisotropy	ζ_0	0.000	0.000
Permiablity [m/sec]	k	1.00E-04	1.00E-04
Dry unit weight [kN/m^3]	γ_d		16
Saturated unit weight [kN/m^3]	γ_{sat}	19.3	20
Unit weight under water [kN/m^3]	γ'	9.5	10.2



図−1 橋脚天端の応答加速度と水平変位の関係の比較（左２つ：第1加振，右２つ：第3加振）



図−2 橋脚天端で最大水平変位発生時の杭・橋脚に発生した曲げモーメント（左）および水平変位（右）分布

４．結論

3 次元弾塑性動的有限要素解析により，振動台実験の結果を定性的にも定量的にも再現することができた．その結果，せん断パネルの塑性化により構造全体の剛性の低下が大きいフーチング型において，橋脚天端の応答加速度および応答変位が増幅され相対的に脆性的な挙動を示したことで，杭基礎一体型の方がより粘り強い構造体となることが確認できた．

参考文献

1) 磯部ら：土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.72，No.4，pp.327-338，2016.