

◆ 報 文 ◆

鋼管杭を用いた斜杭基礎の地震時保有水平耐力に関する検討

中谷昌一* 竹口昌弘** 井落久貴*** 鈴木規彦****

1. はじめに

斜杭基礎は、水平変位の抑制に優れた基礎形式であり、特に軟弱地盤における道路橋基礎では、直杭基礎に比べて杭本数が低減するなど建設コストの縮減が見込まれる他、橋台の側方移動に対する有効な対策として期待できる。また、最近では、回転杭工法などの既製杭を用いた低騒音・低振動の斜杭工法の開発とともに、斜杭が適用できる環境が整いつつある。一方、平成8年度の道路橋示方書から大規模地震時を想定した地震時保有水平耐力法が導入されたが、その設計モデルについては直杭基礎の大変形時挙動を想定したものであり、現状では大規模地震時における斜杭基礎の設計法が十分に整備されていない状況である。

直杭基礎の大変形時挙動については、平成8年に土木研究所が実施した鋼管杭の組杭モデルによる水平載荷試験（以下、直杭組杭モデル試験）により、組杭としての大規模地震時における保有水平耐力と変形性能の検討が実施されている^{1),2)}。しかしながら、斜杭基礎の大規模地震時における保有水平耐力や変形性能に関する知見は少ない。そこで、道路橋基礎としての斜杭組杭の保有水平耐力と変形性能を確認することを目的とし、直杭組杭と比較できる鋼管杭のモデルを用いた気中状態での水平載荷試験を実施した^{3),4)}。

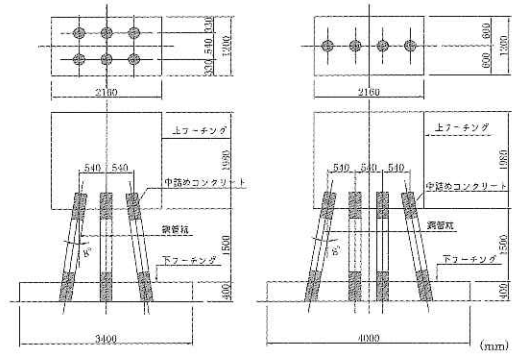
本論文では斜杭組杭の水平荷重と水平変位量の関係を検討し、直杭組杭モデル試験結果や設計評価モデルとの比較を行う。また、斜杭組杭の許容塑性率について考察する。

2. 試験方法

2.1 試験体

試験体は図-1に示すとおり、杭配列を2本×3列（以下、3列試験体）、1本×4列（以下、4列試

験体）の2体とし、いずれの試験体も両端の杭に8°の傾斜を持たせた斜杭組杭構造とした。鋼管杭の上下にはコンクリート製のフーチングを設け、杭とフーチングとの結合部は確実に荷重を伝達できるように、道路橋示方書に示される杭頭結合方法Aを想定して杭を1D（D：杭径）以上フーチング



(1) 3列試験体 (2) 4列試験体
図-1 試験体概要図

表-1 鋼管杭の諸元

No.	杭本数	杭径 (mm)	板厚 (mm)	材質	備考
1	2本×3列	216.3	4.2	STK400	上下1D中詰めコンクリートあり (D：杭径)
2	1本×4列				

表-2 鋼管杭の引張り試験結果

	0.2%耐力 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
平均値	350.1	214.3	37.7

表-3 コンクリートの圧縮試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	密度 (kg/m ³)
フーチングコンクリート	77.21	2.358
中詰めコンクリート(上フーチング側)	34.67	2.324
中詰めコンクリート(下フーチング側)	34.15	2.275

A Study of Lateral Bearing Capacity of Steel Pipe Piles Foundation with Batter Piles

内に埋め込む剛結合構造とした。

鋼管杭は直杭組杭模型試験で用いた鋼管と同等の材料とし、表-1に示す外径216.3mm、板厚4.2mm (いずれも実測値) のSTK400一般構造用炭素鋼管を使用した。

2.2 材料試験結果

鋼管杭の引張り強度試験結果およびコンクリートの圧縮強度試験結果について、それぞれ表-2、表-3に示す。表中の各値はいずれも3供試体の平均値とした。

2.3 荷重方法

試験体の荷重セットアップ状況を図-2に示す。なお、試験体は、荷重装置の配置等を考慮して、水平に寝かせた状態でセットした。実際の杭基礎に作用する荷重状態を再現するため、試験体には一定の鉛直力を荷重した状態で、水平力を正負交番繰り返し荷重した。また、杭頭部に曲げモーメントを発生させるため、水平力の加力位置は杭頭位置から上側に1500mm離れた位置とした。

なお、上フーチングの回転を許容するよう、鉛直力荷重用の油圧ジャッキは水平力作用方向に自由にスライド可能であり、上フーチングとは球座を介して荷重可能な構造とした。また、水平力荷重用の油圧ジャッキも上フーチングとの接続はピンを介してフーチングの回転を許容する構造とした。また、下フーチングは反力壁に高力ボルトで固定した。

鉛直荷重は杭1本あたり150kN (鋼管材料の規格降伏圧縮応力度の20%相当)、水平荷重の最大値は事前解析より推定した値 (直杭組杭の場合の1.4~1.5倍程度) とし、表-4に示す値とした。

荷重経路は、図-3に示すとおりである。基準変位量 $1\delta_y$ は、予備解析にて算出した“全杭の杭体最外縁応力度が降伏応力度に達するときの水平変位量”とし、荷重は、 $1\delta_y$ あたり3サイクル実施した後、 $1\delta_y$ ずつ変位を増加させた。

2.4 計測項目

計測項目と測定点数を表-5に示す。

3. 試験結果

3.1 斜杭組杭の変状過程

荷重試験の状況を写真-1に示す。

3列試験体では、 $1\delta_y$ 時において、端杭 (斜杭) の上下端部付近のひずみが実降伏ひずみを上回っ

たが、外観上は何ら損傷が生じていない。 $2\delta_y$ 時において、中間杭 (直杭) を含む全杭の上下端部のひずみが実降伏ひずみを上回り、端杭の上下端部に目視で認識できない程度の微少な膨らみが

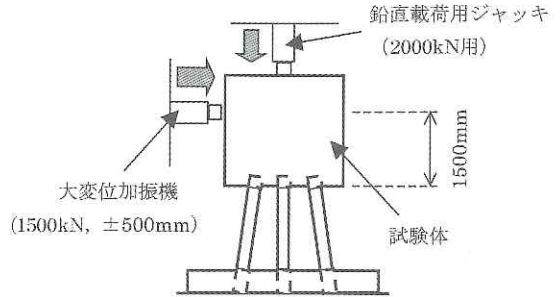


図-2 荷重セットアップ概要図

表-4 鉛直荷重および水平荷重の想定最大値

試験体	杭本数	鉛直荷重	水平荷重の最大値 (推定)
3列試験体	6本	900kN	1,200kN
4列試験体	4本	600kN	800kN

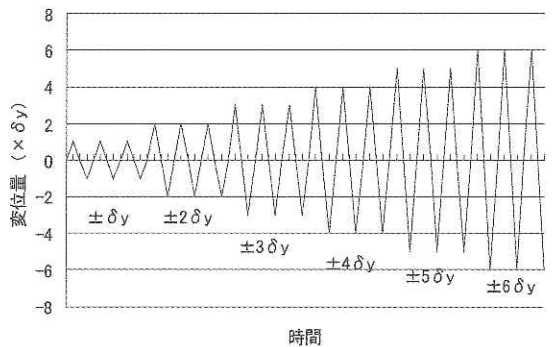


図-3 荷重経路図

表-5 計測項目と測定点数

計測項目	機器	測定点数	
		3列試験体	4列試験体
(1) 鉛直荷重	ロードセル	1点	1点
(2) 水平荷重	ロードセル	1点	1点
(3) 変位			
鉛直ジャッキ	ストローク	1点	1点
水平ジャッキ	ストローク	1点	1点
上フーチング (水平)	変位計	8点	8点
上フーチング (鉛直)	変位計	8点	8点
下フーチング (水平)	変位計	2点	2点
下フーチング (鉛直)	変位計	4点	4点
鋼管杭	変位計	9点	12点
(4) 鋼管杭ひずみ	歪ゲージ	168点	112点
(5) 鋼管杭の損傷	型ゲージ	-	-

観測された。さらに $3\delta_y$ 時においては、端杭の上下端部において膨らみが視認できるようになり、負荷重載荷時においても下端部の膨らみが残留し、3サイクルの繰り返しにより膨らみが累積されるようになった。 $4\delta_y$ に達すると、端杭の下端部の膨らみがかなり顕著になると共に、中間杭も上下端部において膨らみが観測された。ただし、耐力低下は $4\delta_y$ 時まで認められなかった。さらに $5\delta_y$ 時には、上フーチング下面に水平力作用方向と直角方向のクラックが入り、 $5\delta_y$ 時の2サイクル目で耐力低下が顕著となった。

4列試験体では、 $1\delta_y$ 時において、3列試験体と同様に端杭の上下端部付近のひずみが実降伏ひずみを上回ったが、外観上は何ら損傷が生じていない。 $2\delta_y$ 時には全杭の上下端部のひずみが降伏ひずみを上回ったが、全杭の上下端部に膨らみは観測されなかった。さらに $3\delta_y$ 時には端杭の上下端部に目視で認識できない程度の膨らみが観測され、 $4\delta_y$ に達すると端杭の杭下端部の膨らみが顕著になると共に、上下のフーチングの杭周辺に放射状のクラックが入ったが、耐力低下は認められなかった(写真-2)。さらに $5\delta_y$ 時には、中間杭も上下端部に膨らみが観測され、 $6\delta_y$ 時の2サイクル目において耐力低下が顕著となった(写真-3)。

以上の変状過程から考えると、両端の斜杭の杭頭部及び地中部に塑性ヒンジが形成され、次に中間の直杭の塑性化が進展して終局状態を迎えるというプロセスをほぼ近似していると思われ、今回の試験結果から斜杭組杭基礎の挙動を終局状態まで評価しても大きな誤りはないと思われる。

3.2 斜杭組杭の水平荷重—水平変位関係

3列試験体と4列試験体の水平荷重と上フーチング下端位置の水平変位関係をそれぞれ図-4、図-5に示す。これらの水平荷重—水平変位関係より、以下のことが確認された。

- (1) 水平荷重—水平変位関係が正負でほぼ同様な値を示すことより、載荷は良好に行われたといえる。
- (2) 荷重—変位関係のループが紡錘形を示しており、エネルギーの吸収能力が大きい。
- (3) 各 δ_y 毎の3回繰り返しによる荷重—変位関係は、最大荷重レベルまでほぼ同じ形状であり、繰り返し載荷による耐力低下は少ない。

- (4) 最大耐力が発揮されるのは、3列試験体、4列試験体とも、水平変位量が $4\delta_y$ 時であった。

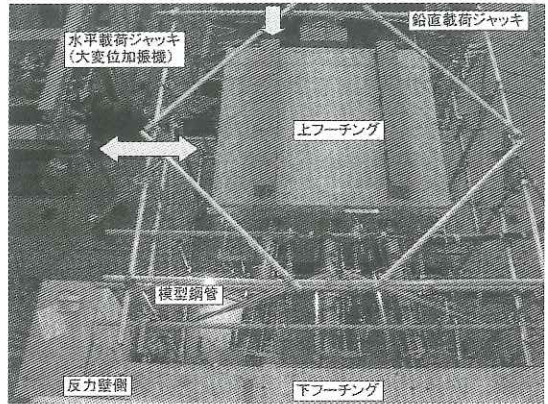


写真-1 載荷試験状況

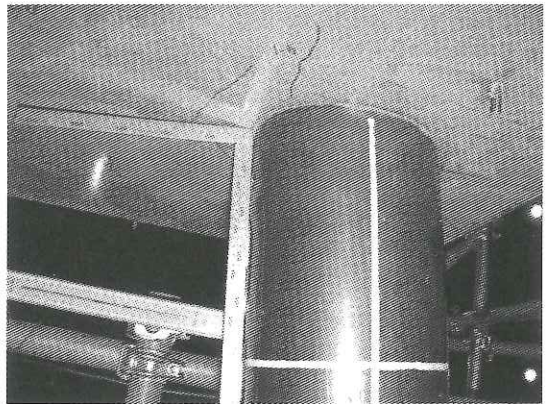


写真-2 4列試験体 $4\delta_y$ 時の杭頭部状況 (端杭)

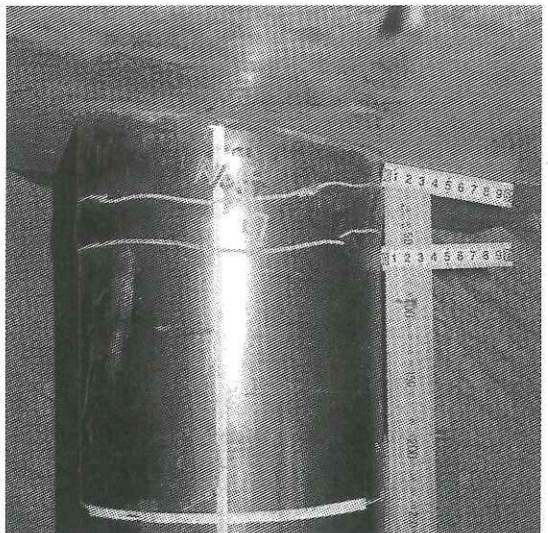


写真-3 4列試験体終了時の杭頭部状況 (端杭)

4. 考察

4.1 直杭組杭による試験結果との比較

直杭組杭模型試験結果と、今回の試験結果との比較を図-6 (3列試験体)、図-7 (4列試験体) に示す。なお、直杭組杭では2本×3列試験体と2本×4列試験体にて試験を実施しており、2本×4列試験体の結果については荷重を半分にして今回の試験結果と比較した。直杭組杭と斜杭組杭では、同スペック・同列数の鋼管組杭であるが、3列試験体、4列試験体ともに初期剛性、最大耐力は斜杭組杭の方が大きい。3列試験体では、斜杭組杭の最大耐力 P_{max} は直杭組杭の約1.3倍であるが、 P_{max} 時の水平変位量 ($\delta_{P_{max}}$) は約0.7倍であった。また、4列試験体では、斜杭組杭の P_{max} は直杭組杭の約1.2倍であり、 $\delta_{P_{max}}$ は約0.4倍であった。

これらの結果より、斜杭組杭で、より少ない本数の杭で基礎の水平変位を抑制することが可能であり、直杭組杭に対する最大耐力の増加率は杭基礎中に占める斜杭の割合が多いほど大きくなるといえる。

4.2 設計評価モデルとの比較

水平荷重と水平変位の関係について、今回の試験結果と設計評価モデルとの比較を図-8 (3列試験体)、図-9 (4列試験体) に示す。ここで、設計評価モデルとは、今回の試験体の条件に合わせて上下フーチングを剛体、杭とフーチングとの結合を剛結合とし、鋼管杭のモーメント—曲率関係 ($M-\phi$ 関係) をバイリニア型の非線形特性とした組杭構造の解析モデルを用いて、プッシュオーバー解析により求めた全杭杭頭降伏時の耐力を P_y 、そのときの変形量を δ_y としたバイリニア型の組杭耐力モデルのことである。この設計評価モデルは道路橋示方書に示される杭基礎のモデルと同等である。

3列試験体、4列試験体ともに、 $\pm 5\delta_y$ までの変位領域まで設計評価モデルの耐力 P_y を上回っており、良好な変形性能を保有していることが確認された。

4.3 エネルギー吸収量の検討

試験体のエネルギー吸収量を、水平力載荷油圧ジャッキによる仕事量、即ち、水平荷重—水平変位関係の図において、荷重—変位曲線と変位軸

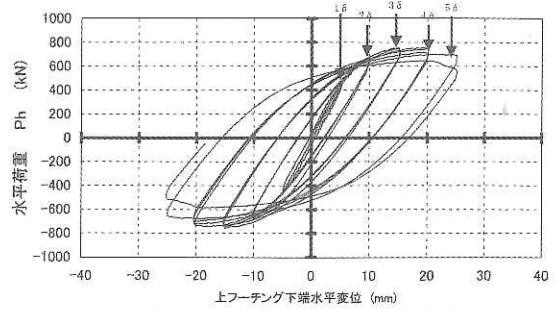


図-4 水平荷重—水平変位関係 (3列試験体)

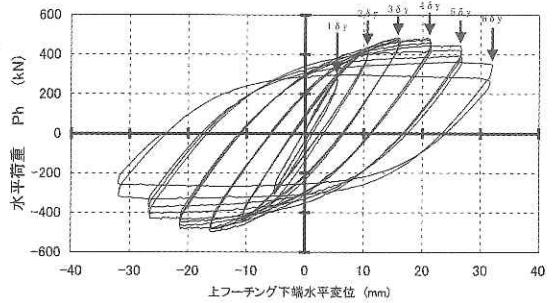


図-5 水平荷重—水平変位関係 (4列試験体)

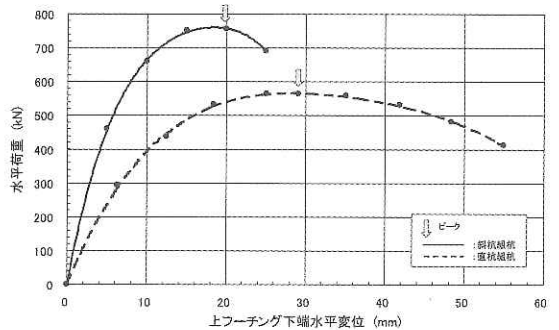


図-6 直杭組杭と斜杭組杭の比較 (3列試験体)

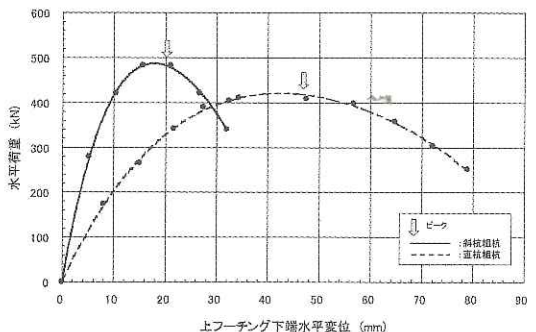


図-7 直杭組杭と斜杭組杭の比較 (4列試験体)

(X軸)とで囲まれた部分の面積と等価とみなして算出した。各 δ_y サイクル内の水平荷重の最大値とエネルギー吸収量を図-10(3列試験体)、図-11(4列試験体)に示す。

3列試験体、4列試験体とも、エネルギー吸収量の推移から、最大耐力の発揮後についても、大きなエネルギー吸収能を有することが確認された。

4.4 許容塑性率の検討

3列試験体、4列試験体ともに、水平荷重—水平変位関係の包絡線より、エネルギー一定則に基づき塑性率を算定した。エネルギー一定則は、図-12

中の「A+B」部(包絡線の変位 δ_{II} まで)の仕事量と等価な仕事量を「A'+B」部に取り、等価変位量 δ_E を求め、降伏変位 δ_y 'で除すことで塑性率 μ を求めた。

$$\mu = \frac{\delta_E}{\delta_y'} \quad (1)$$

降伏変位 δ_y 'は残留変位が急増する点とした。また変形能力の許容点を最大荷重時変位 δ_{Pmax} および載荷最大変位 δ_{max} の2通り、すなわち

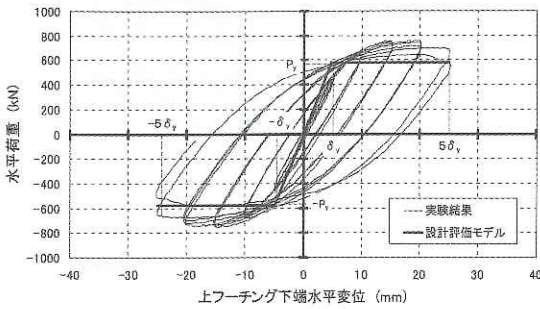


図-8 設計評価モデルとの比較 (3列試験体)

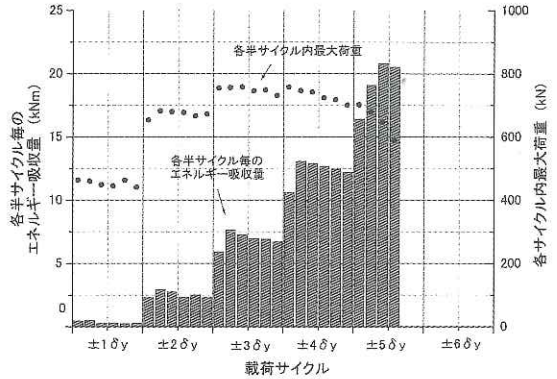


図-10 エネルギー吸収量 (3列試験体)

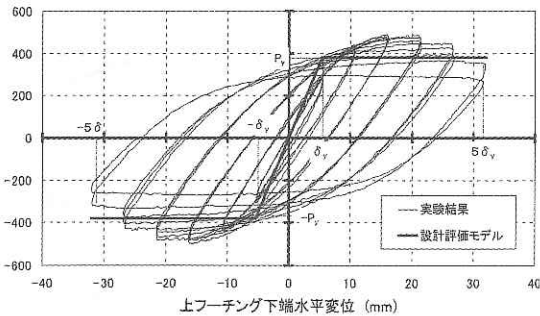


図-9 設計評価モデルとの比較 (4列試験体)

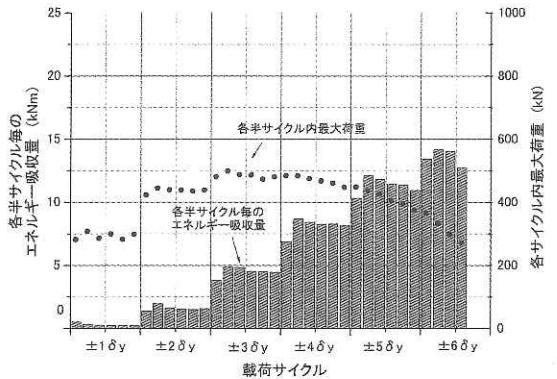


図-11 エネルギー吸収量 (4列試験体)

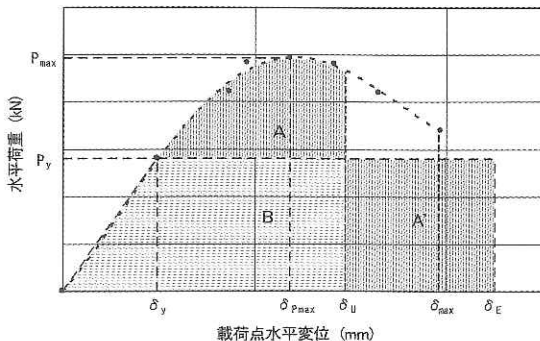


図-12 エネルギー一定則の概要図

表-6 許容塑性率の算定結果

比較項目	3列斜杭		4列斜杭	
	$\delta_{II} = \delta_{Pmax}$	$\delta_{II} = \delta_{max}$	$\delta_{II} = \delta_{Pmax}$	$\delta_{II} = \delta_{max}$
降伏変位 δ_y ' (mm)	6.4		5.9	
降伏荷重 P_y (kN)	461.6		280.2	
最大荷重点変位 δ_{Pmax} (mm)	23.6		19.6	
最大荷重 P_{max} (kN)	755.5		486.0	
最大変位 δ_{max} (mm)	29.5		35.1	
等価変位 δ_E (mm)	31.4	41.5	26.2	50.2
塑性率 μ	5.0	6.5	4.5	8.5

$\delta_v = \delta_{p_{max}}$ 、 $\delta_v = \delta_{max}$ で算定した。算定結果を表-6に示す。塑性率 μ は、4.5~8.5の範囲であった。最大耐力までの変形性能のみを許容としても、今回の試験では4.5~5.0程度の塑性率が許容できることが確認できた。

5. まとめ

鋼管杭を用いた斜杭組杭の模型水平載荷試験を実施し、斜杭組杭の保有水平耐力と変形性能について検討するとともに、直杭組杭模型試験結果と比較し、以下のことが明らかとなった。

- (1) 鋼管杭斜杭基礎では、最大水平荷重到達後においても急激な耐力低下には至らず、大きな保有水平耐力を得られることが確認された。
- (2) 同列数の斜杭組杭と直杭組杭の比較では、斜杭組杭の方が初期の水平剛性が高く、最大耐力も大きい。しかしながら、最大耐力以降の変形に対する耐力の低下は斜杭組杭の方が顕著である。
- (3) 直杭組杭に対する最大水平耐力の増加率は、杭基礎中に占める斜杭の割合が多いほど大きくなる。
- (4) 水平荷重—水平変位関係から、最大耐力は変位量が $4\delta_y$ 程度で発揮されることが確認された。また、降伏変位量 δ_y を基準にして $\pm 5\delta_y$ 程度までの変形性能は確保されており、最大耐力以降のエネルギー吸収能も大きいことが確認された。
- (5) 今回の試験結果に基づき推定される塑性率 μ は、最大耐力までの変形性能のみを許容とした場合、 $\mu = 4.5 \sim 5.0$ の範囲であった。

実際の斜杭組杭基礎の水平剛性、耐力および塑性率には、地盤条件や斜杭の傾斜角、斜杭直杭の

比率等が影響するものと考えられ、今後これらの観点からさらに検討を進める予定であるが、大地震の被災後において、初期の最大耐力を維持することを設計意図とした場合には、許容できる塑性率として4程度は期待できることが確認された。

なお、本研究は、研究費の一部に(社)鉄鋼連盟の助成金を活用して実施した。

参考文献

- 1) 中野、木村、石澤、嶋津、小山：鋼管杭基礎の模型水平載荷試験(その1)、第32回地盤工学研究発表講演集 pp. 1573-1574, 1997.7
- 2) 福井、木村、吉田、鈴木、平田：鋼管杭基礎の模型水平載荷試験(その2)、第32回地盤工学研究発表講演集 pp. 1575-1576, 1997.7
- 3) 井落、中谷、竹口、岡原、小松、平田、高野、池田、高橋：鋼管杭斜杭基礎の保有水平耐力に関する研究(その1)、第41回地盤工学研究発表講演集(投稿中)
- 4) 井落、中谷、竹口、岡原、小松、平田、高野、池田、高橋：鋼管杭斜杭基礎の保有水平耐力に関する研究(その2)、第41回地盤工学研究発表講演集(投稿中)

中谷昌一*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所構造物研究グループ基礎チーム首席研究員
Shoichi NAKATANI

竹口昌弘**



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所構造物研究グループ基礎チーム主任研究員
Masahiro TAKEGUCHI

井落久貴***



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所構造物研究グループ基礎チーム交流研究員
Hisataka IOCHI

鈴木規彦****



鋼管杭協会技術委員
Norihiko SUZUKI