

1. はじめに

図-1に示す低コストの既製鋼管4本組を基本単位とした、履歴型ダンパー機能を有するせん断パネルによりひとつの柱とした構造（鋼管集成橋脚）が提案されている¹⁾。この工法は、安価な材料、鋼材履歴減衰の有効利用、アンカーフレームの省略等をもとに考え出された構造であり、死荷重、活荷重等の鉛直荷重を受けもつ主部材と地震力等の横力対応の二次部材に差別化を図る損傷制御設計を適用したものである。本研究では、鋼管集成橋脚構造の基礎部の合理的な構造として、鋼管杭基礎の適用性を数値解析により検証する。杭基礎構造の力学挙動を検証する上で、群杭効率に関する定量的な評価が必要となるが、鋼管杭基礎構造に支持される鋼管集成橋脚は上部工、下部工、基礎を一体と考え、上部工、特にせん断パネルの影響を適切に考慮する必要がある。そのため、上部工、下部工、基礎構造を一体として計算でき、群杭効率をはじめとする杭基礎の力学挙動を適切に表現できる三次元弾塑性有限要素解析コードDGPILE-3D²⁾を用い、鋼管杭基礎構造に支持される鋼管集成橋脚の力学的安定性、変形挙動を検証するとともに、杭間隔と群杭効率に関する検討を行った。

2. 三次元弾塑性有限要素解析の概要

解析検討事例は、図-1に示す砂層と粘土層の互層地盤で構成される地盤条件に鋼管杭基礎で支持された鋼管集成橋脚である。鋼管集成橋脚を支える鋼管杭基礎とは、鋼管柱それぞれを1本の杭基礎により直接支持する基礎構造であり、本事例では杭体を鋼管ソイルセメント杭で検討する。橋梁構造の概要および諸元を図-1に示す。

鋼管集成橋脚の鋼管柱部分をバイリニア型の $M-\phi$ 関係となる梁要素で、せん断パネルをバイリニア型の $M-\phi$ 関係となる梁要素とバイリニア型の $q-\delta$ 関係となるばね要素を3方向（ x, y, z 方向）に配置することでモデル化した。モデル化の概略を図-1(c)に示す。鋼管ソイルセメント杭は、Zhang et al.²⁾により提案された杭～地盤～杭の相互作用を適切に考慮できるハイブリッド要素を用いる。詳細は文献2)に譲る。鋼管集成橋脚、鋼管ソイルセメント杭の諸元と、モデル化した場合のその諸元を図-1、表-1～3に示す。なお、梁要素の全塑性モーメントは道路橋示方書に基づき算出し、せん断パネルのバネ定数は実物大のせん断パネルに対するせん断試験より決定した。地盤の構成モデルはDrucker-Pragerモデルを用いた。パラメータを表-4に示す。

本解析では、鋼管集成橋脚を鋼管杭基礎で支持した場合の杭間隔と水平抵抗力特性、群杭効率への影響を検証する。Case-1を基本ケースとし、杭間隔 D' を杭径 $D (= 1.4 \text{ m})$ の2.5倍とし、鋼管柱高さ h を24.7 m、鋼管柱に充填するコンクリートの高さ h_c を $h/3 (= 8.3 \text{ m})$ とした。Case-2～Case-4では、鋼管柱高さを一定とし、杭間隔を $2.0 D, 3.0 D, 5.0 D$ と変化させた。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Case-1で10681、要素数は9180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する。荷重条件は、梁部重量を4400 kNで一定とし、鋼管柱部には各柱の重量に応じた分布荷重を載荷する。各ケースとも鉛直荷重を10 ステップで載荷した後に、水平荷重を100ステップで水平震度1.0 まで載荷した（レベル1地震動に対する設計震度 k_h は0.3）。

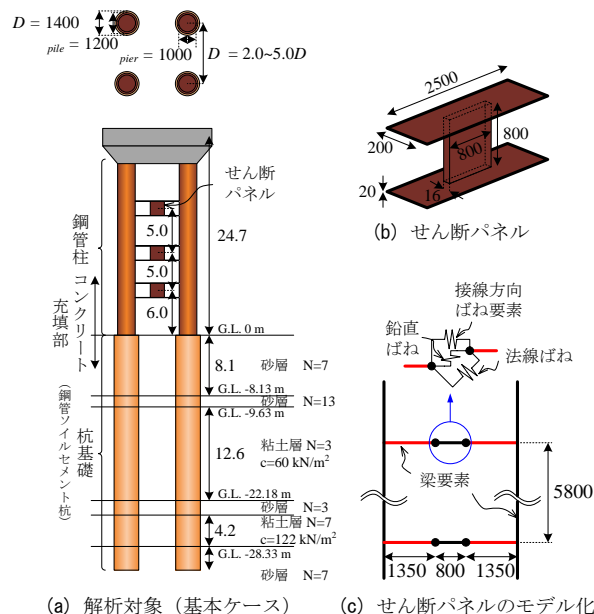


図-1 解析検討事例とそのモデル化

表-1 鋼管集成橋脚に関するパラメータ

	径	肉厚	ヤング率	断面積	断面二次モーメント	断面剛性	曲げ剛性	降伏モーメント
	D	t	E	A	I	EA	EI	M_y
	m	m	kN/m ²	m ²	m ⁴	kN	kN-m ²	kN-m ³
コンクリート 無充填 ()内は充填部	-	-	2.0×10^8 (4.0×10^7)	0.31 (0.31)	0.009 (0.007)	6.1×10^7 (1.2×10^8)	1.8×10^6 (2.7×10^6)	5.7×10^3 (5.7×10^3)

表-2 セン断パネルに関するパラメータ

降伏せん断応力	長さ	せん断剛性	断面積	幅	高さ	降伏せん断力	ばね定数	降伏変位
\bar{q}_y	a	G	A	b	h	q_y	K_z	\bar{q}_z
kN/m ²	m	kN/m ²	m ²	m	m	kN	kN/m	m
1.2×10^6	0.8	7.7×10^7	0.016	0.02	0.8	2.0×10^4	1.5×10^6	0.013

表-3 杭をモデル化したハイブリッド要素のパラメータ


	形状	径	肉厚	ヤング率	断面積	断面二次モーメント	断面剛性	曲げ剛性	降伏モーメント
	-	D	t	E	A	I	EA	EI	M_y
	-	m	m	kN/m ²	m ²	m ⁴	kN	kN-m ²	kN-m
梁要素	●	-	-	2.9×10^8	0.33	0.013	6.8×10^7	2.6×10^6	7.4×10^3
ソイルセメント									
コラム要素		1.4	-	9.1×10^5	1.96	0.32	1.8×10^6	2.9×10^5	-

表-4 土質パラメータ

	N値	層厚	単位体積重量	変形係数	内部摩擦角	粘着力	静止土圧係数	ポアソン比
	N	H	γ	E_0	ϕ	c	K_0	ν
	-	m	kN/m ³	kN/m ²	deg	kN/m ²	-	-
砂質土	7	6.8	20.0	3000	25.0	0.0	0.5	0.3
砂質土	13	1.5	17.0	6800	29.0	0.0	0.5	0.3
粘性土	3	12.55	16.0	3500	0.0	60.0	0.62	0.3
砂質土	3	1.95	17.0	2000	22.0	0.0	0.5	0.3
粘性土	7	4.5	16.4	8300	0.0	122.0	0.54	0.3
砂質土	50	8.3	20.0	28000	39.0	0.0	0.5	0.3

3. 解析結果

図-2に荷重～変位関係、図-3に群杭効率～杭間隔の関係を示す。図-3には道路橋示方書に記載されている群杭効率の取り扱いも併記している。

$$E_f = \frac{P_g}{n \times P_s}$$

<道路橋>

$$\mu = 1 - 0.2 \{2.5 - (L/D)\} \quad (L < 2.5D)$$

$$\mu = 2/3 \quad (2.5 \leq L \leq 5.0D)$$

$$\mu = 1.0 \quad (L > 5.0D)$$

ここで、 E_f ：杭頭の水平変位 δ における群杭効率、 P_g ：杭頭の水平変位が δ となる時の群杭の水平荷重、 P_s ：杭頭の水平変位が δ となる時の単杭の水平荷重、 n ：群杭の杭本数、 μ ：群杭補正係数、 L ：杭中心間隔、 D ：杭径

ただし、本解析では群杭効率算出には杭間隔 $D' = 5.0D$ のものを規準とし、杭頭変位1% D の結果を記載した。これは上部工を考慮した場合の群杭と単杭の構造が異なることから、通常の単杭の水平抵抗力に基づく群杭効率の算出が難しいためである。これらの図より、杭間隔の増加とともに水平抵抗力は増加し、杭間隔5.0 D を規準とした鋼管集成橋脚を有する鋼管杭基礎の1% D 変位時における群杭効率の結果から、道路橋示方書に記載されているものでは安全側に評価しすぎていることがわかる。

図-4に深度1.5 mにおける2本の杭の前後の要素 (Element01～04) の応力経路を比較する。これらを見ると、いずれも杭後方の要素 (Element 01, 03) は引張破壊、杭前方の要素 (Element 02, 04) は圧縮破壊を生じている。杭後方の応力経路 (Element 01, 03) は杭間隔に関係なくほぼ同一の経路を辿るが、杭前方の経路 (Element 02, 04) は杭間隔により変化し、

Element 02では杭間隔が狭いほどより早い段階で圧縮破壊する．一方で、杭間隔が広がるにつれてElement02, 04の二つの要素は同一経路に近づく．以上のことから、杭間隔が狭いと杭間の地盤要素は前方杭の存在により拘束効果が高まり、より早く圧縮破壊に達するが、杭間隔が広がるほど杭～地盤の相互作用の影響は少なく、それぞれの杭が独立して存在、すなわち単杭の集合体と考えられるようになる．このことから先述の群杭効率算出の際に杭間隔 $5.0 D$ を規準とすることの影響は少ないと思われる．

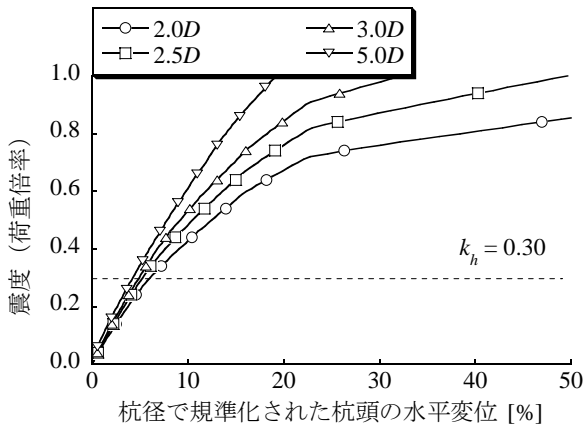


図-2 杭頭の荷重～変位関係

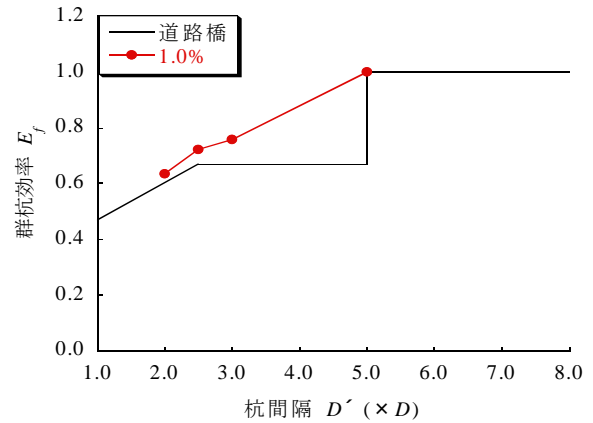
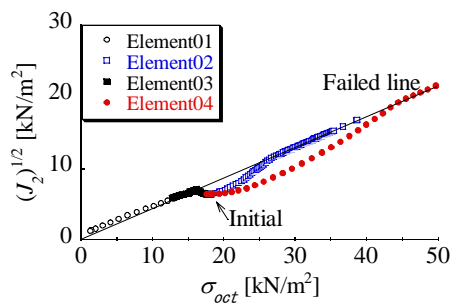
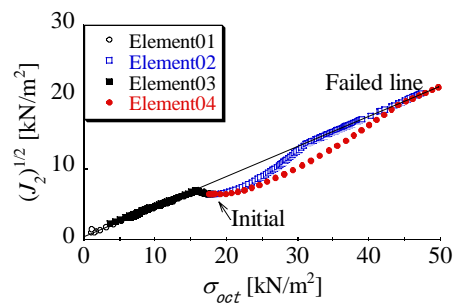


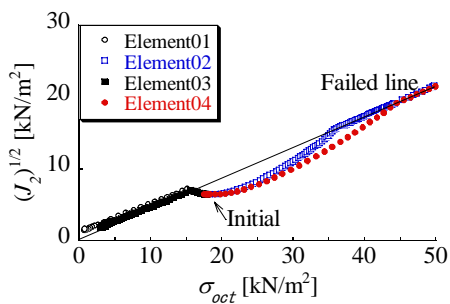
図-3 杭間隔と群杭効率の関係



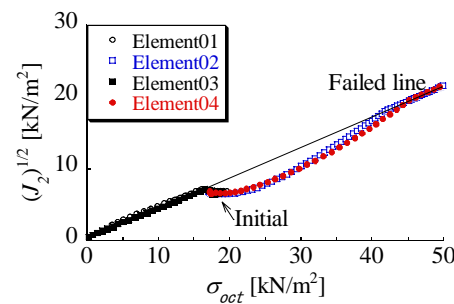
(a) 2.0D



(b) 2.5D



(c) 3.0D



(d) 5.0D

図-4 地盤要素の応力経路

図-5に杭間隔と杭の水平荷重分担率の関係を示す．この図では、各ケースの降伏震度ならびに最大変位時における杭の水平荷重分担率を示している．これより、杭間隔が狭まると前方杭の分担率が上昇する結果となり、地盤要素の応力経路の結果と整合する．しかしながら、杭間隔が $3.0D$ と $5.0D$ では分担率の相違は小さい．

図-6に設計震度ならびに杭体降伏時の曲げモーメント分布を比較する．これより、鋼管集成橋脚に発生する曲げモーメントはせん断パネルの存在により設置個所においてモーメントの減少がみられ、損傷制御機能が発揮されている．また、同一荷重条件下では杭間隔が狭いほど曲げモーメントが大きく、降伏モーメントに達する荷重倍率は杭間隔が大きいほど高い値となる．しかしながら、モーメント分布にはほとんど差異がみられず、深度 5.3 m で最大モーメントが発生する．さらに、図-7に各部材の降伏震度を示す．これより、各部材の降伏順序は下部せん断パネルより始まり杭体が最も遅く降伏し、杭体降伏時は変位急増点と一致することがわかる．ただし、杭間隔が $5.0D$ のケースでは上部せん断パネルおよび杭体の降伏は見られない．また、杭間隔が $2.0D$ の場合ではレベル1地震動に対する設計震度 $k_h 0.3$ において、下部二層のせ

せん断パネルが降伏に達するものの、それ以外のケースでは設計震度 $k_h 0.3$ において部材は降伏しない。以上から、杭間隔が2.5D以上であればレベル1地震動に対する耐震照査項目をすべて満足することになる。

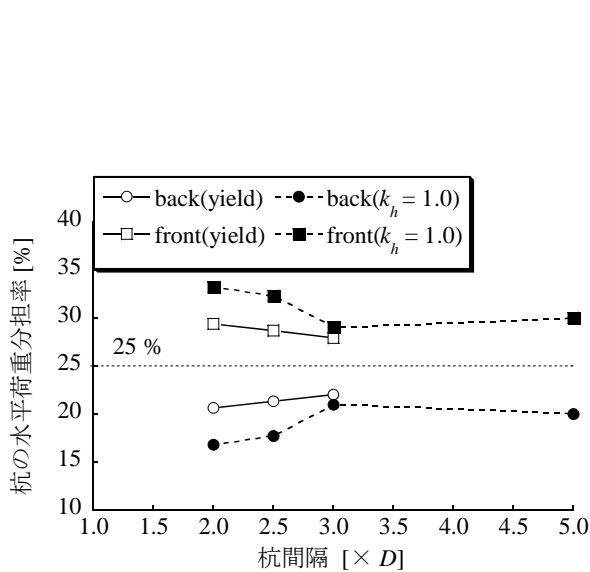


図-5 杭間隔と杭の水平荷重分担率の関係

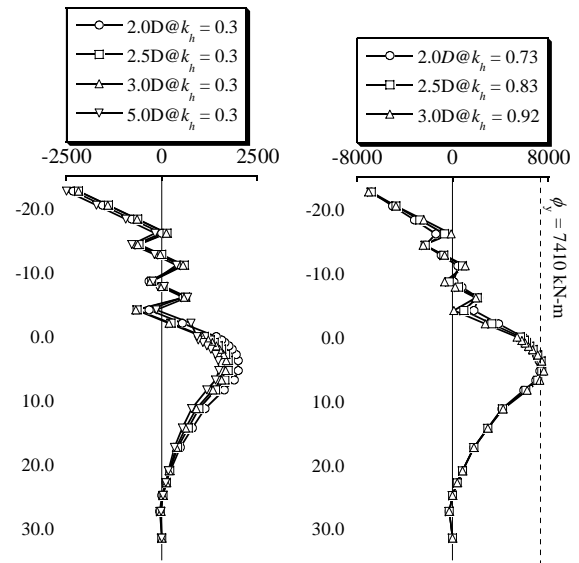


図-6 曲げモーメント深度方向分布

(左：設計震度載荷時，右：降伏モーメント到達時)

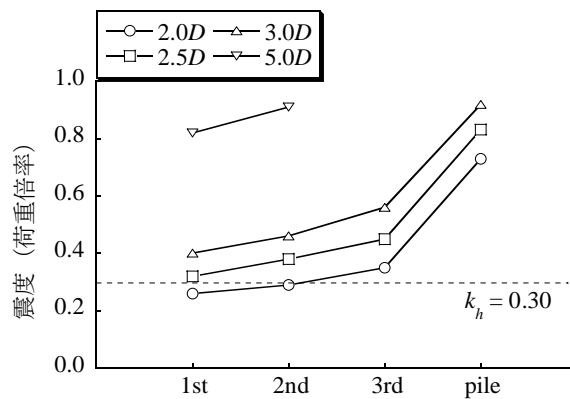


図-7 各部材の降伏震度

4. まとめ

損傷制御設計概念を取り入れた鋼管集成橋脚に対する合理的な基礎構造として、鋼管杭基礎を提案し、その適用性を数値解析により検証した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 鋼管集成橋脚を有する鋼管杭基礎構造でも、杭間隔の増加とともに水平抵抗力が増加する、いわゆる群杭効果を確認できる。
- 2) 杭間隔と群杭効率の関係から、道路橋示方書に記載される群杭効率の取扱いでは安全側に評価しすぎていることがわかった。
- 3) 群杭効果は、杭間隔が狭いと杭間の地盤要素は前方杭の存在により拘束効果が高まり、より低荷重で圧縮破壊に達するために発生する。また、杭の水平荷重分担率と杭間隔との関係とも整合する。
- 4) 鋼管集成橋脚を有する鋼管杭基礎の部材降伏は、地表面に近い下部のせん断パネルから起こり、最後に最上部のせん断パネルが降伏する。その後、杭が降伏する。
- 5) 鋼管柱に発生する曲げモーメントがせん断パネル設置位置で減少することから、せん断パネルによる主部材の鋼管柱の損傷制御機能を確認できる。

参考文献

- 1) 金治英貞，鈴木英之，野中哲也，馬越一也：履歴型ダンパー付き鋼管集成橋脚の損傷制御構造に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.50A，pp.559-566，2004.
- 2) Zhang, F., Kimura, M., Nakai, T. and Hoshikawa, T.: 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.