

◆ 報 文 ◆

回転杭の先端支持力に及ぼす群杭効果の検討

中谷昌一* 竹口昌弘** 井落久貴*** 澤石正道****

1. はじめに

回転杭とは、杭先端に羽根（杭径の1.5～2.0倍の径）を設けた鋼管杭を回転させることにより、地盤中に貫入される杭である。回転杭は、杭先端の羽根により広い先端支持面積を有するため、大きな先端押し込み支持力とアンカー効果による引抜き抵抗力が得られる。また、施工時における騒音・振動が小さい、掘削残土の排出がない、斜杭が比較的精度よく容易に施工できるなどの特徴を有している。

これまで、回転杭単杭での鉛直支持力特性については載荷試験や模型実験などで研究されているが、群杭での鉛直支持力特性に関する知見は少ない。そこで、本検討では、回転杭の先端支持力に及ぼす群杭の効果を確認することを目的として、遠心力場での鉛直模型載荷実験とFEM解析を実施した^{1),2)}。

本報文では、まず、模型載荷実験により、回転杭の配置間隔をパラメータとした鉛直荷重-変位量関係を比較し、先端支持力に及ぼす群杭効果の影響を検討する。次に、模型載荷実験を3次元FEM解析で再現することにより、回転杭による群杭の先端支持力に関するメカニズムについて考察する。

2. 模型載荷実験

2.1 実験方法

実験では、縦500mm×横800mm×高さ605mmの土槽を用い、30Gの遠心加速度場で静的鉛直載荷を実施した。実験概要を以下に示す。

2.1.1 模型杭

実験に用いた模型杭は、実杭の回転杭の縮尺1/30を想定し、図-1に示すとおり、杭外径 $D_p=10.5\text{mm}$ 、羽根外径 $D_w=21.0\text{mm}$ とした。模型杭の諸元を表-1に示す。

表-1 模型杭の諸元

	実 杭	模 型
材 質	SKK400	SUS304
直径 D_p (mm)	300	10.5
板厚 t (mm)	4.5	0.15
弾性係数 E (N/mm ²)	2.00E+05	1.97E+05
杭長 L (mm)	6300	210
実大/模型	1	1/30

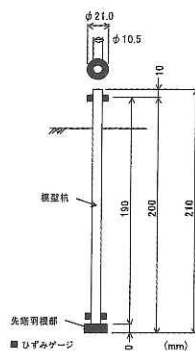


図-1 模型杭

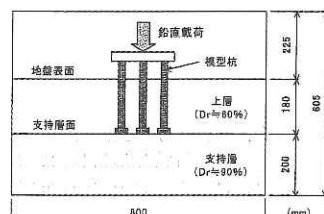


図-2 土槽と模型杭の設置状況

2.1.2 実験地盤

実験地盤には、東北珪砂7号の乾燥砂を用いた。支持層部については、パイブレータによる締め固めにより、目標相対密度 $D_r = 90\%$ 、層厚200mmの地盤を作成し、その上に模型杭を所定の間隔でセットした後、層厚180mmの上層部を空中落下方式により作成した。なお、本実験は杭先端の支持力特性に着目したものであり、模型杭に生じる周面摩擦力を極力小さくするために、上層部の地盤は目標相対密度 $D_r = 60\%$ の緩い砂地盤とした。土層および模型杭の設置イメージを図-2に示す。

2.1.3 載荷実験

実験では、遠心力載荷装置の土槽上に設置した載荷装置を用いて、変位制御による鉛直方向の静的載荷を実施した。載荷速度は、1.0mm/minとした。実験においては、載荷荷重、模型杭の沈下量（鉛直変位量）、杭頭部および杭先端部のひず

A Study of Group Effects for Vertical Bearing Capacity of Screwed Steel Piles

みを計測した。なお、実験結果の整理に用いた杭頭荷重や杭先端荷重は、ひずみゲージの計測値から算出した値を用いた。また、今回の模型実験では杭体の弾性変形量は無視できるほど小さいことから、変位量としては全て杭頭変位量で整理を行った。

2.1.4 実験ケース

実験は、先端支持力に及ぼす群杭効果の影響を確認するために、模型杭の配置間隔をパラメータとし、表-2に示す7ケースを実施した。

2.2 実験結果

2.2.1 杭頭荷重-変位量の関係

各実験ケースの模型杭1本当りでの杭頭荷重-変位量の関係を図-3に示す。群杭の各ケースは単杭に比べて、初期の変位段階では、荷重-変位量曲線の勾配（以下、沈下剛性という）が小さくなるものの、変位量の増大に伴い沈下剛性の低下度合いが小さく、変位量が大きくなると杭頭荷重

は単杭を上回ることがわかる。また、杭配置間隔が密なほど初期の変位段階における沈下剛性が小さくなる。本実験では、杭配置間隔が4.0Dp（ケース5）の場合に杭頭荷重が最大値を示す結果となったが、杭配置間隔がそれ以上の場合には杭頭荷重が小さくなる傾向が見られた。これらは、杭配置間隔が4.0Dpより大きい場合に、荷重-変位特性が単杭の挙動に近づくためと考えられる。

次に、杭の位置による荷重分担の違いについて検討するため、図-4に中心杭（杭No. 5）、隅杭（杭No. 1, 3, 7, 9）、辺中央杭（杭No. 2, 4, 6, 8）の分担荷重-変位量の関係を示す。ここで、隅杭、辺中央杭については該当する4本の杭頭荷重の平均値を示している。この図から、杭の位置によって荷重分担が異なり、杭配置間隔が密なほどそれが顕著に現れていることがわかる。図-4 (a) ~ (c) のいずれのケースも初期の変位段階では群杭の影響が最も大きいと考えられる中心杭の分担荷重が小さく、最も群杭の影響が小さいと考えられる隅杭の荷重分担が大きくなっている。一方、変

表-2 試験ケース

試験ケース	杭本数(本)	模型杭の配置			備考	模型杭平面配置例
		杭中心間隔(mm)	杭径比	羽根径比		
1-1	1	-	-	-	単杭	
1-2						
1-3						
2	9	20	2.0Dp	1.0Dw	羽根部純間隔=0	
3		25	2.5Dp	1.25Dw	羽根部純間隔=0.5Dp	
4-1		30	3.0Dp	1.5Dw	羽根部純間隔=1.0Dp	
4-2						
4-3						
5		40	4.0Dp	2.0Dw	羽根部純間隔=2.0Dp	
6		50	5.0Dp	2.5Dw	羽根部純間隔=3.0Dp	
7	60	6.0Dp	3.0Dw	羽根部純間隔=4.0Dp		

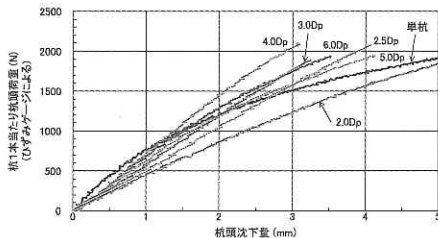
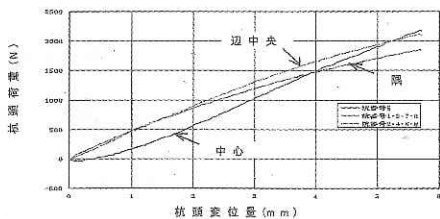
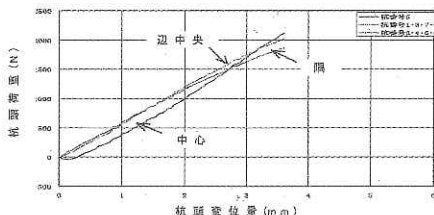


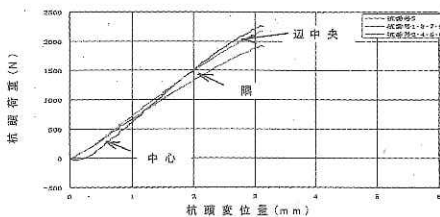
図-3 杭頭荷重-杭頭沈下量の関係



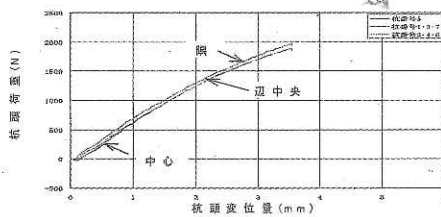
(a) 試験ケース 2 (2.0Dp)



(b) 試験ケース 4 (3.0Dp)



(c) 試験ケース 5 (4.0Dp)



(d) 試験ケース 7 (6.0Dp)

図-4 杭の位置による荷重分担の違い

位置が大きくなるとこの関係が逆転し、中心杭の分担荷重が大きく、隅杭の分担荷重が最も小さくなっていく。なお、図-4 (d) の杭配置間隔6.0Dpのケースでは、杭の位置による荷重分担の違いが明確でなくなるが、これは杭配置間隔が疎になるほど群杭の影響が小さくなり単杭の挙動に近づいていくためと考えられる。

2.2.2 杭先端荷重-変位置の関係

各実験ケースの模型杭1本当たりの杭先端荷重-変位置の関係を図-5に示す。荷重-変位置曲線の傾向は図-3とほぼ同様であるが、杭配置間隔が2.5Dp以下の場合には初期の変位段階における沈下剛性の低下が明確となる傾向がみられ、特に杭配置間隔が2.0Dpの場合ではそれが顕著である。本実験では、杭先端の極限荷重が明確ではないため、極限荷重に関する群杭効果を定量的に評価するのは困難である。しかしながら、図-7に示すように杭配置間隔が3.0Dp以上の場合には単杭が極限支持力として定義されている2mm (羽根外径の10%) 程度の変位時点で、先端荷重が単杭と同等以上の値を示していることから、少なくとも単杭と同等の先端支持力が期待できるものと考えられる。なお、本実験では、群杭の先端支持力への影響を検討するために、極力周面摩擦力が作用しない実験条件としたが、最大周面摩擦力は100~200Nであり、先端荷重に対して1/10~1/20程度の値であった。

3. 実験のシミュレーション解析

3.1 解析方法

模型載荷実験を3次元FEM解析を用いて再現することにより、回転杭による群杭の先端支持力に関するメカニズムについて検討した。

解析には汎用構造解析プログラム(MSC.Marc2003)を用い、図-6に示す中心杭を回転軸とする1/8円筒モデル、ソリッド要素でモデル化した。杭は弾性体とし、表-3に示す物性値を用いた。地盤は、Duncan&Changの非線形弾性体構成式とMohr-Coulombの破壊基準を組み合わせたモデルとした。内部摩擦角 ϕ は、実験地盤の三軸圧縮試験結果を最大値とする応力依存を考慮したモデルとした。杭と地盤との周面摩擦はパイリニアモデルとし、実験結果から表-4に示す値を用いた。また、遠心加速度は実験時と同様に30Gとした。

以上の解析条件のもとに、先ず単杭の解析を行

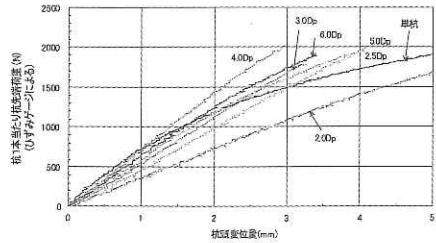


図-5 杭先端荷重-杭頭変位置の関係

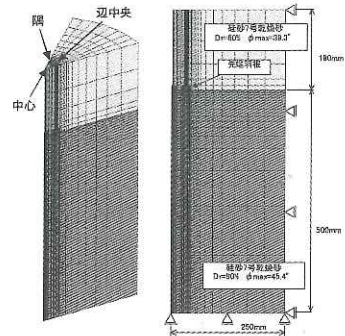


図-6 解析モデル (群杭の場合)

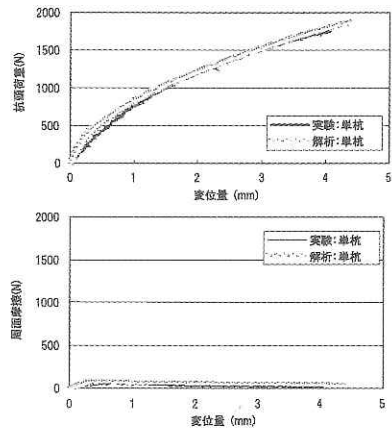


図-7 実験に合わせ込んだ単杭の解析結果

表-3 杭の物性値

	外径 (mm)	E (N/mm ²)	v	比重
銅管部	10.5	206000	0.3	7.93
羽根部	21.0	206000	0.3	8.30

表-4 杭と地盤との周面摩擦

	単杭	群杭
周面摩擦力 Qmax (N)	74	124
τ max (N/mm ²)	0.013	0.022
As (mm ²)	5608	5608
Δ max (mm)	0.200	0.200

表-5 解析に用いる地盤パラメータ

層	土質	密度 (kN/m ³)	解析用パラメータ						
			K	n	Kb	m	Rf	C	ϕ
上層	珪砂7号 乾燥砂 Dr=60%	14	700	0.6	0.75K	0.3	0.8	0	max ϕ 応力依存
支持層	珪砂7号 乾燥砂 Dr=90%	15	1350	0.6	0.75K	0.3	0.8	0	max ϕ 応力依存

い地盤条件を表-5に示す解析用パラメータとして設定することで実験結果と合わせ込んだ。(図-7)次に、その条件を用いて、杭配置間隔2.0Dpと3.0Dp(以下、群杭2.0Dp、群杭3.0Dp)の2ケースについて解析を行った。

3.2 解析結果

杭1本当たりに換算した実験と解析の杭頭荷重-変位量関係を図-8に示す。実験での単杭と群杭の比較において特徴的であった以下の挙動が、解析においても再現できていることがわかる。

- ①初期の変位段階における沈下剛性は、単杭、群杭3.0Dp、群杭2.0Dpの順に小さくなる。
- ②変位が2.0mmを超える付近では、群杭3.0Dpの杭1本当たりの杭頭荷重(鉛直支持力)は、単杭の値と逆転し、大きくなる。

3.3 群杭の支持力特性

実験および解析から確認された群杭の挙動は、基本的に単杭とどのように異なるのかを考える。

まず、群杭の初期の変位段階における沈下剛性が単杭に比べ小さくなるのは、群杭の支持層では、支持している杭からの荷重に加え、隣り合う杭からも荷重が伝達され、地盤のひずみが大きくなるためであると推測する。

実験では、初期の変位段階において、杭間隔が狭く、支持層において隣り合う杭からの荷重の影響を最も受けやすいと考えられる群杭2.0Dpが沈下剛性は一番小さく、杭間隔が広がるにしたがって大きくなり、単杭の沈下剛性に近づいている。また、図-9に群杭2Dpの場合を例に、杭位置に

よる杭頭荷重-変位量関係を示すが、変位が1.0mm程度の段階において、中心杭、辺中央杭、隅杭の順に荷重分担が大きくなっている。この傾向は、杭間隔が狭い群杭2Dpで強く現れている。これは、載荷初期で地盤が弾性状態にある段階では、中心杭のようにその支持層が周りからの応力干渉を強く受ける杭ほど大きく沈下しようとする。その際、9本の杭が同じ変位量となるためには、相対的に中心杭の荷重分担が小さくなることを示している。また、群杭はどの杭であってもその支持層は隣り合う杭からの荷重の影響を受けるため、単杭よりも変位量が大きくなるものと考えられる。

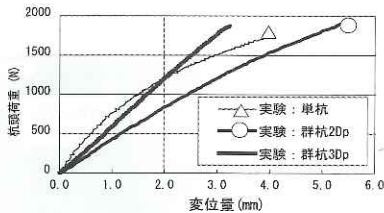
さらに、図-10に支持層の鉛直応力分布を示すが、群杭は変位が0.5mmの初期段階から隣り合う杭により発生する応力が干渉している。また、群杭の支持層における応力発生範囲(応力球根)は単杭に比べ大きくなっており、地盤の変形範囲が広がっている。

以上のことから、群杭の初期の変位段階における沈下剛性は単杭よりも小さく、杭間隔が広がるにしたがって単杭に近づくものと考えられる。

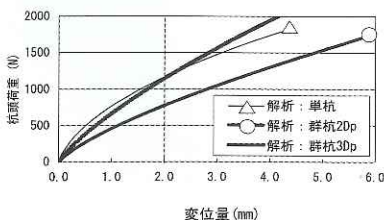
次に、変位が2.0mmを超えると、群杭3.0Dpの杭1本当たりの杭頭荷重(鉛直支持力)が、単杭の値と逆転し大きくなるのは、群杭の支持層のせん断強度が単杭に比べ大きいためであると推測する。

支持層が砂である場合、そのせん断強度は地盤の拘束圧に依存する。単杭の場合、上層地盤による上載圧と支持層自体の受働抵抗力が支持層の拘束圧となるが、群杭の場合は、それに隣り合う杭から伝達される荷重による応力も加わる。そのため、群杭では単杭に比べ支持層の拘束圧が大きくなると考える。

群杭の隣り合う杭から伝達される荷重による応力が球根状に重なり合っていることは、図-10に



(a)実験結果



(b)解析結果

図-8 杭頭荷重-変位量関係の実験と解析結果

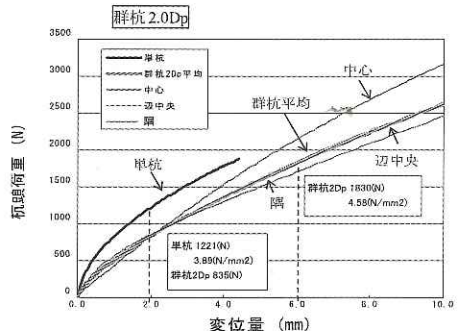


図-9 杭位置による杭頭荷重-変位量関係

示すとおり明らかである。

また、図-11に支持層の破壊余裕度（せん断強度に対する発生せん断応力度の比）を示す。単杭の支持層は、変位が2.0mmの段階で球根状の破壊状態（破壊余裕度が1.0）となっているのに対し、

群杭は中心杭の支持層が破壊していない状態（破壊余裕度が1.0未満）である。

以上のことから、支持層が砂である場合、群杭の支持層では隣り合う杭から伝達される荷重による応力により、単杭に比べ大きな拘束圧を受け、

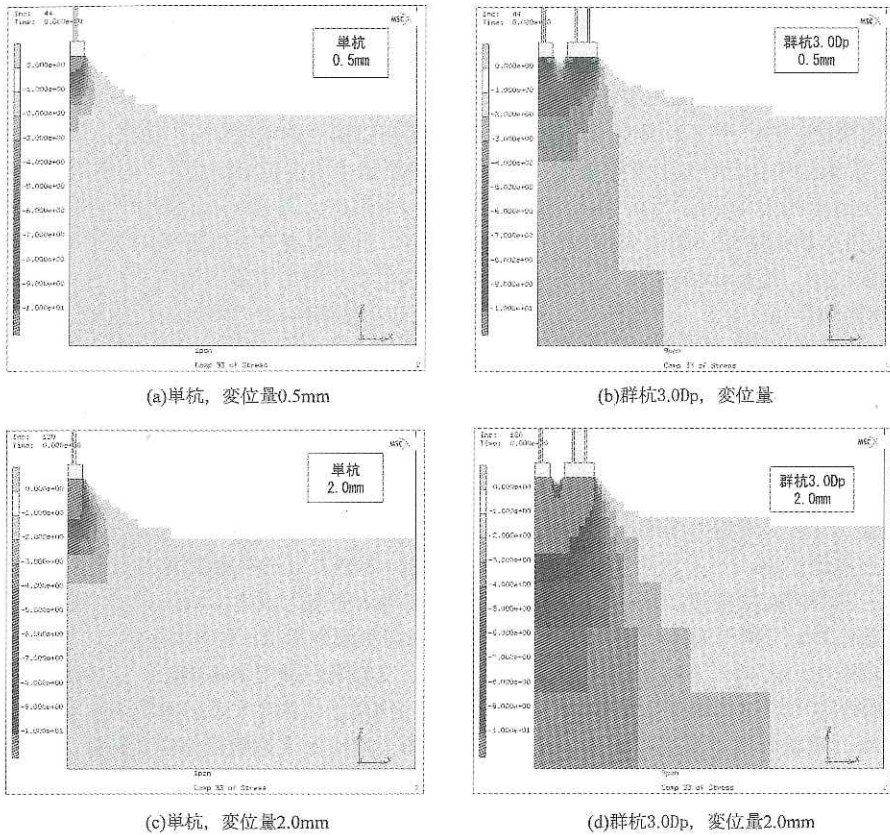


図-10 支持層の鉛直応力分布

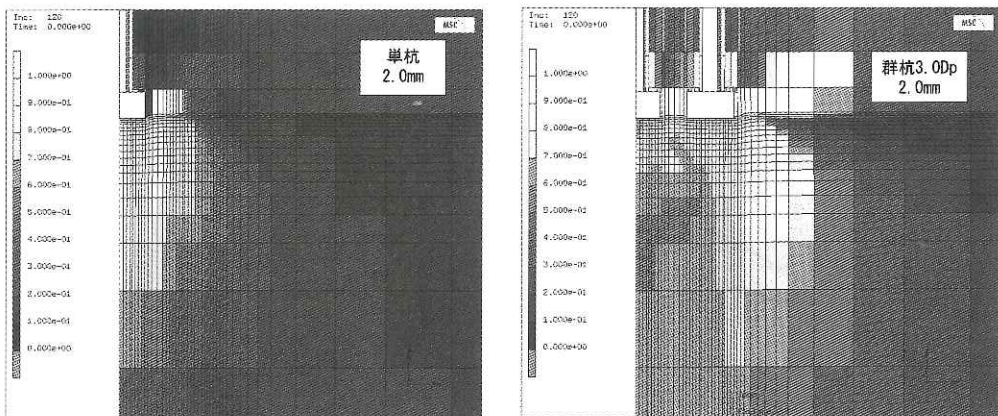


図-11 支持層の破壊余裕度（せん断強度に対する発生せん断応力度の比）

そのせん断応強度が大きくなる。その結果、変位が20mmを超えると、群杭の杭1本当当たりの杭頭荷重が単杭に比べ大きくなるものと考えられる。

3.4 設計実務における群杭先端の極限支持力評価

前項までに述べたように、群杭の先端支持力特性は、支持層における各杭先端から伝達される荷重による応力干渉の影響により、単杭のそれとは異なる。すなわち、初期の変位段階では、群杭は単杭に比べ沈下剛性が低下する傾向であり、その傾向は杭間隔が狭い群杭ほど顕著に現れる。一方、変位が進むと、群杭では杭先端地盤の拘束圧の上昇に伴うせん断強度の増加により、杭1本当当たりの杭頭荷重は単杭に比べ大きくなる傾向を示す。なお、杭基礎の極限支持力を評価する際の基準となる羽根径の10% (2mm) 程度の沈下時に着目した場合、図-5の実験結果や図-8の解析結果に示すとおり、杭間隔が3.0Dp (先端羽根部の純間隔が1Dp) 以上あれば、1本当当たり換算した群杭の杭先端荷重は、単杭と同等以上となることが期待できる。

以上のことから、回転杭を用いた群杭基礎では、杭配置間隔が3.0Dp (先端羽根部の純間隔が1Dp) 以上であれば、杭先端の極限支持力の評価に群杭効果を考慮しなくても設計実務上は問題ないと考えられる。

4. まとめ

回転杭の先端支持力に及ぼす群杭の効果について、遠心模型実験および3次元FEM解析により検討した結果を以下に示す。

- (1) 初期の変位段階における群杭の沈下剛性は、単杭のそれに比べ小さくなり、その傾向は杭配置間隔が小さいほど顕著である。
- (2) 変位量の増加に伴う沈下剛性の低下度合いは、

群杭の方が単杭より小さく、変位量が大きくなると、群杭の1本当当たりの杭頭荷重は、単杭のそれを上回る傾向にある。これは、群杭の支持層では、隣り合う杭から伝達される荷重による拘束圧の上昇により、地盤のせん断強度が増加するためと考えられる。

- (3) 杭基礎の極限支持力を評価する際の基準となる羽根径の10% (2mm) 程度の沈下時においては、杭配置間隔が3.0Dp以上離れれば、1本当当たり換算した群杭の杭先端荷重は、単杭と同等以上の値を示す。したがって、群杭では単杭と異なる先端支持力特性を示すと考えられるものの、設計実務においては、杭配置間隔が3.0Dp (先端羽根部の純間隔が1.0Dp) 以上であれば、単杭と同程度の杭先端の極限支持力としてよいものとする。

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) 竹口、中谷、井落、前田、龍田、澤石、石澤、田中、鈴木：回転杭の群杭効果に関する研究 (その1)、第41回地盤工学研究発表講演集 pp.1459-1460, 2006.7
- 2) 澤石、竹口、中谷、井落、前田、龍田、石澤、田中、鈴木：回転杭の群杭効果に関する研究 (その1)、第41回地盤工学研究発表講演集 pp.1461-1462, 2006.7

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上席研究員
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

澤石正道****



鋼管杭協会技術委員
Masamichi SAWAISHI