

土木研究所資料

鋼管杭を用いた斜杭基礎の変形性能に 関する載荷実験

平成 **20** 年 **3** 月

独立行政法人土木研究所
構造物研究グループ基礎チーム

鋼管杭を用いた斜杭基礎の変形性能に 関する載荷実験

構造物研究グループ（基礎）

上席研究員 中谷 昌一
主任研究員 竹口 昌弘
交流研究員 井落 久貴*
交流研究員 横幕 清

* 交流研究員在職期間：平成17年4月～平成19年3月

要 旨：

斜杭を有する杭基礎は、旧来から構造物の基礎として主に鋼管杭を用いた打撃工法により適用されていたが、近年では騒音・振動等の環境問題から打撃工法そのものが道路橋基礎に適用されなくなっている。しかし、最近では、回転杭工法などの鋼管杭を用いた低騒音・低振動の斜杭施工法の開発により斜杭が適用できる環境が整いつつある。斜杭を有する基礎は、水平変位の抑制に優れており、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期待できる構造であることから、その良さが見直されている。一方、現状では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が少なく、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。

そこで、鋼管の斜杭組杭を用いた気中での正負交番水平載荷試験を実施し、道路橋基礎としての斜杭群杭の大規模地震時における保有水平耐力と変形性能を確認し、斜杭基礎のレベル2地震時の照査における塑性率の制限値について考察した。

キーワード：鋼管、斜杭、許容塑性率

目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	2
2.1 試験概要	2
2.2 供試体	5
2.2.1 モデル化の確認	5
2.2.2 供試体の製作	9
2.2.3 材料試験	13
2.3 荷重方法	15
2.4 計測項目	17
3. 試験結果	22
3.1 3列供試体	22
3.2 4列供試体	33
4. 考察	42
4.1 杭列数および斜杭の有無による相違	42
4.1.1 水平荷重および水平変位	42
4.1.2 杭の軸力	48
4.1.3 フーチングの回転角	52
4.1.4 フーチングの鉛直変位	57
4.2 エネルギー吸収量	59
4.3 設計モデルの検討	61
4.4 許容塑性率の検討	63
5. まとめ	64
参考文献	65

付属資料 I

鋼管を用いた直杭組杭の交番水平荷重試験結果	66
-----------------------	----

付属資料 II

巻末 CD データ集（鋼管斜杭組杭,鋼管直杭組杭）について	97
-------------------------------	----

1. はじめに

斜杭を有する杭基礎（以下、斜杭基礎）は、旧来から構造物の基礎として主に鋼管杭を用いた打撃工法により適用されていたが、近年では騒音・振動等の環境問題から打撃工法そのものが道路橋基礎に適用されなくなっている^{1),2),3),4)}。しかし、最近では、回転杭工法などの鋼管杭を用いた低騒音・低振動の斜杭施工法の開発により斜杭が適用できる環境が整いつつある⁵⁾。斜杭基礎は、水平変位の抑制に優れており、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等建設コストの縮減が期待できる構造であることから、その良さが見直されている。

一方、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く、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のが現状である。平成8年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による耐震設計法が規定され、基礎に主たる塑性化を考慮する場合は、被災後の復旧の支障となるような過大な変形や損傷が橋に生じないように基礎の応答塑性率が制限されているが、これは、場所打ち杭、PHC杭⁶⁾および鋼管杭^{7),8)}の直杭組杭模型を用いた気中での正負交番水平載荷試験等を基に定められたものである⁹⁾。

本研究では、道路橋基礎における斜杭基礎の大規模地震時における保有水平耐力と変形性能を確認することを目的として、鋼管杭の斜杭組杭模型を用いた気中での正負交番水平載荷試験を実施した^{10),11),12)}。なお、既往の鋼管杭の直杭組杭模型の水平載荷試験結果との比較を容易にするために、本試験に用いる鋼管は、既往の試験と同様の諸元（杭径、板厚、材質）のものとした。試験の結果、斜杭組杭は、直杭組杭に比べて水平耐荷力が大きく、水平変位が抑制される一方で、最大水平荷重以降の耐荷力の低下が顕著であることが確認された。さらに、直杭群杭や鋼製橋脚の許容塑性率の工学的意図に沿った場合には、斜杭を有する群杭に許容できる塑性率として3~4程度が期待できることがわかった。

2. 試験方法

2.1 試験概要

試験は、斜杭群杭の杭頭部付近を模擬した組杭模型の供試体に、気中において一定の鉛直力を付与しながら水平力を交番に載荷する方式とした。使用施設は、土木研究所が保有する部材耐震実験施設である。

実構造物の基礎は地中に設置され、一般に最大断面力は杭頭部の付近に生ずる。しかし、本試験では、各杭の損傷と全体系の挙動の関係を把握する必要があり、各杭の損傷状況の観察が可能な気中で行う必要がある。また、地中では地盤も水平力を分担することから杭の曲げ変形が分散される傾向にあり、杭の地中部に相当する部位を固定した模型を用いて気中実験により変形性能を検討することは安全側の評価を与える。さらに、既往の直杭の組杭模型を用いた水平載荷試験と同様の条件とすることで、これとの対比も容易となる。

試験の概要を図-2.1.1に、試験状況を写真-2.1.1に示す。試験では、載荷装置の都合から供試体は水平に寝かせた状態とし、下フーチングを反力壁にボルトで固定した。鉛直載荷ジャッキ1基により一定の鉛直荷重を付与しながら、水平載荷ジャッキ1基により上フーチングに水平荷重を作用させた。ここで、鉛直ジャッキは、上フーチングの水平・回転変位に追従できるよう、水平荷重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が伝達されるようにした。鉛直荷重は、杭基礎が負担する死荷重の標準的な範囲として、鋼管の規格降伏応力度の20%程度とした。また、水平荷重の作用位置は上フーチング底面から1,500 mmの位置であり、上フーチング底面位置では転倒モーメントが水平力との一定比率の大きさを水平力と同時に作用する。

供試体は図-2.1.2に示すように2種類で、一つは載荷方向に3列、載荷直交方向に2列の組杭供試体（以下、3列供試体）、もう一つは載荷方向に4列、載荷直交方向に1列の組杭供試体（以下、4列供試体）であり、各杭の両端はフーチングに剛結した。それぞれの供試体の両端部の杭は、鉛直に対して 8° の傾斜を有する斜杭である。使用した鋼管杭の諸元は、表-2.1.1に示すように、外径216.3 mm、板厚4.2 mmの一般構造用炭素鋼鋼管（STK400）である。また、杭体の上下端部には、フーチング端部から $1D$ （ D は杭径）までの範囲に中詰めコンクリートを設置した。上フーチング下端の杭頭位置における杭中心間隔は、実際の道路橋杭基礎と同様に杭径の2.5倍である。

以上の供試体の諸元は、端部の杭が傾斜を有することおよび4列供試体の載荷直交方向の杭列数を除き、既往の直杭の組杭模型と同一である。本試験において4列供試体の載荷直交方向の杭列数を1列としたのは、水平載荷ジャッキの能力が不足すると考えられたためである。

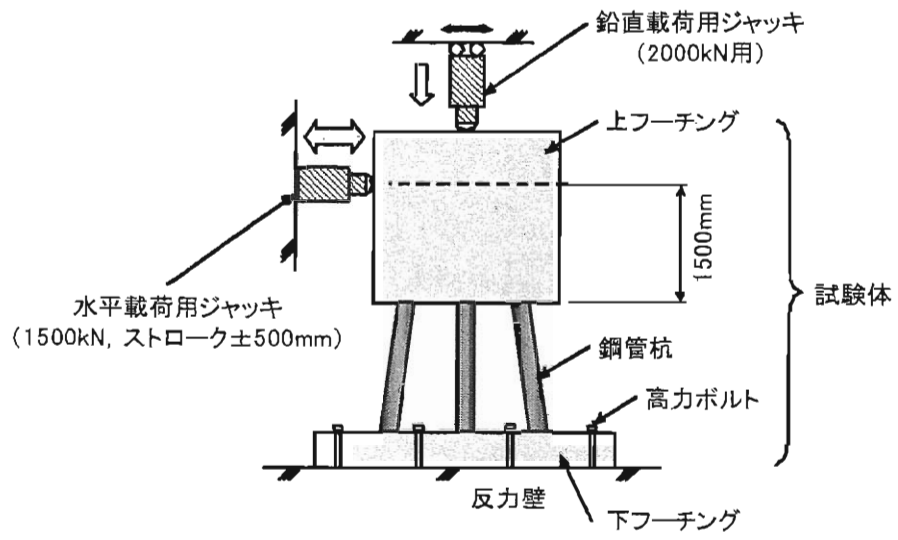


図- 2.1.1 試験概要図

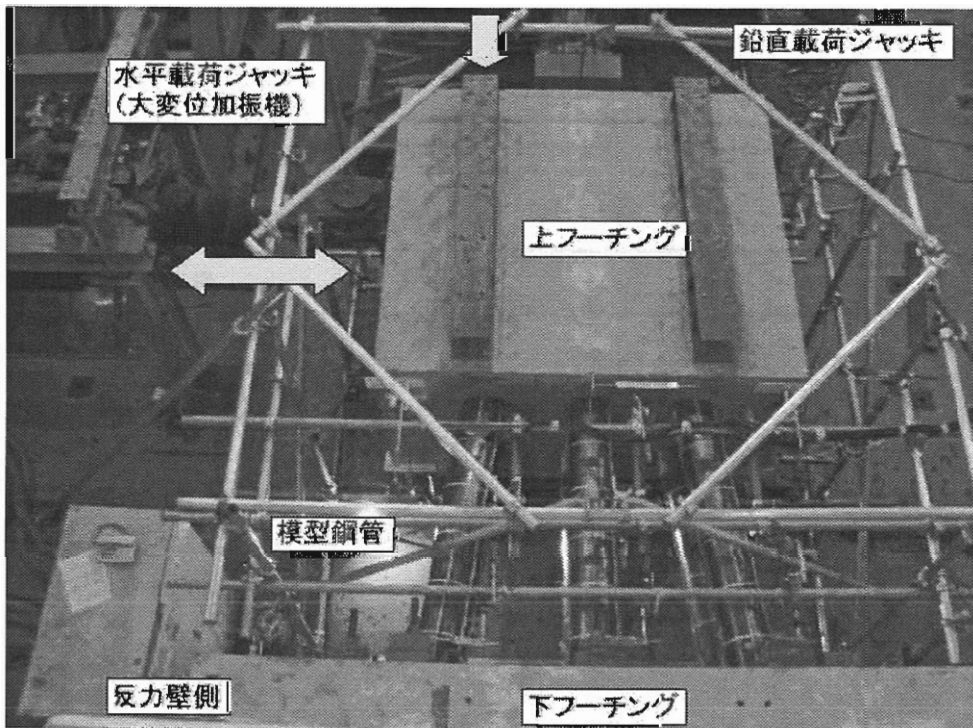
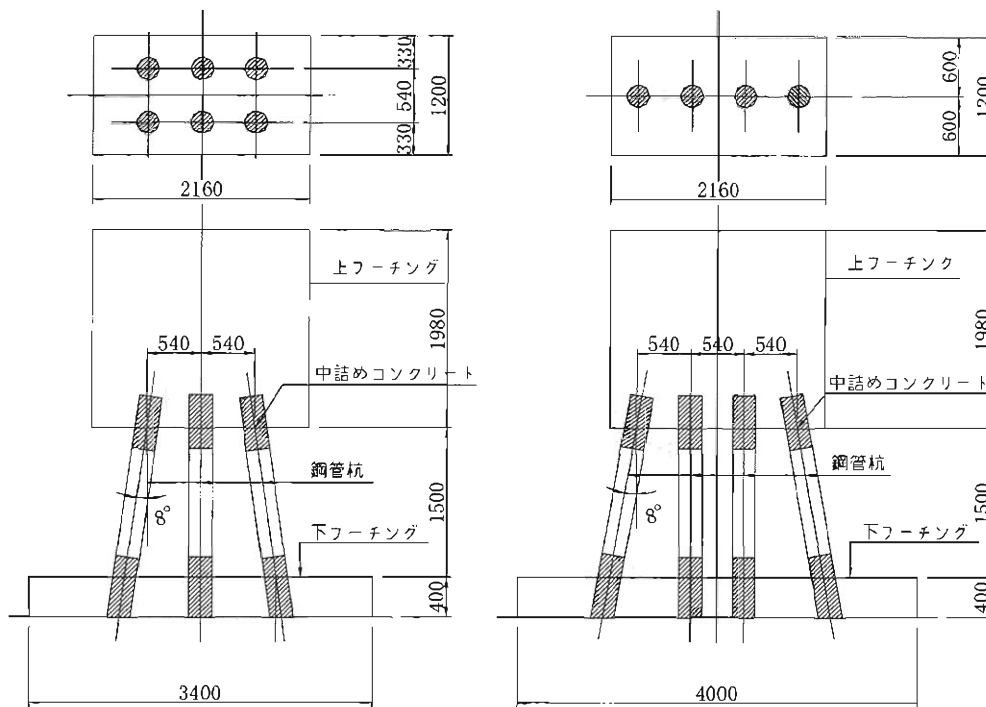


写真- 2.1.1 試験状況



(1) 3列×2列組杭

(2) 4列×1列組杭

図- 2.1.2 供試体

表- 2.1.1 鋼管杭の諸元

No.	杭本数	杭径 (mm)	板厚 (mm)	材質	備考
1	3列×2列	216.3	4.2	STK400	上下端部には中詰めコンクリート設置 (上フーチング底面から1Dおよび下フーチング上面から1Dの範囲まで) (D: 杭径)
2	4列×1列				

2.2 供試体

2.2.1 モデル化の確認

供試体は、既往の鋼管を用いた直杭組杭模型と同様に、杭頭部から 1,300 mm までの範囲をモデル化することにした。これは、地中に設置される実際の杭基礎の杭頭部から地中部最大曲げモーメントの発生深度までの範囲に凡そ着目したことになる。杭頭部は上フーチングに固定し、杭下端部も下フーチングに固定している。上フーチング底面位置における杭中心間隔は、杭径の 2.5 倍である。供試体および地中の杭基礎の挙動を確認するため、図-2.2.1 に示すモデルを用いて静的荷重漸増解析により両者の挙動を推定した。なお、模型材料の調達の都合上、直杭試験と同板厚の鋼管の調達が困難であると考えられたため、解析モデルにおける鋼管の板厚を 4.5 mm (試験では 4.2 mm) としている。解析では、上フーチング底面中心に杭 1 本当たりの平均鉛直荷重が 150 kN (鋼管の規格降伏応力度の約 20%) となるように鉛直荷重を作用させた上で、水平荷重を段階的に増加させ、各応答値を求めた。なお、各杭の曲げモーメント-曲率関係 ($M-\phi$ 関係) は、道路橋示方書¹³⁾ (以下、道示) に解説される弾完全塑性型とし、このときの軸力には、各段階での水平荷重が作用する時の杭頭反力を用いた。また、地盤抵抗特性は、道示 IV に従った。

地中の杭基礎では、地盤反力が分布荷重として生ずるが、供試体モデルでは、杭下端が固定条件であるため、杭下端の降伏が杭頭部に先行して発生し、地盤抵抗を考慮したモデルとは異なる降伏過程となる。そこで、杭頭部の降伏が杭下端部に極力先行するように工夫した。すなわち、図-2.2.1(1)に示すように、下フーチング上面から 200 mm の範囲には、中詰めコンクリートを設置の上、鋼管の板厚を大きくして補強し、杭下端部の断面剛性を向上させることとした。杭下端部の補強に伴い、杭長は着目範囲 1,300 mm に補強範囲 200 mm を加えた 1,500 mm とした。

解析結果から推定される両モデルの水平荷重-杭頭水平変位関係における各杭の降伏順序および曲げモーメント分布の比較結果は次のとおりである。

(1) 水平荷重-杭頭水平変位関係

解析で得られた水平荷重-杭頭水平変位関係を図-2.2.2 に示す。なお、図中に付した記号・数値は、イベントの種類とそれが発生した部位を示している。各記号・数値の意味は次のとおりである。

①：引抜き側の杭、②：中間杭 (直杭)、③：押し込み側の杭

上：上フーチング側 (杭頭部)、下：下フーチング側 (杭下端部)、下 (補強部)：杭下端の補強した部分

M_y ：降伏曲げモーメント (杭体の最外縁が降伏応力度となるとき曲げモーメント)

M_p ：全塑性モーメント (= 塑性断面係数 × 降伏応力度)

例えば、水平荷重-杭頭水平変位曲線上の「③上 M_y 」と記した点は、「押し込み側の杭の

杭頭部が降伏曲げモーメントに達した状態」であること、「①下 M_y 」と記した点は、「引抜き側の杭の杭下端付近において降伏モーメントに達した状態」であること、また「③下（補強部） M_y 」と記した点は、「押込み側杭の下端部のうち、補強部が降伏した状態」であることを示している。

地中の杭基礎モデルでは、A 押込み側杭の杭頭部が降伏 → B 引抜き側杭の杭頭部が降伏 → C 中間杭（直杭）の杭頭部が降伏 の順序で全杭降伏に至っており、供試体モデルでも、この順序は同様である。これより、気中試験モデルは地盤抵抗考慮モデルのイベントの発生順序を再現できると言える。

なお、地中の杭基礎モデルでは全杭降伏までに至る過程において、杭地中部での降伏は生じていないが、供試体モデルでは、この過程で一部に杭下端部付近の降伏が生じている。これは、杭下端部の変形を拘束しているためであるが、気中試験においては止むを得ないと判断した。

(2)杭の曲げモーメント分布

解析で得られた全杭降伏時の曲げモーメント分布を図- 2.2.3 に示す。

供試体モデルでは、杭頭曲げモーメントの値を正としたとき、負の曲げモーメントが地盤反力により深度方向に低減していく様子を再現することはできない。このため、供試体モデルにおける下フーチング近傍の曲げモーメントは、地盤抵抗考慮モデルに比べて大きい。しかし、これより上方の範囲については、地盤抵抗考慮モデルの曲げモーメント分布と同等である。

以上のことから、供試体は、地中に設置された実際の杭基礎の挙動をほぼ再現できるものと判断される。

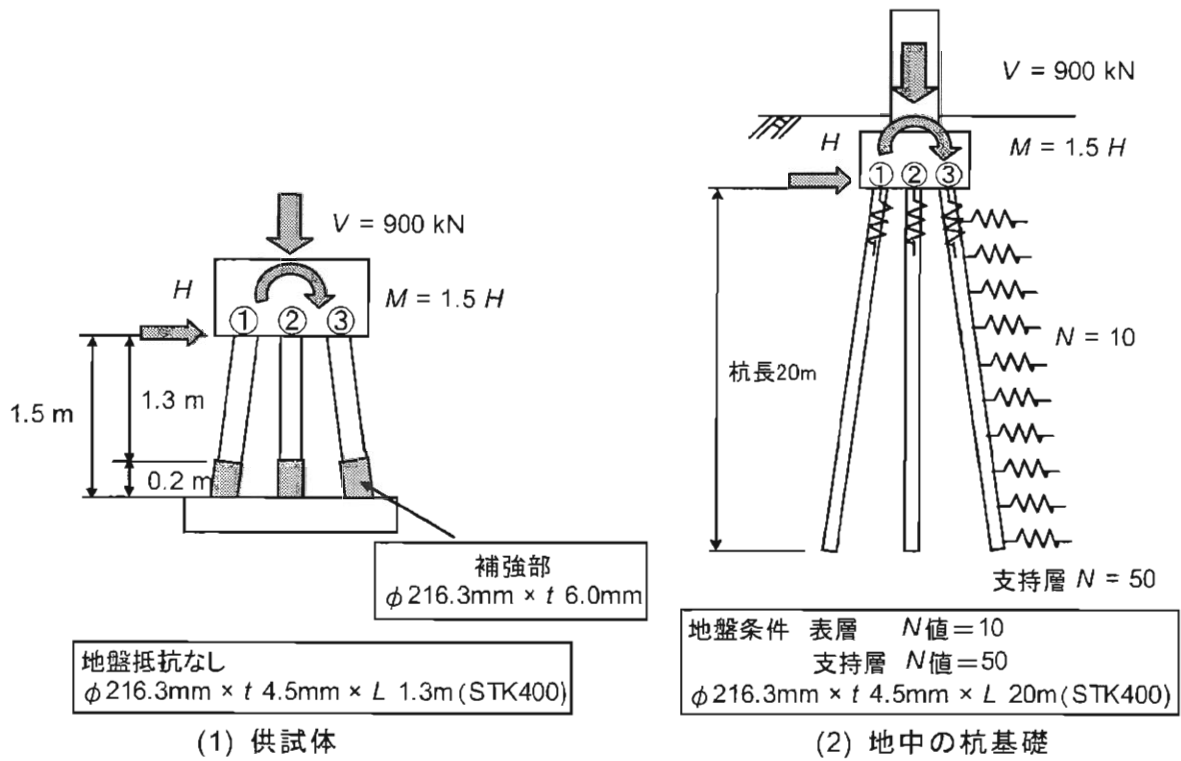


図- 2.2.1 解析モデル

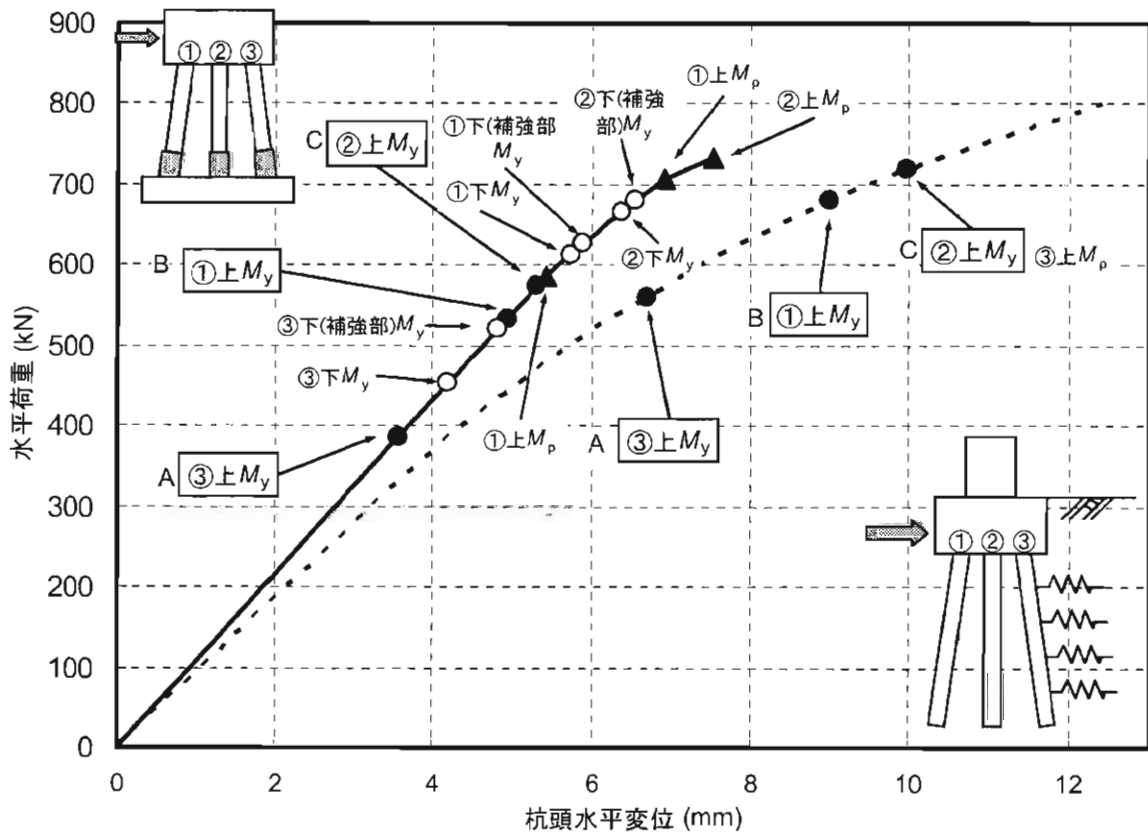


図- 2.2.2 静的荷重漸増解析結果(水平荷重-杭頭水平変位の関係)

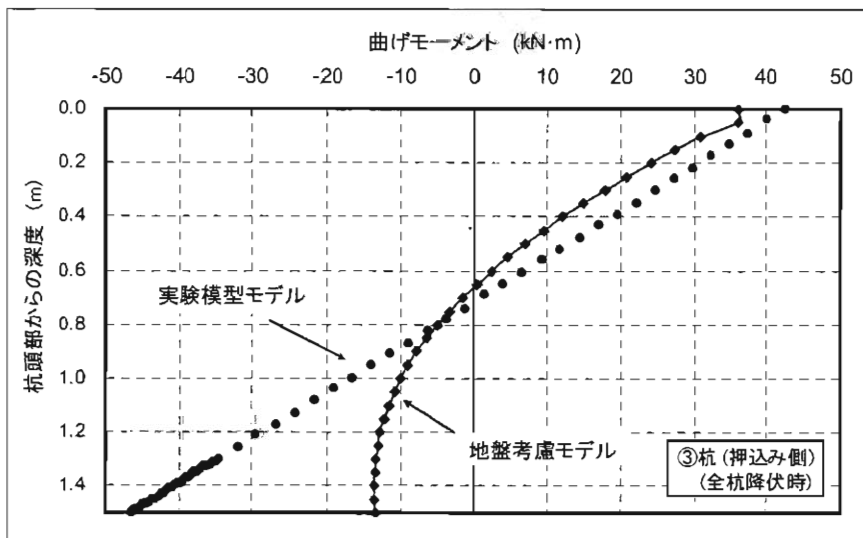
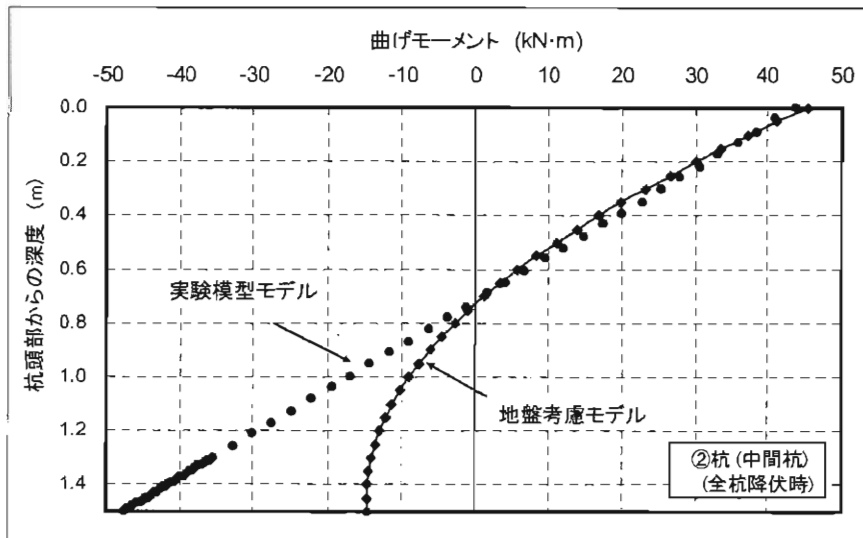
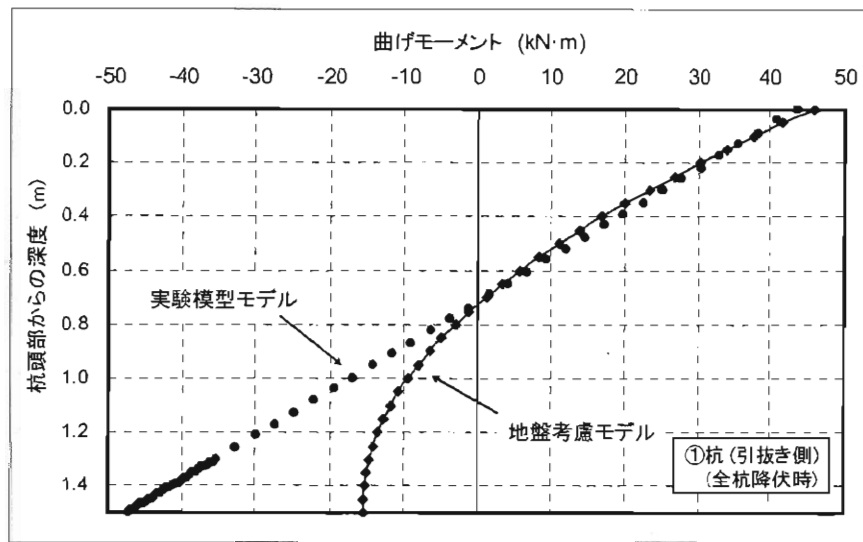


図- 2.2.3 静的荷重漸増解析結果(杭の曲げモーメント分布)

2.2.2 供試体の製作

図- 2.2.4 に 3 列供試体の一般図を、図- 2.2.5 には 4 列供試体の一般図を示す。

3 列供試体は、水平荷重の載荷方向に 3 列、載荷直交方向に 2 列の組杭供試体であり、4 列供試体は、水平荷重の載荷方向に 4 列、載荷直交方向に 1 列の組杭供試体である。杭には、外径 216.3 mm、板厚 4.2 mm の一般構造用炭素鋼鋼管 (STK400) を用い、各供試体の両端部の杭は、鉛直に対して 8° の傾斜を有する斜杭で、それ以外は直杭である。

杭の上下端部は、コンクリート製のフーチングに剛結した。図- 2.2.6 に、鋼管杭の詳細図を示す。上フーチングと杭との結合部では、杭を上フーチング底面から 350 mm 埋め込み、杭のフーチングからの抜け出しを防止するため、杭の上フーチングに埋め込まれた部分の外面には、円周方向にずれ止め (外径 12 mm の丸鋼) を 4 段取り付けた。また、上フーチング底面から下方 200 mm の範囲には、中詰めコンクリートを設けた。下フーチングと杭下端部の結合部では、杭を下フーチング底面まで 400 mm 埋め込み、さらに下フーチング底面に型枠兼用で設けた鋼板に溶接接合した。杭の下フーチングに埋め込まれた部分の外面には、ずれ止めを 5 段取り付けた。下フーチング上面から上方 200 mm の範囲には、中詰めコンクリートを設けた。

また、杭下端部の下フーチングから上方 200 mm の範囲には、中詰めコンクリートに加え、円筒形の半割り状に加工した板厚 2.3 mm の鋼板 (SS400) 2 枚を外面に溶接で取り付け、補強を行った。補強の目的は前述のとおりであり、模型杭の下端を杭頭部に極力先行して降伏させないことを意図した工夫である。

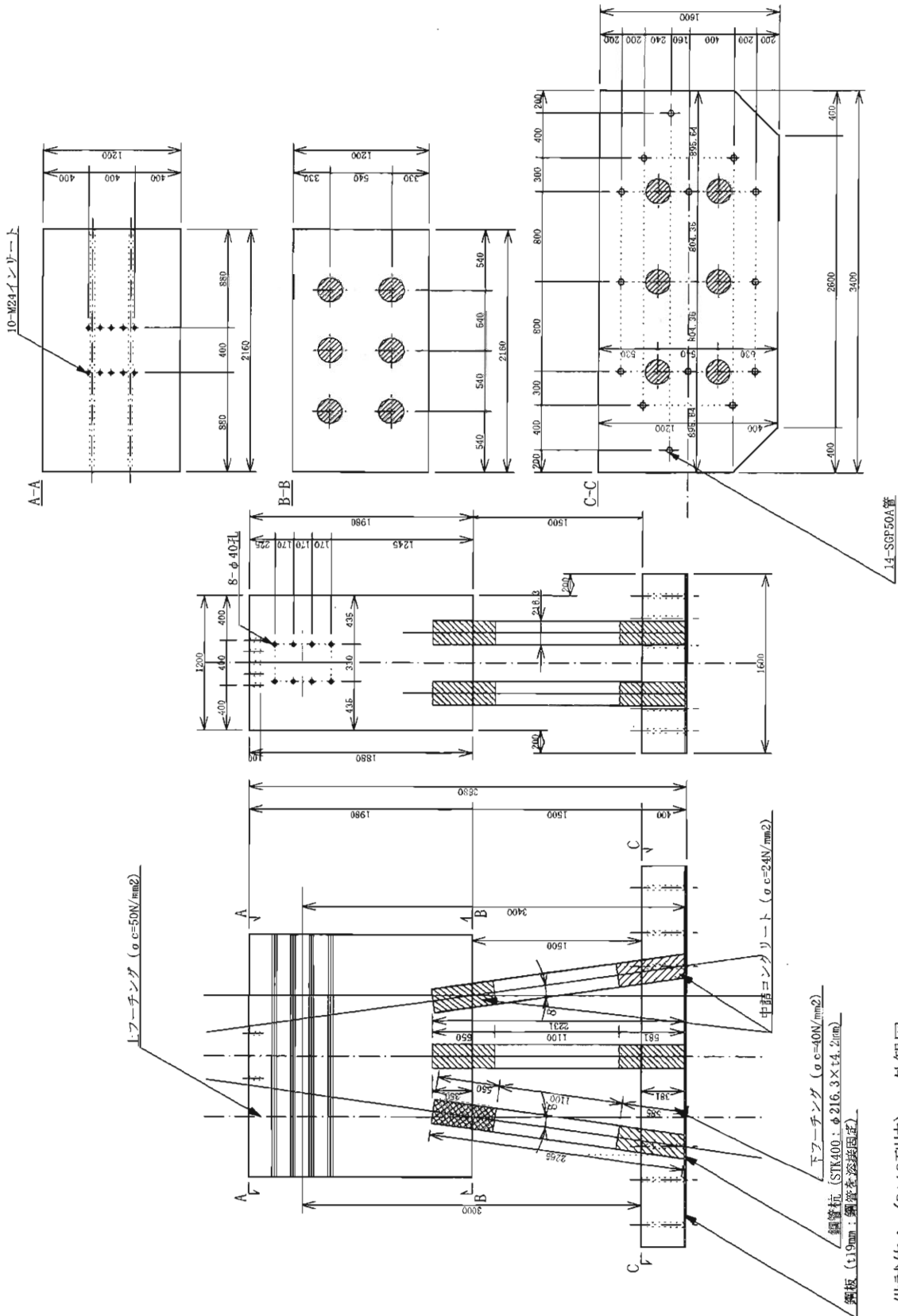


図-2.2.4 3列供試体(3列×2列)一般図

供試体A (3×2列杭) 外観図

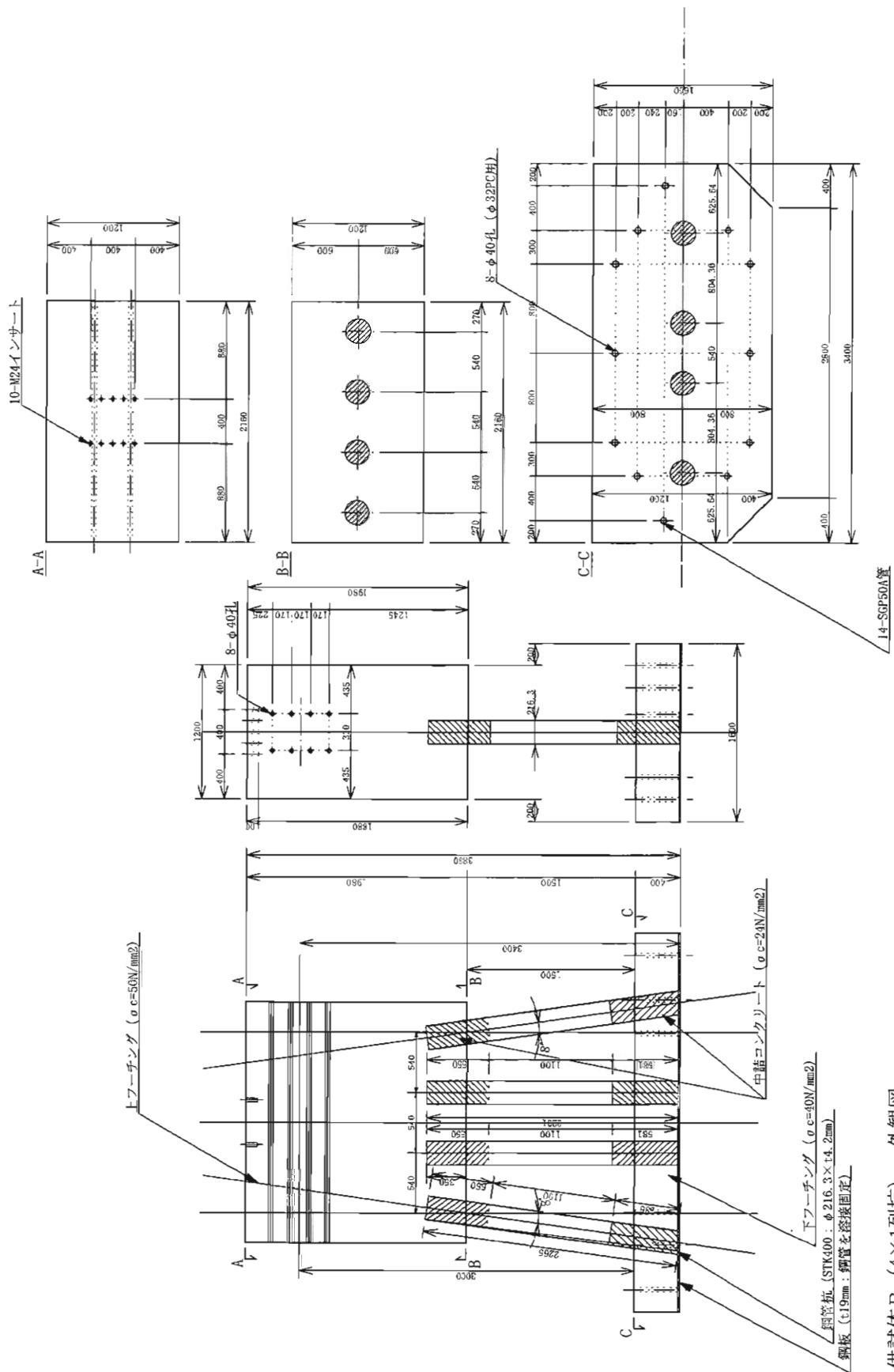


図-2.2.5 4列供試体(4列×1列)一般図

供試体B (4×1列杭) 外観図

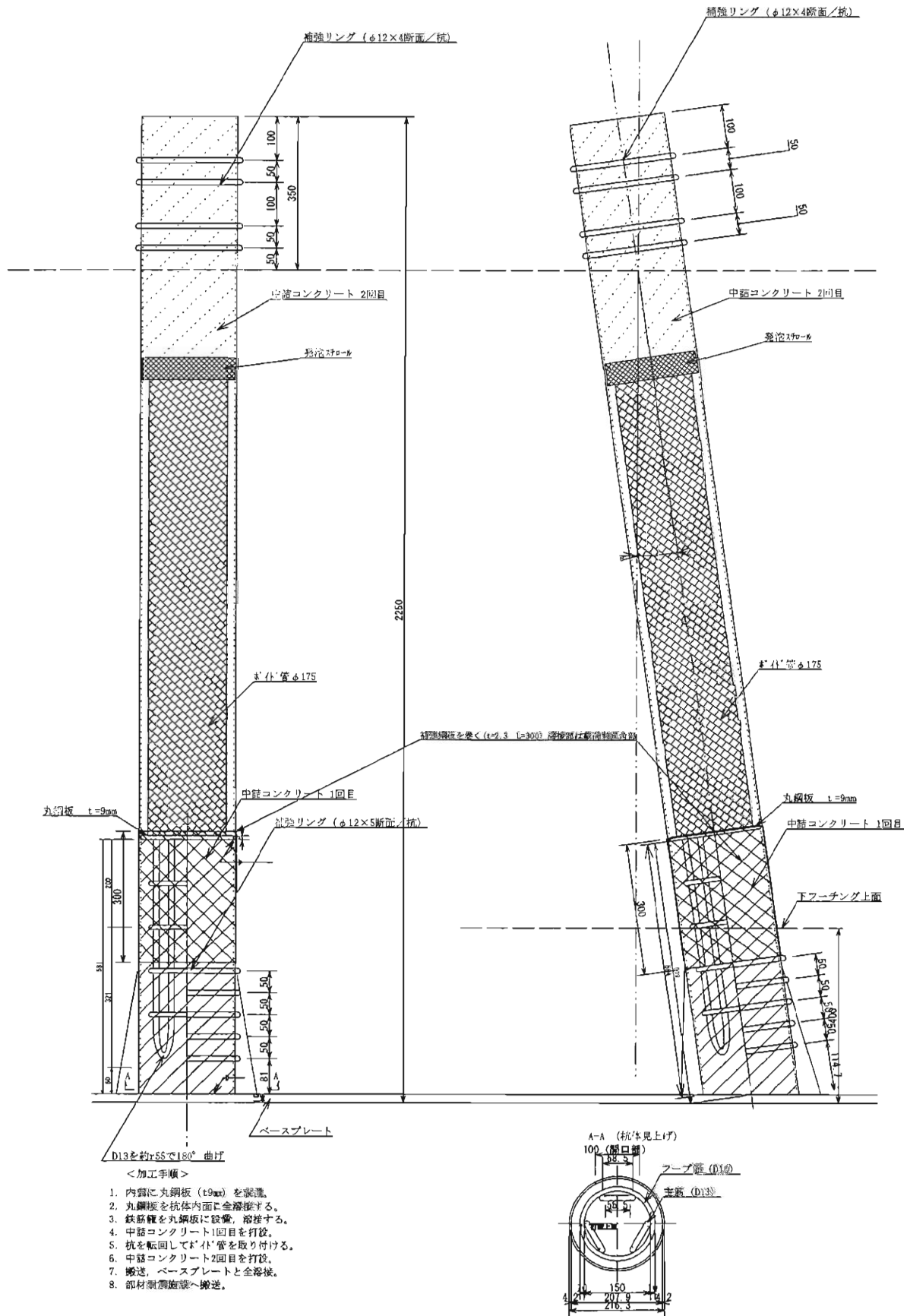


図- 2.2.6 鋼管杭部詳細図

2.2.3 材料試験

鋼管材料の引張試験結果、フーチングおよび鋼管杭端部の中詰めに使用したコンクリートの圧縮試験結果を表- 2.2.1～表- 2.2.3 に示す。

表- 2.2.1 鋼管材料の引張試験結果

番号	板厚 mm	試験前 断面積 mm ²	0.2%耐力時		破断時			弾性係数 kN/mm ²
			荷重 kN	応力 N/mm ²	荷重 kN	応力 N/mm ²	伸び %	
1	4.2	105.0	37.7	359.1	45.00	428.6	39.3	218.2
2	4.2	105.0	35.8	341.1	44.96	428.2	37.1	218.1
3	4.2	105.0	36.8	350.1	44.98	428.4	36.7	206.7
平均				350.1		428.4	37.7	214.3

表- 2.2.2 コンクリートの圧縮試験結果(3列供試体)

(a)フーチングコンクリート

番号	直径			断面積 mm ²	最大荷重 kN	圧縮強度 N/mm ²	密度 kg/m ³	備考
	上端	下端	平均					
1	99.93	100.15	100.04	7,860	618.0	78.62	2.358	15日強度
2	100.28	100.00	100.14	7,876	622.0	78.97	2.360	
3	100.07	100.03	100.05	7,862	582.0	74.03	2.356	
平均	—	—	—	—	—	77.21	2.358	

(b)中詰めコンクリート(杭下端部)

番号	直径			断面積 mm ²	最大荷重 kN	圧縮強度 N/mm ²	密度 kg/m ³	備考
	上端	下端	平均					
1	100.35	100.50	100.43	7,921	277.0	34.97	2.321	42日強度
2	100.36	100.46	100.41	7,919	275.0	34.73	2.320	
3	100.24	100.68	100.46	7,926	272.0	34.32	2.330	
平均	—	—	—	—	—	34.67	2.324	

(c)中詰めコンクリート(杭上端部)

番号	直径			断面積 mm ²	最大荷重 kN	圧縮強度 N/mm ²	密度 kg/m ³	備考
	上端	下端	平均					
1	100.40	100.18	100.29	7,900	278.0	35.19	2.257	38日強度
2	100.34	100.18	100.26	7,895	271.0	34.33	2.279	
3	100.06	100.44	100.25	7,893	260.0	32.94	2.290	
平均	—	—	—	—	—	34.15	2.275	

表- 2.2.3 コンクリートの圧縮試験結果(4列供試体)

(a)フーチングコンクリート

番号	直径			断面積 mm ²	最大荷重 kN	圧縮強度 N/mm ²	密度 kg/m ³	備考
	上端	下端	平均					
1	100.16	100.15	100.16	7,878	679.5	86.25	2.341	22日強度
2	100.22	100.12	100.17	7,881	681.5	86.48	2.348	
3	100.08	100.30	100.19	7,884	672.0	85.24	2.336	
平均	-	-	-	-	-	85.99	2.342	

(b)中詰めコンクリート(杭下端部)

番号	直径			断面積 mm ²	最大荷重 kN	圧縮強度 N/mm ²	密度 kg/m ³	備考
	上端	下端	平均					
1	100.24	100.25	100.25	7,893	274.0	34.72	2.302	49日強度
2	100.41	100.47	100.44	7,923	274.0	34.58	2.320	
3	100.30	100.38	100.34	7,907	285.0	36.04	2.339	
平均	-	-	-	-	-	35.11	2.320	

(c)中詰めコンクリート(杭上端部)

番号	直径			断面積 mm ²	最大荷重 kN	圧縮強度 N/mm ²	密度 kg/m ³	備考
	上端	下端	平均					
1	100.36	100.36	100.36	7,911	279.0	35.27	2.256	45日強度
2	100.35	100.48	100.42	7,919	259.0	32.70	2.277	
3	100.31	100.28	100.30	7,900	272.0	34.43	2.273	
平均	-	-	-	-	-	34.13	2.269	

2.3 載荷方法

載荷時のセットアップ図を図-2.3.1に示す。供試体は、水平に寝かせた状態でセットし、下フーチングを反力壁にボルトで固定した。上フーチングは架台で支持し、接触面にはテフロンシートを設け、さらに潤滑材を塗布して摩擦力を極力低減させている。鉛直載荷ジャッキにより一定の鉛直荷重を保持しながら、水平載荷ジャッキにより上フーチングに水平力を正負交番で繰返し載荷した。試験中の鉛直荷重の平均値は、杭1本当たり147 kNである。これは規格降伏応力度の約20%に相当し、杭基礎に作用する死荷重の標準的な範囲内にある。なお、8°の傾斜を有する斜杭における鉛直荷重の杭軸方向分力は、直杭の99% ($\cos 8^\circ \approx 0.99$) である。鉛直載荷ジャッキは、上フーチングの水平・回転変位に追従できるよう、水平荷重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が伝達されるようにした。また、水平力の作用位置はフーチング底面中心位置から上側に1,500 mm離れた位置にあり、フーチング底面中心位置には、水平力に加えてこれと一定の比率の大きさの転倒モーメントが同時に作用する。

載荷経路を図-2.3.2に示す。載荷は基準変位 d_s を設け変位制御で行った。すなわち、基準変位 $1d_s$ に達するまで正方向へ載荷した後に除荷し、次に $-1d_s$ に達するまで負方向へ載荷した後に除荷する。ここまですを1サイクルと呼ぶ。± $1d_s$ までの載荷を3サイクル行った後、± $1d_s$ ずつ変位を増加させ、各載荷ステップを3サイクル実施した。なお、ここでは、水平載荷ジャッキが伸長する方向を正方向、短縮する方向を負方向と呼ぶ。

既往の試験^{6),7),8)}では、道示IVに解説される杭基礎の降伏の定義¹³⁾と同様に、全杭の杭体の最外縁部もしくは全杭の杭体の最外縁の軸方向鉄筋が規格降伏応力度に達すると予測される水平荷重を全杭降伏水平荷重 P_y としている。そして、試験において全杭降伏水平荷重 P_y を作用させた時の水平変位 d_y を基準変位 d_s としている。本試験における全杭降伏水平荷重 P_y 、全杭降伏水平変位 d_y および基準変位 d_s の一覧を表-2.3.1に示す。全杭降伏水平荷重 P_y を求めるための解析は、道示IVに示されるラーメンモデルを用い、平均鉛直荷重が150 kNとなるように鉛直荷重を付与しつつ、水平荷重を段階的に増加させた。また、各杭の $M-\phi$ 関係は弾完全塑性型とし、軸力には各水平荷重に応じた杭頭反力を用いた。本試験における基準変位 d_s は、試験において全杭降伏荷重 P_y を作用させた時の水平変位 d_y よりもやや大きく、3列供試体では $1.3d_y$ 、4列供試体では $1.2d_y$ を基準変位として繰返し載荷を行ったことになる。

表-2.3.1 全杭降伏水平荷重 P_y 、全杭降伏水平変位 d_y および基準変位 d_s

供試体種別	全杭降伏時		基準変位 d_s	比 d_s/d_y
	水平荷重 P_y^*	水平変位 d_y^{**}		
3列供試体	380 kN	3.9 mm	4.9 mm	1.3
4列供試体	240 kN	4.3 mm	5.3 mm	1.2

*：解析値、**：試験値（解析で得られた P_y を試験で作用させた時の値）

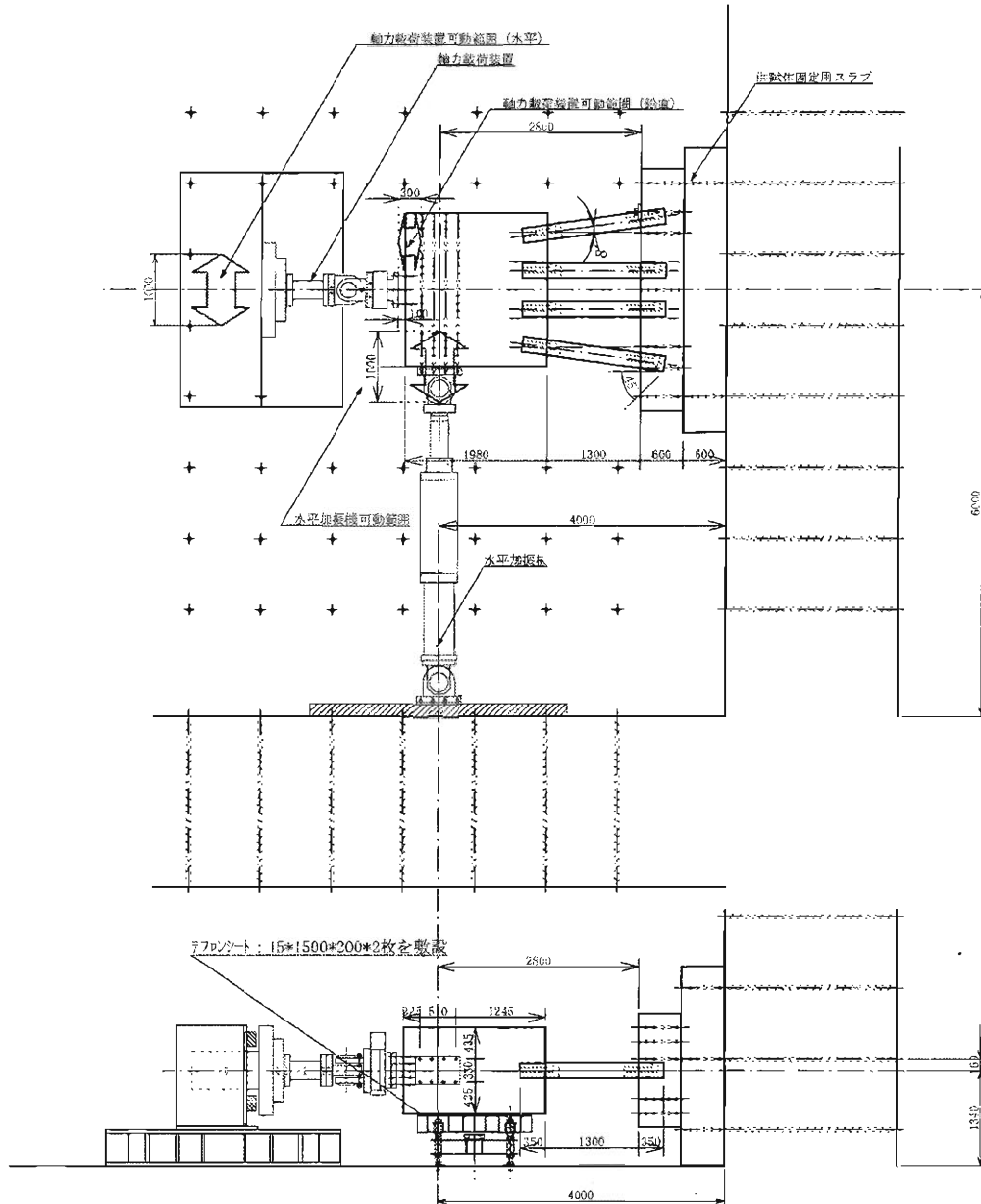


図- 2.3.1 載荷時セットアップ図

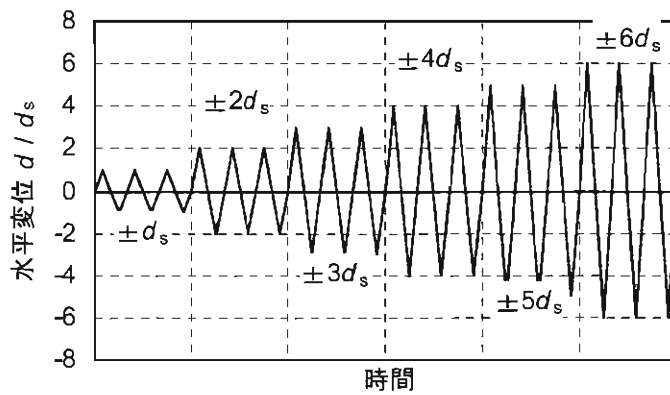


図- 2.3.2 載荷経路図

2.4 計測項目

計測項目と測定点数を表-2.4.1に、ひずみゲージおよび変位計の配置図を図-2.4.1～図-2.4.4に示す。

鉛直ジャッキ、水平ジャッキの荷重およびストロークを計測した他、上・下フーチングの鉛直・水平変位、鋼管杭の杭頭部、中間部、杭下端部の載荷方向変位を計測した。また、全杭の杭頭部および杭下端部にそれぞれ3断面、杭中間部に1断面の計7断面/本、各断面4箇所ずつひずみゲージを貼り付け、杭体のひずみを計測した。その他、鋼管杭表面の損傷（凸凹）状況の観察には、目視による光の陰影確認に加え、型ゲージも用いた。損傷観察に当たっては、目視で確認できないわずかな凹凸でも、手で触れると確認できることがあり、後述の変状過程の観察記録にはこれをも反映している。

表-2.4.1 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) 鋼管杭のひずみ	ひずみゲージ	168点	112点
(5) 鋼管杭の損傷	目視,接触,型ゲージ	—	—

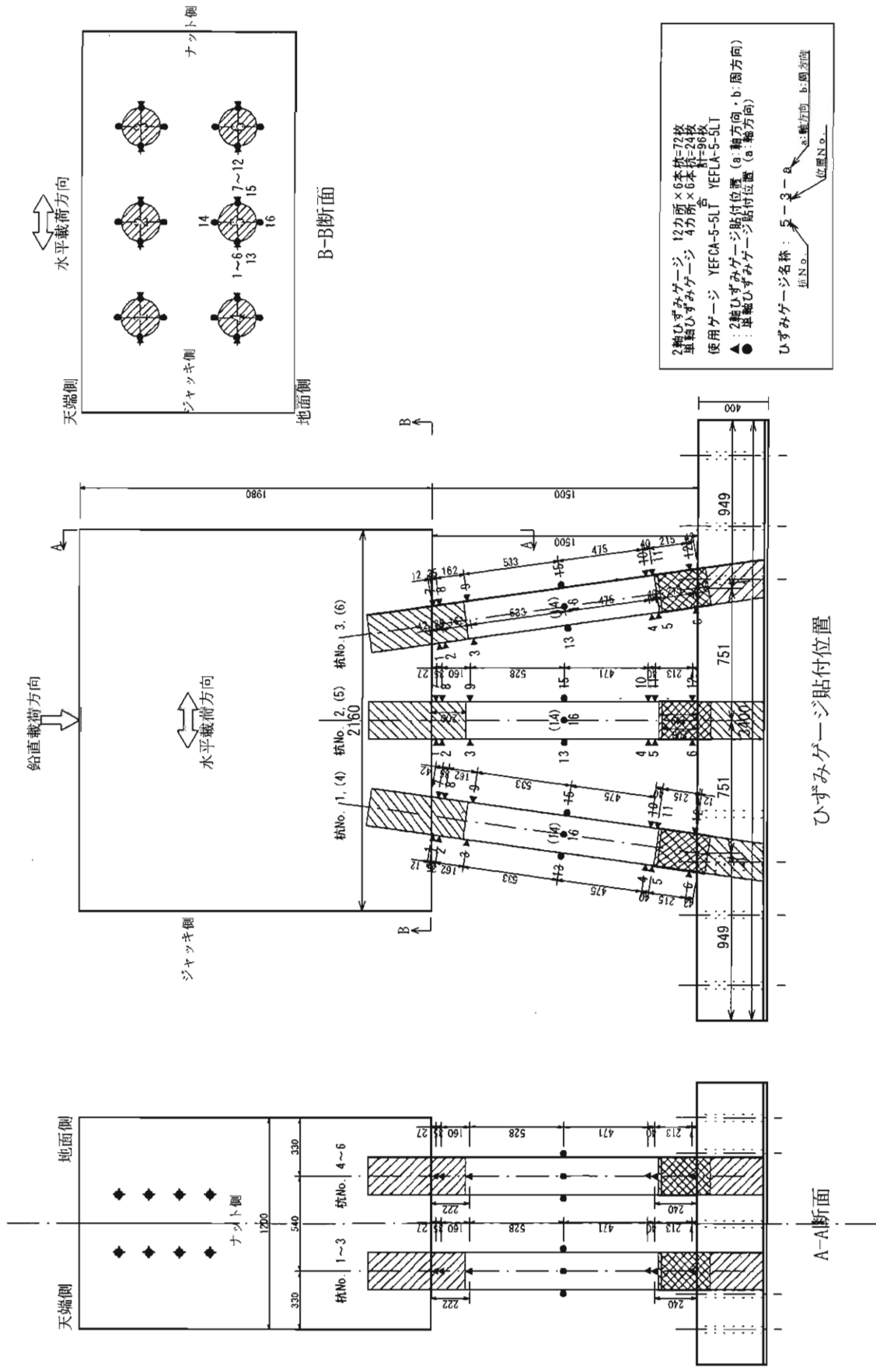


図-2.4.1 ひずみゲージ貼付位置図 (3列供試体 3列×2列)

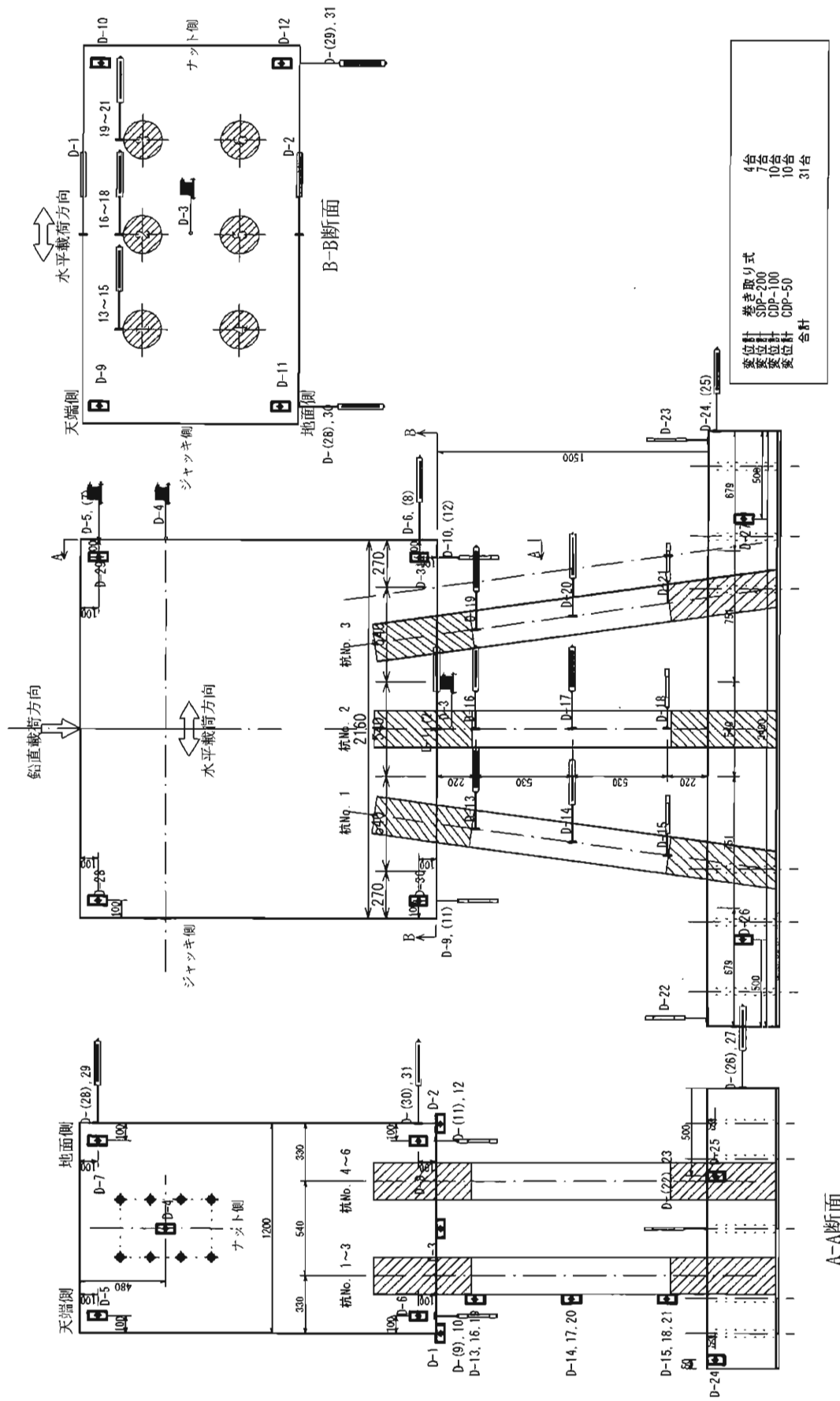


図-2.4.3 変位計位置図 (3列供試体 3列×2列)

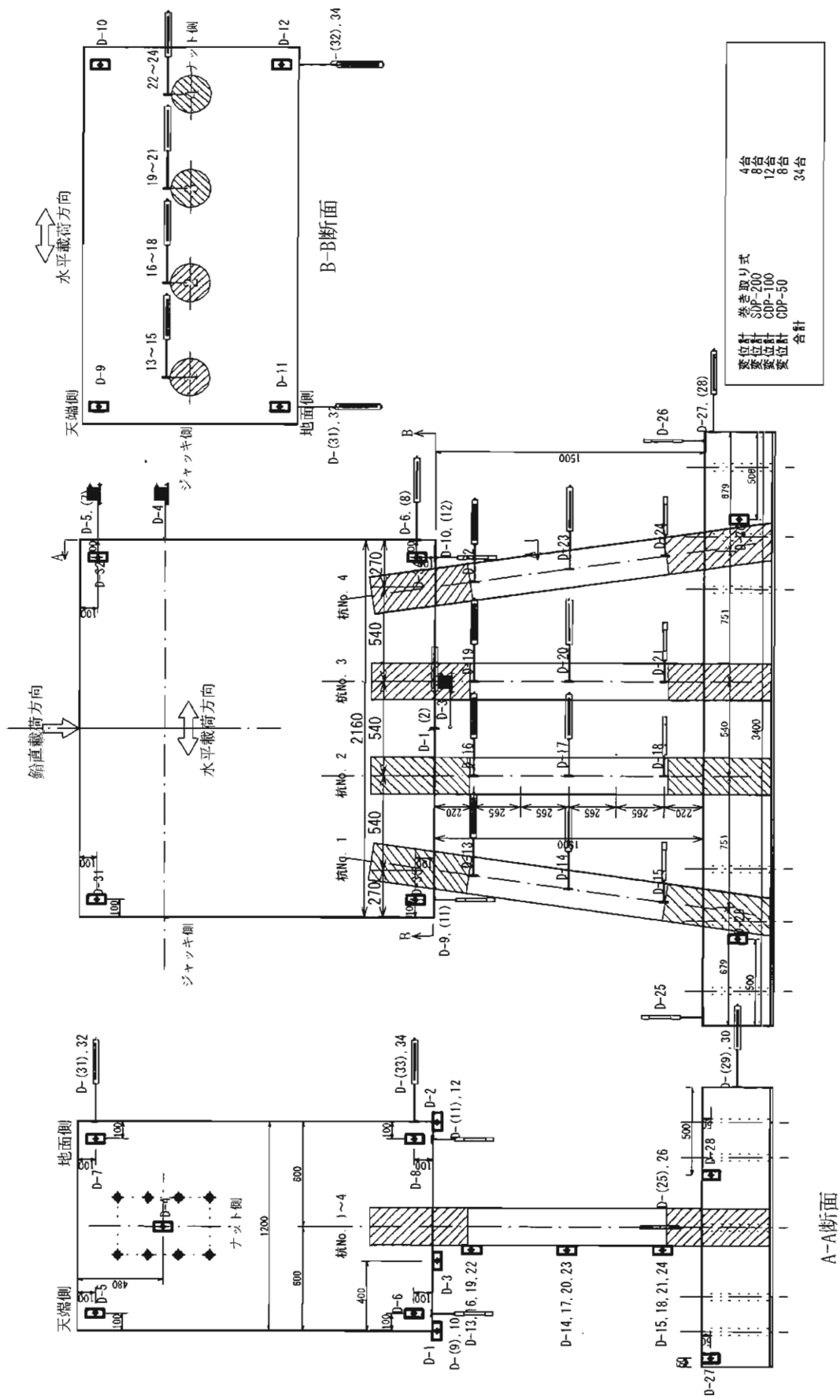


図-2.4.4 変位計位置図 (4列供試体 4列×1列)

3. 試験結果

3.1 3列供試体

3列供試体の水平荷重と上フーチング底面における水平変位の履歴曲線を図-3.1.1に示す。図-3.1.2は、水平荷重 P を全杭降伏水平荷重 P_y により、水平変位 d を全杭降伏水平変位 d_y により正規化して表したものである。本試験の基準変位は $d_s = 4.9\text{ mm}$ 、全杭降伏変位は $d_y = 3.9\text{ mm}$ である。各載荷ステップにおける変状過程を表-3.1.1に、鋼管杭のひずみ分布を図-3.1.3～図-3.1.8に、載荷試験終了時の損傷状況を写真-3.1.1～写真-3.1.4に示す。

水平荷重と水平変位の履歴曲線は、正載荷側および負載荷側ともほぼ同様の値もしくは形状であり、正負交番載荷が良好に行われたことが確認できる。また、水平荷重-水平変位の履歴ループは、エネルギー吸収能力の大きいことを表す紡錘型であり、試験終了まで変化はない。さらに、各 d_s の3回繰返しによる水平荷重-水平変位の関係は、最大荷重となる $3.9d_y (3d_s) \sim 5.2d_y (4d_s)$ まではほぼ同じ形状であり、繰返し載荷による耐力低下は少ない。

$1.3d_y (1d_s)$ 時においては、外観上の変化はなかった。 $2.6d_y (2d_s)$ 時において、端部杭（斜杭）の上下端部に目視（光の陰影）では確認できないものの、触れると分かる程度の微少な膨らみが観測された。さらに $3.9d_y (3d_s)$ 時においては、端部杭（斜杭）の上下端部において膨らみが目視で確認できるようになり、負載荷時においても下端部の膨らみが残留し、3サイクルの繰返しによりその膨らみは蓄積されるようになった。 $5.2d_y (4d_s)$ に達すると、端部杭（斜杭）の下端部の膨らみが顕著となるとともに、中間杭（直杭）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 $5.2d_y (4d_s)$ 時までは認められなかった。さらに $6.4d_y (5d_s)$ 時には、上フーチング底面に水平力作用方向と直角方向にクラックが入り、 $6.4d_y (5d_s)$ 時の2サイクル目で耐力低下が顕著となったが、全杭降伏水平荷重程度までの低下は見られなかった。

$1.3d_y (1d_s)$ 時の正載荷時のひずみ（引張+）に着目すると、押込み側の杭（No.3,6）で杭頭部： $-1,800\ \mu$ 、杭下端部： $-3,000\ \mu$ 、中間杭（No.2,5）で杭頭部： $-1,050\ \mu$ 、杭下端部： $-1,150\ \mu$ 、引抜き側の杭（No.1,4）では杭頭部： $1,000\ \mu$ 、下端部： $1,350\ \mu$ であり、この時点で全杭が降伏ひずみ（ $\pm 1,100\ \mu$ ）に至っていることが確認できる。また、ひずみの大きさから、押込み側の杭の圧縮降伏、引抜き側の杭の引張降伏、中間杭の圧縮降伏の順に各杭の降伏が進行している様子が伺える。なお、供試体に工夫を施したにも関わらず、杭頭部よりも杭下端部の降伏が先行している。この点は、杭下端部の固定方法の課題である。

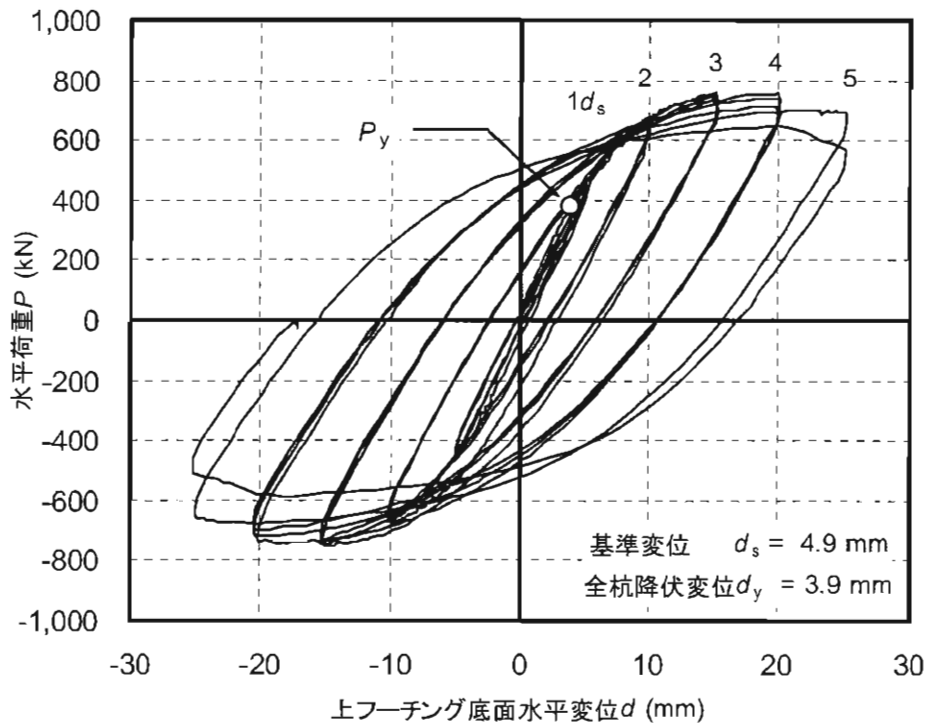


図- 3.1.1 水平荷重-水平変位履歴曲線(3列供試体)

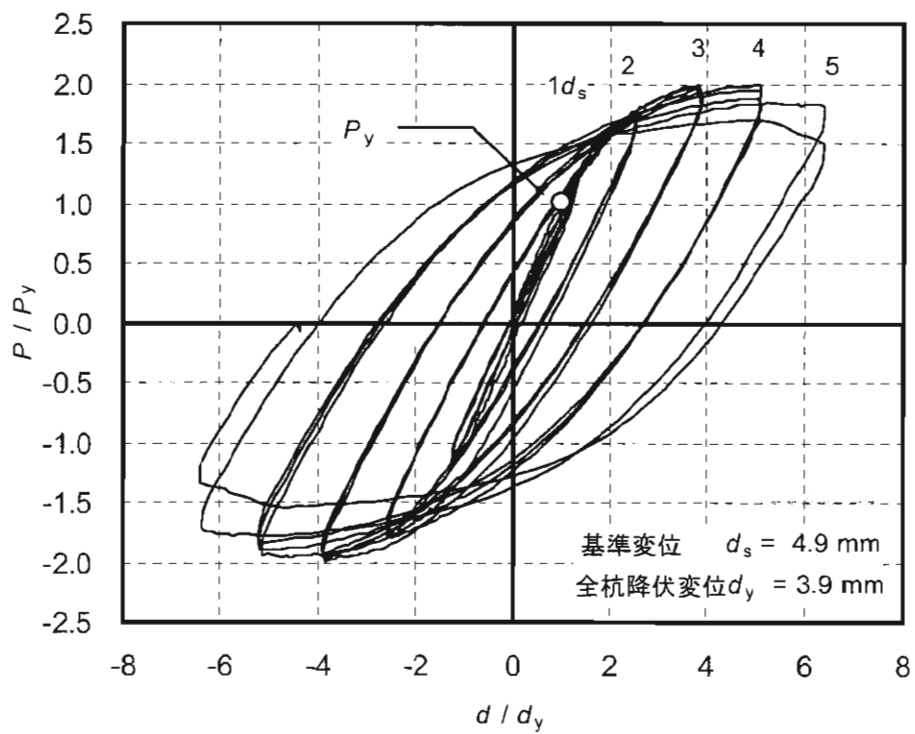


図- 3.1.2 水平荷重-水平変位履歴曲線(3列供試体、正規化)

表- 3.1.1 3列供試体の変状過程

載荷ステップ		荷重 (kN)	水平変位 ^{注)} (mm)	変状状況
1.3 d_y (1 d_s)	正載荷①	461.6	5.1	<ul style="list-style-type: none"> ・外観上の損傷は確認されず ・全杭で降伏ひずみに至る。
	負載荷①	-458.2	-4.9	
	正載荷②	443.5	5.0	
	負載荷②	-443.1	-4.9	
	正載荷③	461.0	5.1	
	負載荷③	-438.8	-4.9	
2.6 d_y (2 d_s)	正載荷①	651.4	10.0	<ul style="list-style-type: none"> ・端部杭（斜杭）の上下端部に目視で確認できない程度の微小な（光の陰影では認識できないが、触れると分かる程度の）膨らみ発生
	負載荷①	-676.4	-10.0	
	正載荷②	677.6	10.0	
	負載荷②	-675.4	-10.0	
	正載荷③	664.3	9.9	
	負載荷③	-670.3	-10.1	
3.9 d_y (3 d_s)	正載荷①	743.4	15.2	<ul style="list-style-type: none"> ・端部杭（斜杭）の上下端部の膨らみが進行（下端部の膨らみは蓄積）
	負載荷①	-754.4	-15.0	
	正載荷②	755.7	15.0	
	負載荷②	-743.8	-15.2	
	正載荷③	737.8	15.1	
	負載荷③	-729.0	-15.2	
5.2 d_y (4 d_s)	正載荷①	755.5	20.0	<ul style="list-style-type: none"> ・端部杭（斜杭）の下端部の膨らみが顕著 ・中間杭（直杭）の上下端部に膨らみ発生
	負載荷①	-726.6	-20.2	
	正載荷②	737.7	20.1	
	負載荷②	-719.6	-20.2	
	正載荷③	684.3	20.1	
	負載荷③	-698.2	-20.3	
6.4 d_y (5 d_s)	正載荷①	691.0	25.1	<ul style="list-style-type: none"> ・上フーチング底面の杭周辺部にクラック発生 ・耐力低下（2サイクル目で顕著）
	負載荷①	-650.1	-25.0	
	正載荷②	567.9	25.1	
	負載荷②	-510.1	-25.1	
	正載荷③	-	-	
	負載荷③	-	-	

注) 上フーチング底面（杭頭部）の水平変位

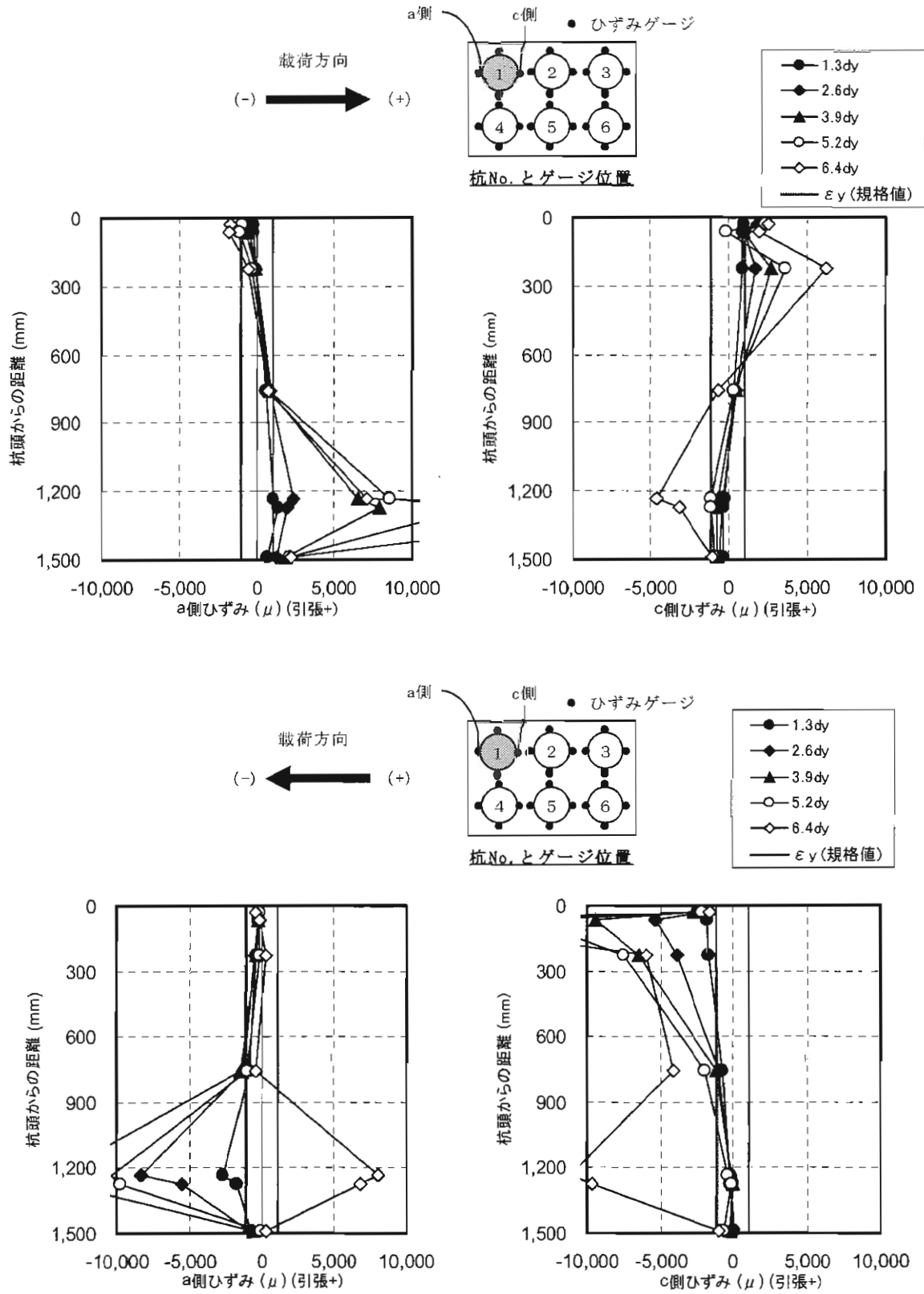


図- 3.1.3 鋼管杭ひずみ分布(3列供試体 No.1 杭)

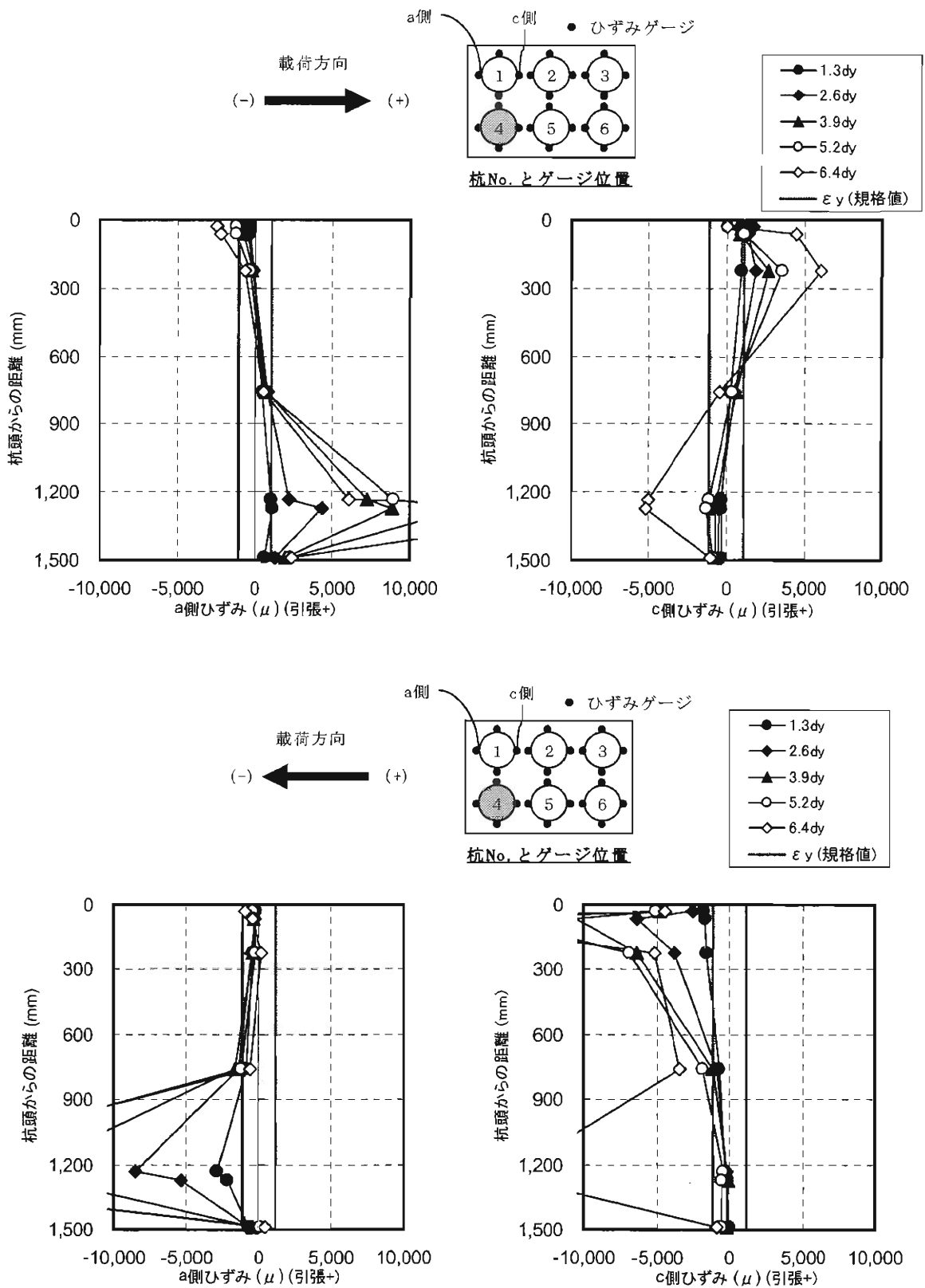


図- 3.1.4 鋼管杭ひずみ分布(3列供試体 No.4 杭)

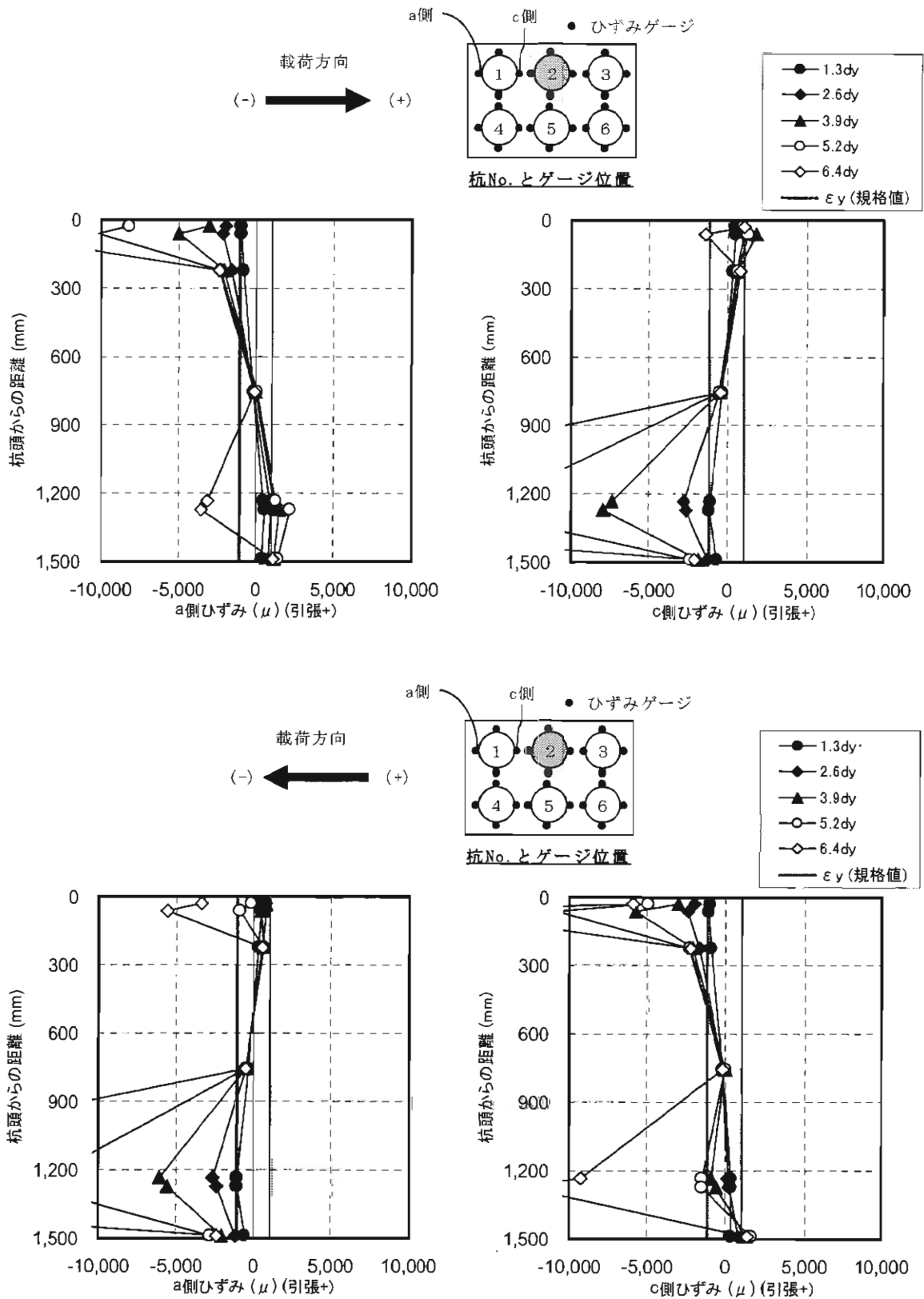


図- 3.1.5 鋼管杭ひずみ分布(3列供試体 No.2 杭)

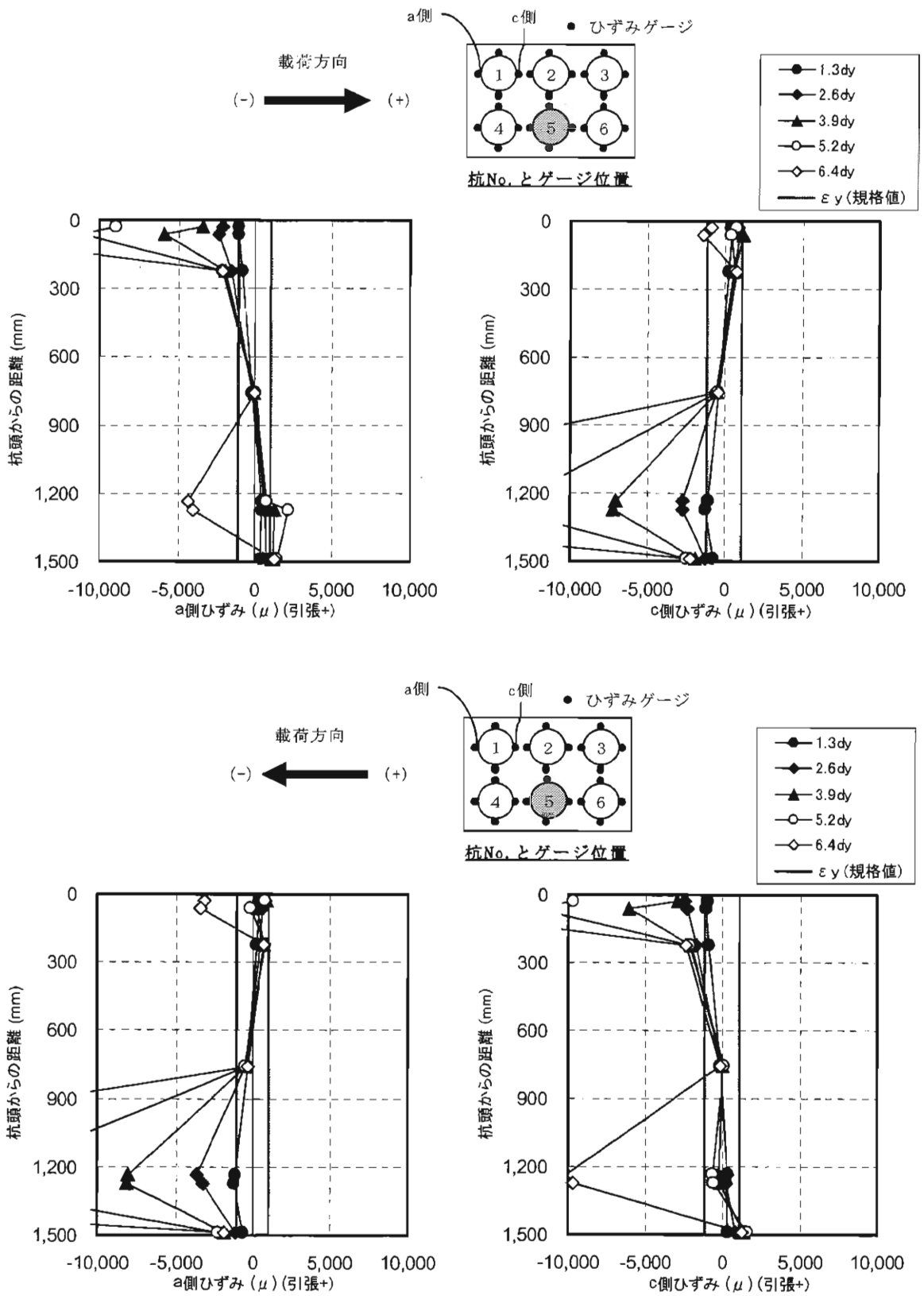


図- 3.1.6 鋼管杭ひずみ分布 (3 列供試体 No.5 杭)

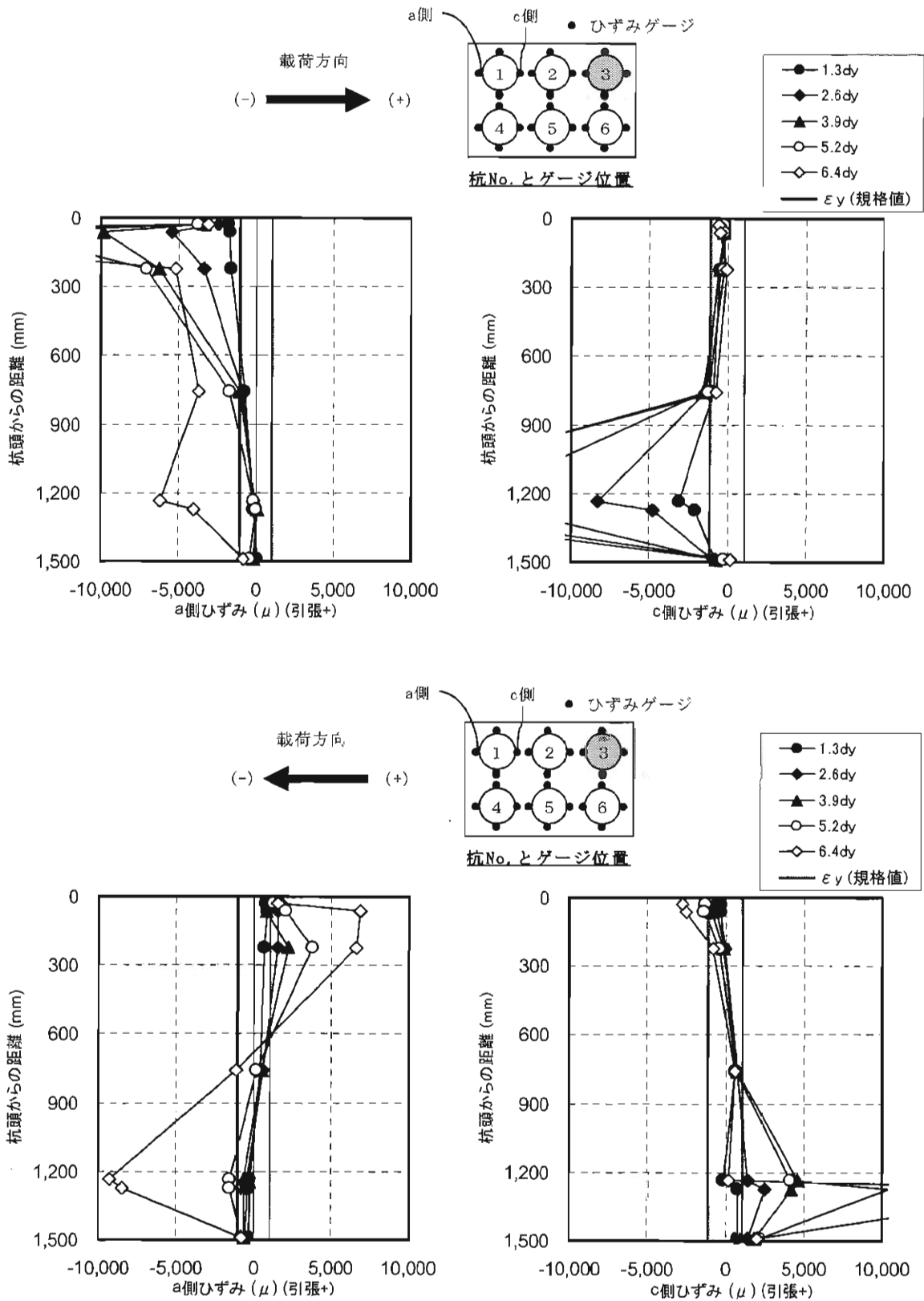


図- 3.1.7 鋼管杭ひずみ分布(3列供試体 No.3 杭)

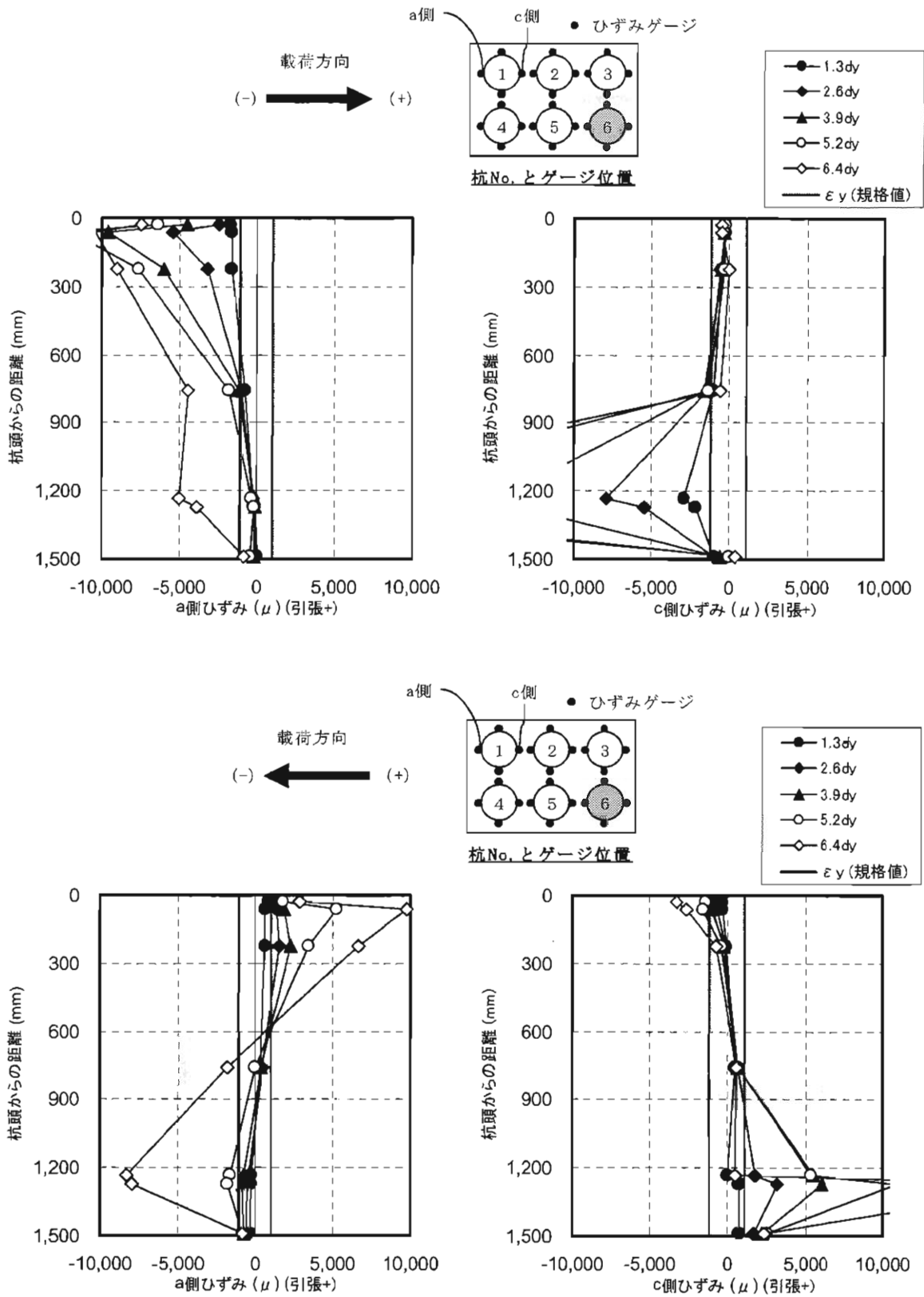


図- 3.1.8 鋼管杭ひずみ分布 (3列供試体 No.6 杭)

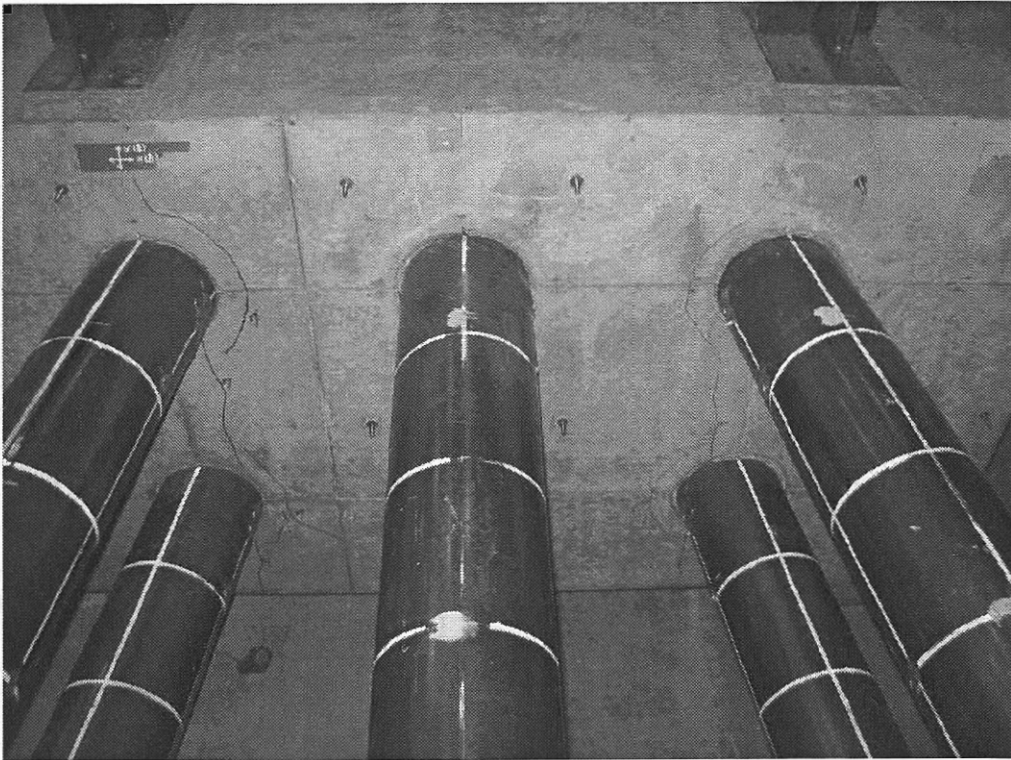


写真- 3.1.1 3列供試体 杭頭部全景(試験終了時)



写真- 3.1.2 3列供試体 上フーチング底面ひびわれ状況(試験終了時)

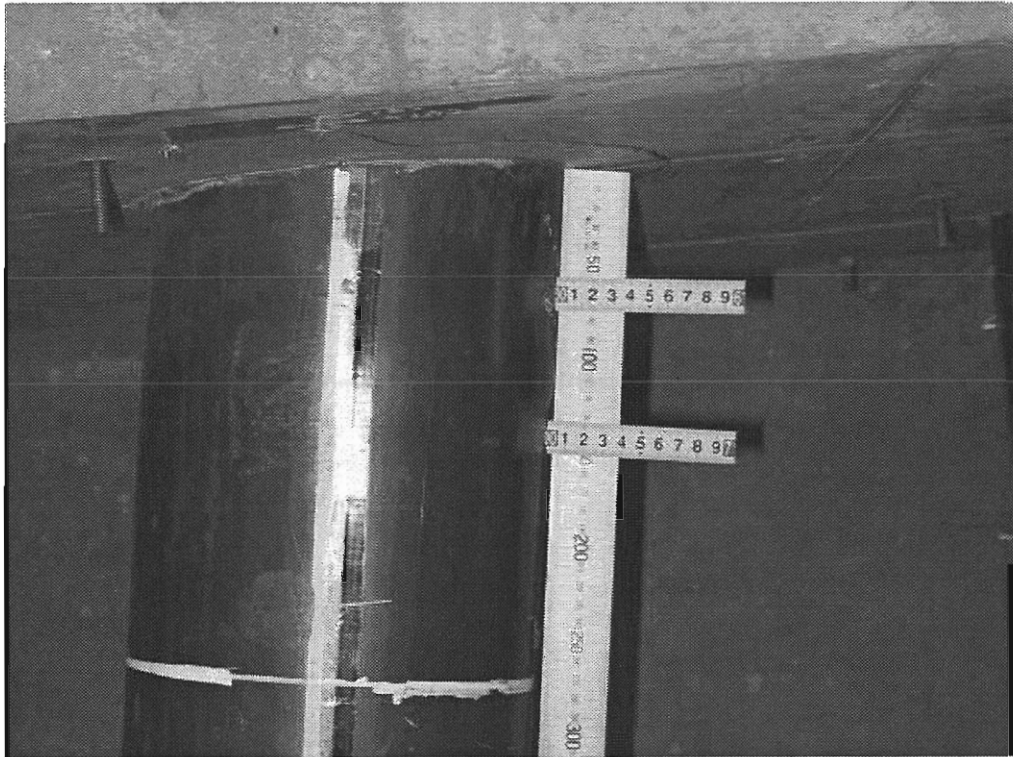


写真- 3.1.3 3列供試体 杭頭部損傷状況(斜杭/端部杭、試験終了時)



写真- 3.1.4 3列供試体 杭頭部損傷状況(直杭/中間杭、試験終了時)

3.2 4 列供試体

4 列供試体の水平荷重と上フーチング底面における水平変位の履歴曲線を図- 3.2.1 に示す。図- 3.2.2 は、3 列供試体の場合と同様に、水平荷重 P を降伏水平荷重 P_y で、水平変位 d を降伏水平変位 d_y で正規化したものである。本試験の基準変位は $d_s = 5.3 \text{ mm}$ 、全杭降伏変位は $d_y = 4.3 \text{ mm}$ である。各载荷ステップにおける変状過程を表-3.2.1 に、鋼管杭のひずみ分布を図- 3.2.3～図- 3.2.6 に、载荷試験終了時の損傷状況を写真- 3.2.1～写真- 3.2.4 に示す。

4 列供試体においても 3 列供試体と同様に、水平荷重と水平変位の履歴曲線は、正载荷側および負载荷側ともほぼ同様の値もしくは形状であり、正負交番载荷が良好に行われたことが確認できる。また、水平荷重-水平変位関係の履歴ループは、エネルギー吸収能力の大きいことを表す紡錘型であり、試験終了まで変化はない。さらに、各 d_s の 3 回繰返しによる水平荷重-水平変位の関係は、最大荷重となる $3.6d_y (3d_s) \sim 4.8d_y (4d_s)$ まではほぼ同じ形状であり、繰返し载荷による耐力低下は少ない。

$1.2d_y (1d_s)$ 時および $2.4d_y (2d_s)$ 時には、外観上の変化は見られず、全杭の上下端部に膨らみは観測されなかった。 $3.6d_y (3d_s)$ 時には、端部杭（斜杭）の上下端部に目視（光の陰影）では確認できないものの、触れると分かる程度の微小な膨らみが観測された。 $4.8d_y (4d_s)$ に達すると端部杭（斜杭）の下端部の膨らみが顕著となるとともに、上下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。さらに $6.1d_y (5d_s)$ 時には、中間杭（直杭）も上下端部に膨らみが観測され、 $7.3d_y (6d_s)$ 時の 2 サイクル目において耐力低下が顕著となったが、降伏荷重までは低下していない。

$1.2d_y (1d_s)$ 時の正载荷時のひずみ（引張+）に着目すると、押込み側の端部杭（No.4）で杭頭部： $-1,850 \mu$ 、杭下端部： $-3,000 \mu$ 、押込み側の中間杭（No.3）で杭頭部： $-1,250 \mu$ 、杭下端部： $-1,100 \mu$ 、引抜き側の中間杭（No.2）で杭頭部： $-1,150 \mu$ 、杭下端部： $-1,050 \mu$ 、引抜き側の端部杭（No.1）で杭頭部： $1,000 \mu$ 、杭下端部： $1,150 \mu$ であり、この時点で全杭が降伏に至っていることが分かる。ひずみの大きさから、押込み側の端部部、押込み側の中間杭の順に圧縮降伏が進行し、次に引抜き側の端部杭の引張降伏および引抜き側の中間杭の圧縮降伏が生じている様子が伺える。4 列供試体においても、杭頭部よりも杭下端部の降伏が先行しており、3 列供試体と同様に杭下端部の固定方法は今後の課題である。

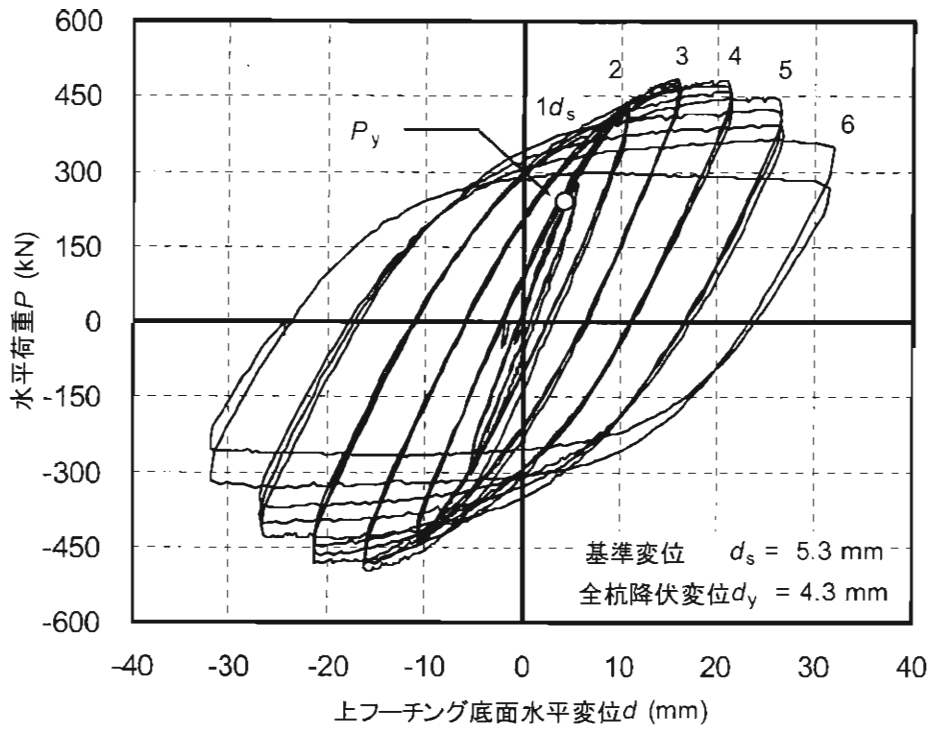


図- 3.2.1 水平荷重-水平変位履歴曲線(4列供試体)

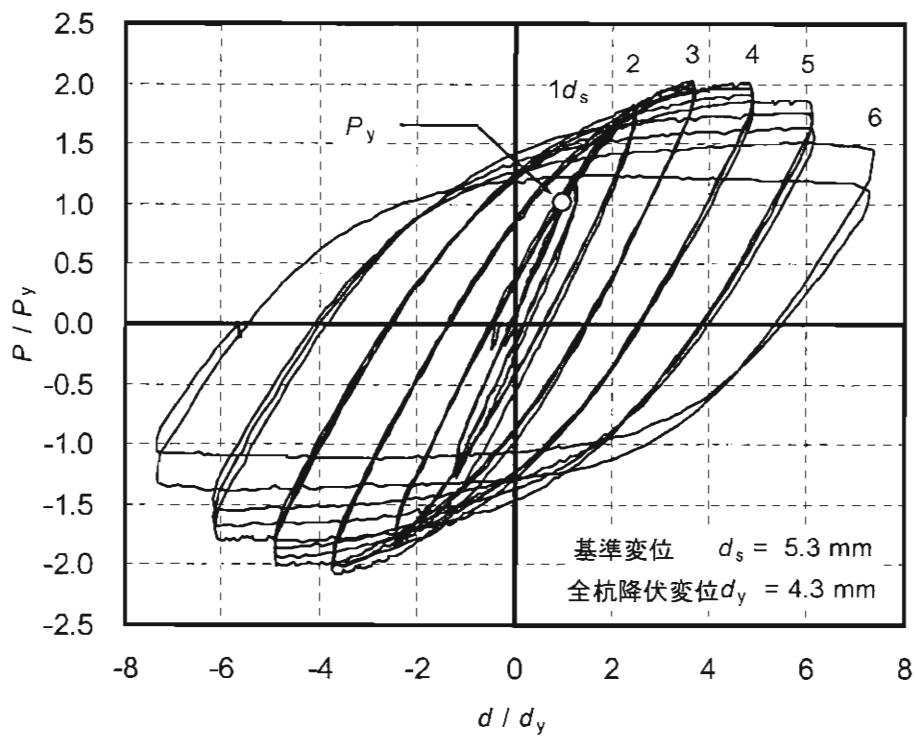


図- 3.2.2 水平荷重-水平変位履歴曲線(4列供試体、正規化)

表- 3.2.1 4列供試体の変状過程

載荷ステップ		荷重 (kN)	水平変位 ^{注)} (mm)	変状状況
1.2 d_y (1 d_s)	正載荷①	280.2	5.3	・外観上の損傷は確認されず ・全杭で降伏ひずみに至る
	負載荷①	-297.4	-5.3	
	正載荷②	284.0	5.3	
	負載荷②	-297.8	-5.3	
	正載荷③	272.6	5.5	
	負載荷③	-296.5	-5.4	
2.4 d_y (2 d_s)	正載荷①	421.2	10.5	・外観上の損傷は確認されず
	負載荷①	-443.1	-10.6	
	正載荷②	437.9	10.7	
	負載荷②	-436.6	-10.6	
	正載荷③	433.6	10.7	
	負載荷③	-436.6	-10.6	
3.6 d_y (3 d_s)	正載荷①	479.1	15.8	・端部杭（斜杭）の上下端部に目視で確認できない微小な（光の陰影では確認できないが、触れると分かる程度の）膨らみ発生
	負載荷①	-496.1	-15.9	
	正載荷②	485.5	16.0	
	負載荷②	-483.9	-16.0	
	正載荷③	470.9	15.9	
	負載荷③	-478.5	-16.0	
4.8 d_y (4 d_s)	正載荷①	475.6	21.3	・端部杭（斜杭）の上下端部の膨らみが進行（下端部の膨らみは蓄積） ・上下フーチング杭周辺部にクラック発生
	負載荷①	-481.0	-21.3	
	正載荷②	472.2	21.2	
	負載荷②	-463.5	-21.2	
	正載荷③	458.5	21.4	
	負載荷③	-445.5	-21.3	
6.1 d_y (5 d_s)	正載荷①	420.6	26.7	・中間杭（直杭）の上下端部に膨らみ発生 ・耐力低下
	負載荷①	-429.1	-26.5	
	正載荷②	421.1	26.5	
	負載荷②	-403.5	-26.7	
	正載荷③	370.6	26.8	
	負載荷③	-370.1	-26.6	
7.3 d_y (6 d_s)	正載荷①	340.3	32.0	・2サイクル目で耐力低下が顕著
	負載荷①	-306.4	-31.9	
	正載荷②	265.4	31.6	
	負載荷②	-254.0	-31.9	
	正載荷③	-	-	
	負載荷③	-	-	

注) 上フーチング底面（杭頭部）の水平変位

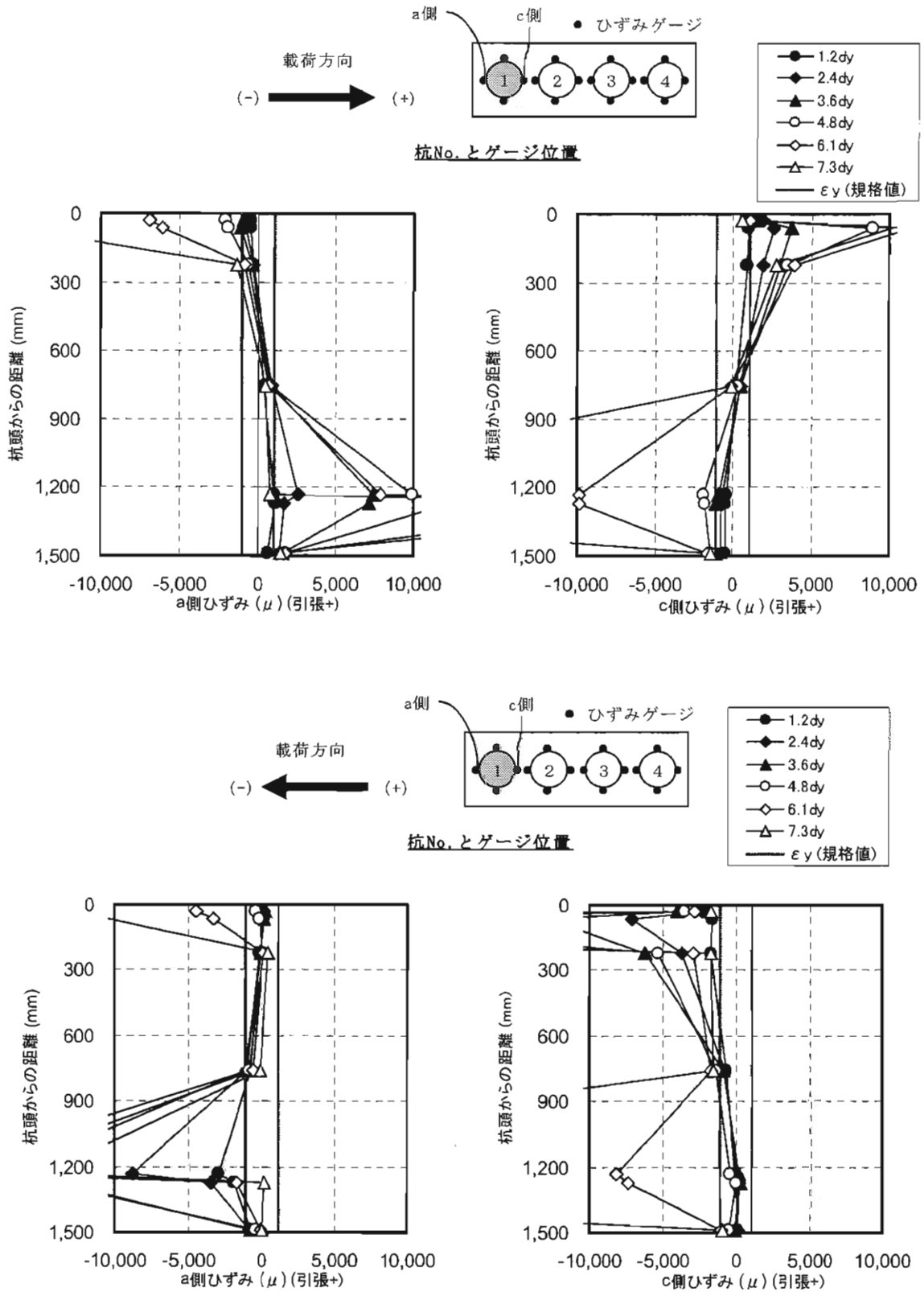


図- 3.2.3 鋼管杭ひずみ分布(4列供試体 No.1杭)

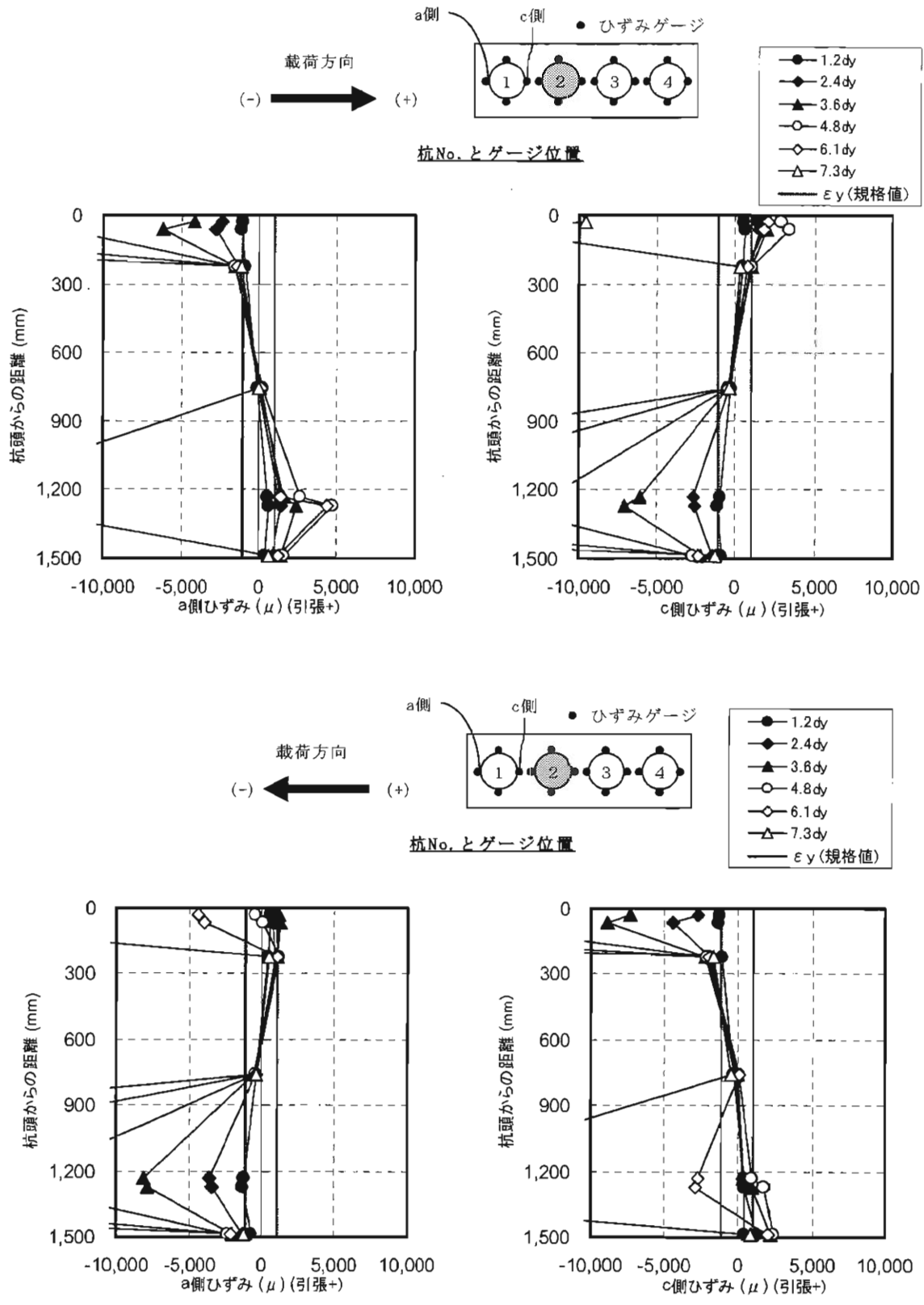


図-3.2.4 鋼管杭ひずみ分布(4列供試体 No.2 杭)

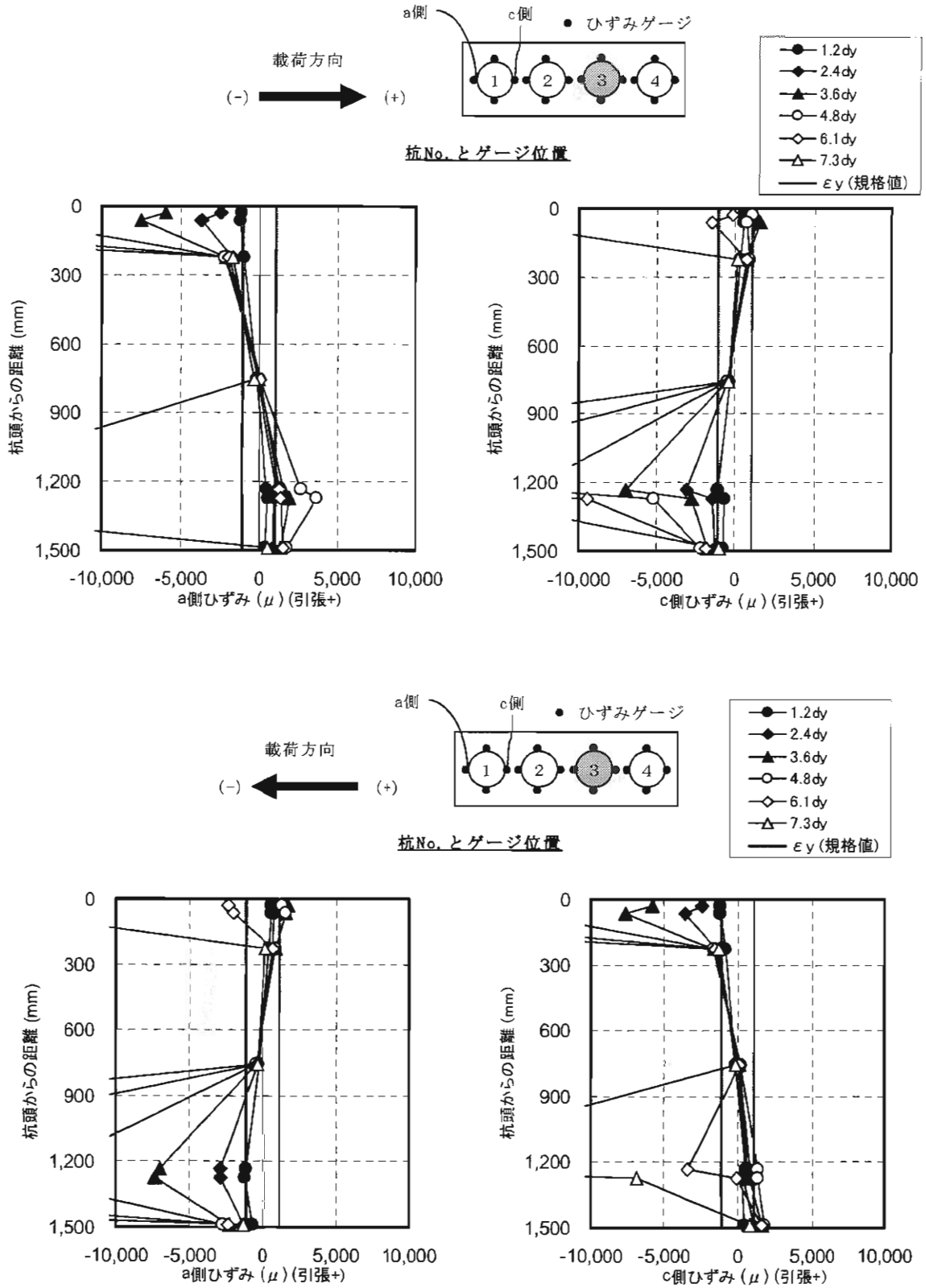


図- 3.2.5 鋼管杭ひずみ分布(4列供試体 No.3 杭)

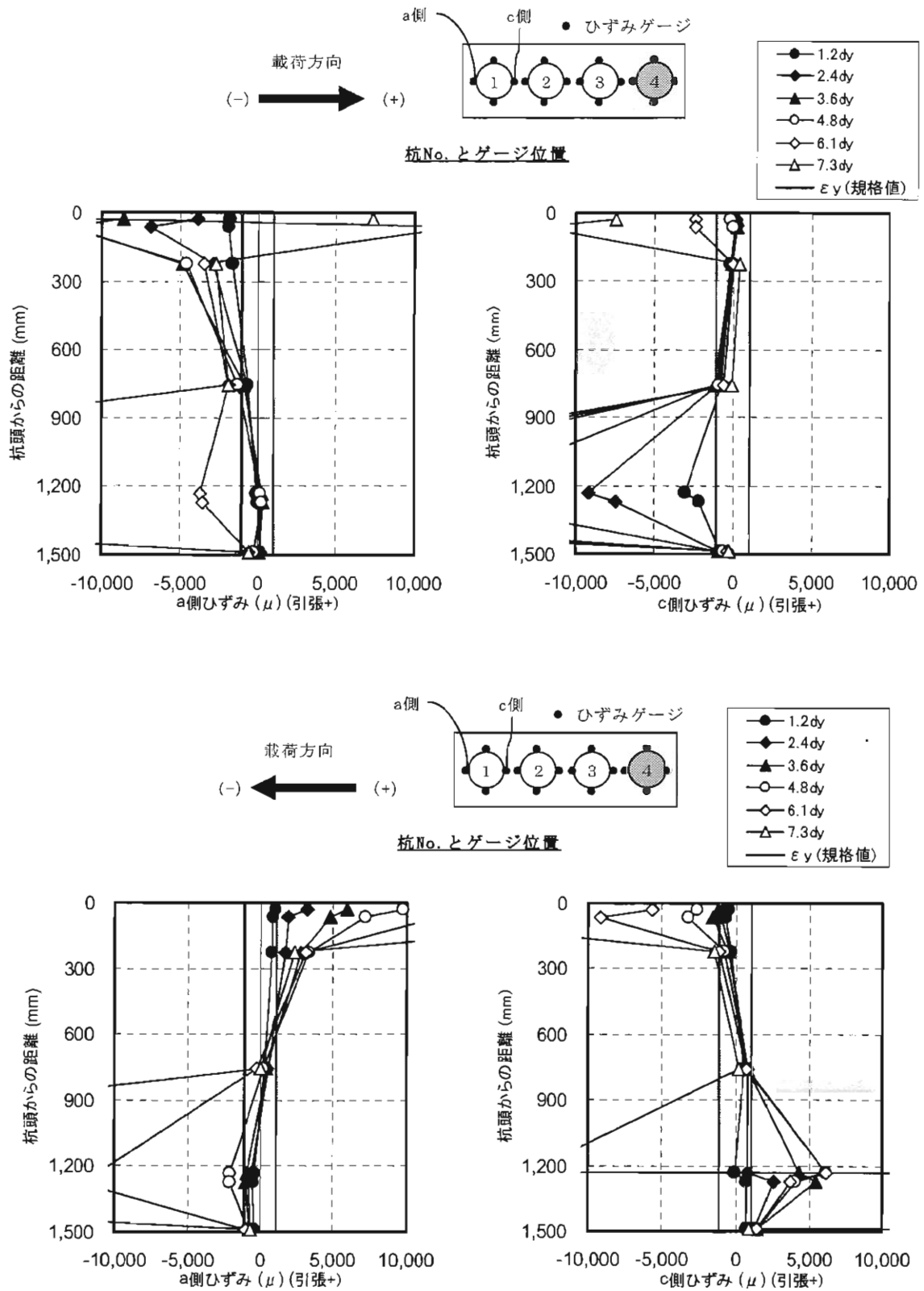


図- 3.2.6 鋼管杭ひずみ分布(4列供試体 No.4 杭)

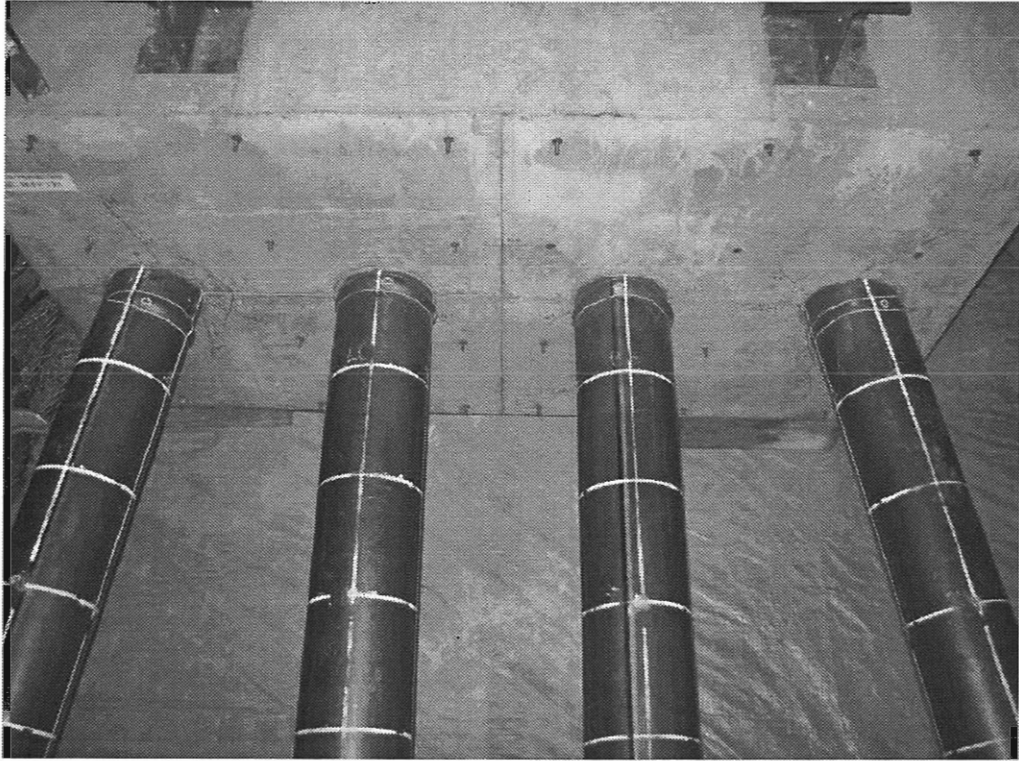


写真-3.2.1 4列供試体 杭頭部全景(試験終了時)

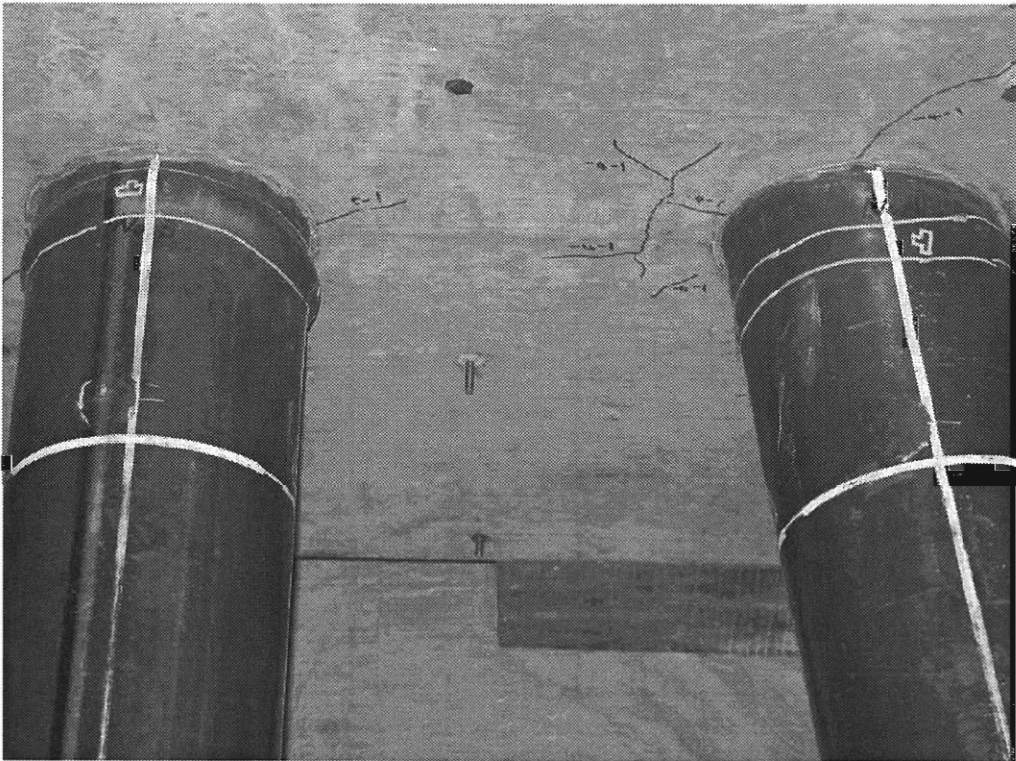


写真-3.2.2 4列供試体 上フーチング底面ひびわれ状況(試験終了時)

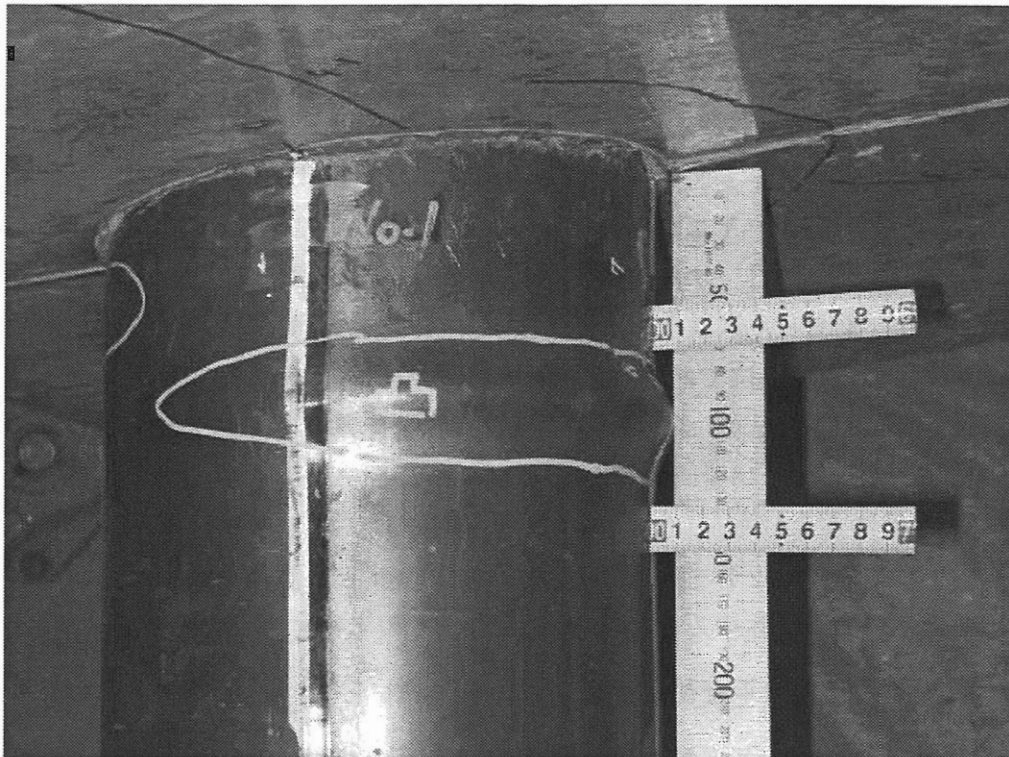


写真- 3.2.3 4列供試体 杭頭部損傷状況(斜杭/端部杭、試験終了時)



写真- 3.2.4 4列供試体 杭頭部損傷状況(直杭/中間杭、試験終了時)

4. 考察

4.1 杭列数および斜杭の有無による相違

既往の類似の試験結果を参照し、杭列数や斜杭の有無による相違について考察する。群杭の変形性能の把握を目的とした類似の試験は、兵庫県南部地震がもたらした甚大な被害経験の直後に行われている。すなわち、平成8年度の道路橋示方書の改訂に先立って行われた鋼管組杭を対象とした試験^{7),8)}および場所打ち組杭およびPHC組杭を対象とした試験⁶⁾である。これらは全て直杭である。鋼管直杭組杭の供試体は、3列供試体（荷重方向に3列、荷重直交方向に2列配置）および4列供試体（荷重方向に4列、荷重直交方向に2列）の2体であり、杭径および板厚は本試験と同一である。場所打ち直杭組杭の供試体は、2列供試体（荷重方向および荷重直交方向に2列配置）および3列供試体（荷重方向に3列、荷重直交方向に2列）の2体であり、杭径は300 mmと本試験の約1.5倍である。なお、PHC組杭の供試体は、1体のみであるので、ここでの考察には参照しない。

4.1.1 水平荷重および水平変位

図-4.1.1は、鋼管斜杭組杭および鋼管直杭組杭の3列供試体の水平荷重-水平変位関係の包絡線を示したものである。図-4.1.2は、4列供試体のものである。なお、鋼管斜杭組杭の4列供試体は、荷重直交方向の杭列数が1列であるため、水平荷重は試験結果を2倍した値で示している。

荷重方向の杭列数が等しい供試体の斜杭の有無および全杭に占める斜杭の比率に着目すると、斜杭の比率が大きいほど初期剛性および最大荷重ともに大きく、最大荷重の比は、3列供試体で1.3倍強、4列供試体では1.2倍弱である。また、最大荷重が発揮されるときの水平変位は斜杭の比率が大きいほど小さく、3列供試体で0.6倍、4列供試体では0.75倍である。なお、鋼管直杭組杭では、最大荷重に到達した後に変位が増加してもしばらくはこれを保持するのに対し、鋼管斜杭組杭では、最大荷重に到達した後の荷重の低下が比較的早いことも確認できる。

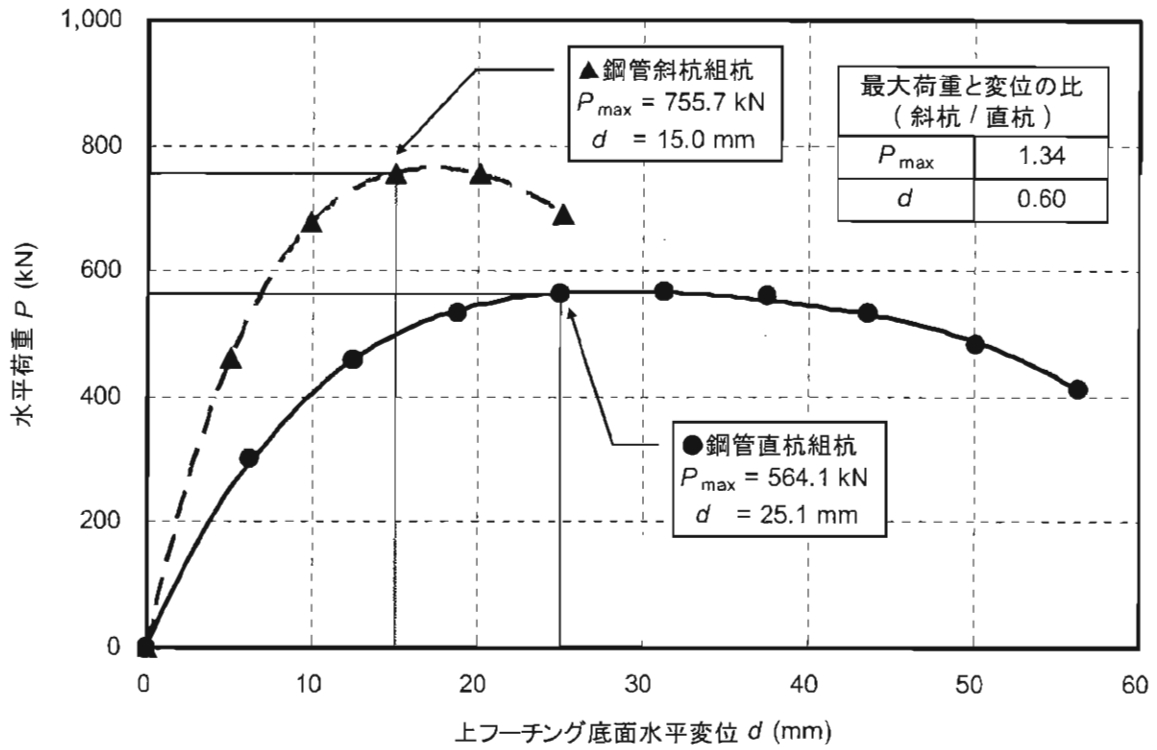


図- 4.1.1 鋼管斜杭組杭と鋼管直杭組杭の水平荷重-水平変位関係(3 列供試体)

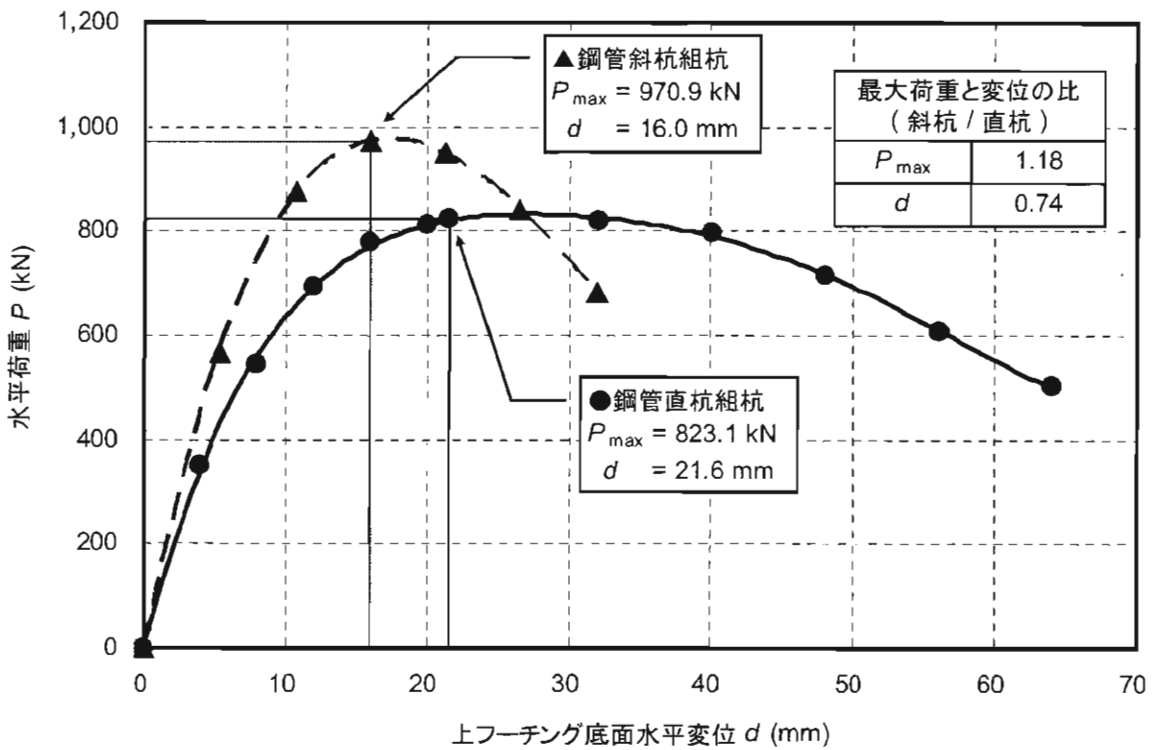


図- 4.1.2 鋼管斜杭組杭と鋼管直杭組杭の水平荷重-水平変位関係(4 列供試体)

図-4.1.3は、各々の組杭供試体の全杭降伏時および最大荷重時の水平荷重および水平変位を示したものである。全般に載荷方向の杭列数が多いと水平耐荷力が向上し、水平変位は抑制される。また、載荷方向の杭列数に着目した降伏荷重および最大荷重の比は、直杭組杭では載荷方向の杭列数の比に比較的近いのに対し、斜杭組杭では、直杭組杭のそれよりも小さい。さらに、3列供試体に比べ斜杭比率の小さい4列供試体の方が、全杭降伏時および最大荷重時の水平変位が僅かに大きくなっている。

これらのことより、載荷方向の杭列数が増加すると、水平耐荷力の向上効果および水平変位の低減効果が得られること、斜杭組杭では、載荷方向の杭列数が増加することと同様の効果が得られ、その効果は、全杭に占める斜杭の比率が大きいほど大きくなる傾向があることが確認できる。

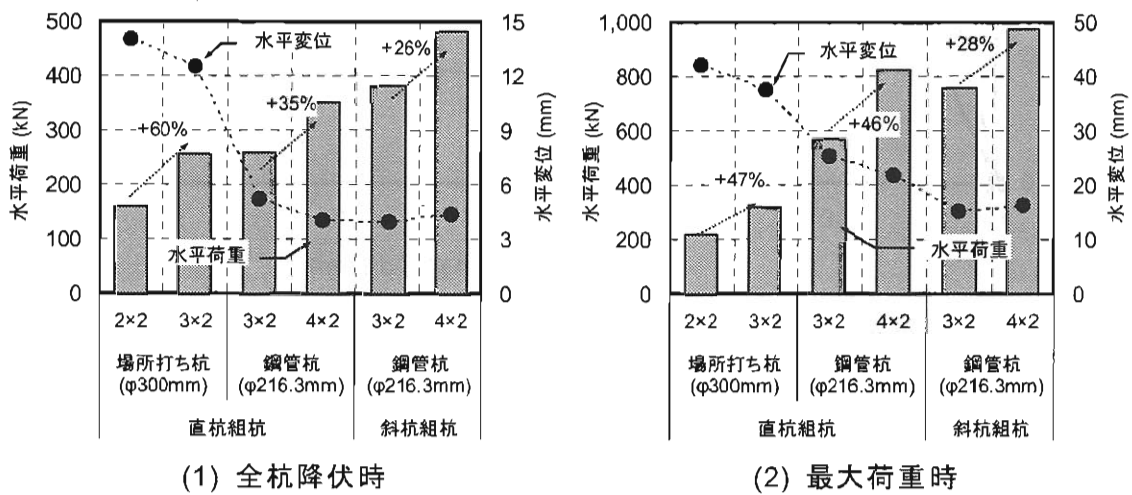


図- 4.1.3 杭列数および斜杭の有無による水平荷重・水平変位の比較

次に、変形性能に着目する。図-4.1.4 および図-4.1.5 は、場所打ち杭を用いた直杭組杭の水平荷重-水平変位の履歴曲線⁶⁾、図-4.1.6 および図-4.1.7 は、鋼管杭を用いた直杭組杭の水平荷重-水平変位の履歴曲線^{7),8)}である。場所打ち直杭組杭では、2列供試体では $4d_y$ 程度まで、3列供試体では $5d_y$ 程度まで最大荷重が保持される。水平荷重が再び全杭降伏荷重程度まで低下するのは両者とも $7d_y$ の1~2サイクル目であるが、 $7d_y$ の2,3サイクルにおける水平荷重の低下は2列供試体の方がやや大きい。なお、場所打ち直杭組杭の $7d_y$ での顕著な荷重低下は、鉄筋の座屈や破断に伴って生じているが、このあたりから履歴ループが紡錘型から逆S字型もしくはスリップ型へ変化している。また、 $2d_y$ の1サイクル目で生じたコンクリートの小さな圧壊のため、2サイクル目以降では剛性が低下するとともに、1サイクル目に比べて2,3サイクル目の荷重がやや小さい傾向にある。

鋼管直杭組杭では、3列供試体では $7.3d_y$ 程度まで、4列供試体では $10d_y$ 程度まで最大荷重が保持される。両供試体とも、全杭降伏荷重程度に低下するまでの載荷は行われなかったため、全杭降伏荷重となるときにの水平変位は、3列供試体： $11d_y$ 以上、4列供試体：

18 d_y 以上となる。なお、鋼管直杭組杭では、最大荷重点までは剛性低下および繰返しによる荷重低下は認められない。荷重低下は最大荷重点以降に生ずる座屈を伴うものであり、このあたりから履歴ループが紡錘型から逆S字型もしくはスリップ型へ変化している。

一方、鋼管斜杭組杭では、先に示したように、最大荷重が保持されるのは、3列供試体では5.2 d_y 程度まで、4列供試体では4.8 d_y 程度までである。また、顕著な荷重低下が認められたのは、3列供試体：6.4 d_y の2サイクル目以降、4列供試体：7.3 d_y の2サイクル目以降である。これらの値は直杭組杭に比べて小さい。ただし、履歴ループは試験終了まで紡錘型のままであり、変化はなかった。

以上の観察結果は、表-4.1.1のようにまとめられる。

表-4.1.1 水平荷重-水平変位履歴曲線の観察結果

組杭の種類	杭列数	最大荷重を保持	全杭降伏荷重に低下	履歴ループ
場所打ち直杭組杭	2列×2列	2~4 d_y	7 d_y の1~2サイクル目	初期：紡錘型 最大荷重以降： 逆S字型~スリップ型
	3列×2列	2~5 d_y	7 d_y の1~2サイクル目	
鋼管直杭組杭	3列×2列	4.9~7.3 d_y	11 d_y の1サイクル目以降	
	4列×2列	5~10 d_y	18 d_y の1サイクル目以降	
鋼管斜杭組杭	3列×2列	3.9~5.2 d_y	6.4 d_y の2サイクル目以降	紡錘型（終始）
	4列×1列	3.6~4.8 d_y	7.3 d_y の2サイクル目以降	

このように、載荷方向の杭列数が増加すると、水平耐荷力の向上効果および水平変位の低減効果に加え、全杭降伏後の変形性能の向上効果も得られるようである。しかし、斜杭組杭は、載荷方向の杭列数が増加すると同様に水平耐荷力の向上効果および水平変位の低減効果が得られるものの、全杭降伏後の変形性能は直杭組杭に比べて小さいことが特徴であると言える。なお、実際の道路橋基礎では、一般に杭列数は2列以上であるので、これらの試験で確認された変形性能は、安全側の指標を与えると考えられる。

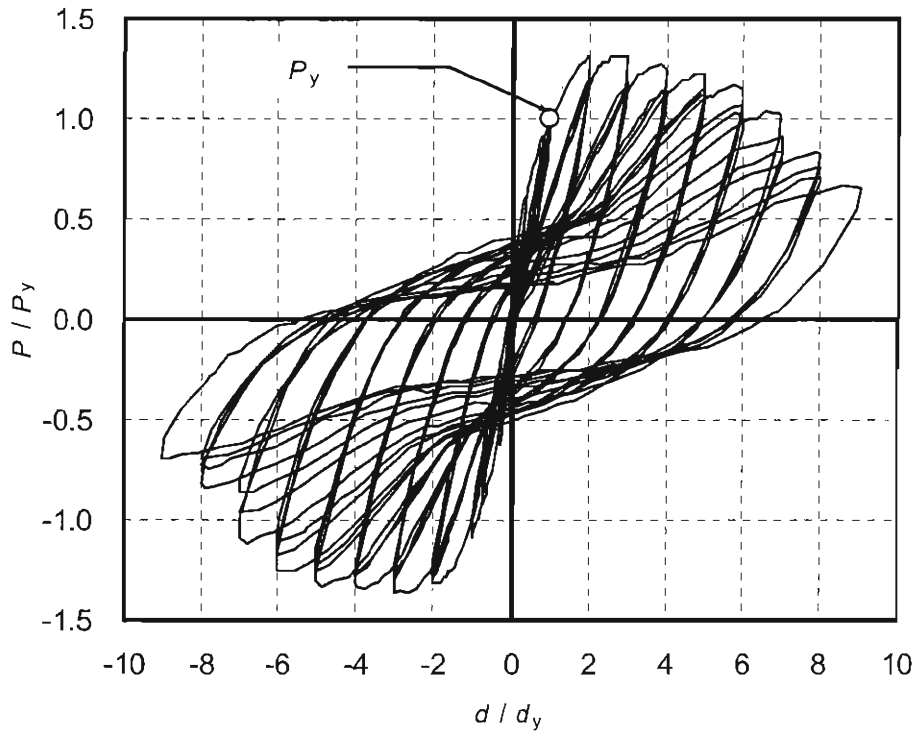


図- 4.1.4 水平荷重-水平変位履歴曲線(場所打ち直杭 2列×2列 正規化)

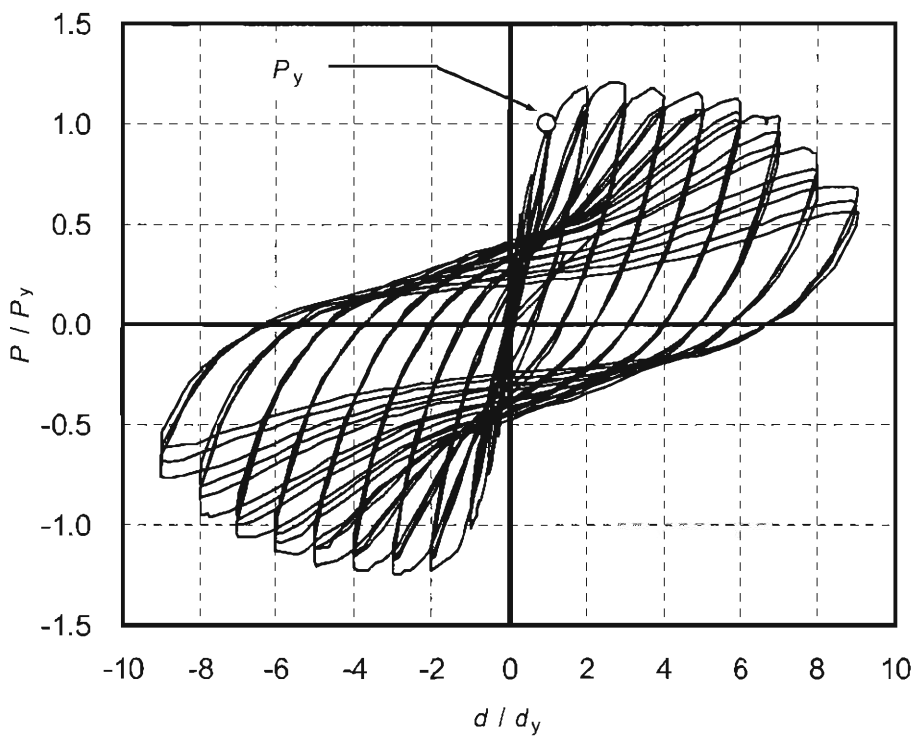


図- 4.1.5 水平荷重-水平変位履歴曲線(場所打ち直杭 3列×2列 正規化)

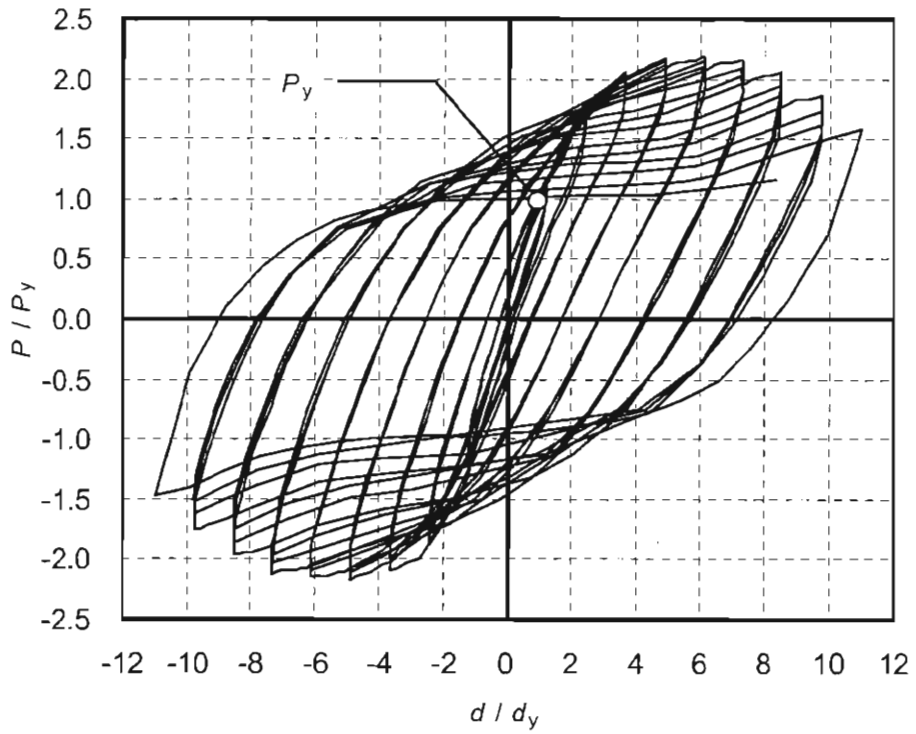


圖- 4.1.6 水平荷重-水平變位履歷曲線(鋼管直杭 3 列×2 列 正規化)

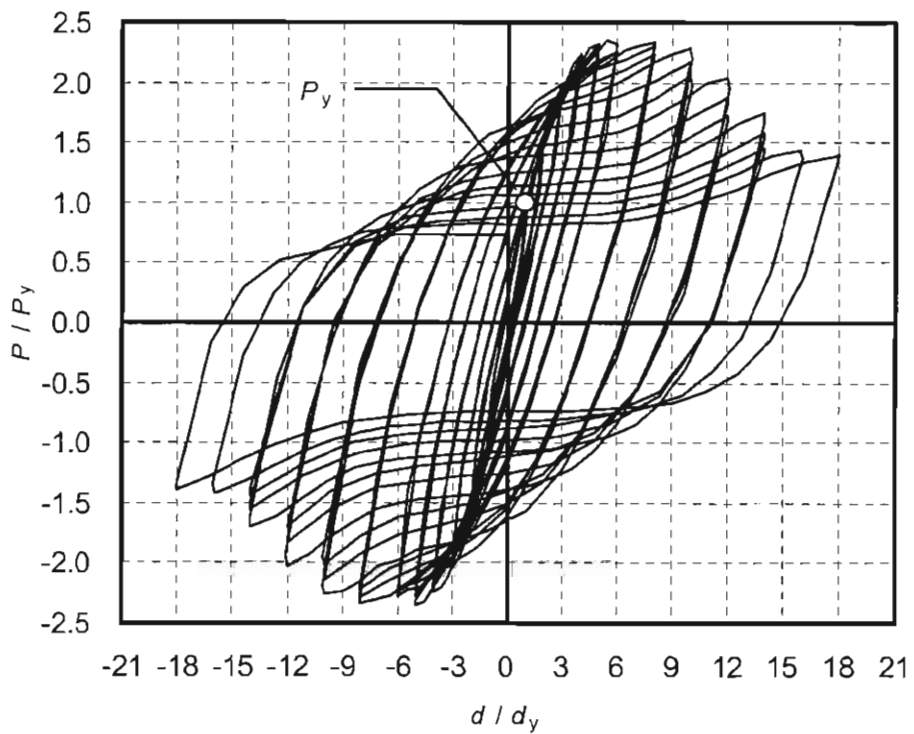


圖- 4.1.7 水平荷重-水平變位履歷曲線(鋼管直杭 4 列×2 列 正規化)

4.1.2 杭の軸力

鋼管斜杭組杭および鋼管直杭組杭の杭体軸力と水平変位との関係を図- 4.1.8～図- 4.1.11 に示す。杭体軸力は、杭体の中央高さで計測した4方向のひずみを用いて算出した。なお、鋼管斜杭組杭ではひずみが大きく、規格降伏ひずみを超えるものがあるため、この場合、弾性係数は材料試験結果から得られた値を用いている。また、図中には、規格応力度 ($\sigma = 235 \text{ N/mm}^2$) を用いて求めた軸力 N_y および 0.2% 耐力 ($\sigma = 350 \text{ N/mm}^2$) を用いて求めた軸力 N_y' の値を併せて示している。

斜杭の有無や杭列数によらず、水平変位（荷重）の増加に伴い、押込み側端部に配置された杭の圧縮力および引抜き側端部に配置された杭の引張力が顕著に増加している。これより、水平荷重に対しては、杭の曲げ剛性に加え、主に端部に配置された杭の軸剛性によっても抵抗していると解釈できる。

図- 4.1.12 は、端部杭の軸力の大きさとフーチングの水平変位の関係を示したものである。縦軸の値は、端部杭の杭体軸力の絶対値の平均値を求め、これを死荷重軸力に対する比率で示している。いずれの供試体においても、水平荷重が最大となる時（鋼管斜杭組杭： $3.5 \sim 5d_y$ 程度、鋼管直杭組杭： $5 \sim 8d_y$ もしくは $5 \sim 10d_y$ ）に軸力が最大となっている。これより、杭体軸力が最大となるときに最大水平荷重が発揮されることが分かる。

また、軸力の値は、鋼管直杭組杭よりも鋼管斜杭組杭の方が大きく、同一杭列数では鋼管斜杭組杭は鋼管直杭組杭の 1.5 倍程度である。斜杭組杭が水平耐荷力を向上させ、水平変位を抑制する効果を有するのは、端部に斜杭を配置した場合には、その特性上、端部に配置された杭の軸力が直杭に比べてより大きく変化し、作用する水平力や転倒モーメントに有効に抵抗するためであると考えられる。なお、載荷方向の杭列数に着目すると、軸力は、4 列供試体よりも 3 列供試体の方が大きい。これは、載荷方向の杭列数が少なければ、フーチング中心から端部杭までの距離が小さく、押込み側（引抜き側）の杭列数も少なくなるためであり、予想された結果である。

ところで、道示IVでは、レベル2地震時の照査に用いる杭体の曲げモーメント-曲率関係（ $M-\phi$ 関係）の算定に当たっては、設計計算の便宜等を考慮して杭体軸力を一定（コンクリート杭：引抜き側は軸力 0、押込み側は死荷重、鋼管杭：全杭とも死荷重）としている¹³⁾。しかし、ここで示したとおり、斜杭組杭では直杭組杭に比べて、水平荷重の変化に伴う杭体軸力の変化が大きいことから、斜杭を含む群杭基礎の主たる塑性化を考慮した設計を行う場合には、 $M-\phi$ 関係の算定に用いる杭体軸力の仮定も見直す必要があると考えられる。なお、直杭組杭においても、基礎の主たる塑性化を考慮した設計を行う場合には、 $M-\phi$ 関係を算定する際の杭体軸力を水平荷重に応じて変化させることが望ましいと考えられる。

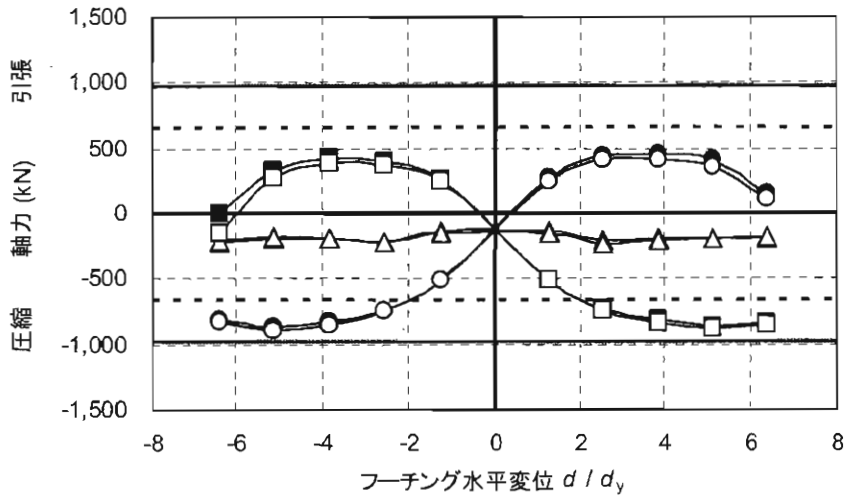
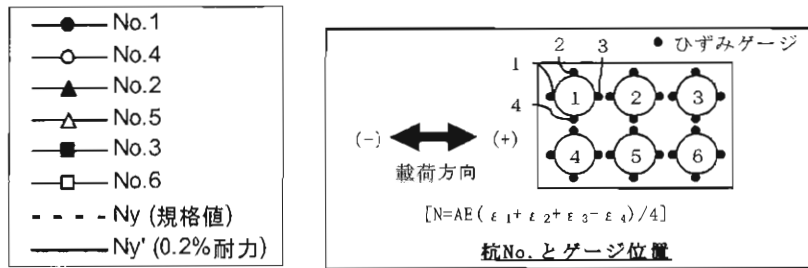


図-4.1.8 杭体軸力-水平変位関係(3列供試体 / 鋼管斜杭組杭)

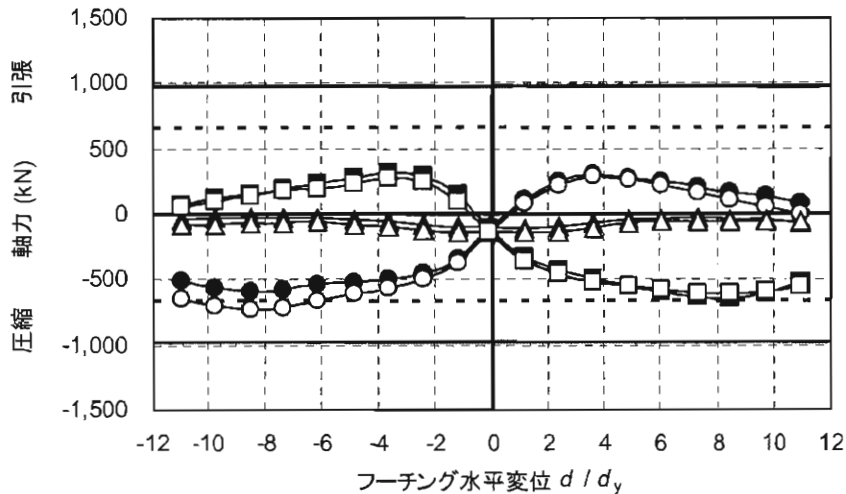
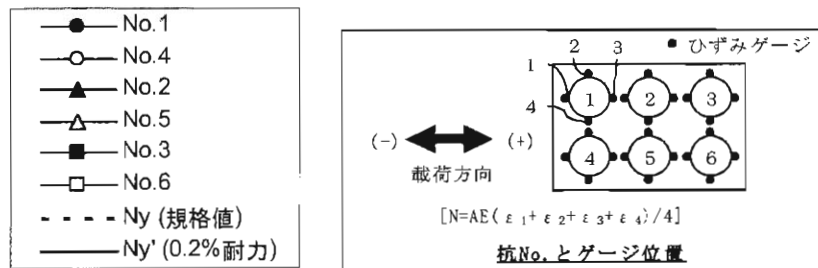


図-4.1.9 杭体軸力-水平変位関係(3列供試体 / 鋼管直杭組杭)

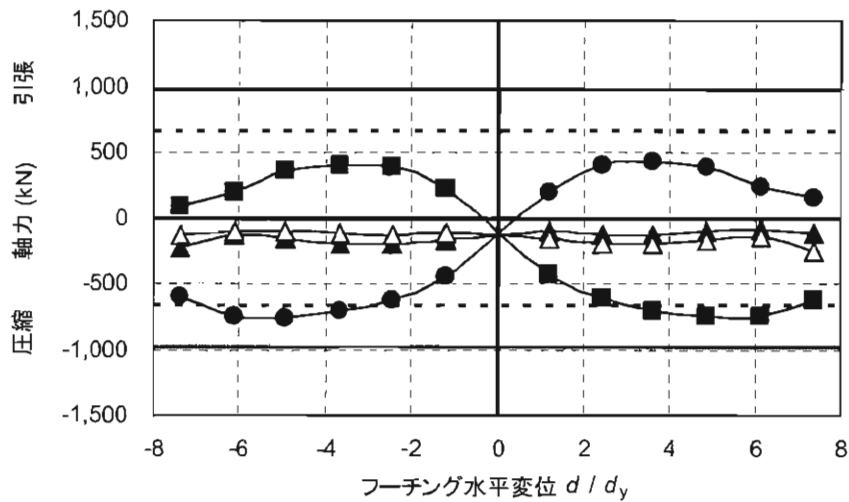
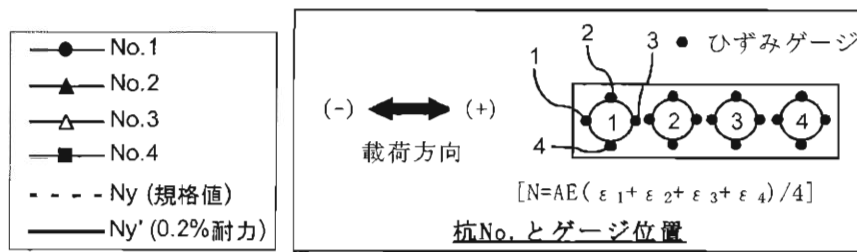


図- 4.1.10 杭体軸力-水平変位関係(4列供試体 / 鋼管斜杭組杭)

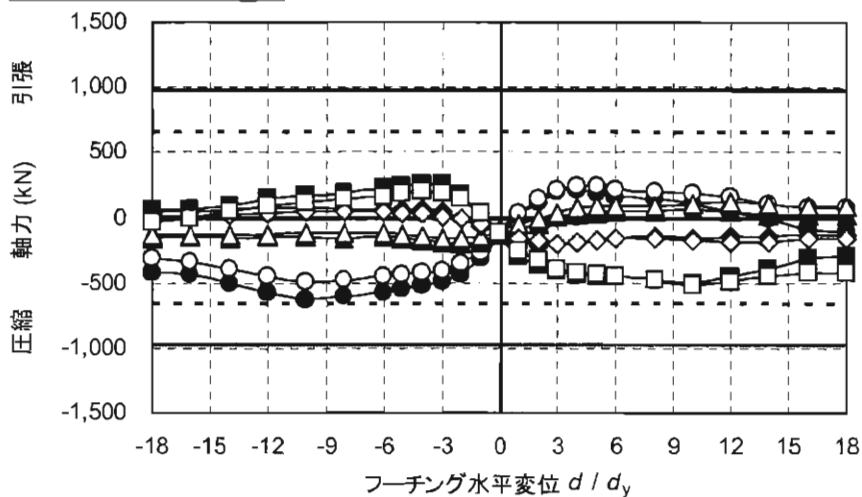
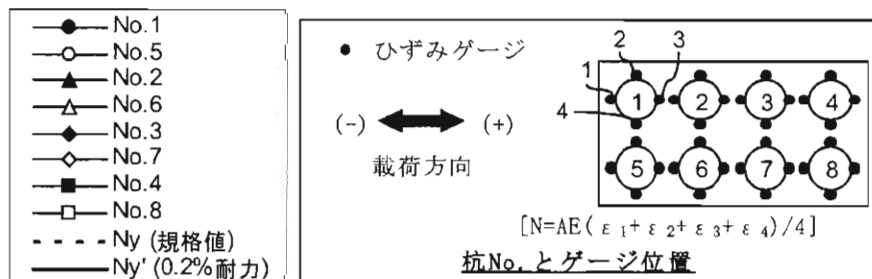


図- 4.1.11 杭体軸力-水平変位関係(4列供試体 / 鋼管直杭組杭)

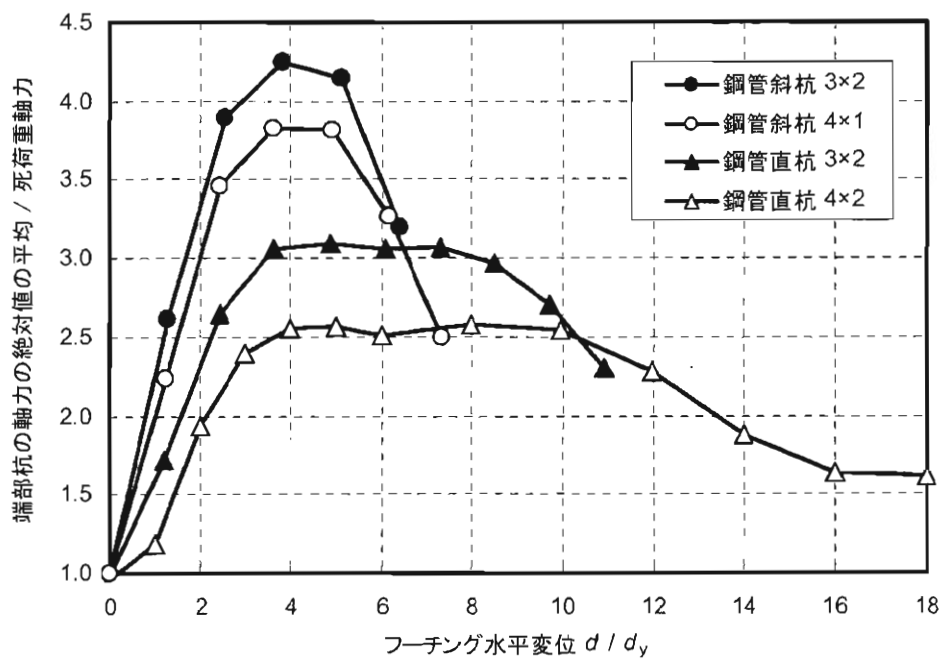


図- 4.1.12 端部杭の軸力-水平変位関係

4.1.3 フーチングの回転角

図-4.1.13は、鋼管斜杭組杭のフーチングの回転角と正規化した水平変位の履歴曲線を示したものである。図-4.1.14および図-4.1.15は、鋼管直杭組杭および場所打ち直杭組杭のものである。鋼管斜杭組杭では、水平変位と同様にフーチングの回転変位を抑制する効果があることが分かる。また、斜杭の有無および杭材料を問わず、载荷方向の杭列数が多いほど、回転角が小さい。

全般に回転角と水平変位の関係はほぼ直線状であるが、鋼管斜杭組杭では、□印で示すように、 $6d_y$ あたりから回転角が急増している。

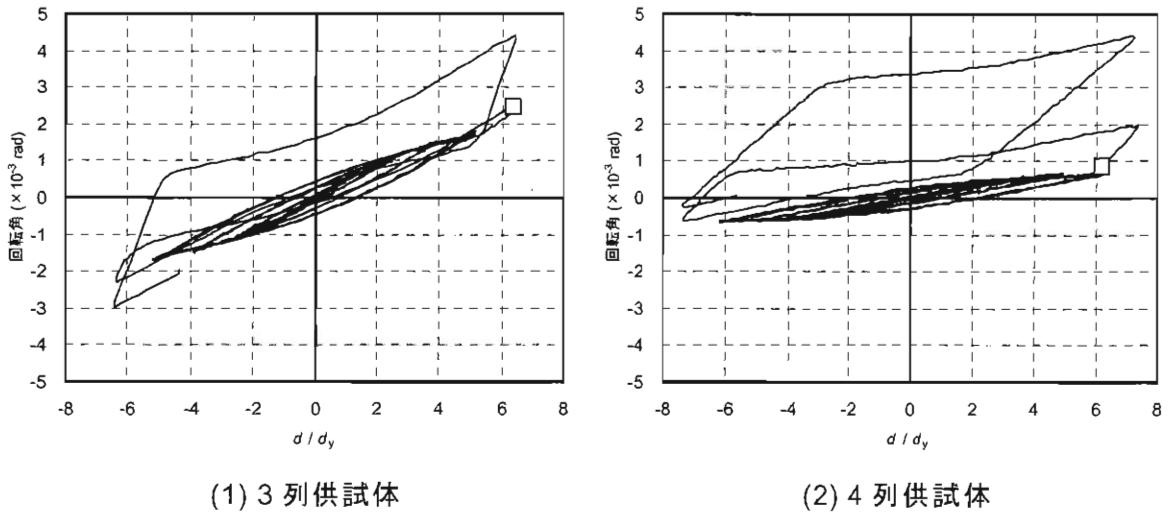


図-4.1.13 フーチング回転角-水平変位履歴曲線(鋼管斜杭組杭)

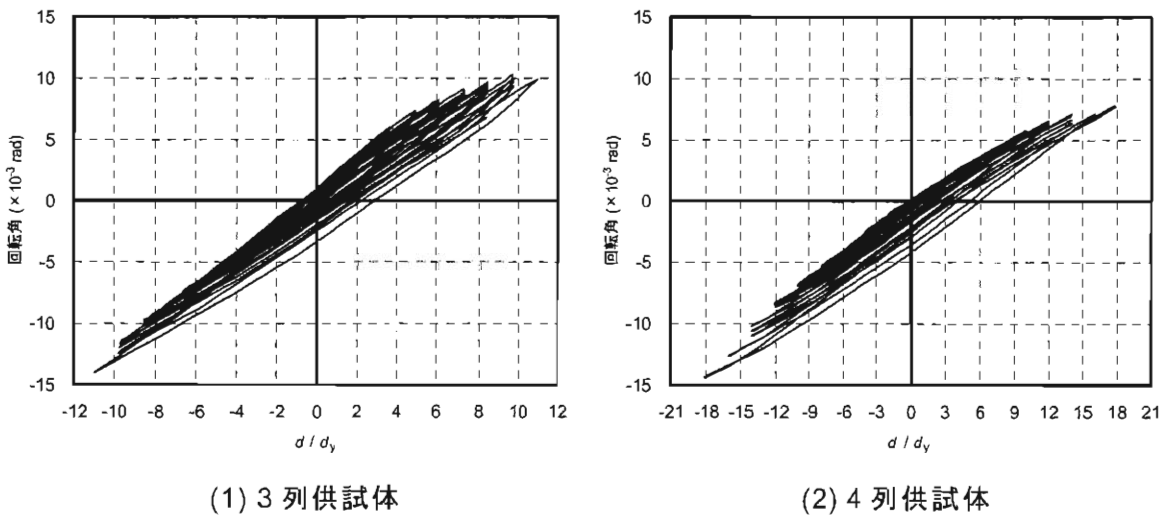
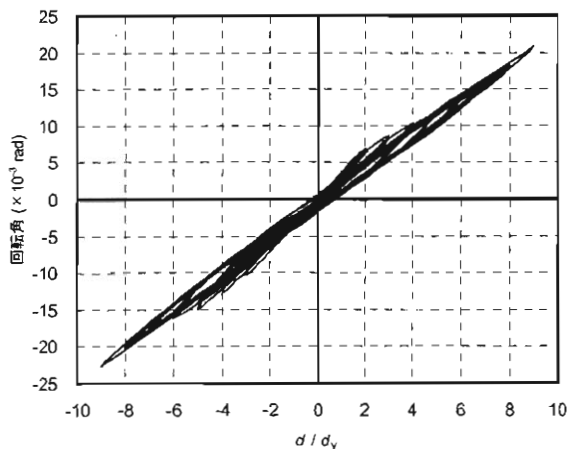
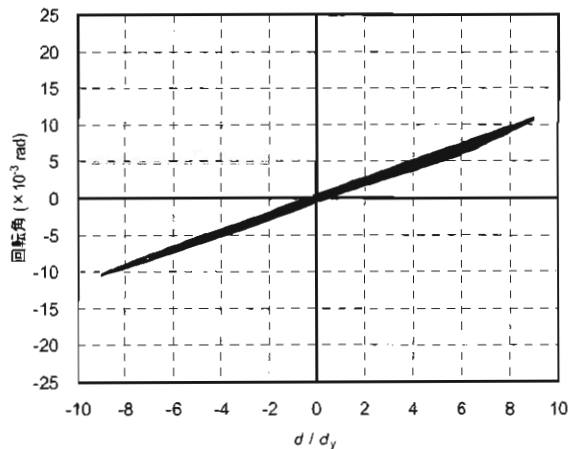


図-4.1.14 フーチング回転角-水平変位履歴曲線(鋼管直杭組杭)



(1) 2列供試体



(2) 3列供試体

図-4.1.15 フーチング回転角-水平変位履歴曲線(場所打ち直杭組杭)

ここでも、設計法との関係について考察してみる。道示IVでは、基礎の塑性化を考慮した設計をする場合、残存耐荷力、変形性能および損傷度を制御する観点から橋脚杭基礎の許容塑性率として4を目安とするとともに、残留変位を制御する観点から、許容変位としてフーチングの回転角 0.02 rad を目安としている¹³⁾。まずは、試験結果から、回転角の残留値と応答値とを対比してみる。

図-4.1.16 は、3列供試体における回転角の応答値に対する残留値の比と正規化した水平変位との関係を示したものである。水平変位の増加に伴い応答値に対する残留値の比率は増加するものの、その値は比較的小さく、 $4d_y$ 時における応答値と残留値の比は、鋼管斜杭組杭および鋼管直杭組杭で 1/4 程度、場所打ち直杭組杭では 1/2 程度である。

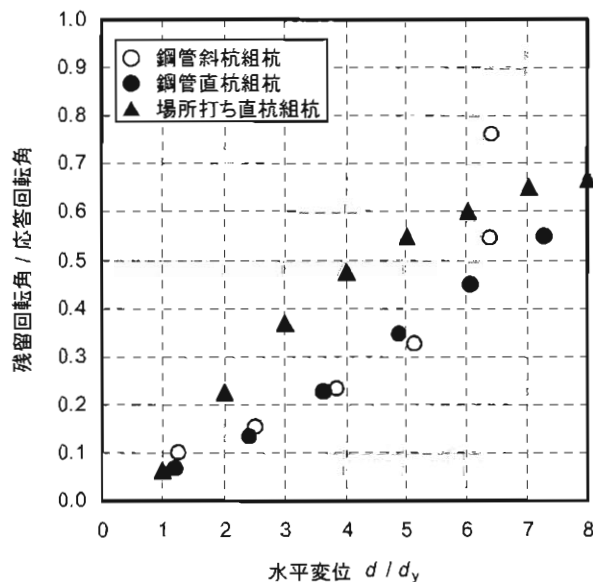


図-4.1.16 残留回転角 / 応答回転角 - 正規化水平変位関係

ここで、弾完全塑性型の履歴モデルを適用すれば、 $1d_y$ までに生ずる回転角 θ_y が全回転変位に占める弾性応答分 θ_e であると考えられるので、図-4.1.17に概念的に示すように、残留回転角 $\theta_p = \text{応答回転角 } \theta_r - 1d_y \text{ 時の応答回転角 } \theta_y$ となるものと考えられる。

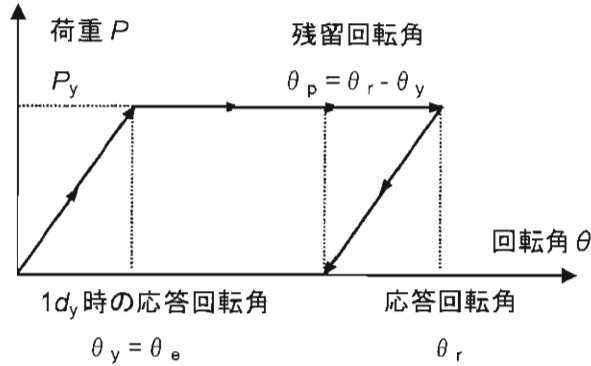


図-4.1.17 応答回転角と残留回転角(概念図)

図-4.1.18は、試験で得られた $1d_y$ 時の応答回転角 θ_y で正規化した残留回転角 θ_p と応答回転角 θ_r との関係に、 $\theta_p = \theta_r - \theta_y$ により与えられる直線を示したものである。これより、残留回転角 θ_p の値は、 $\theta_p = \theta_r - \theta_y$ で見積もっておけば十分に安全側であると判断できる。

また、 $\theta_r / \theta_y = 1$ における θ_p / θ_y の値がほぼ0であることから、道示IVに定義される杭基礎の降伏に至らないように設計された杭基礎は、各杭体断面に塑性変形が残留する可能性があるものの、基礎天端での変位で見れば部材の塑性化に起因する残留変位成分を0とみなしてよいことも確認できる。

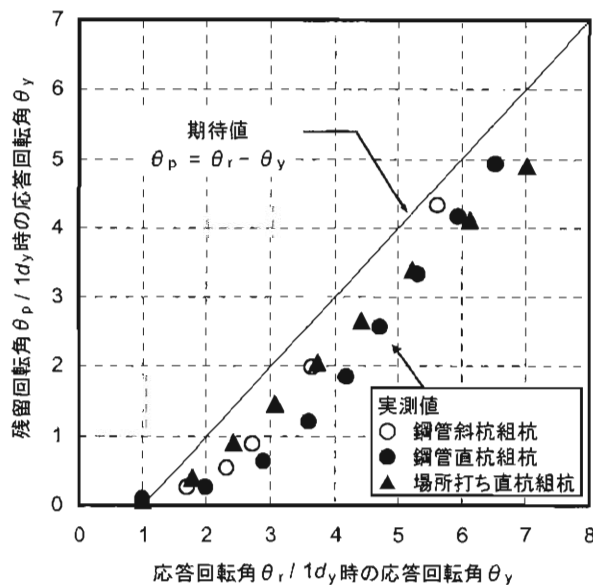


図-4.1.18 残留回転角の期待値と実測値

次に、応答回転角の大きさに着目すると、図- 4.1.13～図- 4.1.15 より、 $4d_y$ 時の回転角の応答値は、鋼管斜杭組杭で $\pm 1.5 \times 10^{-3}$ rad 程度、鋼管直杭組杭および場所打ち直杭組杭でもせいぜい $\pm 5 \times 10^{-3} \sim \pm 10 \times 10^{-3}$ rad 程度であり、道示IVの許容値 ($\pm 20 \times 10^{-3}$ rad) に比較して余裕が大きい。よって、一連の試験結果からは、許容塑性率 4 を満足するように設計された杭基礎の回転角が許容変位 0.02 rad に達することはないようにも思われる。しかし、一連の試験は、転倒モーメントと水平力との比率をパラメータとしたものではなく、この比率によって $4d_y$ のときの回転角が変化するものと考えられる。例えば、レベル 2 地震時において基礎の塑性化を考慮した照査の行われた橋脚杭基礎のうち、基礎の規模が基礎の許容変位によって決定されたものが約半数を占めるとの調査結果もある⁴⁾。

フーチングの回転変位は、杭頭部の鉛直変位の相対差および杭頭部の傾斜によって生ずる。杭頭部の鉛直変位は、杭体の変形と杭先端地盤の変形との和であるが、杭下端の変位を固定した一連の試験には地盤変形が含まれないことに加え、実際の杭基礎では一連の試験に比べて杭長が長いことが多い。よって、杭頭部の鉛直変位の相対差に伴うフーチングの応答回転角は、一連の試験結果に比べて実際の杭基礎の方が大きくなるはずである。鉛直変位の値は、フーチング下面重心における転倒モーメント、フーチング重心から杭までの平面距離および杭軸方向バネ定数に支配される。杭列数が最外縁の杭の鉛直反力で決定されるものとするれば、載荷方向の杭列数が多いほどフーチング重心から最外縁の杭までの距離が大きいため、鉛直変位の相対差による回転角は大きいであろう。

一方、杭軸直角方向力に対する杭頭傾斜角の値は、地盤中の杭と下端が固定された地盤抵抗のない気中にある杭とでは異なり、それぞれ、前者が $\frac{P}{2EI\beta^2}$ 、後者は $\frac{PL^2}{2EI}$ である。こ

こに、 P ：杭軸直角方向力、 EI ：杭の曲げ剛性、 β ：杭の特性値、 L ：気中の杭の長さである。 $1/\beta$ は一般に杭径の 5 倍以下であり、試験における模型杭の長さ L は杭径の 6 倍とこれよりも大きい。よって、杭の傾斜に伴うフーチングの応答回転角は、杭頭部の鉛直変位とは逆に、一連の試験結果に比べて実際の杭基礎の方が小さくなるはずである。

したがって、実際の杭基礎の応答回転角の推定値と試験結果との差は、杭頭部の鉛直変位の相対差の大きさによるものであるということになる。しかし、杭の軸方向抵抗特性および地震動の繰返し作用の大きさが 2 方向とも同一であれば、鉛直変位の相対差は実際にはほとんど残留しないと考えられる。

以上のことから、静的照査法により推定される応答回転角は、実際に生じうる残留回転角を過大に評価していると考えられる。すなわち、基礎の塑性化を考慮した設計を行う場合の許容変位の値は、現状の値よりも緩和することによって合理化する余地があると考えられる。具体には、静的照査法により推定される応答回転角から杭頭部の鉛直変位に伴う成分を差し引き、その上で全杭降伏時の応答回転角を弾性回転角として残留回転角を推定する方法がよいであろう。

図-4.1.19は、1本の棒部材が純曲げを受ける時のひずみ分布を示したものである。道示IVに定義される杭基礎の降伏時とは、鋼管の最外縁部もしくは最外縁部の鉄筋が降伏応力度に達する状態が全杭に至る状態のことを指している。このとき、最外縁部以外の領域では、降伏ひずみに至っておらず、これらの領域では弾性範囲内にあるはずである。すなわち、最外縁部において降伏点に至るまでの変形が完全な弾性変形であったとしても、これが弾性変形の全てではないことになる。図-4.1.18に示したように、残留回転角の実測値が期待値よりも小さいのは、このためではないかと考えられる。ただし、一連の試験は、杭が曲げと軸力とを同時に受け、軸力が水平荷重の増加に伴い変化する組杭であることから、これら条件の相違に対する検証が必要である。

また、図-4.1.18において、鋼管組杭と場所打ち組杭とで残留回転角の比率の大きさに相違があるのは、コンクリートの応力ひずみ関係が非線形であること、RC部材では曲げモーメントの増加に伴い中立軸が圧縮側に移動すること等が関係していると考えられる。

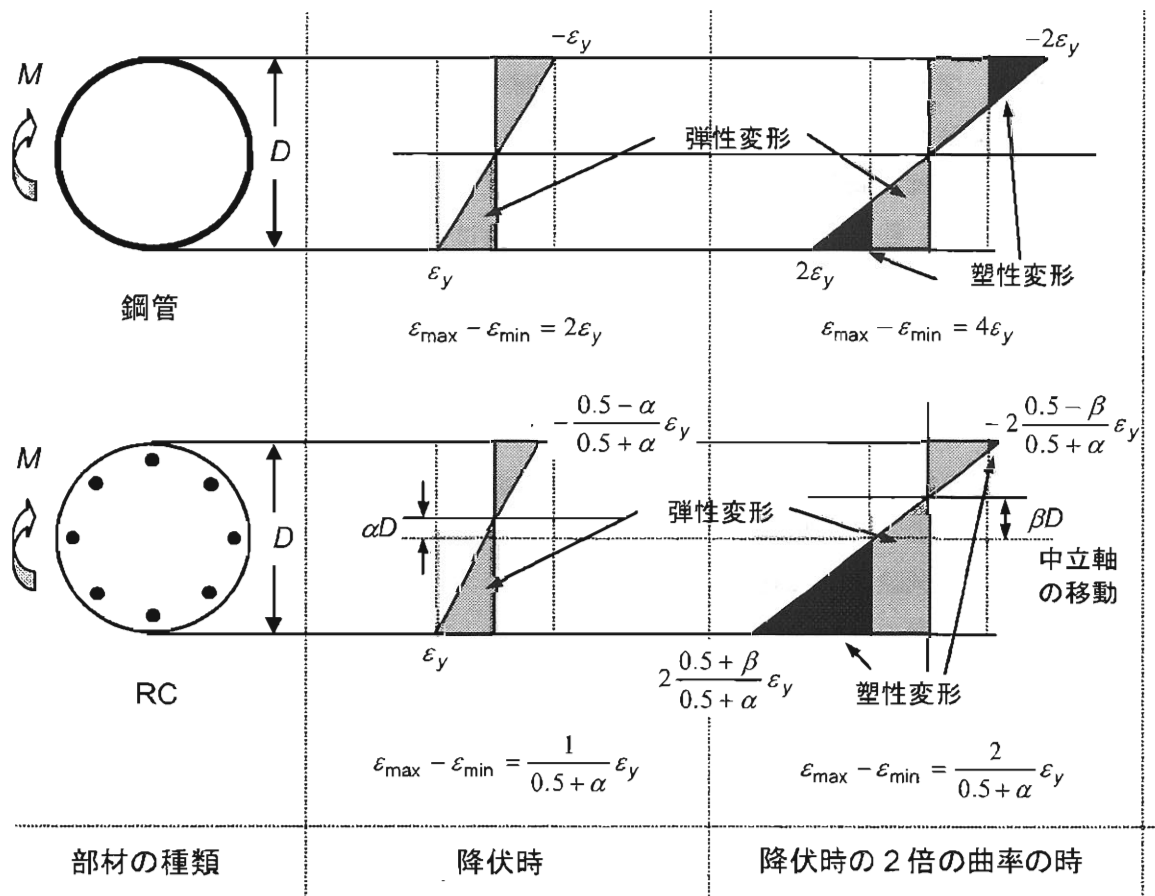


図-4.1.19 純曲げ部材のひずみ分布

4.1.4 フーチングの鉛直変位

図-4.1.20～図-4.1.22は、フーチングの鉛直変位と水平変位の履歴曲線を示したものであり、それぞれ、図-4.1.20は鋼管斜杭組杭、図-4.1.21は鋼管直杭組杭、図-4.1.22は場所打ち直杭組杭のものである。図中には、最大荷重点を▲印で示す。

鋼管斜杭組杭と鋼管直杭組杭とを比較すると、最大荷重点までの鉛直変位は小さく、最大荷重点を超えると鉛直変位の増加が大きくなっている点は、両者とも同一の傾向である。ところが、鋼管直杭組杭では、最大荷重点以降の鉛直変位の増加割合はほぼ一定であるのに対し、鋼管斜杭組杭では、図中の□印あたりから、鉛直変位が急増している。この様子は、鋼製橋脚単柱の交番水平載荷試験¹⁴⁾のそれに近い。なお、図中に設けた□印は、鋼管斜杭のフーチングの回転角が急増を開始した点を示しており、鉛直変位および回転角の急増がほぼ同時に生じていることも確認できる。

次に、場所打ち直杭組杭では、やや傾向が異なり、水平変位の増加に対する鉛直変位の増加は大きいものの、最大荷重点を超えた $5d_y$ あたりまでは、除荷後に残留鉛直変位を生じながら、それまでの曲線を延長するような軌跡を描いており、この様子は地盤の圧密沈下曲線のそれに近い。そして、 $6d_y$ あたりからは鉛直変位があまり増加しなくなっている。

なお、いずれも載荷方向の杭列数が多いほど、鉛直変位が抑制されることも分かる。

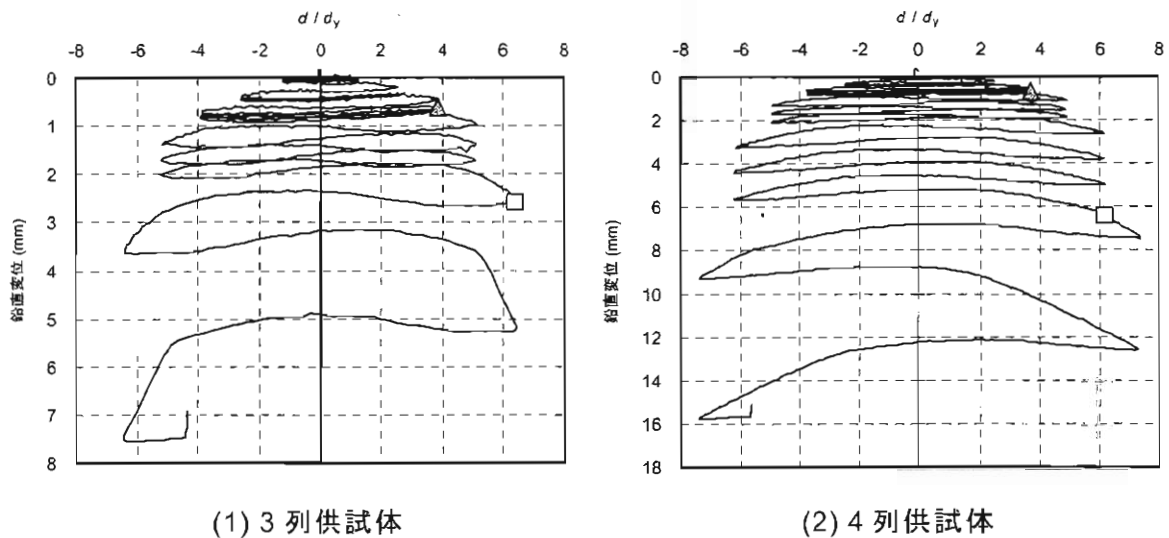
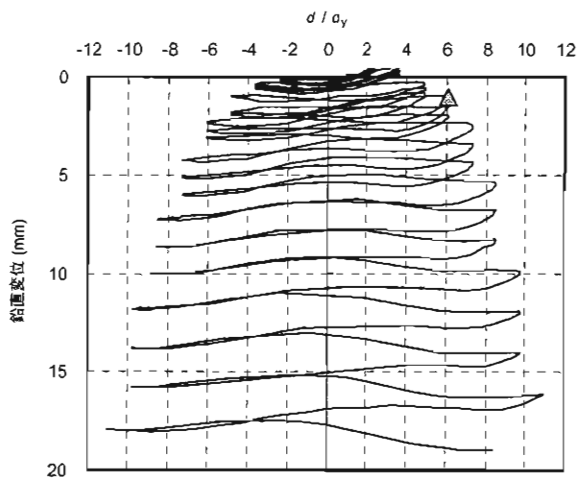
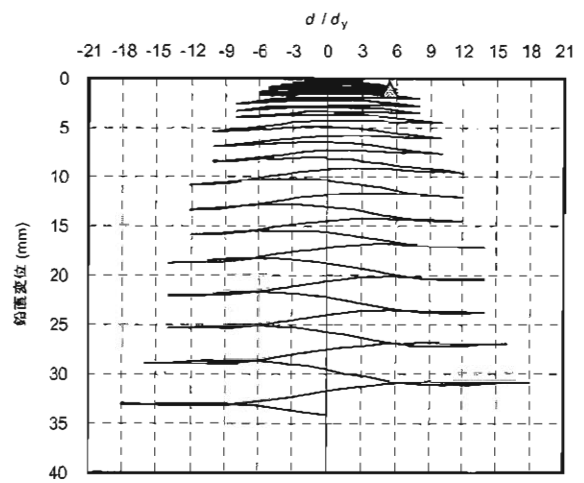


図-4.1.20 フーチング鉛直変位-水平変位履歴曲線(鋼管斜杭組杭)

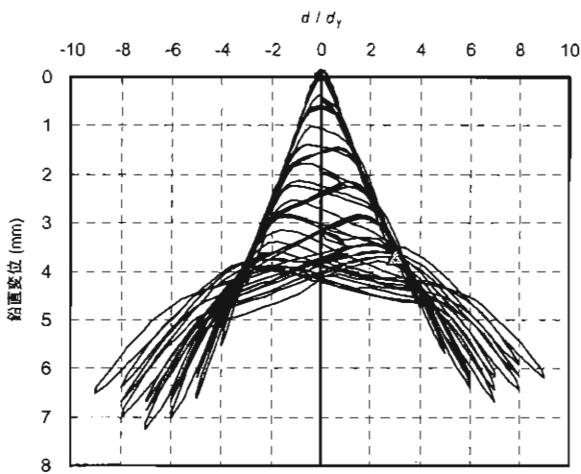


(1) 3列供試体

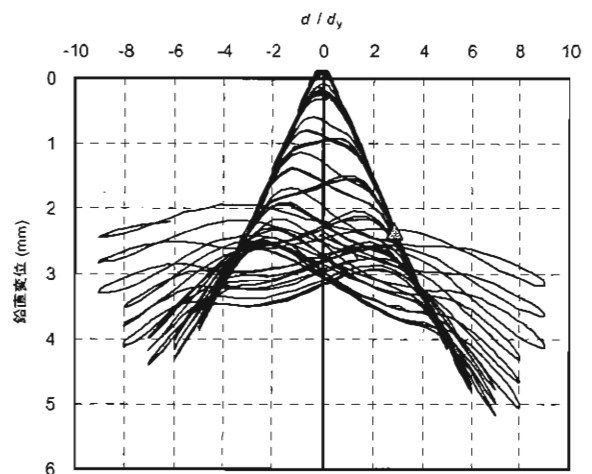


(2) 4列供試体

図- 4.1.21 フーチング鉛直変位-水平変位履歴曲線(鋼管直杭組杭)



(1) 2列供試体



(2) 3列供試体

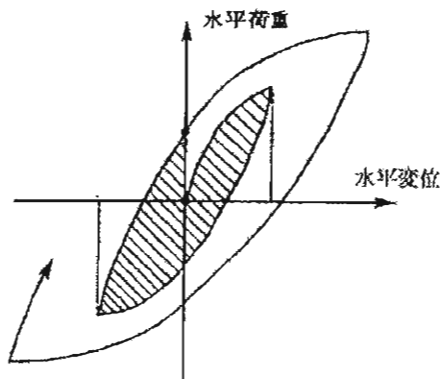
図- 4.1.22 フーチング鉛直変位-水平変位履歴曲線(場所打ち直杭組杭)

4.2 エネルギー吸収量

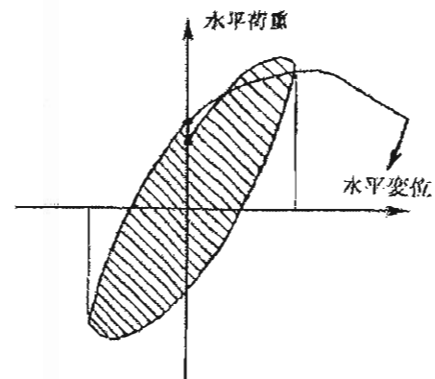
各サイクルでの吸収エネルギーは、荷重変位履歴曲線と変位軸とで囲まれる部分の面積で表すことができ、これは、図-4.2.1 (1) (2) のようになる。これを図-4.2.1 (3) のように台形積分で求め、1 サイクル毎の吸収エネルギーを算出した。ここで、1 サイクルとは、図-4.2.1 (4) に示すように、水平変位が 0 mm の状態から再び 0 mm になるまでのことを言う。また、計測誤差により水平変位が 0 mm における水平荷重が必ずしも計測されていないため、この場合の水平荷重は内挿により求めた。

各サイクルでのエネルギー吸収量を各サイクルでの水平荷重の最大値もしくは最小値の絶対値と併せ、図-4.2.2 (3 列供試体)、図-4.2.3 (4 列供試体) に示す。

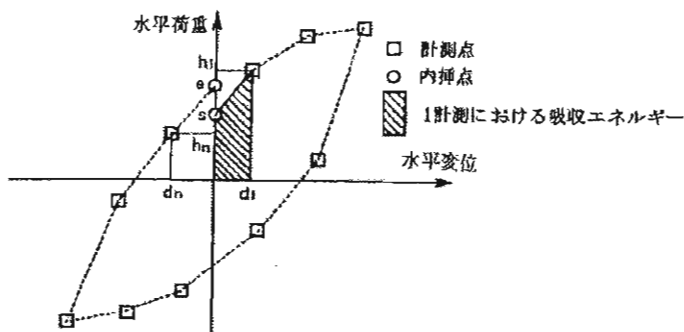
3 列供試体、4 列供試体ともに、最大荷重以降、水平荷重の低下にも関わらずエネルギー吸収量は増加を続けている。これは、水平荷重-水平変位関係の履歴ループが終始紡錘型であることから推定されたことではある。よって、本試験結果からは、エネルギー吸収量が限界に達する水平変位を判断することはできない。



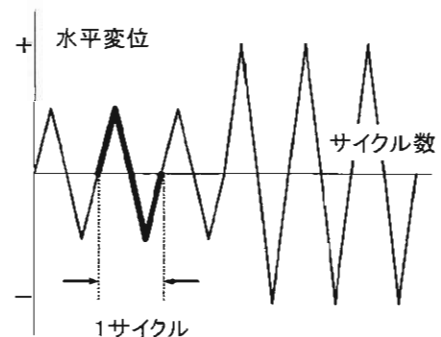
(1) 初期の場合の吸収エネルギーの定義



(2) 強度低下を起こした場合の吸収エネルギーの定義



(3) 吸収エネルギーの計算方法



(4) 1 サイクルの定義

図-4.2.1 エネルギー吸収量の算出方法

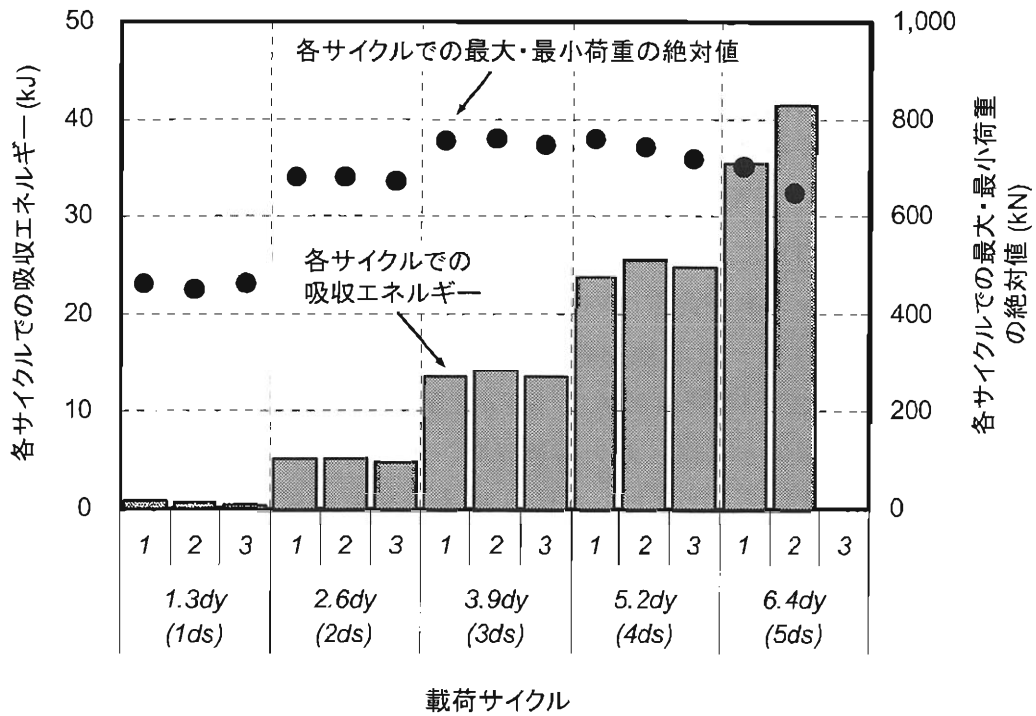


図- 4.2.2 エネルギー吸収量(3 列供試体)

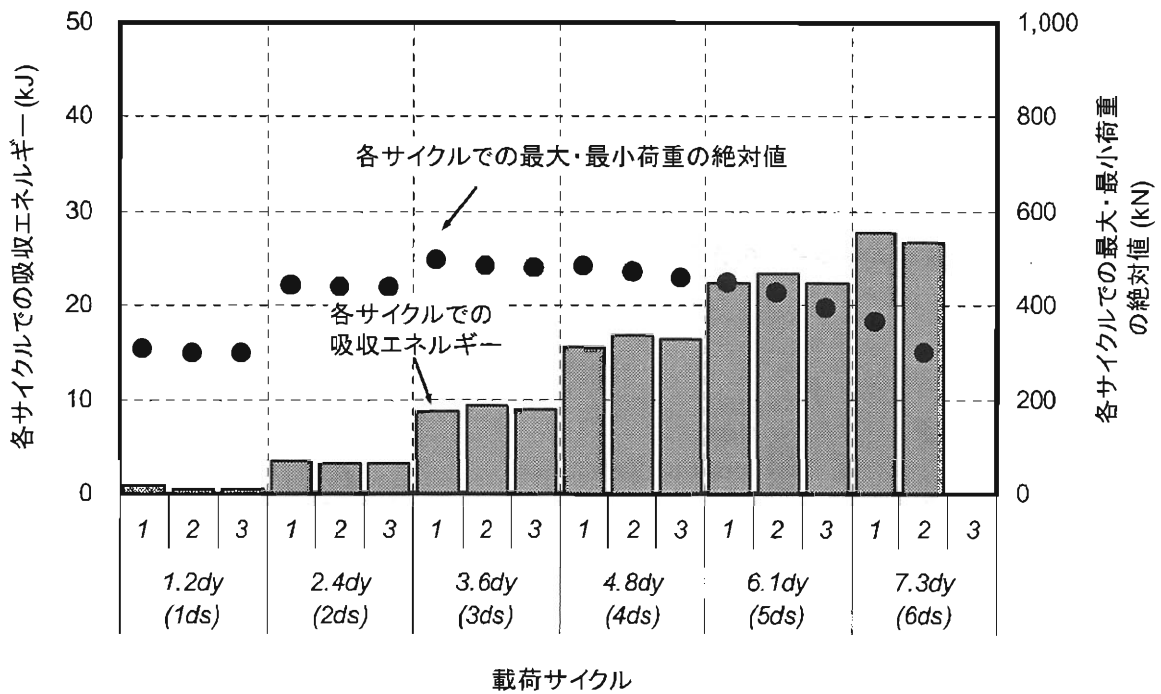


図- 4.2.3 エネルギー吸収量(4 列供試体)

4.3 設計モデルの検討

道示IVに示される非線形性を考慮したラーメンモデル¹³⁾を用い、設計モデルの検討を行う。設計モデルの概要を図-4.3.1に示す。試験で用いた供試体の条件と同様に、上下フーチングを剛体、杭とフーチングとの結合部を剛結合としたラーメンモデルであり、杭体の曲げモーメント-曲率関係 ($M-\phi$ 関係) は弾完全塑性型の非線形としている。ここで、 $M-\phi$ 関係の算定に用いる杭の軸力は、水平荷重の変化に伴って変化させる。また、杭材料の機械的性質は、規格降伏応力度 (235 N/mm^2) とした場合、材料試験結果における 0.2% 耐力値 (350 N/mm^2) を用いた場合の 2 通りの計算を行う。材料試験結果を用いた場合、全杭降伏曲げモーメント M_y に達する時の水平荷重および水平変位は、規格降伏応力度および弾性係数を用い、全杭が全塑性モーメント M_p に達する時の水平荷重および水平変位は、0.2%耐力およびこの時の応力-ひずみ関係の割線勾配を用いる。

計算結果を試験結果に重ね書きしたものを図-4.3.2 (3列供試体)、図-4.3.3 (4列供試体) に示す。3列供試体、4列供試体ともに、材料強度を設計で用いる規格値とした場合は、試験結果よりもかなり安全側の結果を与える。また、材料強度を材料試験値とした場合には、水平荷重-水平変位関係の最大荷重までの包絡線をほぼ再現できている。

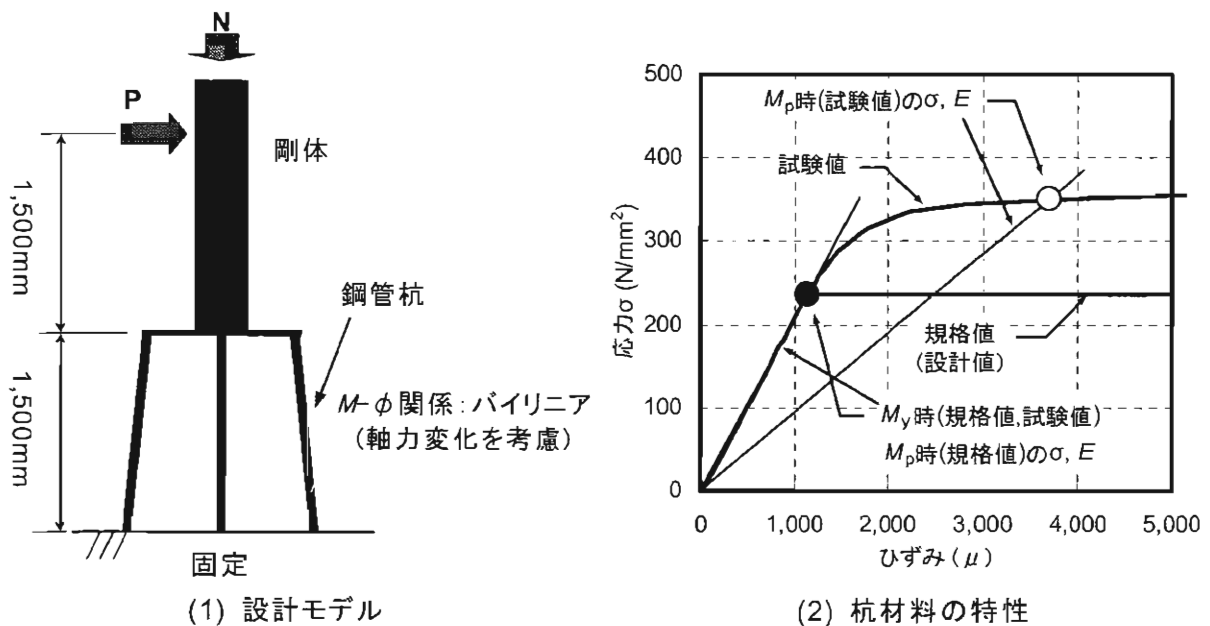


図-4.3.1 設計モデルの概要

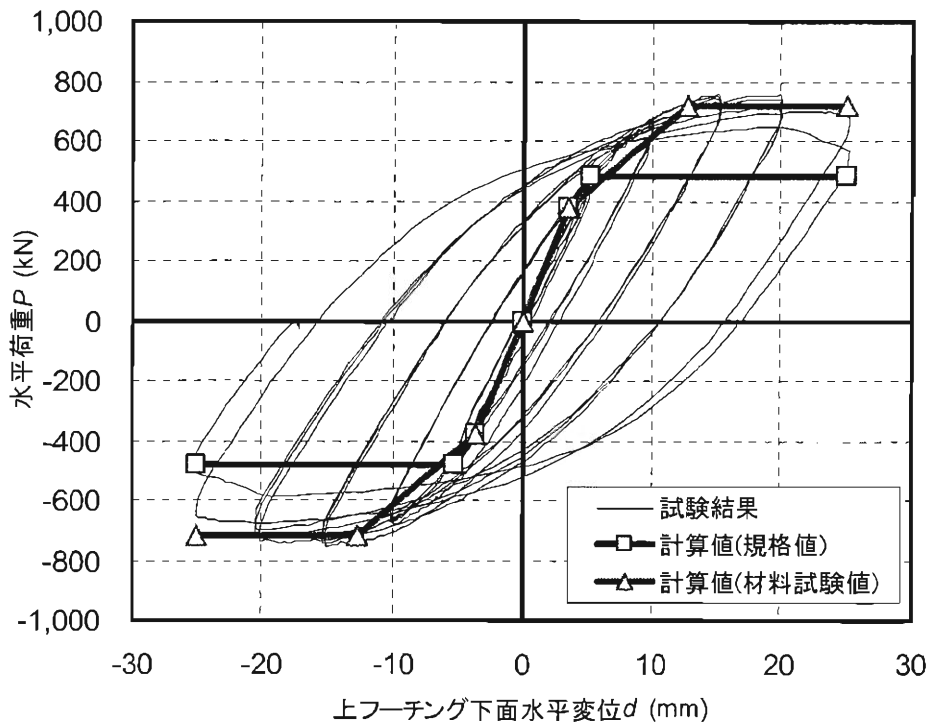


図- 4.3.2 試験結果と計算値との比較 (3 列供試体)

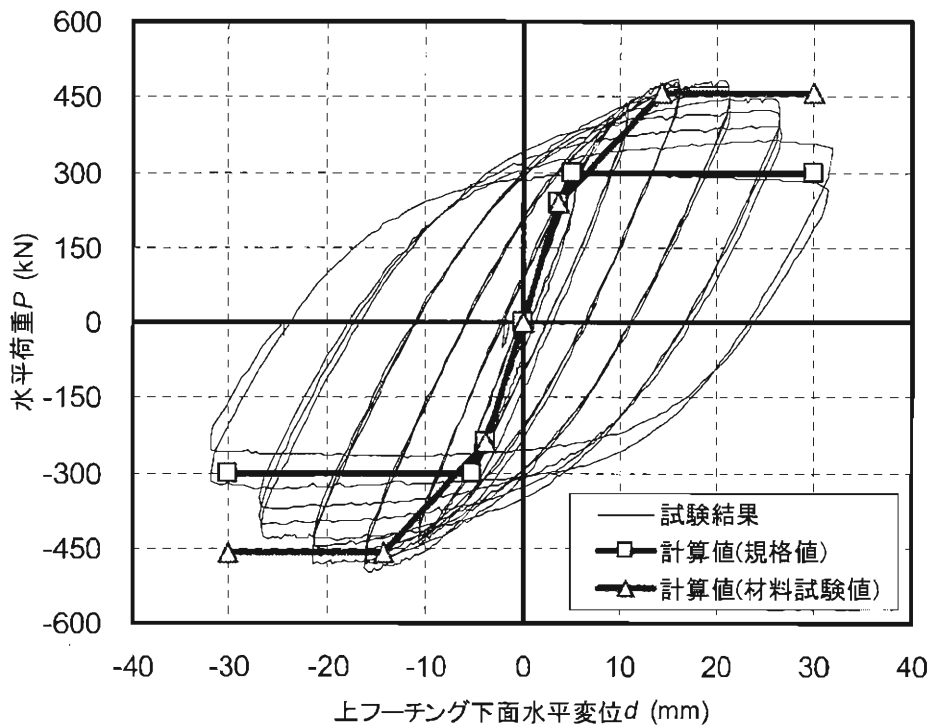


図- 4.3.3 試験結果と計算値との比較 (4 列供試体)

4.4 許容塑性率の検討

杭基礎の許容塑性率の工学的意義は、次のように整理されている⁹⁾。

- (1) 基礎が最大強度相当の強度を発揮している状態を超えないこと
- (2) 基礎は過大な損傷には達せず、地震後も無補修のままでも橋の供用に影響を与えない状態に留まること
を担保するためのものであり、結果として、
- (3) 無補修のままであっても、再度の大地震に対して初期と同等の残存耐荷力を有する。
- (4) そして、最大強度に達するまでに吸収するエネルギーと同等以上の残存エネルギー吸収能を有する。

道示Ⅳの杭配置や構造細目に従った直杭の場合、杭材料によって異なるものの、最大強度は小さくとも $4d_y$ 程度までは保持され、全杭降伏荷重程度に低下するのは小さくとも $7d_y$ 程度である。このことから、道示Ⅳでは許容塑性率の目安を4程度としている。

一方、斜杭の場合、最大強度は $5d_y$ 程度まで保持され、水平荷重が全杭降伏荷重程度に低下するのは、 $6\sim 7d_y$ 以降である。なお、最大強度以降の荷重低下度合いは直杭よりも大きく、 $6d_y$ 程度で鉛直変位および回転変位が急増する。これと類似の挙動をする構造に、鋼製橋脚がある。鋼製橋脚の許容変位の工学的意義は、次のように整理されている⁹⁾。

- (1) 鋼製橋脚は過大な損傷に達せず、地震後も無補修のままでも橋の供用に影響を与えない状態に留まること
- (2) 再度の大地震に対して初期と同程度の残存耐荷力を有することが期待できる状態に保たれること
- (3) 最大水平荷重に達するまでに吸収するエネルギーと同等の残存エネルギー吸収能を有すること

その結果、鋼製橋脚においては、次の点を考慮して最大水平荷重に達する時の水平変位を許容変位としている。

- (4) 最大水平荷重点に至るまでの領域では、載荷繰返し回数によらず履歴が安定する。
- (5) 最大水平荷重点を超えた後の水平荷重-水平変位関係の骨格曲線は、顕著な負勾配を有するため、最大水平荷重点以降の変形性能を期待した設計を行った場合には、大きな残留変位を生ずる可能性があること。

以上の両構造が達成しようとしている事項を同時に満足するように許容塑性率を設定すると、斜杭を有する基礎の許容塑性率として、 $3\sim 4$ 程度が期待できる。

5. まとめ

鋼管杭の斜杭組杭模型を用いた気中での正負交番水平載荷試験を行い、道路橋基礎における斜杭基礎の大規模地震時における保有水平耐力と変形性能について検討するとともに、既往の直杭組杭の試験結果を参照し、杭列数や斜杭の有無について考察した。その結果、確認された事項は次のとおりである。

- (1) 載荷方向の杭列数が多いと、水平耐荷力は増加し、水平変位は抑制される。
- (2) 斜杭組杭は、直杭組杭に比べて水平耐荷力が大きく、水平変位は抑制される。
- (3) 全杭に占める斜杭の割合が大きいと、上記の効果が大きいようである。
- (4) 斜杭組杭の最大水平荷重が発揮される時の水平変位は、全杭降伏となる水平変位を $1d_y$ とした場合、 $3.5\sim 5d_y$ 程度であり、鋼管直杭組杭と比較すると小さい。
- (5) 最大水平荷重を発揮した後の水平耐荷力の低下の度合いは、直杭組杭に比べて斜杭組杭の方が顕著である。
- (6) フーチングの回転角や鉛直変位に着目した場合、斜杭は $6d_y$ 程度を境にこれらが急増する。
- (7) 直杭および斜杭を問わず、 $4d_y$ 程度においても、フーチング回転角の残留値は、応答値の半分以下である。よって、基礎の塑性化を考慮した設計を行う場合の許容変位としての回転角の応答値は、緩和できる可能性が示唆される。
- (8) エネルギー吸収能は非常に大きく、これが限界に達する時の水平変位を本試験結果から判断することはできない。
- (9) 設計においては、道示IVに解説されるラーメンモデルを基本とし、杭体の曲げ抵抗特性を曲げモーメント-曲率関係でモデル化しても、水平荷重の変動に伴う杭体軸力の変動や材料の硬化特性を適切に考慮することで、保有水平耐力の評価が可能であると考えられる。
- (10) 直杭組杭や鋼製橋脚の許容塑性率の工学的意図に沿えば、斜杭を有する群杭の許容塑性率としては、 $3\sim 4$ 程度が期待できる。

最後に、本研究は、研究費の一部に（社）日本鉄鋼連盟の助成金を活用して実施しており、また、鋼管杭協会には、解析的な検討等、本資料の作成にあたりご協力をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 塩井 幸武, 古谷 敏夫, 千野 啓次 : 構造物基礎形式の選定手法調査, 土木研究所資料, 第 1285 号, 1978.3.
- 2) 岡原 美知夫, 小幡 宏, 小池 信一 : 構造物基礎形式の選定手法調査, 土木研究所資料, 第 2528 号, 1988.1.
- 3) 福井 次郎, 中野 正則, 石田 雅博, 七澤 利明, 芦達 拓哉, 田口 博文 : 橋梁基礎形式の選定手法調査, 土木研究所資料, 第 3500 号, 1996.8.
- 4) 中谷 昌一, 石田 雅博, 白戸 真大, 井落 久貴 : 橋梁基礎形式の選定手法調査, 土木研究所資料, 第 4037 号, 2007.2.
- 5) (社) 日本道路協会 : 杭基礎設計便覧 平成 18 年度改訂版, 2007.1.
- 6) 福井 次郎, 中野 正則, 木村 嘉富, 石田 雅博, 大越 盛幸, 阪野 彰 : 杭基礎の変形性能に関する載荷試験, 土木研究所資料, 第 3553 号, 1998.3.
- 7) 中野 正則, 木村 嘉富, 石澤 毅, 嶋津 晃臣, 小山 清一 : 鋼管杭基礎の模型水平載荷実験 (その 1)、第 32 回地盤工学研究発表講演集, pp.1573-1574, 1997.7.
- 8) 福井 次郎, 木村 嘉富, 吉田 映, 鈴木 規彦, 平田 尚 : 鋼管杭基礎の模型水平載荷実験 (その 2)、第 32 回地盤工学研究発表講演集, pp.1575-1576, 1997.7.
- 9) 中谷 昌一, 白戸 真大 : 深い基礎の許容塑性率に関する工学的意義について, 土木研究所資料, 第 4030 号, 2006.12.
- 10) 中谷 昌一, 竹口 昌弘, 井落 久貴, 鈴木 規彦 : 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, 土木技術資料, Vol.48 No.6, pp.58-63, 2006.6.
- 11) 井落 久貴, 中谷 昌一, 竹口 昌弘, 岡原 美知夫, 小松 章, 平田 尚, 高野 公寿, 池田 真, 高橋 一樹 : 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, pp.1385-1386, 2006.7.
- 12) 井落 久貴, 中谷 昌一, 竹口 昌弘, 岡原 美知夫, 小松 章, 平田 尚, 高野 公寿, 池田 真, 高橋 一樹 : 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, pp.1387-1388, 2006.7.
- 13) (社) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, 2002.3.
- 14) 建設省土木研究所, 首都高速道路公団, 阪神高速道路公団, 名古屋高速道路公社, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会 : 道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書 (I ~ VIII, 総括編) , 1997-1999.

付属資料 I 鋼管を用いた直杭組杭模型載荷実験結果

1 試験方法

1.1 試験概要

平成 8 年度の道路橋示方書の改訂にあたり、大地震時における杭基礎の変形性能の評価法を検討するため、鋼管を用いた直杭組杭模型の載荷試験が行われている^{1),2),3)}。

試験の概要を図-付 1.1.1 に示す。試験では、供試体の下フーチングを反力壁にボルトで固定した状態で、鉛直載荷ジャッキ 1 基と水平載荷ジャッキ 1 基を同時に用いて、一定の鉛直荷重のもと、水平荷重が上フーチングに与えられた。鉛直載荷ジャッキはローラーを介して載荷梁に設置され、また上フーチングとは球座を介して接続されている。したがって、上フーチングの水平・回転変位を許容する構造となっている。試験中に保持された鉛直荷重は、上フーチングの重量を含め、杭 1 本当たり 147 kN である。これは、鋼管の規格降伏応力度の約 20% に相当し、杭基礎が保持する死荷重の標準的な範囲内にある。水平力の作用位置は、杭頭から上方 1,500 mm である。載荷は、予備解析から得られた全杭降伏時の水平荷重（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荷重）を供試体に作用させたときの上フーチング下端（杭頭）位置の水平変位量を $1d_y$ とし、 $\pm nd_y$ ($n = 1, 2, 3, 4, \dots$) の各ステップで 3 回繰返された。

供試体は 2 種類で、載荷方向に 3 列、載荷直交方向に 2 列の組杭供試体（以下、3 列供試体）、もう一つは載荷方向に 4 列、載荷直交方向に 2 列の組杭供試体（以下、4 列供試体）である。使用された鋼管は、表-付 1.1.1 に示すように、外径 216.3 mm、板厚 4.2 mm の一般構造用炭素鋼鋼管（STK400）である。また、杭体の上下端部はフーチング端部から杭径分の長さの範囲に中詰めコンクリートが設置された。杭の中心間隔は、実際の道路橋杭基礎と同様に杭径の 2.5 倍である。すなわち、両端の杭が直杭であること、4 列供試体の載荷直交方向の杭列数が 2 列であることを除き、本文で示した斜杭組杭模型の試験と基本的に同一の条件である。

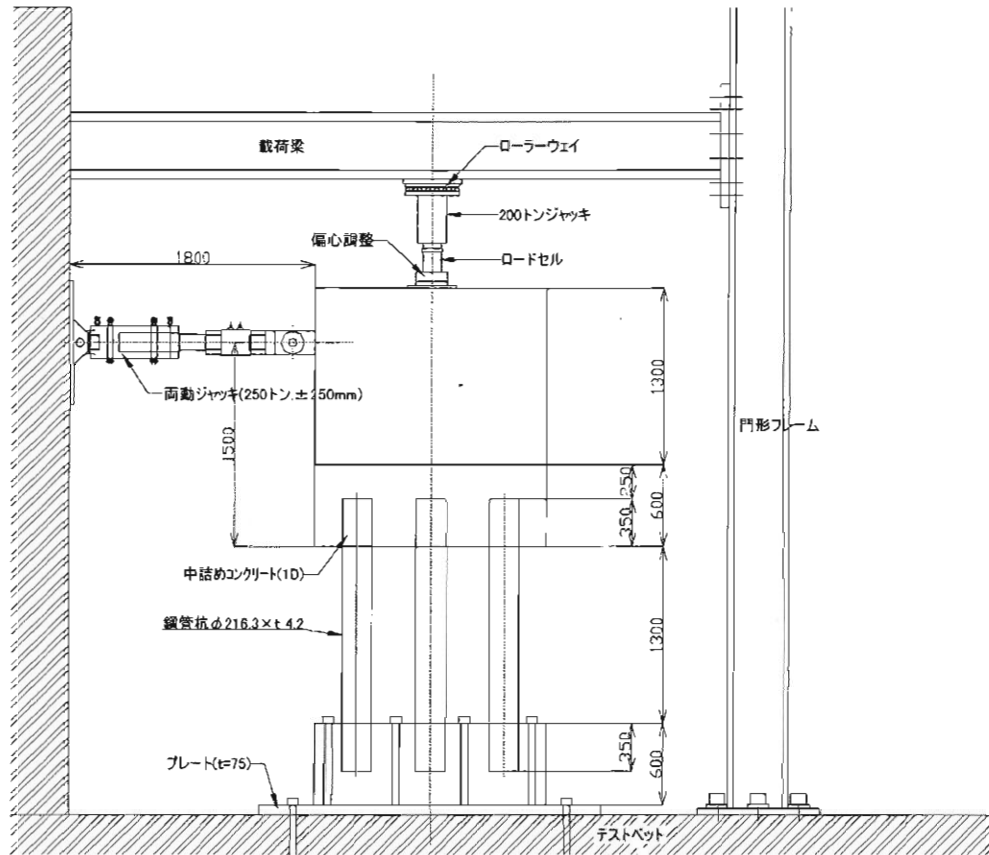


図-付 1.1.1 載荷試験概要図

表-付 1.1.1 鋼管杭の諸元

No.	杭本数	杭径 (mm)	板厚 (mm)	材質	備考
1	3列×2列	216.3	4.2	STK400	上下端部には中詰めコンクリート設置 (上フーチング下面から1Dおよび下フーチング上面から1Dの範囲まで) (D: 杭径)
2	4列×2列				

1.2 供試体

図-付 1.2.1に 3 列供試体の一般図を、図-付 1.2.2には 4 列供試体の一般図を示す。

3 列供試体は、水平荷重の载荷方向に 3 列、载荷直交方向に 2 列の組杭供試体であり、4 列供試体は、水平荷重の载荷方向に 4 列、载荷直交方向に 2 列の組杭供試体である。杭には、外径 216.3 mm、板厚 4.2 mm の一般構造用炭素鋼鋼管 (STK400) であり、全て直杭である。杭の上下端部 350 mm をコンクリート製のフーチングへ埋め込まれている。また、フーチングの周囲は型枠を兼ねた鋼板で覆われている。

図-付 1.2.3に示すように、杭の上下端部の 550 mm の区間 (フーチング外で杭径程度) には中詰めコンクリートが設けられ、杭頭部は鉄筋で補強されている。

表-付 1.2.1に鋼管材料の引張試験結果を、表-付 1.2.2にはコンクリートの圧縮試験結果を示す。

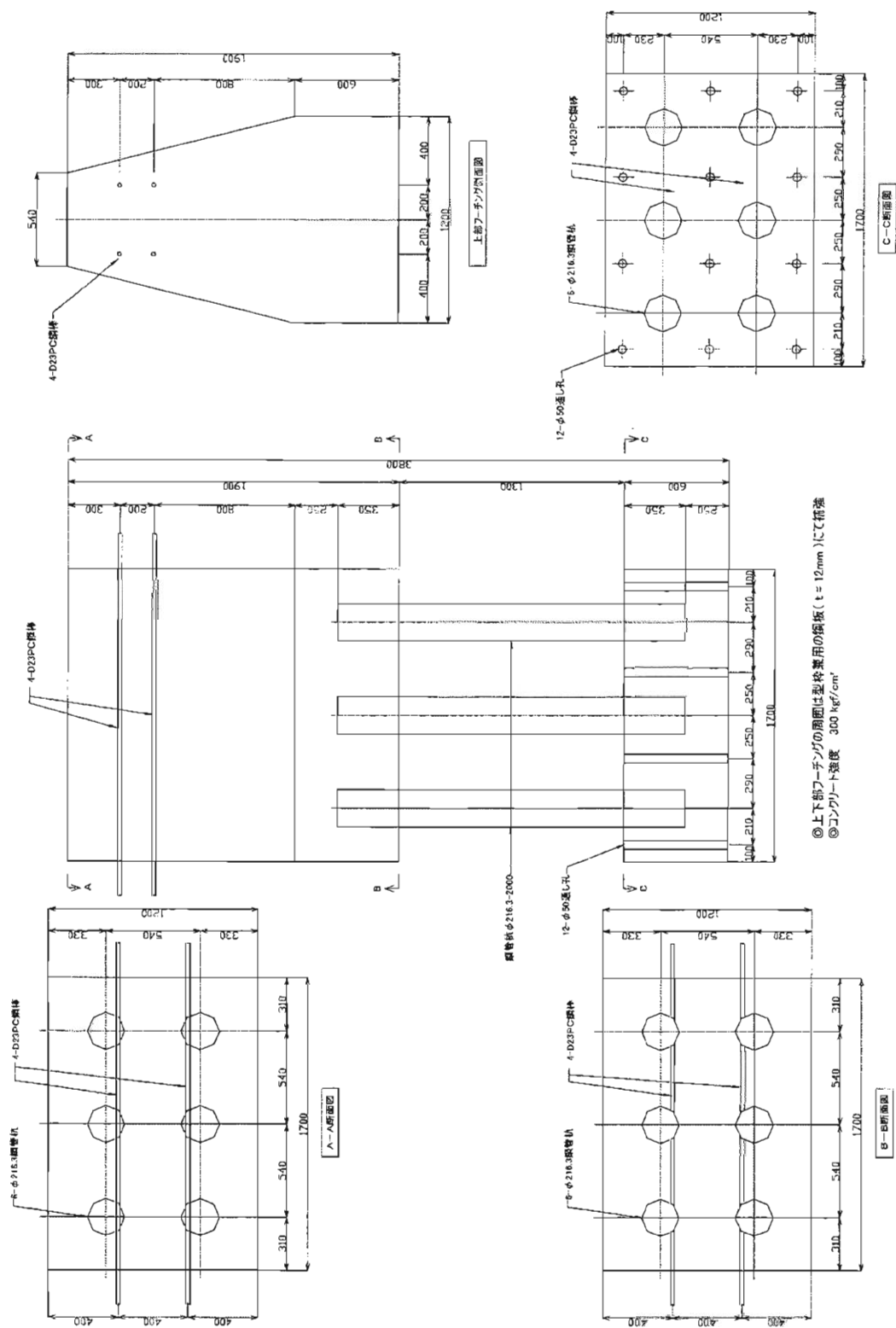


図-付 1.2.1 3列供試体(3列×2列)一般図

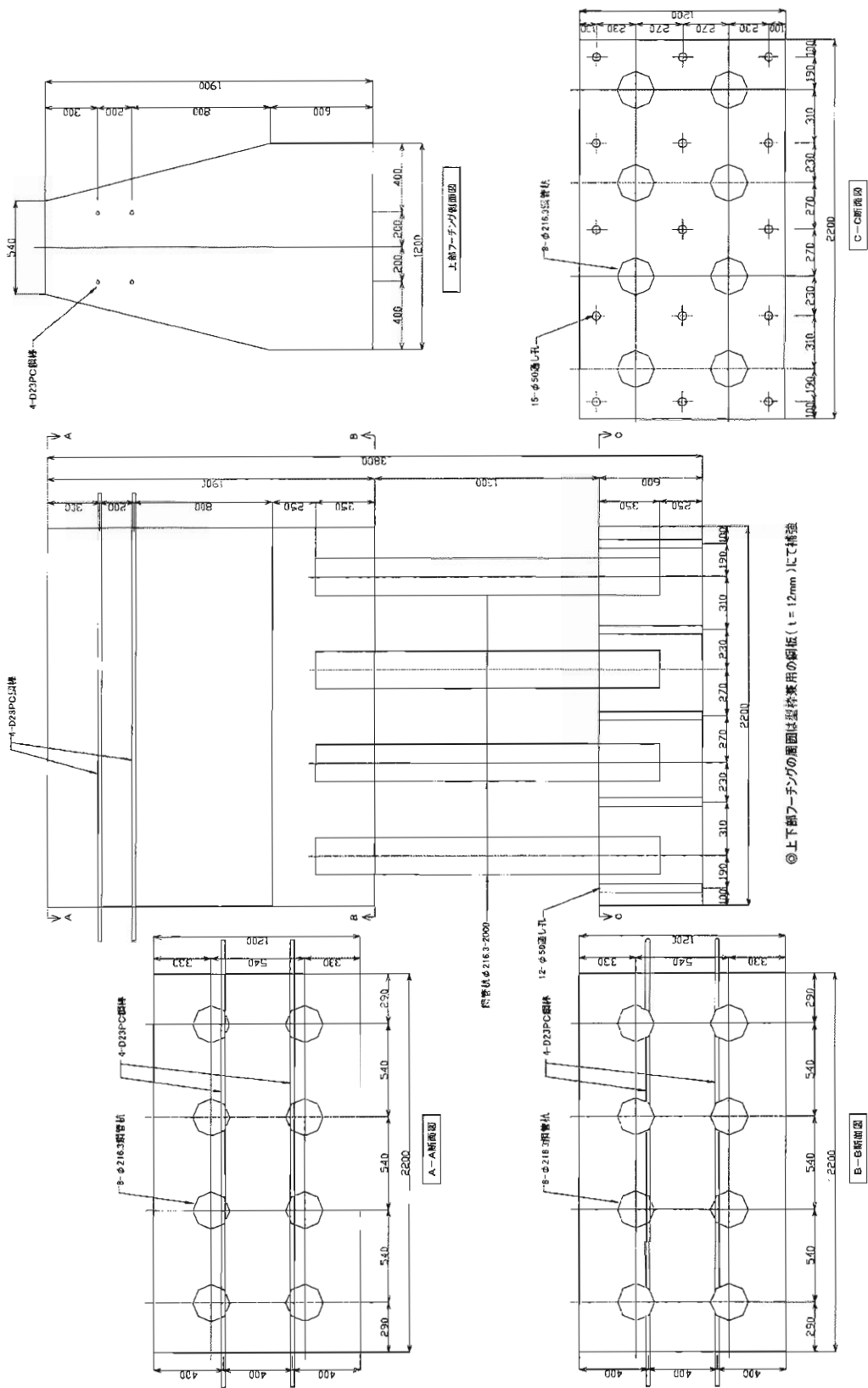


図-付 1.2.2 4列供試体(4列×2列)一般図

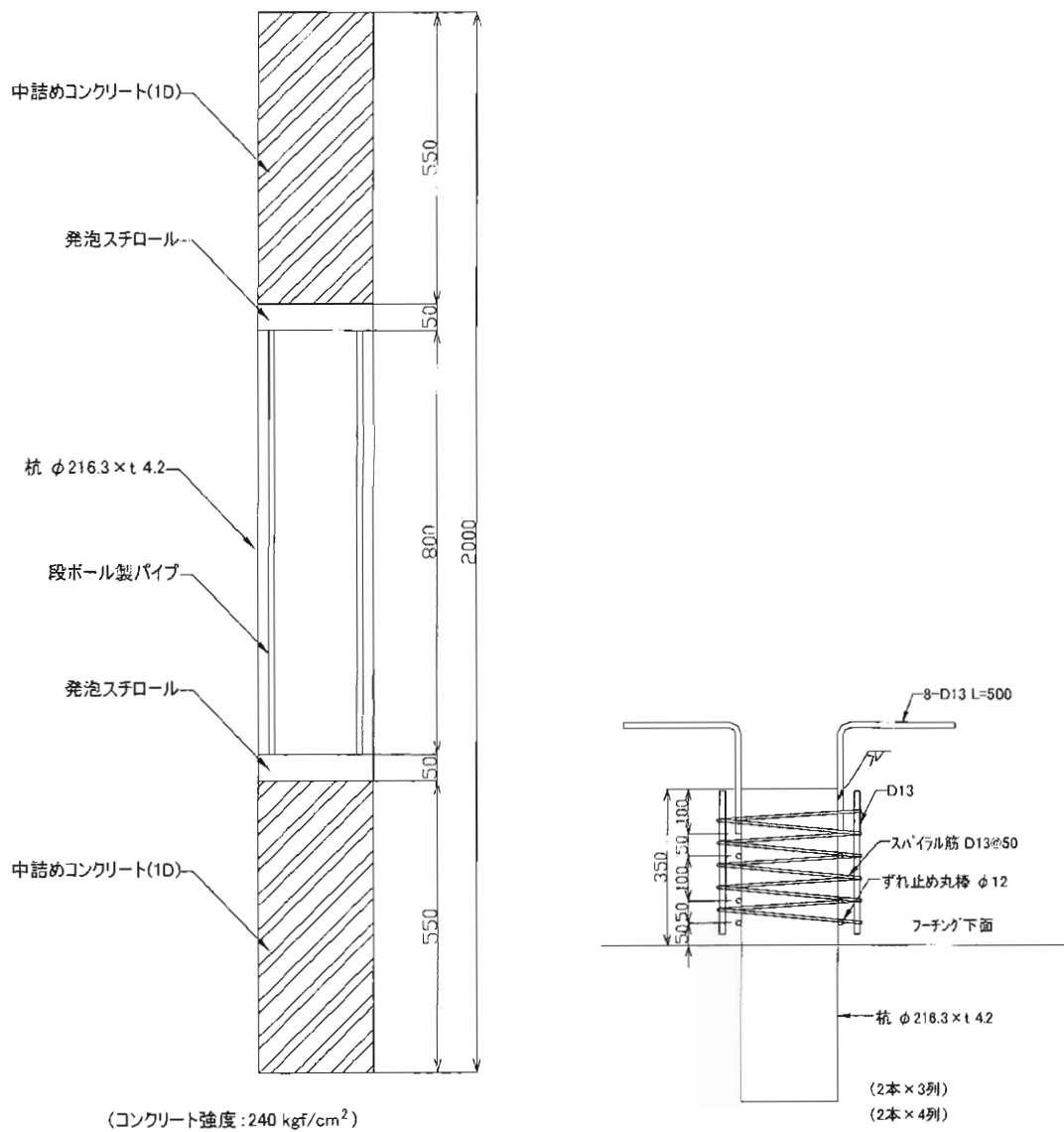


図-付 1.2.3 鋼管杭部詳細図

表-付 1.2.1 鋼管材料の引張試験結果

番号	板厚	板幅	断面積	0.2%耐力時		破断時		
				荷重	応力	荷重	応力	伸び
	mm	mm	mm ²	kN	N/mm ²	kN	N/mm ²	%
1-1	4.37	38.03	166.2	58.1 56.4	349 339	79.8	480	42.3
1-2	4.39	37.98	166.7	58.1 56.9	348 341	80.8	484	42.0
2-1	4.38	38.16	167.1	58.2 56.4	348 337	79.8	478	41.2
2-2	4.36	38.13	166.2	59.8 57.9	360 348	79.5	478	40.3
3-1	4.39	38.13	167.4	60.3 56.9	360 348	81.3	485	41.7
3-2	4.37	38.14	166.7	58.4 56.7	350 340	80.0	481	41.0
平均					353 343		481	41.5

注) JIS12C号 (鋼管φ216.3 t=4.2)

注) 0.2%耐力欄：上段/変位計、下段/ひずみゲージの測定値より求めた値

表-付 1.2.2 コンクリートの圧縮試験結果 (単位:N/mm²)

番号	組杭供試体 3列×2列		組杭供試体 4列×2列	
	中詰め コンクリート	フーチング コンクリート	中詰め コンクリート	フーチング コンクリート
1	30.9	34.3	32.0	34.3
2	31.7	33.1	31.2	34.3
3	32.1	33.9	32.1	34.0
4	32.0	31.9	31.7	34.4
5	30.8	33.2	31.5	34.1
6	33.2	33.3	32.5	33.7
平均	31.8	33.3	31.8	34.1
材令	42日	13日	50日	21日
目標強度	24	30	24	30

1.3 載荷方法

鉛直載荷ジャッキにより一定の鉛直荷重を保持しながら、水平載荷ジャッキにより上フーチングの杭頭部から 1,500 mm の位置に水平力が正負交番で繰返し与えられた。鉛直荷重は、上フーチングの重量を含め杭 1 本当たり 147 kN である。これは、規格降伏応力度の約 20% に相当し、杭基礎に作用する死荷重の標準的な範囲内にある。

水平荷重は、予備解析により求めた全杭降伏時（全杭の最外縁が規格降伏応力度に達する時）の水平荷重 P_y を作用させた時の水平変位 $1d_y$ を基準変位 d_s として、各載荷ステップにて 3 回の繰返しを行う $\pm nd_y$ ($n = 1, 2, 3, \dots$) の水平変位履歴が与えられた。ただし、4 列供試体では、 $6d_y$ 以降は、水平変位の増加幅は $\pm 2d_y$ ずつとされ ($\pm 8d_y, \pm 10d_y, \pm 12d_y, \dots$)、最終の $\pm 16d_y$ および $\pm 18d_y$ では繰返し回数は 1 回である。

予備解析は、上下のフーチングを剛体、杭とフーチングの結合条件を固定としたラーメンモデルが用いられた。杭の曲げモーメント-曲率関係は、全塑性モーメントを上限値とする弾完全塑性型であり、軸力は死荷重が用いられた。以上の解析方法は、道示 IV に示される方法と同様である。

解析により予測された全杭降伏時の水平荷重 P_y は、3 列供試体で 26.4 tf (259 kN)、4 列供試体で 35.6 tf (349 kN) である。ただし、3 列供試体では、これよりやや大きい 30 tf (294 kN) の水平荷重を作用させた時の水平変位を基準変位 d_s として繰返し載荷が行われている。すなわち、全杭降伏変位を $1d_y$ とした時、3 列供試体では $1.2d_y$ 、4 列供試体では $1.0d_y$ を基準変位として繰返し載荷が行われたことになる。

表-付 1.3.1 全杭降伏変位と試験における基準変位

供試体種別	全杭降伏時		基準変位 d_s	比 d_s / d_y
	水平荷重 P_y^*	水平変位 d_y^{**}		
3 列供試体	26.4 tf (259 kN)	5.1 mm	6.3 mm	1.2
4 列供試体	35.6 tf (349 kN)	4.0 mm	4.0 mm	1.0

*: 解析値、 **: 試験値（解析で得られた水平荷重を試験で与えた時の値）

2 試験結果

2.1 3列供試体（鋼管直杭）

3列供試体（鋼管直杭）の水平荷重と上フーチング下面における水平変位の履歴曲線を図-付 2.1.1に示す。図-付 2.1.2は、水平荷重 P を全杭降伏水平荷重 P_y により、水平変位 d を全杭降伏水平変位 d_y により正規化して表したものである。各载荷ステップにおける変状過程を表-付 1.1.1に、鋼管杭のひずみ分布を図-付 2.1.3～図-付 2.1.8に示す。

水平荷重と水平変位の履歴曲線は、正载荷側および負载荷側ともほぼ同様の値もしくは形状であり、正負交番载荷が良好に行われたことが確認できる。水平荷重の最大値は $6.1d_y$ ($5d_s$) で発揮され、 $7.3d_y$ ($6d_s$) では $6.1d_y$ と同等、 $8.5d_y$ ($7d_s$) 以降で少しずつ低下した。また、水平荷重-水平変位関係の履歴ループは、最大水平荷重が保持される $7.3d_y$ ($6d_s$) 程度まではエネルギー吸収能力の大きいことを表す紡錘型であり、3回の繰返しによる荷重低下も少ない。最大荷重以降は、履歴ループは逆S字型もしくはスリップ型へ変化している。

$6.1d_y$ のループの1サイクル目の正载荷時に全ての鋼管上下端に触るとわかる程度の塑性座屈が発生した。負载荷時には全ての鋼管の下端で大きな座屈が観察された。

以降座屈が進展するが、座屈の形状は $7.3d_y$ ($6d_s$)、 $8.5d_y$ ($7d_s$) では丸みを帯びたものであったが、 $9.8d_y$ ($8d_s$) では鋭角的なものへ変化し、最終的にはくびれが発生し破断に至り、試験が終了された。しかし、水平荷重の全杭降伏荷重程度までの低下は確認されなかった。

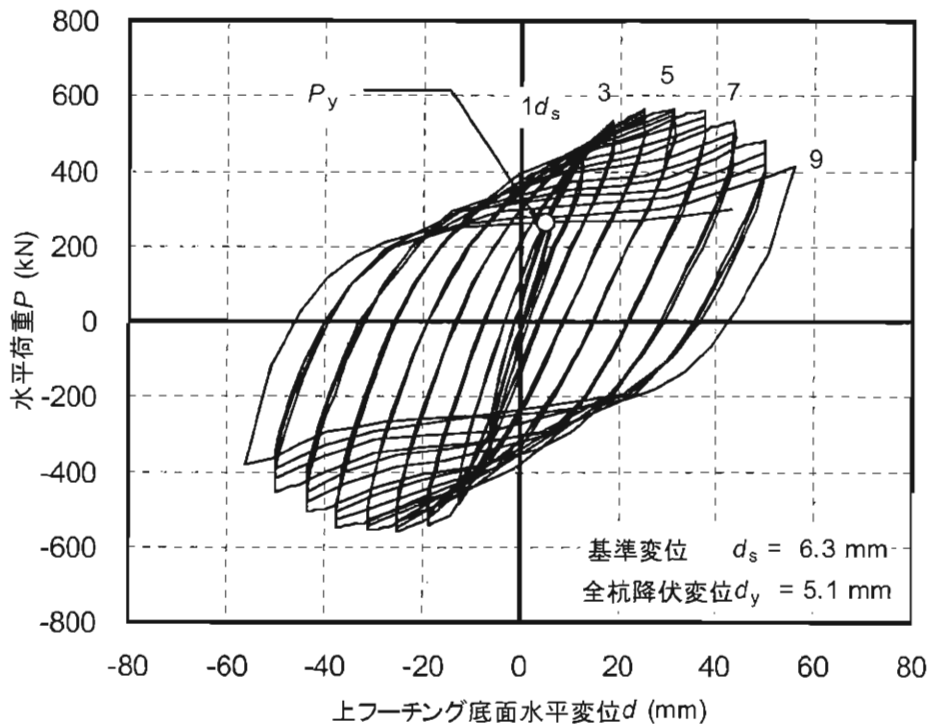


図-付 2.1.1 水平荷重-水平変位履歴曲線(3列供試体 / 鋼管直杭)

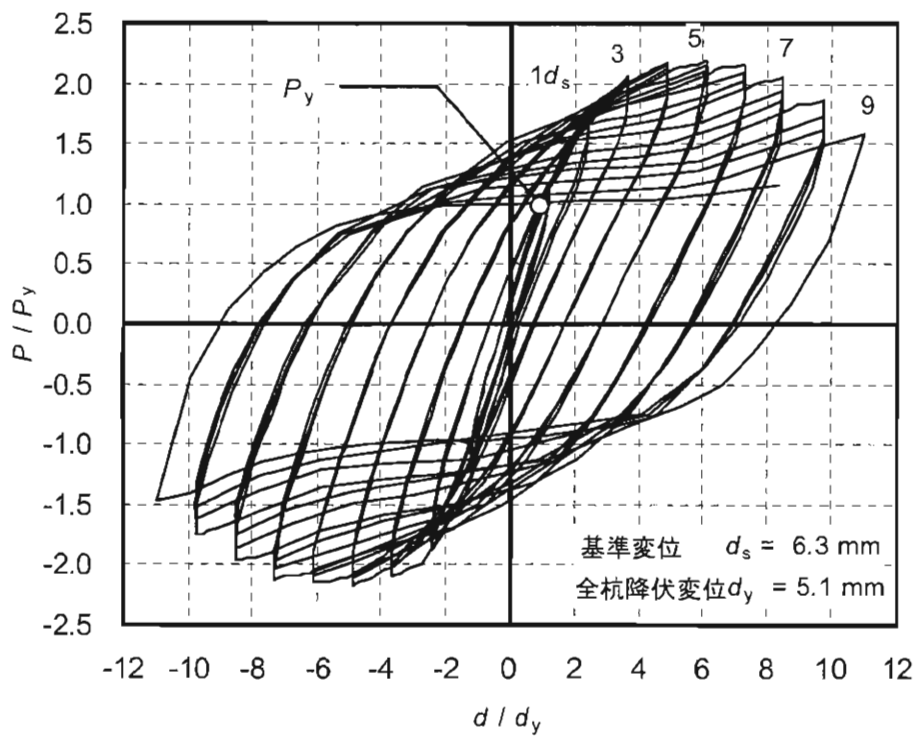


図-付 2.1.2 水平荷重-水平変位履歴曲線(3列供試体 / 鋼管直杭 正規化)

表-付 2.1.1(1) 3列供試体の変状過程(鋼管直杭)

	荷重P (kN)	変位d (mm)	杭の損傷度合い															
			杭4				杭5				杭6							
				東	西	南	北		東	西	南	北		東	西	南	北	
1.2d _y (1d _s)	正載荷①	294.3	6.3	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	負載荷①	-315.9	-6.3	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	正載荷②	300.2	6.3	-														
	負載荷②	-309.0	-6.2	-														
正載荷③	301.2	6.3	-															
負載荷③	-306.1	-6.2	-															
2.4d _y (2d _s)	正載荷①	438.5	12.5	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	負載荷①	-487.6	-12.5	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	正載荷②	459.1	12.5	-														
	負載荷②	-468.9	-12.5	-														
正載荷③	454.2	12.5	-															
負載荷③	-467.0	-12.5	-															
3.7d _y (3d _s)	正載荷①	533.7	18.8	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	負載荷①	-541.5	-18.8	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	正載荷②	529.7	18.8	-														
	負載荷②	-524.8	-18.8	-														
正載荷③	524.8	18.8	-															
負載荷③	-515.0	-18.8	-															
4.9d _y (4d _s)	正載荷①	564.1	25.1	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	負載荷①	-561.1	-25.0	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	正載荷②	560.2	25.2	-														
	負載荷②	-546.4	-25.1	-														
正載荷③	548.4	25.1	-															
負載荷③	-535.6	-25.1	-															
6.1d _y (5d _s)	正載荷①	566.0	31.3	上端	-	-	△	△	上端	-	-	△	-	上端	-	-	○	-
				下端	-	-	△	△	下端	-	-	△	-	下端	△	-	-	○
	負載荷①	-554.3	-31.3	上端	-	-	-	○	上端	-	-	-	○	上端	-	-	-	-
				下端	○	○	◎	-	下端	○	○	◎	○	下端	-	△	△	○
	正載荷②	557.2	31.3	-														
	負載荷②	-543.5	-31.3	-														
正載荷③	547.4	31.3	-															
負載荷③	-534.6	-31.3	-															

(凡例) - : 異常なし

△ : 目で見ても判らないが、触るとわかる程度の座屈

○ : 目で見ても判る程度の座屈

◎ : 丸みを帯びた大きな座屈

☆ : 鋭角な大きな座屈

★ : 板にくびれが入り始める

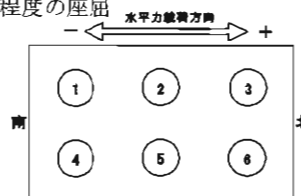


表-付 2.1.1(2) 3列供試体の変状過程(鋼管直杭)

		荷重P (kN)	変位d (mm)	杭の損傷度合い														
				杭4				杭5				杭6						
					東	西	南	北		東	西	南	北		東	西	南	北
7.3d _y (6d _s)	正載荷①	559.2	37.6	上端	-	-	-	-	上端	-	-	○	△	上端	-	△	◎	-
				下端	△	△	△	△	下端	○	○	○	◎	下端	○	○	-	◎
	負載荷①	-548.4	-37.6	上端	-	-	-	○	上端	-	-	△	○	上端	-	△	△	△
				下端	○	○	◎	△	下端	○	○	◎	○	下端	△	△	○	○
	正載荷②	543.5	37.5	-														
	負載荷②	-526.8	-37.5	-														
正載荷③	523.9	37.5	-															
負載荷③	-508.2	-37.5	-															
8.5d _y (7d _s)	正載荷①	531.7	43.8	上端	△	△	△	△	上端	△	○	○	○	上端	△	○	◎	△
				下端	○	○	◎	◎	下端	○	○	○	◎	下端	◎	◎	○	◎
	負載荷①	-509.1	-43.8	上端	○	○	△	◎	上端	△	○	○	◎	上端	△	△	○	△
				下端	◎	◎	◎	◎	下端	○	◎	◎	○	下端	◎	◎	◎	◎
	正載荷②	504.2	43.8	-														
	負載荷②	-481.7	-43.8	-														
正載荷③	480.7	43.8	-															
負載荷③	-453.2	-43.8	-															
9.8d _y (8d _s)	正載荷①	481.7	50.1	上端	○	○	○	○	上端	○	○	☆	○	上端	○	○	☆	○
				下端	◎	◎	◎	☆	下端	☆	◎	◎	☆	下端	☆	☆	◎	☆
	負載荷①	-454.2	-50.1	上端	◎	○	○	☆	上端	○	○	○	☆	上端	○	○	○	○
				下端	☆	☆	☆	☆	下端	☆	☆	☆	☆	下端	◎	◎	◎	◎
	正載荷②	448.3	50.1	-														
	負載荷②	-419.9	-50.1	-														
正載荷③	416.9	50.1	-															
負載荷③	-392.4	-50.1	-															
11.0d _y (9d _s)	正載荷①	412.0	56.3	上端	○	○	◎	◎	上端	○	◎	◎	○	上端	◎	◎	◎	◎
				下端	☆	☆	◎	☆	下端	☆	☆	◎	☆	下端	☆	☆	◎	★
	負載荷①	-382.6	-56.3	上端	☆	☆	◎	☆	上端	○	○	◎	☆	上端	◎	◎	◎	◎
				下端	☆	☆	★	☆	下端	☆	☆	☆	☆	下端	◎	◎	☆	★
	正載荷②			杭1および杭4の座屈部損傷 (P=30.6tf、d=43.17mm)														
	負載荷②			-														
正載荷③			-															
負載荷③			-															

(凡例) - : 異常なし

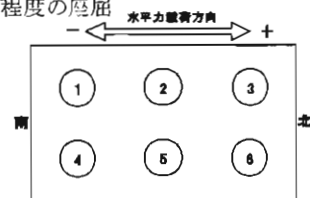
△ : 目で見ても判らないが、触るとわかる程度の座屈

○ : 目で見ても判る程度の座屈

◎ : 丸みを帯びた大きな座屈

☆ : 鋭角な大きな座屈

★ : 板にくびれが入り始める



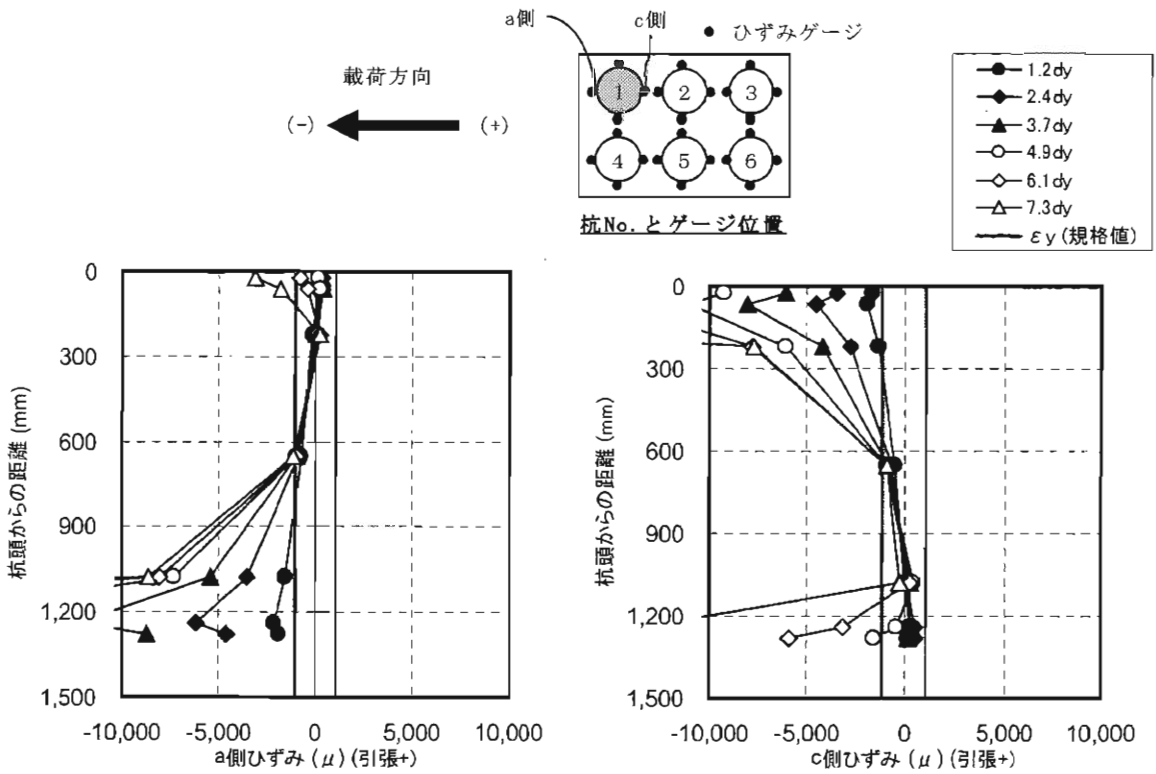
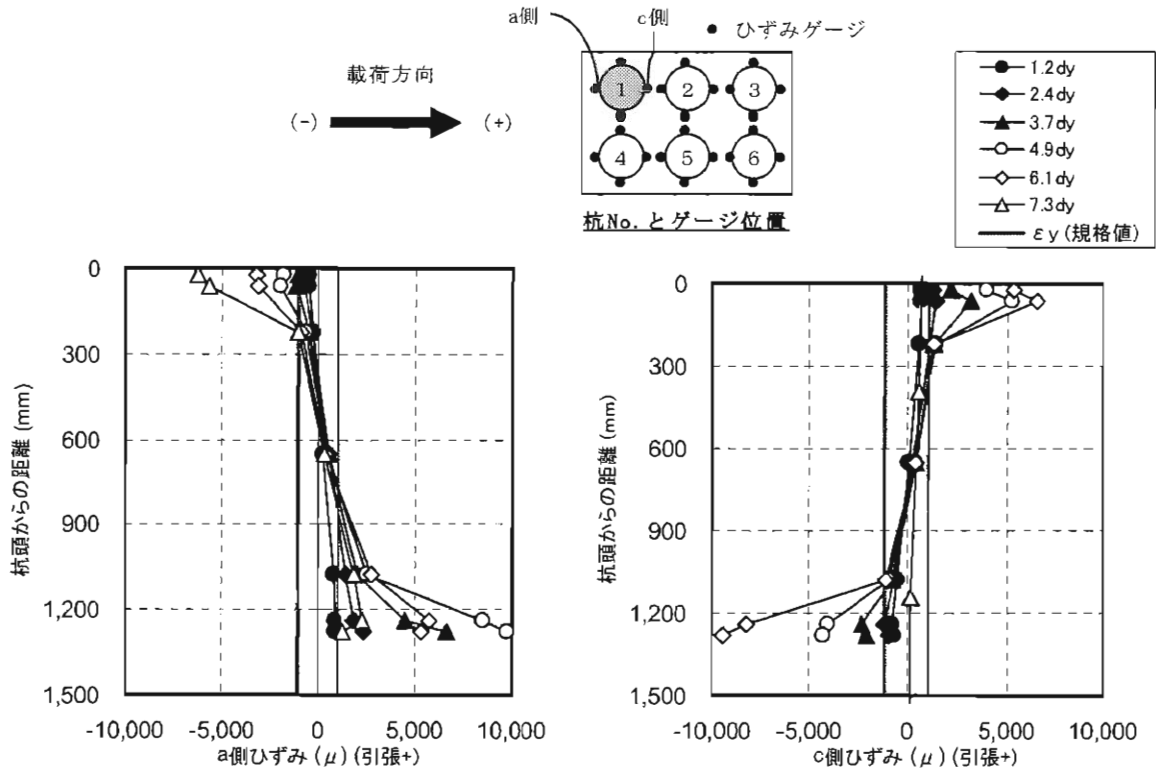


図-付 2.1.3 鋼管杭ひずみ分布(3列供試体 / 鋼管直杭 No.1 杭)

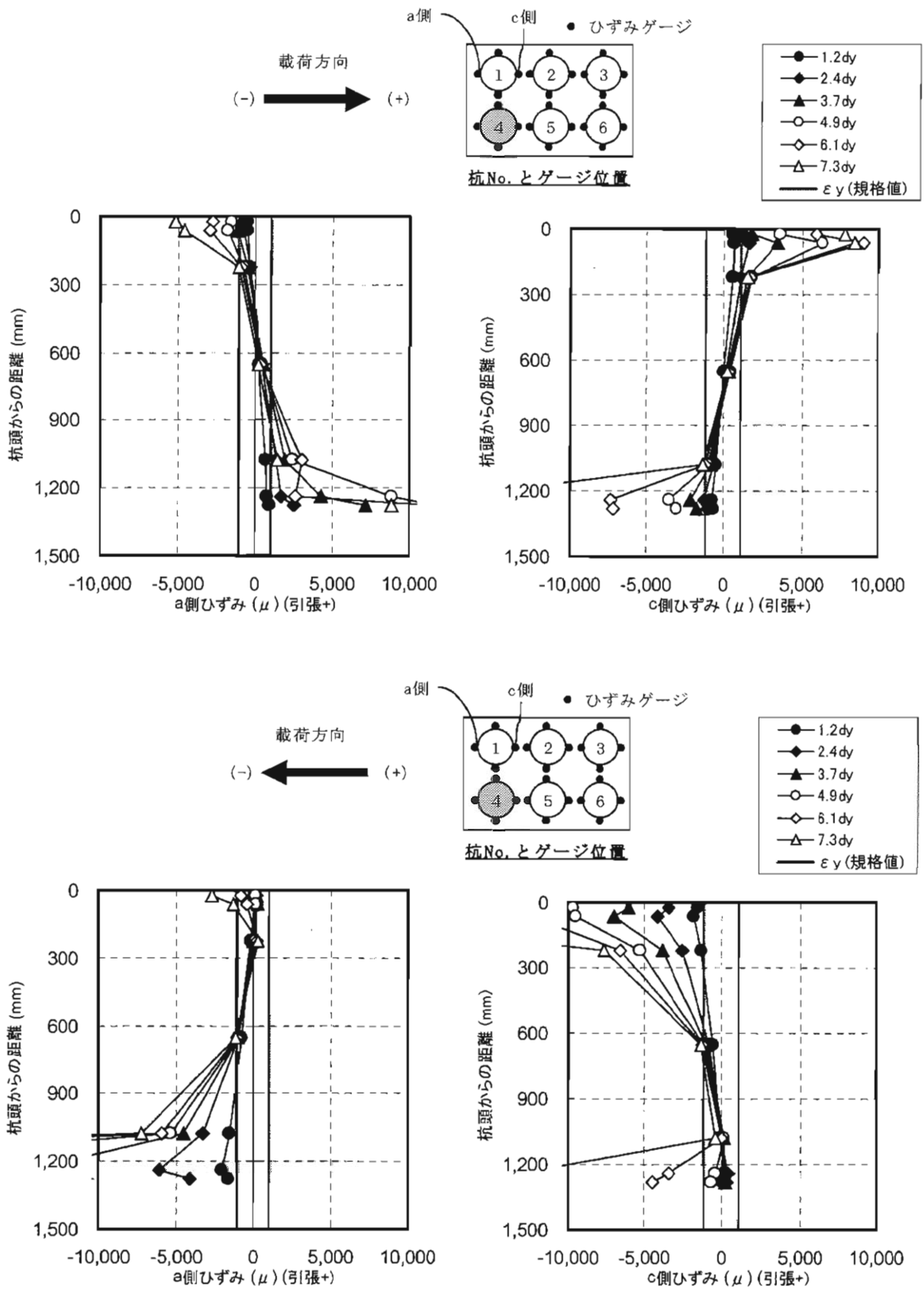


図-付 2.1.4 鋼管杭ひずみ分布(3列供試体 / 鋼管直杭 No.4 杭)

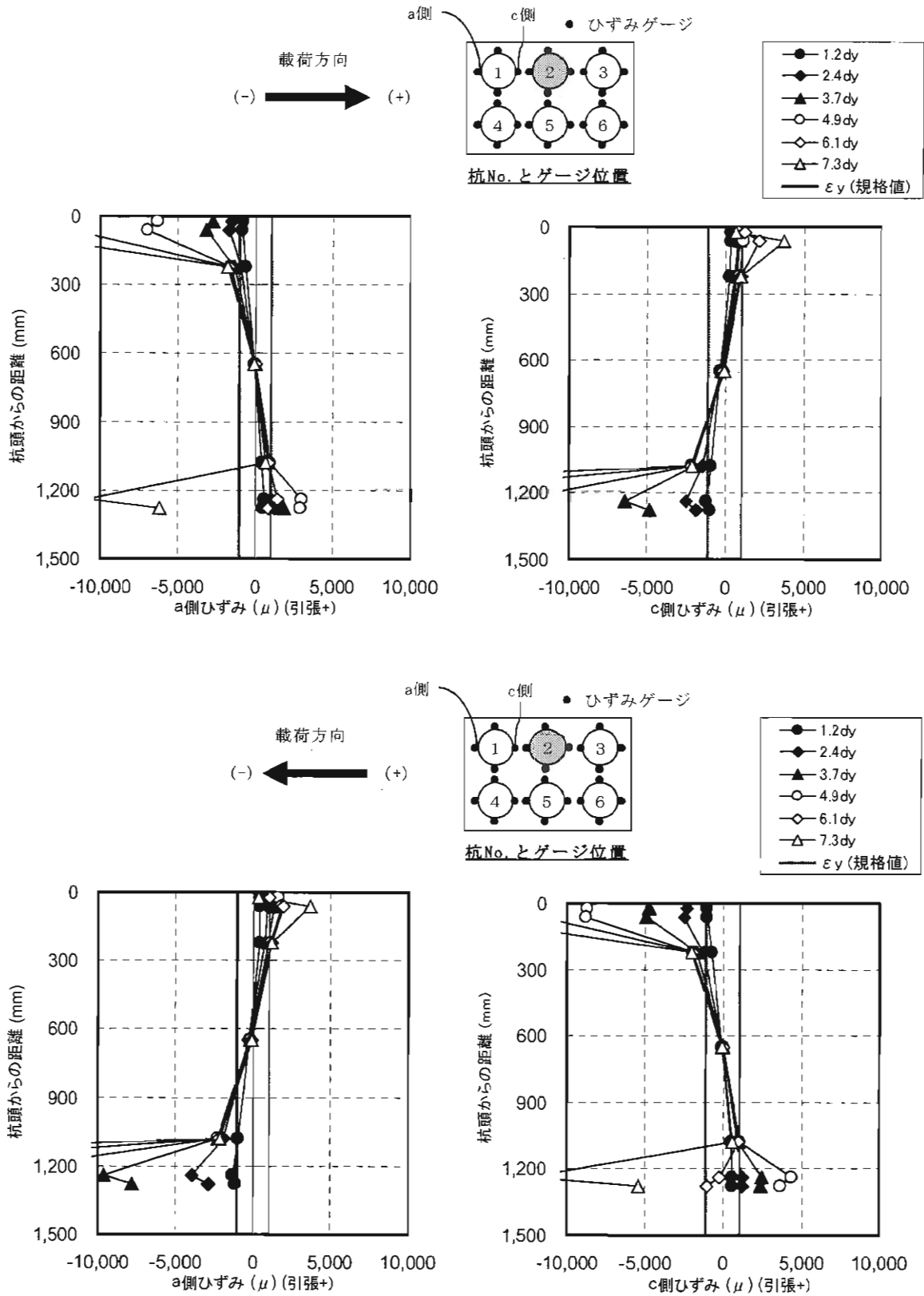


図-付 2.1.5 鋼管杭ひずみ分布(3列供試体 / 鋼管直杭 No.2 杭)

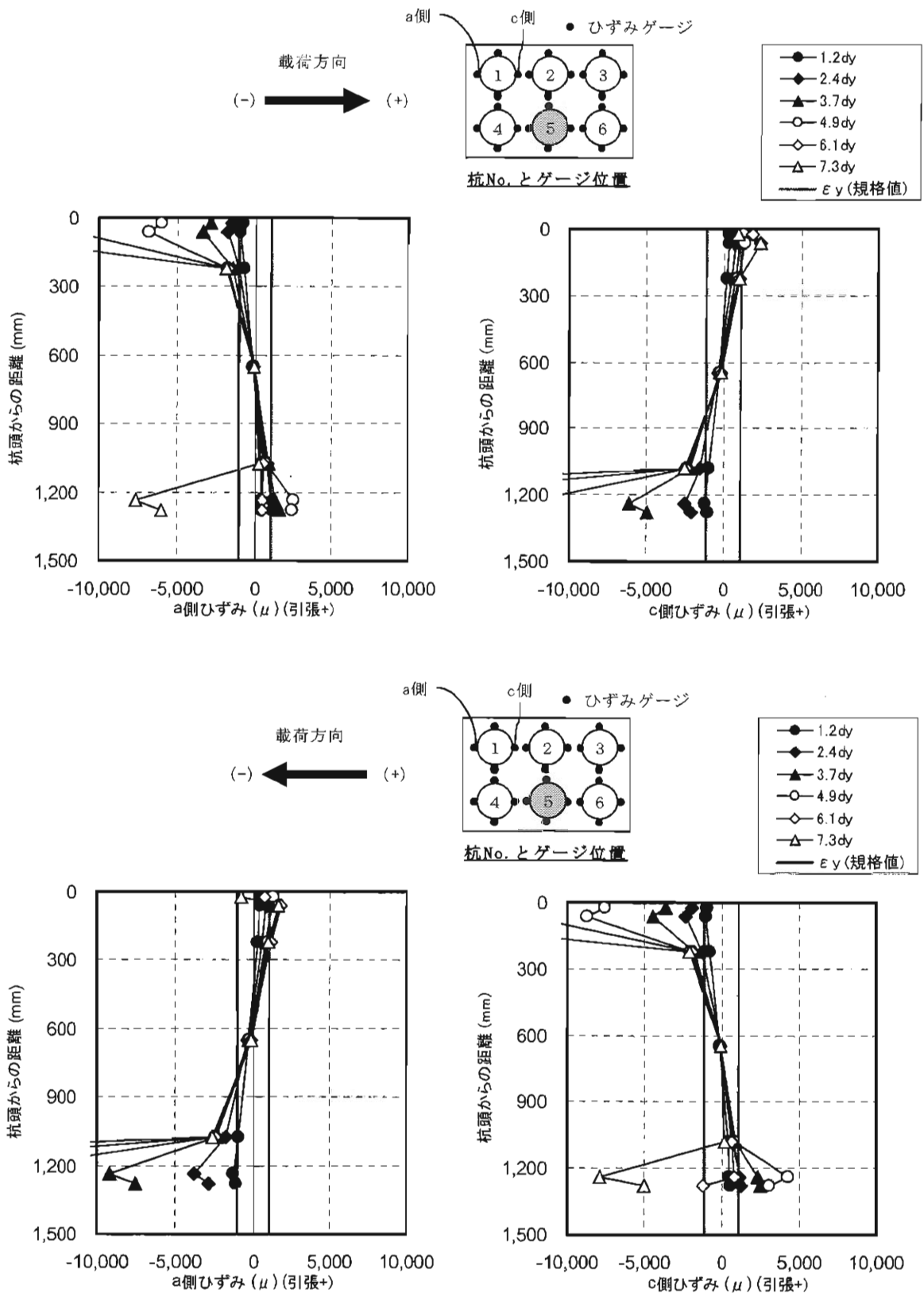


図-付 2.1.6 鋼管杭ひずみ分布(3列供試体 / 鋼管直杭 No.5 杭)

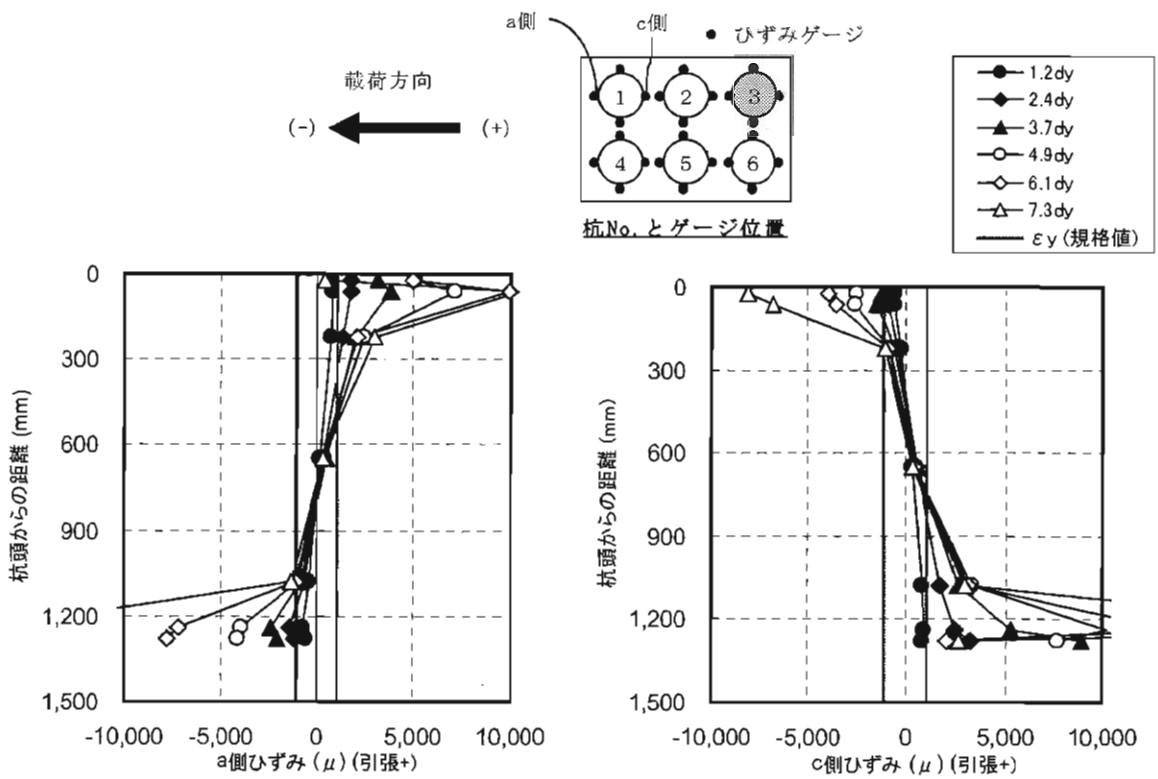
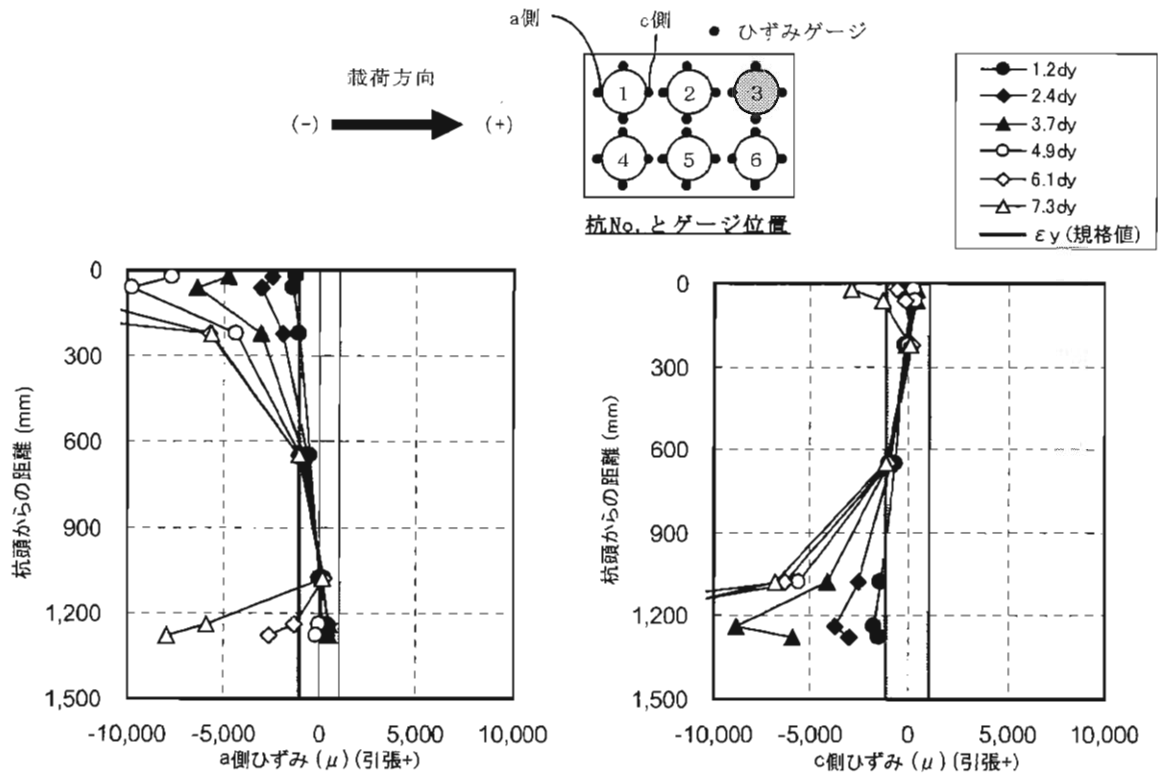


図-付 2.1.7 鋼管杭ひずみ分布(3列供試体 / 鋼管直杭 No.3 杭)

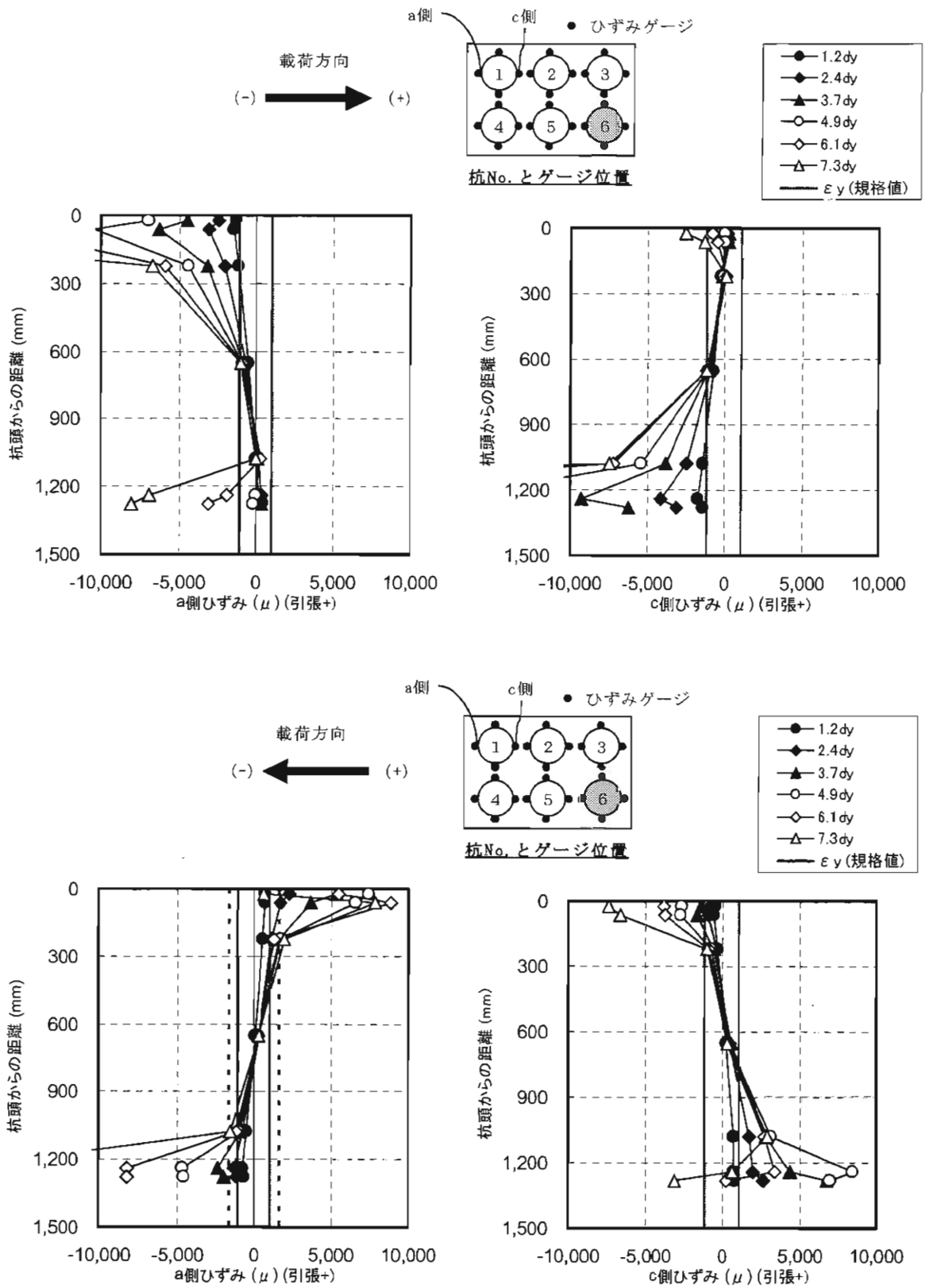


図-付 2.1.8 鋼管杭ひずみ分布(3列供試体 / 鋼管直杭 No.6杭)

2.2 4列供試体（鋼管直杭）

4列供試体の水平荷重と上フーチング下面における水平変位の履歴曲線を図-付 2.2.1に示す。図-付 2.2.2は、水平荷重 P を全杭降伏水平荷重 P_y により、水平変位 d を全杭降伏水平変位 d_y により正規化して表したものである。各載荷ステップにおける変状過程を表-付 2.2.1に、鋼管杭のひずみ分布を図-付 2.2.3～図-付 2.2.10に示す。

4列供試体においても3列供試体と同様に、水平荷重と水平変位の履歴曲線は、正載荷側および負載荷側ともほぼ同様の値もしくは形状であり、正負交番載荷が良好に行われたことが確認できる。水平荷重の最大値は $6d_y$ で発揮され、 $8d_y$ および $10d_y$ では $6d_y$ と同等、 $12d_y$ のループ以降少しずつ低下した。また、水平荷重-水平変位関係の履歴ループは、 $8d_y$ 程度まではエネルギー吸収の大きいことを表す紡錘型であり、3回の繰返しによる耐荷力の低下は少ない。最大荷重以降は、履歴ループは逆S字型もしくはスリップ型へと変化している。

$5d_y$ の1サイクル目の正載荷時に押込み側の杭（No.7,8）の下端に触るとわかる程度の塑性座屈が発生した。 $6d_y$ の1サイクル目の正載荷時には、目で見てわかる程度の塑性座屈が発生した。 $8d_y$ の1サイクル目の負載荷時には、全ての鋼管に目で見てわかる程度の塑性座屈が発生した。

以降座屈が進展するが、座屈の形状は $10d_y$ では丸みを帯びたものであったが、 $12d_y$ では鋭角的なものへ変化し、最終的にはくびれが発生し破断に至り、試験が終了された。しかし、水平荷重の全杭降伏荷重程度までの低下は確認されなかった。

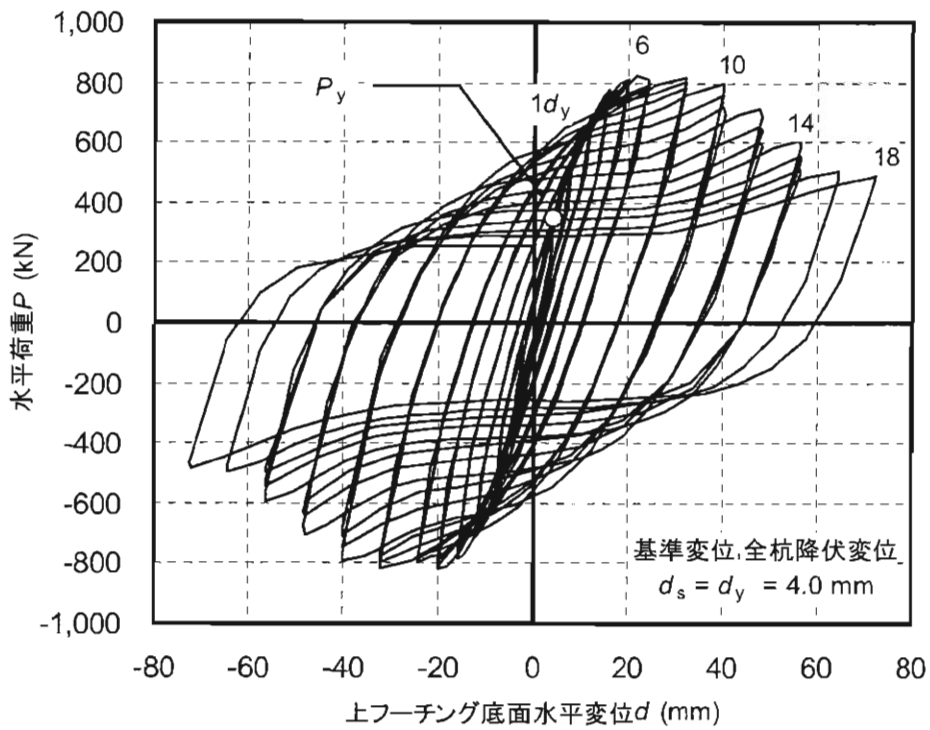


図-付 2.2.1 水平荷重-水平変位履歴曲線(4列供試体 / 鋼管直杭)

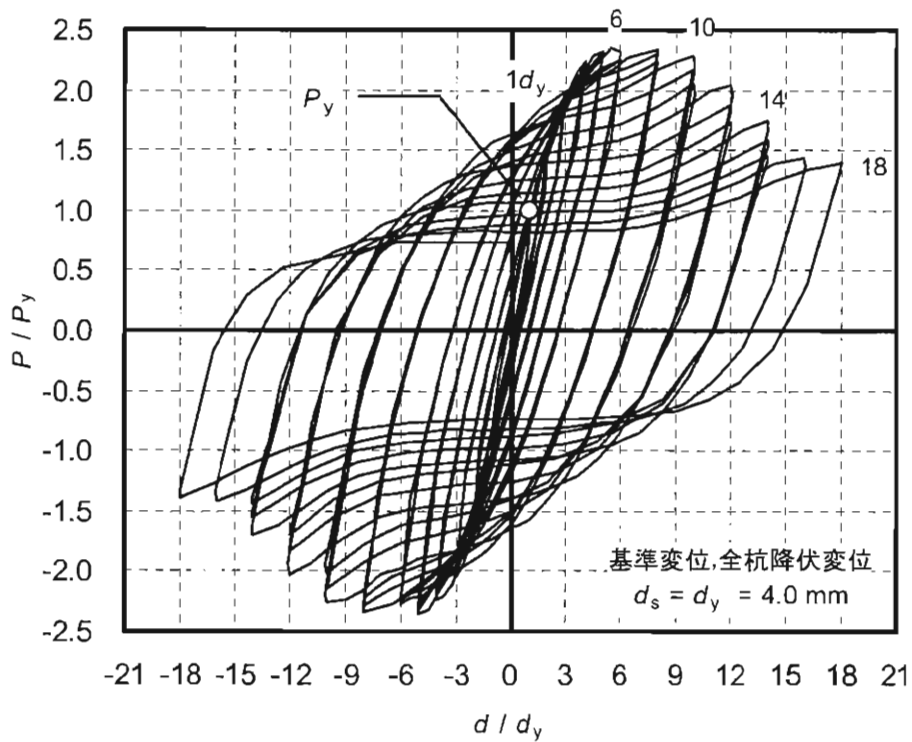


図-付 2.2.2 水平荷重-水平変位履歴曲線(4列供試体 / 鋼管直杭 正規化)

表-付 2.2.1(1) 4列供試体の変状過程(鋼管直杭)

	荷重P (kN)	変位d (mm)	杭の損傷度合い																				
			杭5				杭6				杭7				杭8								
			東	西	南	北	東	西	南	北	東	西	南	北	東	西	南	北					
1d _y	正載荷①	348.3	4.0	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	負載荷①	-329.6	-4.0	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	正載荷②	350.2	4.0	-																			
	負載荷②	-354.1	-4.0	-																			
正載荷③	347.3	4.0	-																				
負載荷③	-349.2	-4.0	-																				
2d _y	正載荷①	530.7	8.0	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	負載荷①	-578.8	-8.0	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	正載荷②	541.5	8.0	-																			
	負載荷②	-557.2	-8.0	-																			
正載荷③	544.5	8.0	-																				
負載荷③	-555.2	-8.0	-																				
3d _y	正載荷①	682.8	12.0	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	負載荷①	-712.2	-12.0	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	正載荷②	694.5	12.0	-																			
	負載荷②	-701.4	-12.0	-																			
正載荷③	684.7	12.0	-																				
負載荷③	-694.5	-12.0	-																				
4d _y	正載荷①	779.9	16.0	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	負載荷①	-782.8	-16.0	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	正載荷②	774.0	16.0	-																			
	負載荷②	-768.1	-16.0	-																			
正載荷③	764.2	16.0	-																				
負載荷③	-758.3	-16.0	-																				
5d _y	正載荷①	808.3	20.0	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	△	下端	-	-	-	△
	負載荷①	-820.1	-20.1	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	△	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	正載荷②	811.3	20.0	-																			
	負載荷②	-810.3	-20.1	-																			
正載荷③	804.4	20.0	-																				
負載荷③	-792.6	-20.0	-																				
6d _y	正載荷①	823.1	24.1	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	△	上端	-	-	-	○	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	○	下端	-	-	-	○	下端	-	-	-	○
	負載荷①	-794.6	-24.1	上端	-	-	○	-	上端	-	-	-	△	上端	-	-	-	△	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	○	下端	-	-	○	-	下端	-	-	△	-	下端	-	-	-	-
	正載荷②	789.7	24.0	-																			
	負載荷②	-782.8	-24.0	-																			
正載荷③	786.8	24.0	-																				
負載荷③	-778.9	-24.1	-																				

- (凡例) - : 異常なし
 △ : 目で見ても判らないが、触るとわかる程度の座屈
 ○ : 目で見て判る程度の座屈
 ◎ : 丸みを帯びた大きな座屈
 ☆ : 鋭角な大きな座屈
 ★ : 板にくびれが入り始める

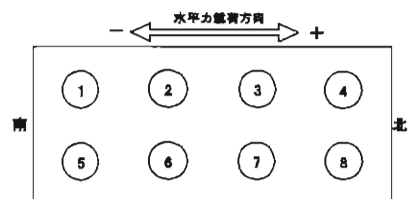


表-付 2.2.1(2) 4列供試体の変状過程(鋼管直杭)

	荷重P (kN)	変位d (mm)	杭の損傷度合い																				
			杭5				杭6				杭7				杭8								
				東	西	南	北		東	西	南	北		東	西	南	北		東	西	南	北	
8d _y	正載荷①	818.2	32.1	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-	上端	-	-	-	-
				下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-	下端	-	-	-	-
	負載荷①	-818.2	-32.1	上端	-	-	-	-	上端	-	-	○	-	上端	-	-	○	○	上端	-	-	◎	-
				下端	-	-	-	○	下端	-	○	-	○	下端	-	-	-	◎	下端	○	○	-	◎
	正載荷②	805.4	32.0																				
	負載荷②	-797.6	-32.0																				
正載荷③	781.9	32.0																					
負載荷③	-775.0	-32.1																					
10d _y	正載荷①	797.6	40.1	上端	○	○	◎	◎	上端	△	△	◎	△	上端	△	△	△	◎	上端	○	○	◎	○
				下端	△	△	○	◎	下端	○	○	◎	○	下端	○	○	◎	○	下端	○	○	◎	○
	負載荷①	-789.7	-40.0	上端	○	○	○	◎	上端	○	○	○	◎	上端	△	△	○	◎	上端	○	○	○	○
				下端	○	○	◎	○	下端	○	○	◎	○	下端	○	○	◎	○	下端	○	○	○	○
	正載荷②	758.3	40.1																				
	負載荷②	-747.5	-40.1																				
正載荷③	718.1	40.0																					
負載荷③	-703.4	-40.1																					
12d _y	正載荷①	715.1	48.1	上端	◎	☆	◎	◎	上端	○	○	◎	○	上端	○	○	◎	○	上端	◎	◎	☆	◎
				下端	◎	◎	◎	☆	下端	○	○	◎	◎	下端	○	○	◎	◎	下端	◎	◎	◎	☆
	負載荷①	-705.3	-48.1	上端	◎	◎	◎	☆	上端	○	○	◎	◎	上端	○	○	◎	◎	上端	◎	◎	☆	◎
				下端	◎	☆	◎	◎	下端	○	○	◎	◎	下端	○	○	◎	◎	下端	◎	◎	◎	☆
	正載荷②	655.3	48.1																				
	負載荷②	-641.6	-48.1																				
正載荷③	604.3	48.1																					
負載荷③	-591.5	-48.1																					
14d _y	正載荷①	608.2	56.1	上端	◎	◎	◎	◎	上端	◎	◎	◎	◎	上端	◎	◎	◎	◎	上端	◎	◎	☆	◎
				下端	◎	◎	◎	☆	下端	◎	◎	◎	◎	下端	◎	◎	◎	◎	下端	◎	◎	◎	☆
	負載荷①	-591.5	-56.1	上端	☆	☆	◎	☆	上端	◎	◎	◎	◎	上端	◎	◎	◎	◎	上端	◎	◎	☆	◎
				下端	☆	☆	◎	◎	下端	◎	◎	◎	◎	下端	◎	◎	◎	◎	下端	◎	◎	◎	☆
	正載荷②	554.3	56.1																				
	負載荷②	-539.6	-56.1																				
正載荷③	510.1	56.1																					
負載荷③	-499.3	-56.1																					
16d _y	正載荷①	502.3	64.1	上端	☆	☆	☆	◎	上端	◎	◎	☆	◎	上端	◎	◎	☆	☆	◎	◎	◎	☆	☆
				下端	☆	☆	◎	☆	下端	◎	☆	☆	◎	下端	◎	◎	◎	◎	下端	☆	☆	☆	△
負載荷①	-494.4	-64.1	上端	☆	☆	☆	☆	上端	☆	◎	☆	☆	上端	◎	◎	◎	◎	上端	◎	◎	☆	☆	
			下端	☆	☆	★	☆	下端	☆	☆	☆	☆	下端	◎	◎	◎	◎	下端	◎	◎	◎	★	
18d _y	正載荷①	490.5	72.2	上端	☆	☆	☆	★	上端	☆	☆	☆	☆	上端	☆	☆	☆	☆	上端	◎	◎	◎	☆
				下端	☆	☆	☆	☆	下端	☆	☆	☆	☆	下端	☆	☆	☆	☆	下端	☆	☆	☆	★
負載荷①	-482.7	-72.2	上端	☆	☆	☆	☆	上端	☆	☆	☆	☆	上端	☆	☆	☆	☆	上端	☆	☆	☆	☆	
			下端	☆	☆	☆	☆	下端	☆	☆	☆	☆	下端	☆	☆	☆	☆	下端	☆	☆	☆	★	

(凡例) - : 異常なし

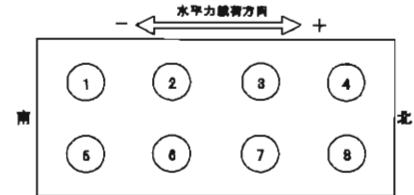
△ : 目で見ても判らないが、触るとわかる程度の座屈

○ : 目で見ても判る程度の座屈

◎ : 丸みを帯びた大きな座屈

☆ : 鋭角な大きな座屈

★ : 板にくびれが入り始める



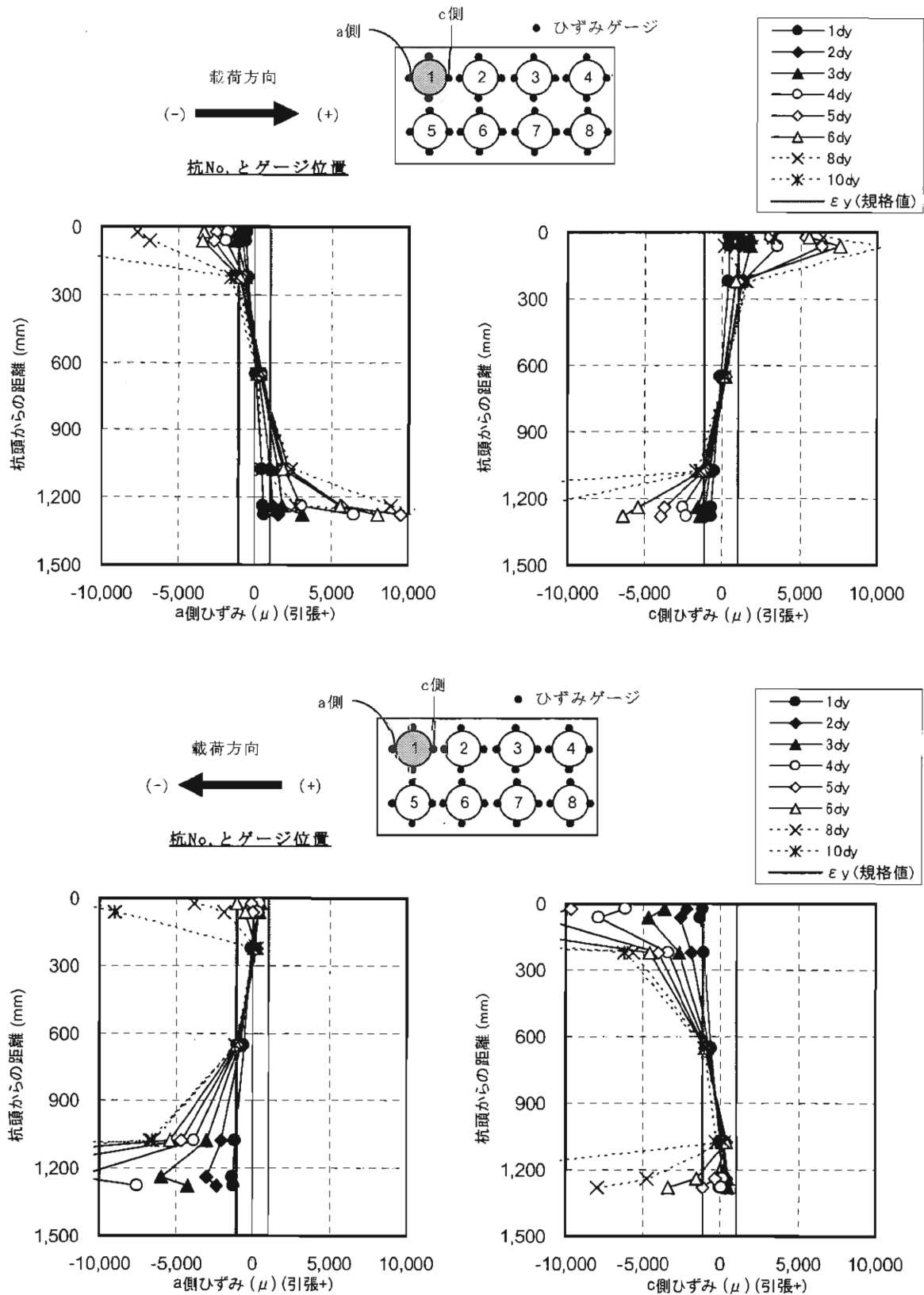


図-付 2.2.3 鋼管杭ひずみ分布(4列供試体 / 鋼管直杭 No.1 杭)

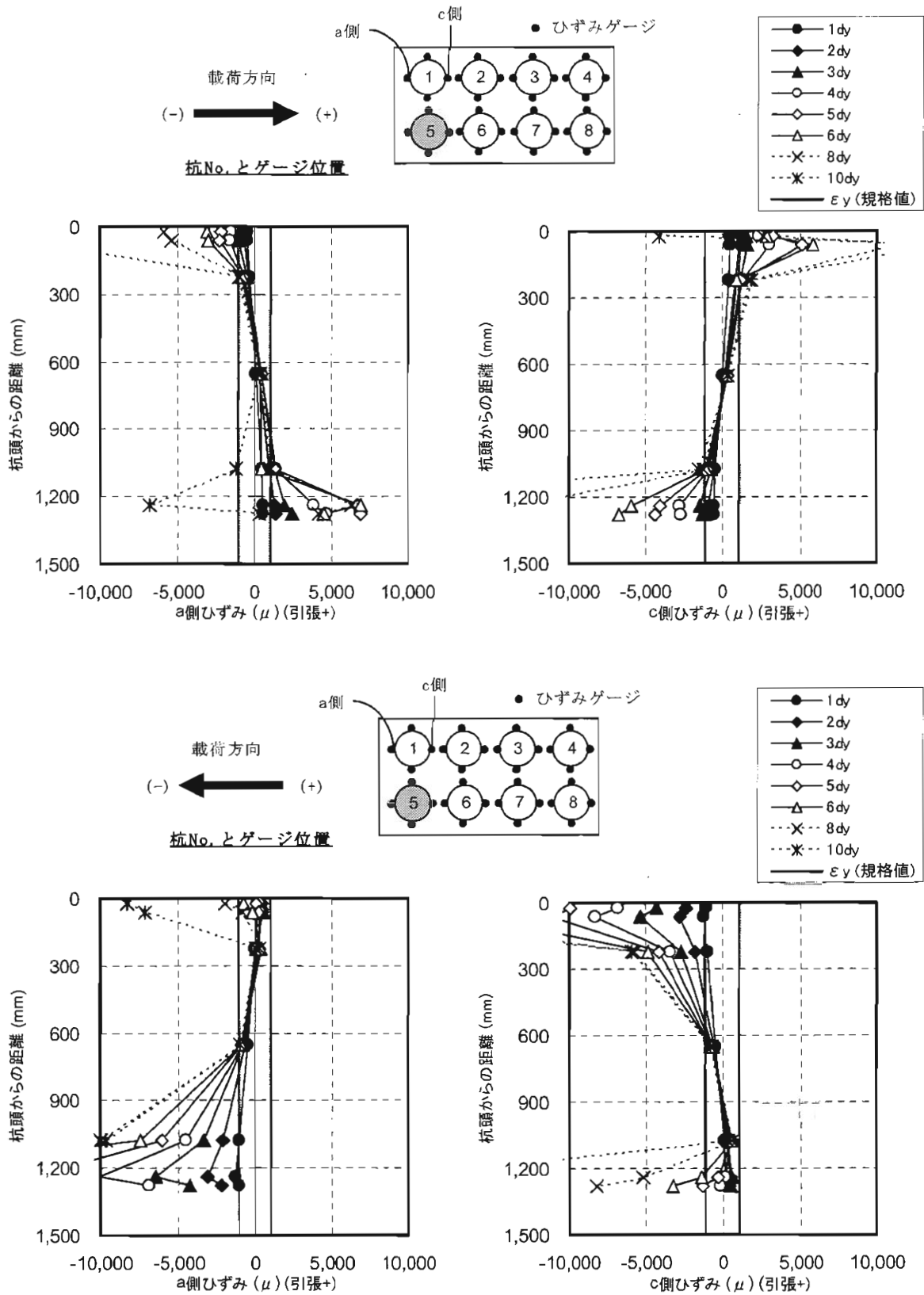


図-付 2.2.4 鋼管杭ひずみ分布(4列供試体 / 鋼管直杭 No.5 杭)

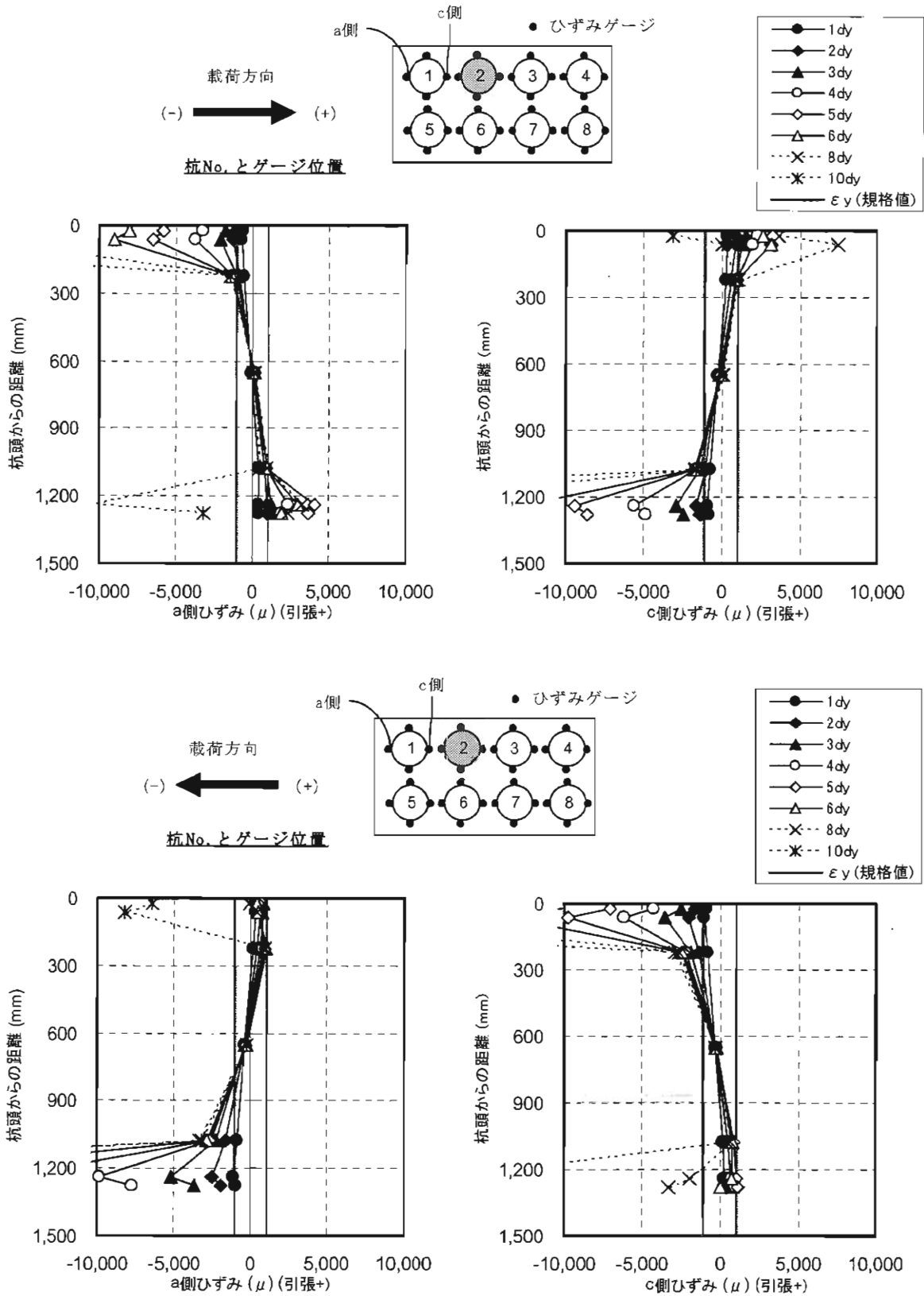


図-付 2.2.5 鋼管杭ひずみ分布(4列供試体 / 鋼管直杭 No.2 杭)

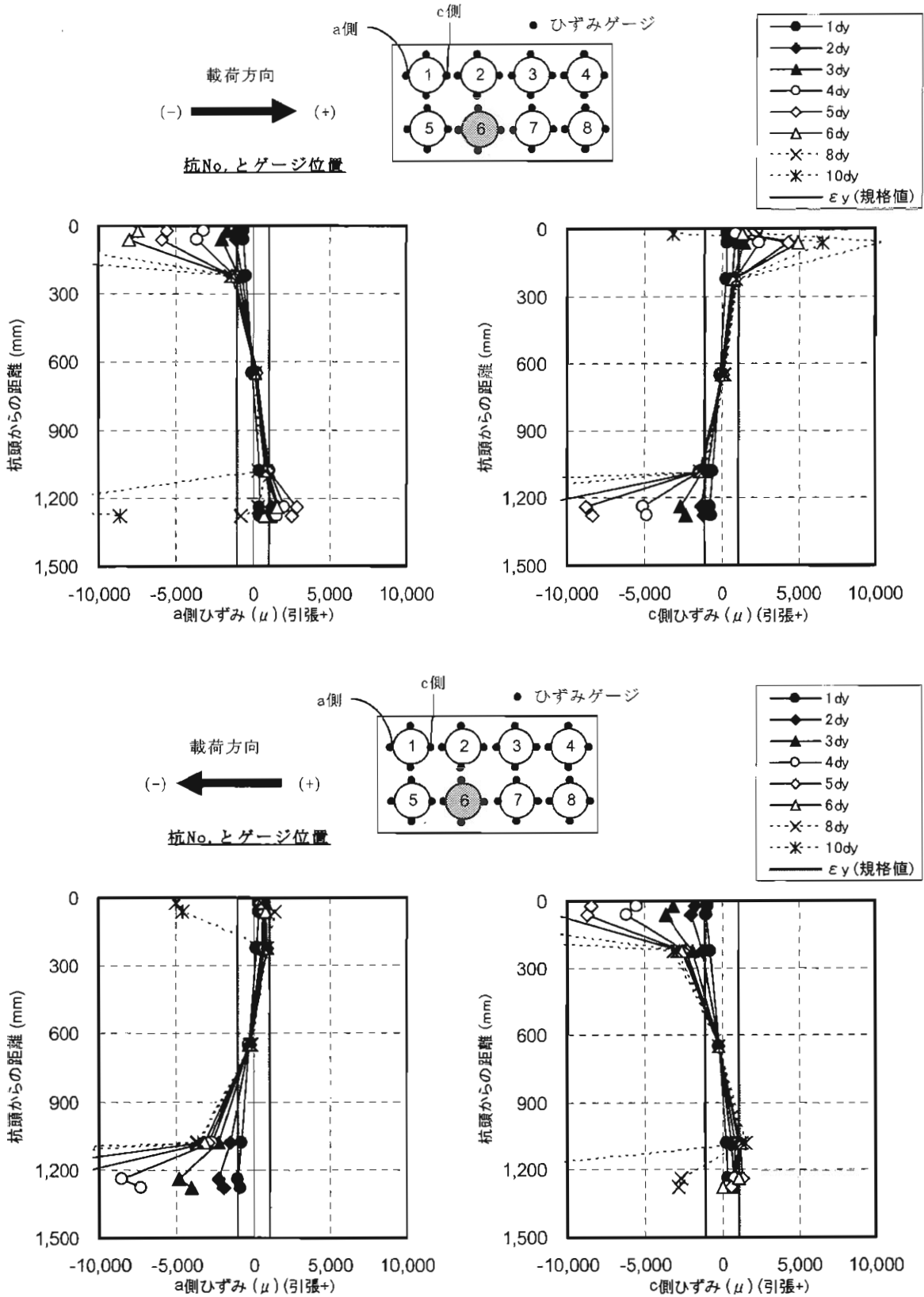


図-付 2.2.6 鋼管杭ひずみ分布(4列供試体 / 鋼管直杭 No.6 杭)

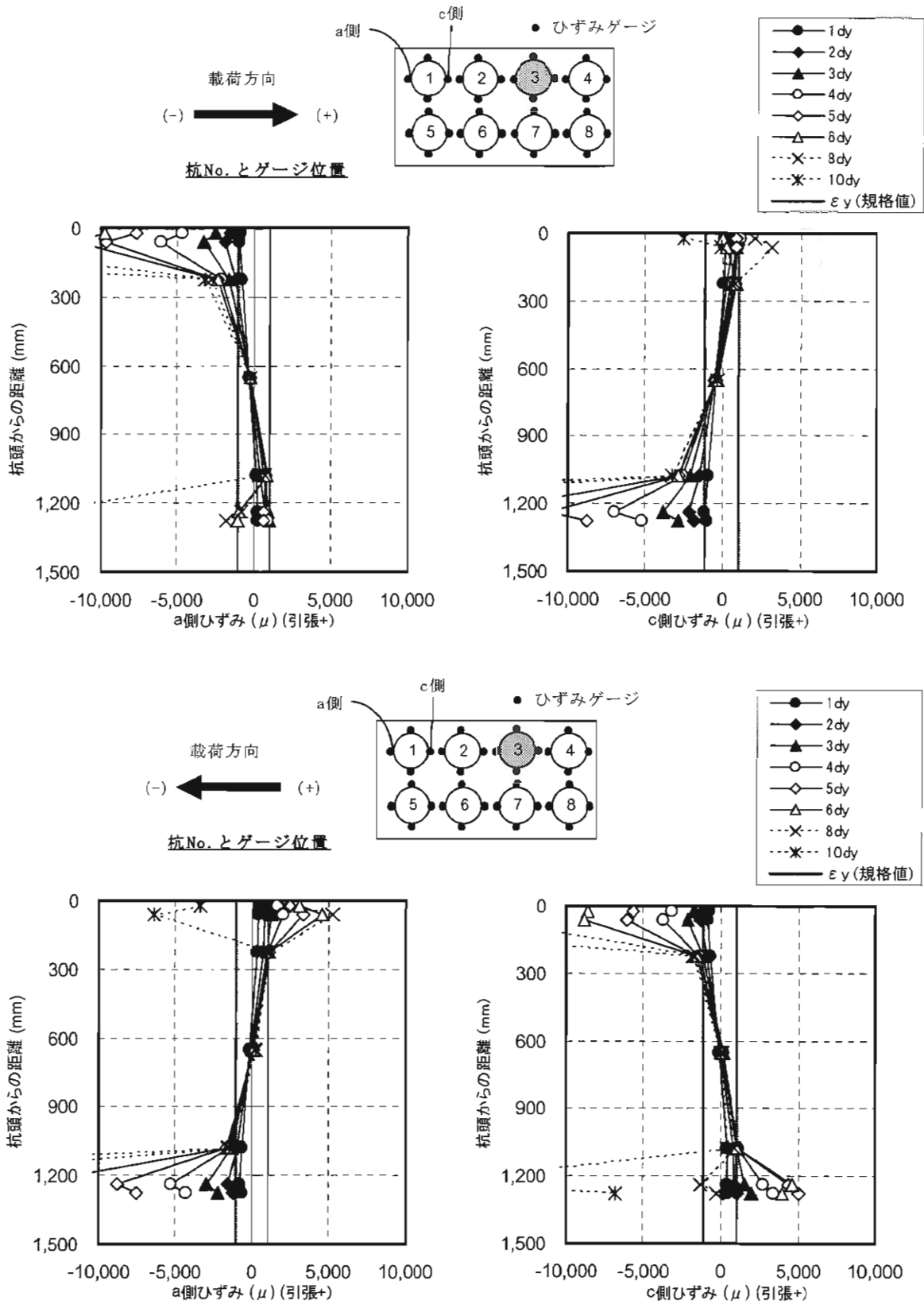


図-付 2.2.7 鋼管杭ひずみ分布(4列供試体 / 鋼管直杭 No.3 杭)

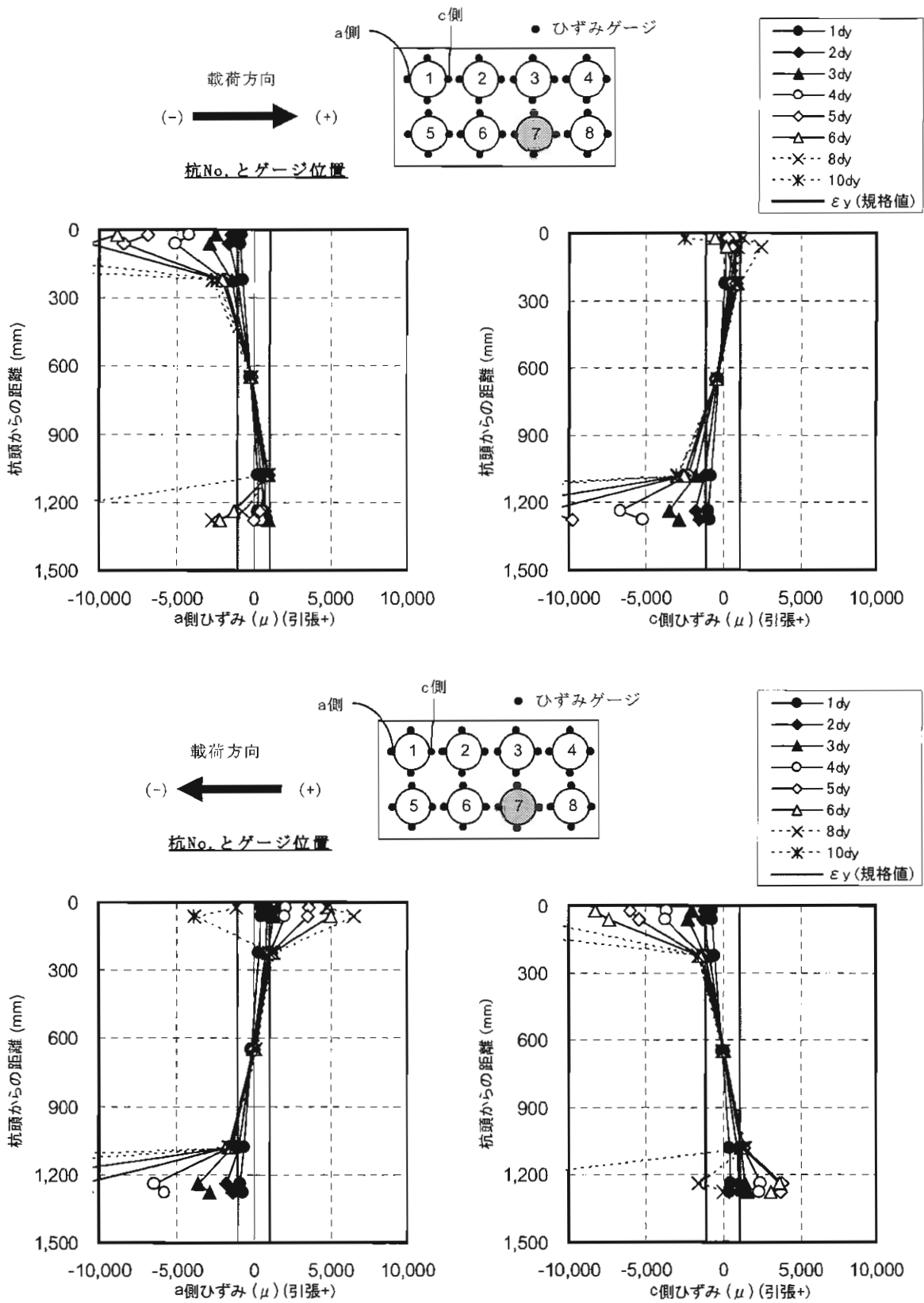


図-付 2.2.8 鋼管杭ひずみ分布(4列供試体 / 鋼管直杭 No.7 杭)

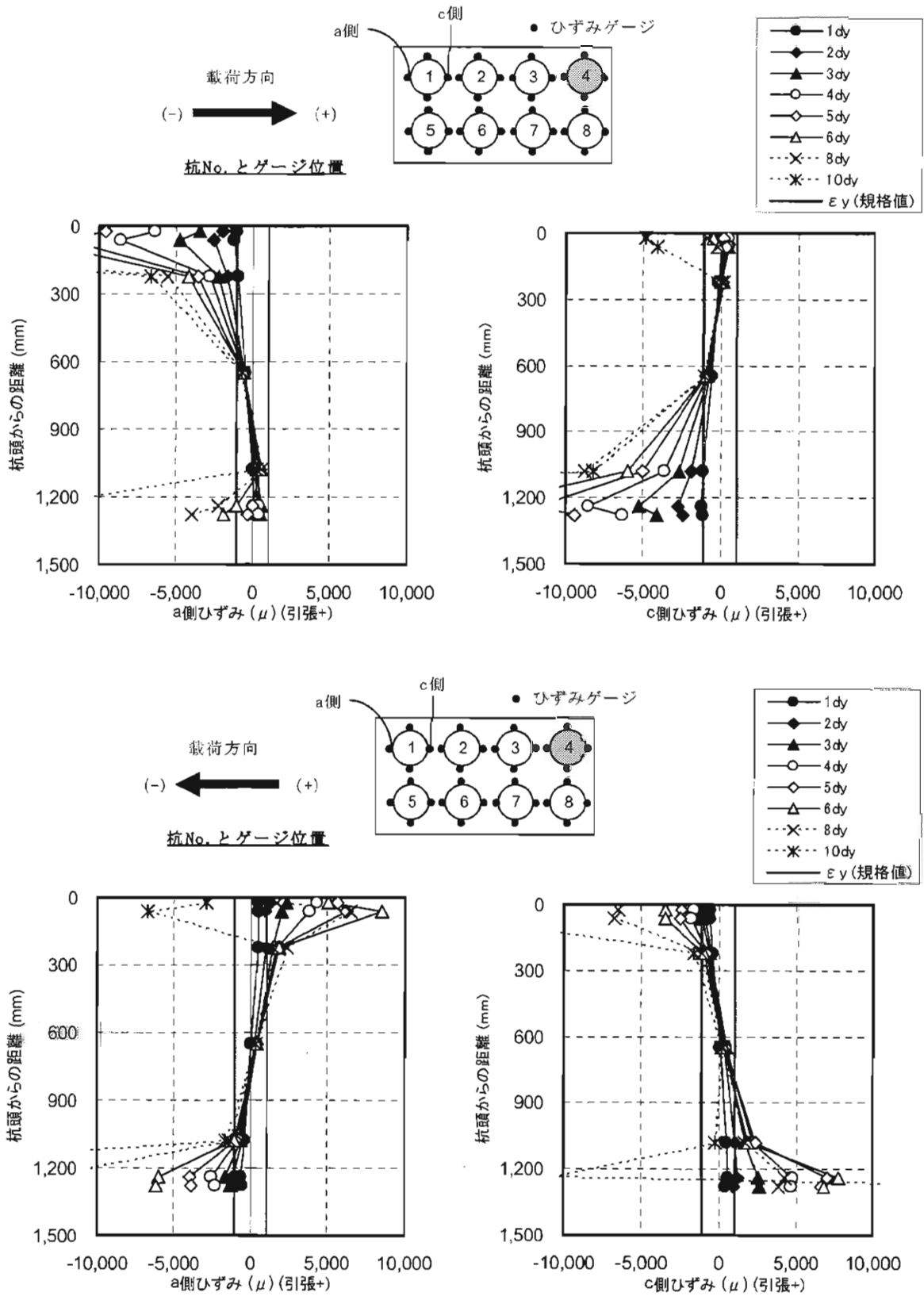


図-付 2.2.9 鋼管杭ひずみ分布(4列供試体 / 鋼管直杭 No.4 杭)

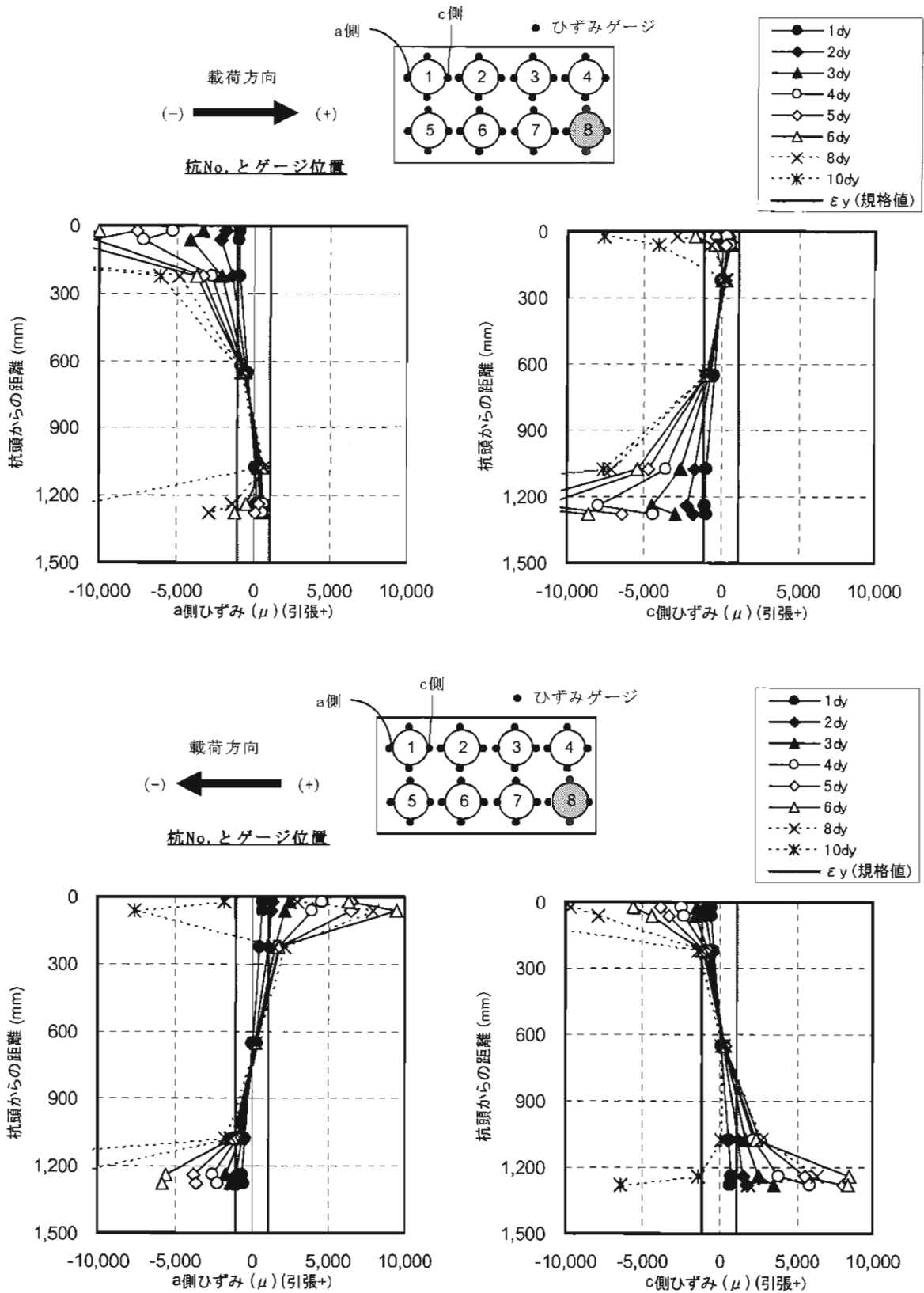


図-付 2.2.10 鋼管杭ひずみ分布(4列供試体 / 鋼管直杭 No.8 杭)

参考文献

- 1) 中野 正則, 木村 嘉富, 石澤 毅, 嶋津 晃臣, 小山 清一: 鋼管杭基礎の模型水平載荷実験 (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 次郎, 木村 嘉富, 吉田 映, 鈴木 規彦, 平田 尚: 鋼管杭基礎の模型水平載荷実験 (その 2)、第 32 回地盤工学研究発表講演集, pp.1575-1576, 1997.7.
- 3) 中谷 昌一, 白戸 真大: 深い基礎の許容塑性率に関する工学的意義について, 土木研究所資料第 4030 号, 2006.12.

付属資料Ⅱ 巻末 CD データ集(鋼管斜杭組杭,鋼管直杭組杭)について

1. データ利用上の注意

土木研究所資料第 4108 号の巻末 CD には、鋼管斜杭組杭および鋼管直杭組杭の計測データが収録されています。巻末 CD に収録された計測データは、制限なく使用することができます。ただし、データの利用実績を蓄積することによってデータ提供の必要性・有益性を把握するため、次の 2 点についてご協力をお願い致します。

- ・ 計測データを利用した時は、その旨を参考文献等に明示して下さい。
- ・ 計測データを用いて作成された学術論文・報告書等で、印刷物等が出版・公開された場合は、コピーを下記に送付して下さい。これには、大学等における卒業論文、学会講演の予稿集・商用利用時の報告書等も含まれます。送付いただくのは、随時あるいは年度末等にまとめてでも構いません。

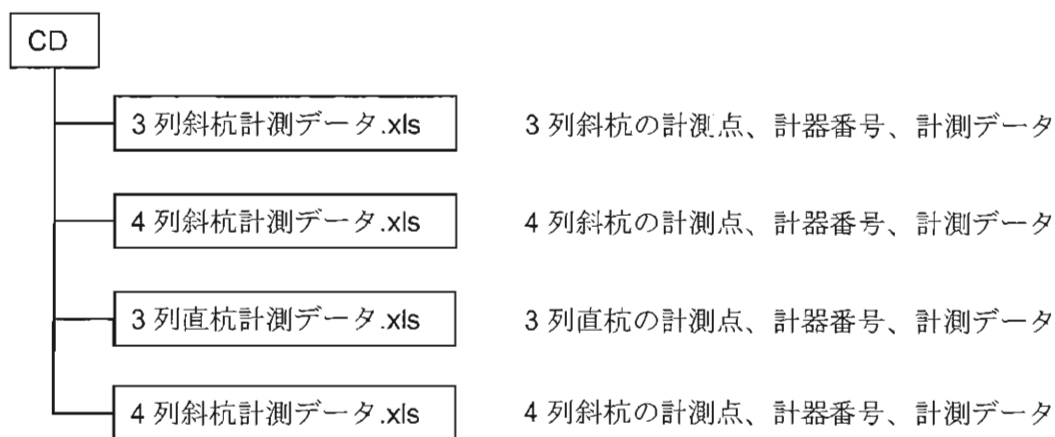
〒305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6

独立行政法人 土木研究所

構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ

2. CD の構成

巻末 CD の構成は次のとおりである。



3. データ様式

各ファイルの書式は全て同じである。「3列斜杭計測データ.xls」を例に、書式を示す。

計器番号一覧					
CH	計器番号	測定項目	測定場所	単位	備考
001	P1	鉛直荷重	鉛直ジャッキ	kN	鉛直ジャッキ伸長方向+ 荷重計
002	P2	水平荷重	水平ジャッキ	kN	水平ジャッキ伸長方向+ 荷重計
003	D-P1	鉛直ジャッキストローク	鉛直ジャッキ	mm	鉛直ジャッキ伸長方向+ 変位計
004	D-P2	水平ジャッキストローク	水平ジャッキ	mm	水平ジャッキ伸長方向+ 変位計
005	D-1	水平変位	上フーチング底面	mm	水平ジャッキ伸長方向+ SDP-200D
006	D-2		上フーチング底面	mm	水平ジャッキ伸長方向+ SDP-200D
007	D-3		上フーチング下面(巻き取り式)	mm	水平ジャッキ伸長方向+ DTP-05
008	D-4		水平ジャッキ位置	mm	水平ジャッキ伸長方向+ DTP-05
009	D-5		上フーチング側面	mm	水平ジャッキ伸長方向+ DTP-1M
010	D-6		上フーチング側面	mm	水平ジャッキ伸長方向+ SDP-200R
011	D-7		上フーチング側面	mm	水平ジャッキ伸長方向+ DTP-05
012	D-8		上フーチング側面	mm	水平ジャッキ伸長方向+ SDP-200D
013	D-9		軸方向変位	上フーチング	mm
014	D-10	上フーチング		mm	鉛直ジャッキ伸長方向+ SDP-100
015	D-11	上フーチング		mm	鉛直ジャッキ伸長方向+ SDP-100
016	D-12	上フーチング		mm	鉛直ジャッキ伸長方向+ SDP-100

CH	001	002	003	004	005	006	007	008
計器番号	P1	P2	D-P1	D-P2	D-1	D-2	D-3	D-4
単位	kN	kN	mm	mm	mm	mm	mm	mm
1	6.58	4.27	0	0	0	0	0	0
2	-1.44	-1.99	0	0.17	0.04	-0.1	0	0
3	-0.86	-5.08	0	2.45	-0.14	0	0.6	0.45
4	172.48	2.98	0.01	-0.04	-0.1	0	0.6	0.4
5	624.6	5.04	0	-0.03	-0.04	0	0.6	0.4
6	653.96	0.75	0.01	-0.17	-0.04	-0.02	0.6	0.4
7	716.86	4.27	0.02	-0.2	0	-0.02	0.6	0.4
8	867.38	2.85	0.02	-0.1	0	0	0.6	0.4
9	1041.48	2.01	0	-0.26	-0.02	-0.02	0.6	0.4
10	899.64	4.8	0	-0.08	0.04	-0.02	0.6	0.4
11	897	16.65	0.05	0.05	0.18	-0.02	0.6	0.35
12	896.88	27.76	-0.01	0.27	0.3	0	0.6	0.35
13	896.7	29.91	0.02	0.3	0.38	0.02	0.7	0.45
14	896.2	47.88	0	0.25	0.5	0.08	0.6	0.5
15	896.1	47.34	0.01	0.38	0.54	0.08	0.6	0.5
16	895.68	66.93	0.02	0.58	0.68	0.14	0.6	0.65
17	895.26	77.19	-0.01	0.63	0.78	0.2	0.7	0.85
18	894.8	83.13	0.01	0.73	0.84	0.24	0.6	0.8
19	894.18	102.19	0.04	0.91	1.04	0.36	1	1
20	893.44	114.96	0	1.2	1.18	0.5	1.3	1.2
21	892.96	124.56	0	1.07	1.26	0.6	1.3	1.25