

### 斜柱を有する鋼管柱基礎の水平抵抗特性に関する三次元有限要素解析

長岡技術科学大学大学院  
 長岡技術科学大学  
 京都大学  
 (財) 阪神高速道路管理技術センター  
 阪神高速道路(株)

学生会員 ○秋山耕士郎  
 正会員 磯部公一, 大塚 悟  
 正会員 木村 亮  
 正会員 金治英貞  
 正会員 篠原聖二

#### 1. はじめに

図-1に示す既製鋼管4本組で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(鋼管集成橋脚と呼称)が提案されている<sup>1)</sup>。本工法は、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ている。この鋼管集成橋脚に対し、著者らは合理的な基礎構造として、フーチングを配しない鋼管柱それぞれを1本の杭基礎により直接支持する構造(鋼管柱基礎と呼称)を提案し、その適用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支持力が低下する、群杭効果が認められること、②杭間隔と群杭効率の関係において、群杭効率は道路橋示方書記載の値よりも大きな値を示すこと、③せん断パネルにより鋼管柱の断面力を抑制できること、④せん断パネルの降伏は地表面側から起こり、順に上部のせん断パネルが降伏し、全パネル降伏後に杭が降伏する変形特性を示すこと、等が分かった。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で構成される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で検討する。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。鋼管柱・杭間隔を $2.5D$ と一定とした直柱構造のCase-S1を基本Caseとし、直柱構造、斜柱構造ともに杭間隔を $3.0D$ 、 $3.5D$ 、 $4.0D$ 、 $5.0D$ と変化させる。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。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、ハイブリッド要素<sup>3)</sup>を用いる。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諸元を図-1、表-2~4に示す。地盤の構成モデルは $t_{ij}$  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、側面はローラー支持とする。荷重条件は、梁部重量を $4400\text{ kN}$ 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。

#### 3. 解析結果

図-2に荷重~変位関係、図-3に荷重増加倍率~杭間隔の関係を示す。荷重増加倍率は杭間隔 $D' = 2.5D$ のものを規準とし、杭頭変位 $1\%D$ の水平支持力の値により算出した。これより、直柱に比べ斜柱は水平変位を抑制すること、杭間隔拡大の効果よりも斜柱による効果の方が大きいことが分かる。

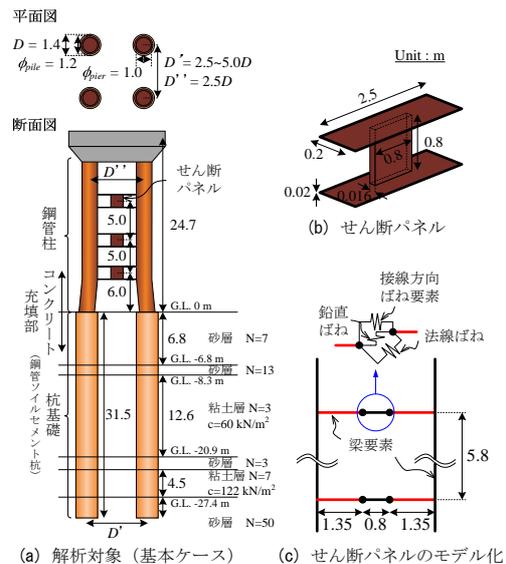


図-1 解析検討事例とそのモデル化(斜柱構造)

キーワード 鋼管柱基礎 斜柱 三次元有限要素解析

連絡先 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1 長岡技術科学大学 環境・建設系 環境防災研究室

次に、**図-4**に直柱と斜柱での曲げモーメント分布を比較する。これより、斜柱においてもせん断パネル設置部における柱部のモーメントが低下しており、直柱の場合と同様に損傷制御機能が発揮されることが分かる。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なる傾向は共通しており、斜柱構造では直柱よりも杭体に発生する最大曲げモーメントが抑制される。

**図-5**に各ケースの杭の最大曲げモーメント／柱の最大軸力～杭間隔の比較を示す。直柱、斜柱ともに杭の最大モーメントはGL. 6.8 m、柱の最大軸力(圧縮を正)はGL. -4.1 mで発生している。これより、斜柱は直柱に比べ杭体のモーメントを抑制し、軸力は直柱に比べ増大する。ゆえに、水平抵抗力の増加要因は、斜柱により荷重伝達機構が変わり、従来の曲げ抵抗に加え、柱の軸力抵抗が加味されたためといえる。

4. まとめ

斜柱を有する鋼管柱基礎の水平抵抗特性を数値解析により検証し、以下の知見が得られた。①斜柱を有する鋼管柱基礎構造では、直柱と比較して水平抵抗力が大幅に向上する。②斜柱構造でも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・せん断パネルの降伏を確認でき、せん断パネルによる鋼管柱の損傷制御機能を確認できる。③斜柱による荷重伝達機構の変化で、鋼管柱の軸力による抵抗が付加され、水平抵抗力が増加する。④杭部の最大モーメントを大幅に抑制できる。⑤斜柱構造により、鋼材使用量の増大を抑え、施工面積に制限されずに、より効果的に水平抵抗力の高い合理的な構造形式の設計を可能とする。

参考文献 1) 金治ら：構造工学論文集, Vol.50A, pp.559-566, 2004. 2) 秋山ら：第44回地盤工学会, 2009. (印刷中) 3) 例えば, Zhang et al.: *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.1-17, 2000. 4) 例えば, Nakai, T. and Mihara, Y.: *Soils and Foundations*, Vol. 24, No.2, pp.82-94, 1984.

表-1 解析ケース

Case	直柱モデル	D'	D''	Case	構造モデル	D'	D''
S1		2.5	2.5	I2		3.0	2.5
S2		3.0	3.0	I3		3.5	2.5
S3		3.5	3.5	I4		4.0	2.5
S4		4.0	4.0	I5		5.0	2.5
S5		5.0	5.0				

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 <sub>y</sub>
m	m	kN/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>4</sup>	kN	kN-m <sup>2</sup>	kN-m
コンクリート 無充填 ①内は充填部	-	2.0 x 10 <sup>8</sup> (4.0 x 10 <sup>7</sup> )	0.31 (0.31)	0.009 (0.007)	6.1 x 10 <sup>7</sup> (1.2 x 10 <sup>8</sup> )	1.8 x 10 <sup>6</sup> (2.7 x 10 <sup>6</sup> )	5.7 x 10 <sup>3</sup> (5.7 x 10 <sup>3</sup> )

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
$\sigma_v$	a	G	A	b	h	q <sub>v</sub>	k <sub>v</sub>	$\delta$
kN/m <sup>2</sup>	m	kN/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m	m	kN	kN/m	m
1.2 x 10 <sup>6</sup>	0.8	7.7 x 10 <sup>7</sup>	0.016	0.02	0.8	2.0 x 10 <sup>4</sup>	1.5 x 10 <sup>6</sup>	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 <sub>y</sub>
-	m	m	kN/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	m <sup>4</sup>	kN	kN-m <sup>2</sup>	kN-m
梁要素	●	-	2.9 x 10 <sup>8</sup>	0.33	0.013	6.8 x 10 <sup>7</sup>	2.6 x 10 <sup>6</sup>	7.4 x 10 <sup>3</sup>
ソイルセメント コラム要素		1.4	-	9.1 x 10 <sup>5</sup>	1.96	0.32	1.8 x 10 <sup>6</sup>	2.9 x 10 <sup>5</sup>

表-5 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	初期間隙比	破壊時主応力比	圧縮係数	膨潤係数	Tij-snd modelの土質パラメータ			
N	H	$\gamma$	E <sub>p</sub>	$\phi$	c	K <sub>0</sub>	v	e <sub>0</sub>	R <sub>f</sub>	C( $\lambda$ )	C( $\kappa$ )	$\alpha$	D <sub>y</sub>	m	
-	-	-	kN/m <sup>3</sup>	deg	kN/m <sup>2</sup>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
砂質土	7	6.8	20.0	3000	25.0	0.0	0.5	0.3	0.88	2.4643	0.3800	0.3000	0.85	-0.2	0.3
砂質土	13	1.5	17.0	6800	29.0	0.0	0.5	0.3	0.88	2.8840	0.0400	0.0300	0.85	-0.2	0.3
粘性土	3	12.5	16.0	3500	0.0	60.0	0.62	0.3	0.88	1.6125	-	-	0.70	-	-
砂質土	3	1.95	17.0	2000	22.0	0.0	0.5	0.3	0.88	2.1990	0.0500	0.0350	0.85	-0.2	0.3
粘性土	7	4.5	16.4	8300	0.0	122.0	0.54	0.3	0.88	1.6400	-	-	0.70	-	-
砂質土	50	8.3	20.0	28000	39.0	0.0	0.5	0.3	0.88	4.4000	0.0028	0.0250	0.85	-0.2	0.3

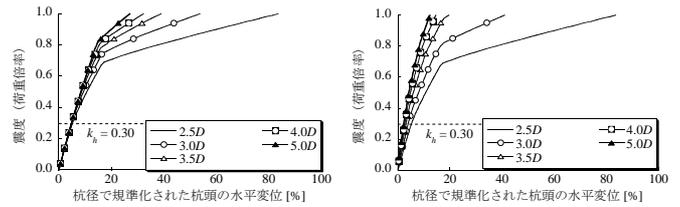


図-2 杭頭の荷重～変位関係 (左:直柱, 右:斜柱)

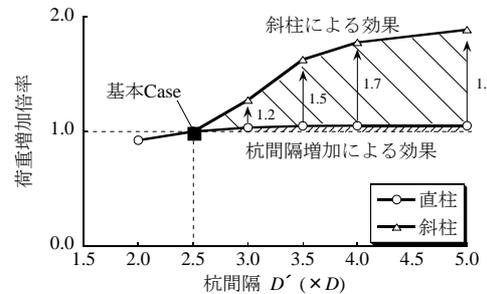


図-3 荷重増加倍率と杭間隔の関係

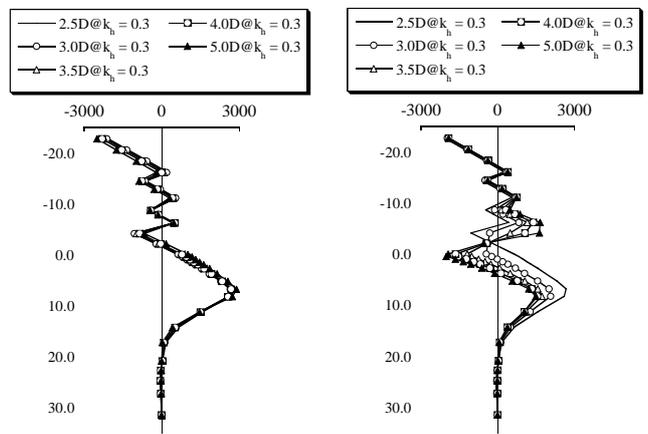


図-4 モーメント深度方向分布 (左:直柱, 右:斜柱)

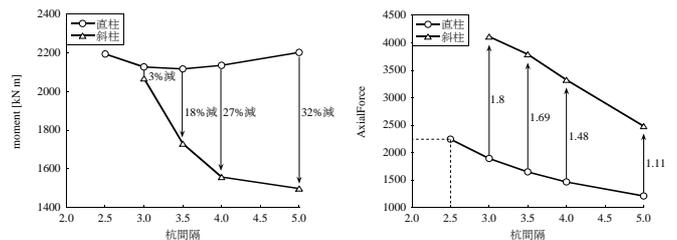


図-5 杭の最大モーメント・柱の軸力の比較図

(左:モーメント(GL. 6.8 m), 右:軸力(GL. -4.1 m))