

# 鋼管柱基礎の静的および動的的水平抵抗特性

建設工学専攻 2 年 秋山耕士郎

## 1. はじめに

既製鋼管4本を、履歴型ダンパー機能を有するせん断パネルにより結合した柱構造（鋼管集成橋脚と呼称）が提案されている<sup>1)</sup>。本工法は、死荷重、活荷重の鉛直荷重を受けもつ主部材と地震力等の水平荷重対応の二次部材を用いる損傷制御設計を適用している。この鋼管集成橋脚に対する基礎構造として、著者らはフーチングを配さずに鋼管柱それぞれを1本の杭基礎により直接支持する上下部工・基礎工一体構造（鋼管柱基礎と呼称）を提案し、その静的水平抵抗特性を数値解析により検証してきた<sup>2)</sup>。その結果、①通常の群杭基礎と同様に、杭間隔が狭まると水平抵抗力が低下する、群杭効果が認められること、②鋼管柱基礎の群杭効率として道路橋示方書記載の値を用いても支障がないこと、③せん断パネルにより鋼管柱の断面力を抑制し、損傷制御できること、などが分かった。しかし、本構造は長尺構造のため、地震時に橋脚天端で過大な応答水平変位の発生が危惧される。また、その抑制に杭間隔を拡大するとしても、施工面積が制約される場合もある。

以上の背景から、**図-1**のように杭接続部に斜柱あるいは斜杭構造を適用することで、応答変位、杭・柱の断面力を抑制させる構造を提案し、従来の直柱構造の水平抵抗特性との差異を数値解析により検証した。

## 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上の鋼管柱基礎とする。本事例では杭体を鋼管ソイルセメント杭とする。橋梁構造の概要および諸元を**図-1**に示す。解析ケースを**表-1**に示す。柱間隔( $D_c$ )、杭間隔( $D_p$ )を $2.5 D$ と一定とした直柱構造(SC)を基本ケースとし、鋼管柱間隔を $2.5 D$ とした斜柱構造(IC)、鋼管柱間隔を $2.5 D$ とした斜杭構造(IP)の3ケースを比較した。ここで、 $D$ は杭径を表す。鋼管柱高さ $h$ は $24.7 \text{ m}$ 、鋼管柱、杭に充填するコンクリート高さ $h_c$ は地表面を中心に約 $2h / 3$  ( $\approx 17.0 \text{ m}$ )と全ケースで一定とした。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

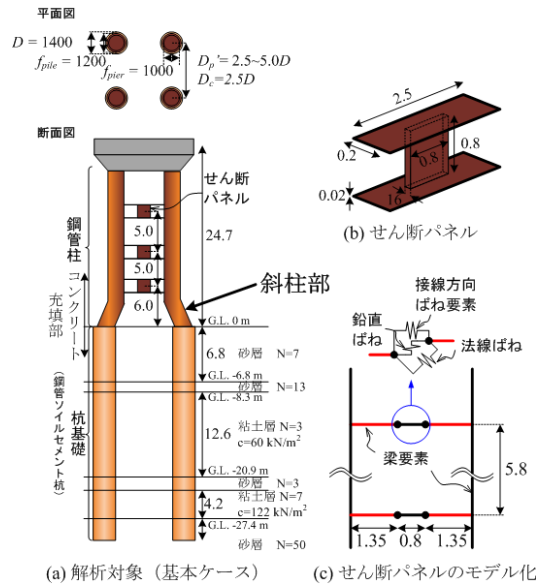


図-1 解析検討事例とそのモデル化(斜柱構造)

表-1 解析ケース

	形式		
	直柱(SC)	斜柱(IC)	斜杭(IP)
柱間隔( $D_c$ )	$2.5 D$	$2.5 D$	$2.5 D$
杭間隔( $D_p$ )	$2.5 D$	$3.0 D$	$> 3.0 D$
斜度( $\theta$ )	-	7 deg.	7 deg.

模式図

表-2 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/m²	m²	m⁴	kN	kN·m²	kN·m
コンクリート	-	-	$2.0 \times 10^8$	0.31	0.009	$6.1 \times 10^7$	$1.8 \times 10^6$	$5.7 \times 10^3$
無充填 ( )内は充填部	-	-	$(4.0 \times 10^7)$	(0.31)	(0.007)	$(1.2 \times 10^8)$	$(2.7 \times 10^6)$	$(5.7 \times 10^3)$

表-3 せん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
$\sigma_y$	$a$	$G$	$A$	$b$	$h$	$q_y$	$K_c$	$\delta_c$
kN/m²	m	kN/m²	m²	m	m	kN	kN/m	m
$1.2 \times 10^6$	0.8	$7.7 \times 10^7$	0.016	0.02	0.8	$2.0 \times 10^4$	$1.5 \times 10^6$	0.013

表-4 杭をモデル化したハイブリッド要素パラメータ

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/m²	m²	m⁴	kN	kN·m²	kN·m
梁要素	●	-	-	$2.9 \times 10^6$	0.33	0.013	$6.8 \times 10^7$	$2.6 \times 10^6$
ソイルセメント	■	-	-	$9.1 \times 10^5$	196	0.32	$1.8 \times 10^7$	$2.9 \times 10^5$
コラム要素	□	1.4	-	$9.1 \times 10^5$	196	0.32	$1.8 \times 10^7$	$2.9 \times 10^5$

表-5 土質パラメータ

N値	層厚	単位体積重量	変形係数	低減係数	内部摩擦角	粘着力	静止土圧係数	ポアソン比	初期間隙比	破壊時主応力比	圧縮係数	膨張係数	ti-j-modelの土質パラメータ			
$N$	$H$	$\gamma$	$E_0$	$De$	$\phi$	$c$	$K_0$	$\nu$	$e_0$	$R_f$	$C(\lambda)$	$C(\lambda)$	$\alpha$	$D_f$	$m$	
-	m	kN/m³	kN/m²	-	deg	kN/m²	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
砂質土(S1)	7	6.8	20.0	3000	0.167	25.0	0.0	0.55	0.3	0.88	2.46	0.38	0.30	0.85	-0.2	0.3
砂質土(S2)	13	1.5	17.0	6800	0.333	29.0	0.0	0.55	0.3	0.88	2.88	0.04	0.03	0.85	-0.2	0.3
粘性土(C1)	3	12.55	16.0	3500	1.0	0.0	60.0	0.62	0.3	0.88	1.61	0.02	0.01	0.70	-	-
砂質土(S3)	3	1.95	17.0	2000	1.0	22.0	0.0	0.55	0.3	0.88	2.20	0.05	0.035	0.85	-0.2	0.3
粘性土(C2)	7	4.5	16.4	8300	1.0	0.0	122.0	0.54	0.3	0.88	1.64	0.02	0.01	0.70	-	-
砂質土(S4)	50	8.3	20.0	28000	1.0	39.0	0.0	0.5	0.3	0.88	4.40	0.0028	0.025	0.85	-0.2	0.3

ア型の $M-\phi$ 関係となる梁要素とバイリニア型の $q-\tau$ 関係となるばね要素を3方向(x, y, z方向)に配することでモデル化した。概略を図-1(c)に示す。鋼管ソイルセメント杭は、ハイブリッド要素<sup>3)</sup>を用いた。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諸元を図-1、表-2~4に示す。地盤の構成モデルには $t_{ij}$ モデル<sup>4)</sup>を用いた。パラメータを表-5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。境界条件は、底面の節点は全方向固定、加振直角方向の側面は等変位境界、加振方向に沿った側面は加振直角方向の変位のみを固定条件とした。入力波は、兵庫県南部地震のJR西日本鷹取駅観測波とし、主要波が含まれる40 secを4000ステップ、解析における時間刻みを0.01 secで与えた。地盤材料の減衰は10%とし、剛性比例型減衰を用いた。時間積分はニューマーク $\beta$ 法で行った。

### 3. 解析結果

図-2に杭頭と橋脚天端の応答加速度・水平変位の時刻歴を示す。直柱では杭頭と橋脚天端での応答特性が異なり、杭頭では入力波系と似た振動波形が観測されるが、橋脚天端では長周期成分の卓越した振動波形が見られる。事前に危惧した通り、橋脚天端での応答変位が極端に大きい。一方、斜柱、斜杭のケースでは応答変位を抑制することができ、その効果は斜杭の方がより大きい。しかし、応答加速度は増大する。また、杭頭と天端での相対変位も減少する傾向にある。

続いて、各ケースでの鋼管柱・杭に発生する断面力の最大値を図-3で比較する。これより、斜柱、斜杭の適用により、曲げモーメントの顕著な差異はみられないのに対し、軸力が増加傾向にあることが分かる。すなわち、斜柱、斜杭を用いることで、水平抵抗特性が、曲げ変形による抵抗から柱および杭の軸方向に対する抵抗(軸力および地盤との周面摩擦力)へと水平抵抗

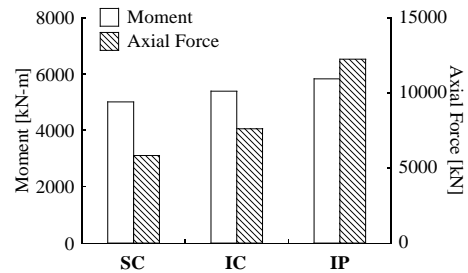


図-3 杭・柱に発生する最大断面力の比較

抗特性が変わり、構造体自身で地震荷重に抵抗する機構となることを確認できた。

### 4. 結論

鋼管集成橋脚に対する合理的な基礎形式である鋼管柱基礎として、直柱、斜柱、斜杭の3タイプを提案し、それぞれの動的水平抵抗特性を把握した。その結果、斜柱、斜杭構造となるにつれ、橋脚天端の応答水平変位と相対変位を抑制できること、一方で応答加速度が増加することが示された。斜柱、斜杭を用いることで、水平抵抗特性が、鋼管の曲げ変形による抵抗から柱および杭の軸方向に対する抵抗(軸力および地盤との周面摩擦力)へと水平抵抗特性が変わり、構造体自身で地震荷重に抵抗する機構となる。以上のことから、斜杭構造が最も水平変位と相対変位を抑制し、断面力も減少できる可能性が高く、合理的な構造体となりうると考えられる。

参考文献 1) 金治ら: 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) 秋山ら: 鋼管柱基礎の群杭効率に関する数値解析的検討, 第44回地盤工学会, pp. 1183-1184, 2009. 3) Zhang 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. 4) Nakai, T. and Mihara, Y.: A New Mechanical Quantity for Soils and Its Application to Elastoplastic Constitutive Models, *Soils and Foundations*, Vol.24, No.2, pp.82-94, 1984.

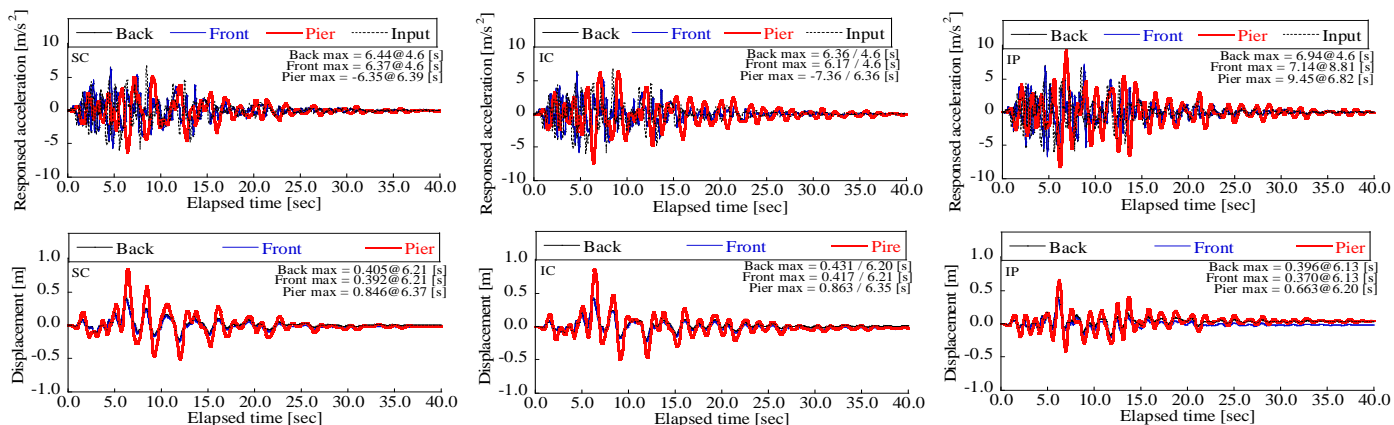


図-2 応答加速度, 水平変位の時刻歴 (上段: 加速度, 下段: 水平変位, 左から直柱, 斜柱, 斜杭)