

軸力を考慮した4本鋼管群杭の保有水平耐力に関する実験的研究

木村 亮*・山仲 徹**・福林良典*・吉田 敦*

*京都大学大学院工学研究科

**日本国土開発

要 旨

鋼管杭は円筒形の鋼材であるために、変形追従性のよい特性を持ちながら、局部座屈という小さな変形時で終局限界となる弱点を有し、限界状態設計法では不利になると言われてきた。そこで、杭頭部にコンクリートを充填して座屈を防止し、せん断耐力を高めて終局限界状態を鋼材の破断強度の付近まで持続せしめる、複合構造が用いられる。本研究では、中詰めされた4本鋼管群杭の保有水平耐力を検討するために、まず気中において軸力を考慮した水平載荷試験を実施した。さらに、砂地盤中の鋼管群杭基礎の遠心載荷実験を実施し、杭頭部の充填コンクリートの効果（水平耐力の増大、変形性能と初期剛性の向上）を確認した。

キーワード：鋼管群杭、繰返し水平力、保有水平耐力、軸力、中詰めコンクリート

1. はじめに

鋼管杭基礎は、支持力・変形性能・施工性等に優れた特性を有する基礎工法で、幅広い分野にわたって長年の需要があり、年間60～100万トンの鋼管杭が生産されている。

現在、土木建築の構造物の設計方法は、世界的に許容応力度設計法から限界状態設計法へと移りつつある。基礎構造も例外ではなく、限界状態設計法への移行を模索しつつある。すなわち、破壊に対する安全率という考え方から、構造物の利用面から定められた限界状態に対する安全係数（余裕）で設計する考え方である。例えば、使用限界状態は正常な使用ができなくなったり、耐久性を損なったりする状態で、終局限界状態は部材が破壊したり、座屈や大変形で安定や機能を失う状態と定義できる。

鋼管杭は円筒形の鋼材であるために、変形追従性の

よい特性を持ちながら、局部座屈という小さな変形時で終局限界となる弱点を有すると言われ、限界状態設計法では不利になると言われてきた。そこで、鋼管杭基礎の座屈を防止し、せん断耐力を高めて終局限界状態を鋼材の破断強度の付近まで持続せしめることによって、鋼管杭の特性を最大限に発揮させることを研究の目標とした。具体的には、モーメントの最大となる杭頭部にコンクリートを充填し、座屈を抑制するとともにせん断補強の効果を図り、杭の破壊は曲げ破壊で迎えるようにした。

一方、平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、土木建築の構造物に多大な被害を与えた。幾つかの壊滅的な被災例を受けて、決定的な損壊を防ぐには終局状態でも形状を保持することが求められている。すなわち、構造物に大きな変形性能とせん断耐力を付与するような設計基準が必要とされている。特に、基礎には被災後の検査や修復が困難であること、基礎を

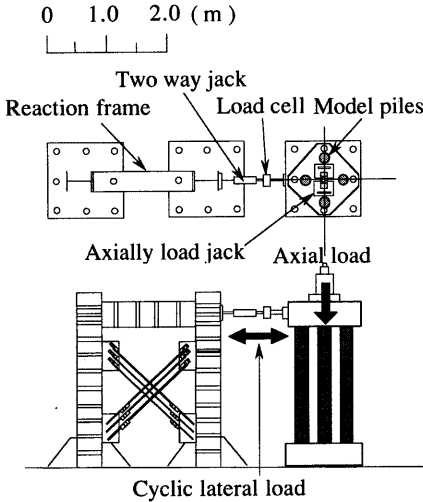


Fig.1 Test apparatus

Table 1 Properties of large scale test pile

Length	2000 mm
Diameter (D)	216.3 mm
Steel thickness (t)	4.5 mm
D/t	48.07
Stiffness (EI)	$3.53 \times 10^9 \text{ kgf-cm}^2$
Axial load per pile	60 tf
Material type	STK400

再構築すると構造物全体を更新せざるを得なくなること、迅速な復旧を図るには修復作業を気中の躯体や上部構造に留めたいことなどから、基礎の耐力と靱性は気中部分よりも大きいことが必要とされている。

このように、構造物のせん断耐力や変形性能を照査する考え方は、限界状態設計法と非常に馴染むものである。

上記の目標を達成するために、まず第1段階として気中において、Fig.1に示す要領で水平載荷試験を実施した（塩井ら、1996）。試験は鋼管杭のモーメント最大となる杭頭部にコンクリートを充填して座屈を防ぐとともにせん断補強の効果を図り、破壊は曲げ破壊で抑えられるようにすることをねらったものである。

- : Lateral displacement gauge
- : Axial displacement gauge
- ◇ : Inclinometer
- : Pile

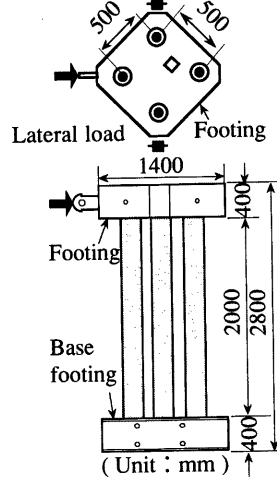


Fig.2 Arrangement of piles

すなわち、杭頭部の充填コンクリートの効果を調べ、鋼管杭基礎の変形性能も向上を図ろうとするものである。本来ならば地盤中の杭基礎に対し試験を行うのが現実的であるので、第2段階として砂地盤中の鋼管群杭基礎の遠心載荷実験を実施し、杭頭部の充填コンクリートの効果を確認した。

2. 気中における大縮尺模型実験

2.1 実験方法

(1) 試験体

本実験で用いた模型杭の諸元をTable 1に示すが、相似律を考慮しなくても良い程度の大きさと考えられる。試験体はFig.2に示すように4本の模型杭のボックス配列で、上下にコンクリートのフーチングを有する構造とした。また今回用いる試験体は、鋼管杭の中詰コンクリートの長さに応じて、Fig.3に示すような中詰無（H-pile）、1D中詰（1D-pile）、3D中詰（3D-pile）、全長中詰（C-pile）の4種類とした。

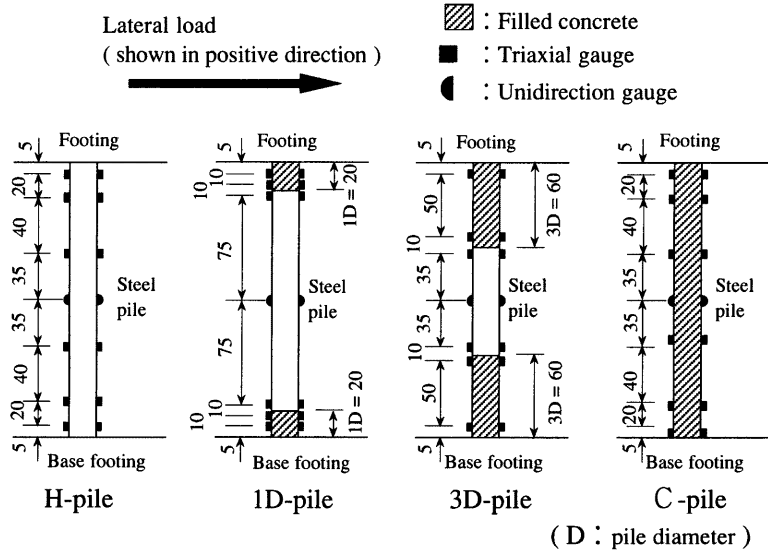


Fig.3 Types of model pile

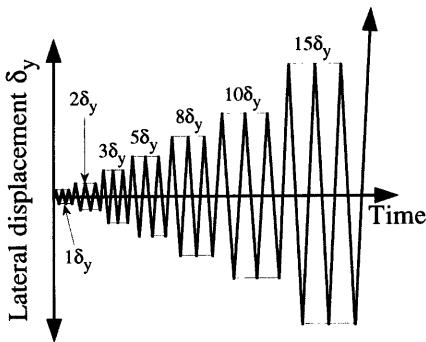


Fig.4 Applied load path

$1\delta_y, \pm 2\delta_y, \pm 3\delta_y, \pm 5\delta_y, \pm 8\delta_y, \pm 10\delta_y, \pm 15\delta_y$ を最大変位とするサイクルで、各サイクル3回の正負繰返し载荷を行った。载荷の様子はFig.4に示すとおりである。 $\pm 15\delta_y$ の終了後、正方向に一方方向終局载荷を試みた。計測項目は水平荷重、水平変位、垂直変位、傾斜、杭体ひずみであり、その計測位置はFig.2, Fig.3の中に示している。

2.2 実験結果および考察

(1) 荷重～変位関係

水平荷重と上フーチングの水平変位の関係をFig.5に示す。図から各ケースの群杭基礎に対して以下のことがわかる。

1) 中詰無

$8\delta_y$ で最大荷重を迎え、このとき、局部座屈の兆候がみられた。それから、荷重変位曲線は負勾配となり、次第に耐力が低下していく。

2) 全長中詰

$8\delta_y$ で座屈の兆候が現れるものの、 $15\delta_y$ でも耐力の微増がみられ、杭径程度の変位になっても水平耐力の低下は見られない。この場合は鋼管の塑性座屈とフーチングの亀裂が進行しているの、実質的な終局限界状態であった。

(2) 载荷方法

Fig.1に実験装置の概略図を示す。床を反力としてセンターホールジャッキで一定軸力60tfをかけながら、両動ジャッキで繰返し水平力を与えた。

载荷に先立ち、鋼管杭モデルが降伏(鋼管の外周線応力が降伏応力に到達する)を始める水平変位量 δ_y を算定した。この変位量 δ_y (5.26mm)を基準に、 \pm

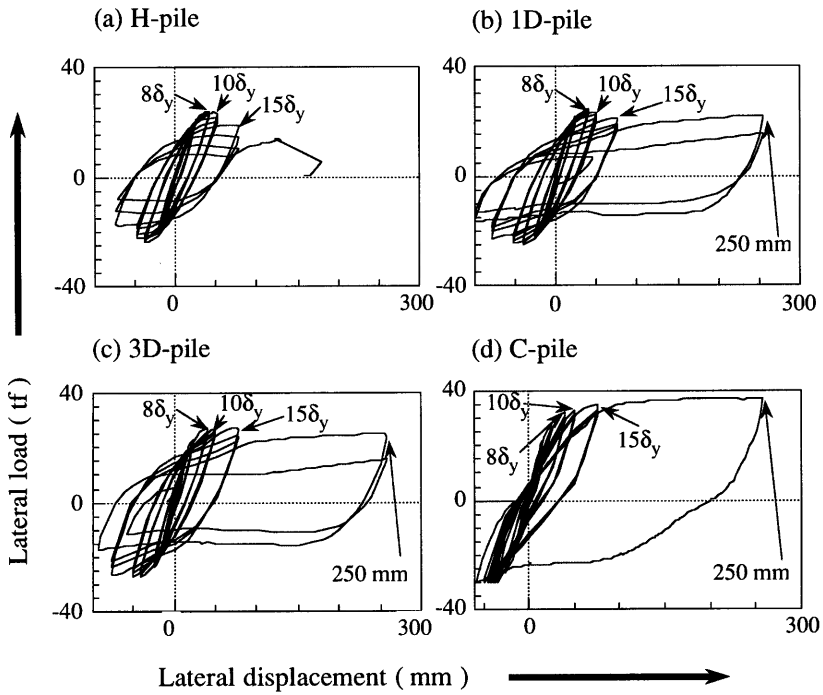


Fig.5 Load-displacement relation

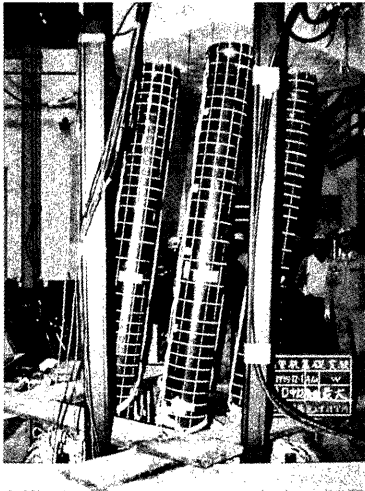


Photo. 1 Final condition of 1D-piles

3) 1D中詰

$8\delta_y$ で最大荷重を迎え、座屈の兆候が現れるが、その後の荷重変位曲線の負勾配は緩やかで、杭径程度の変位までわずかの耐力低下で追従している。最大変位時の杭体の様子をPhoto.1に、杭下部の座屈の様子をPhoto.2に示す。

4) 3D中詰

$8\delta_y$ で全長中詰と1D中詰の中間の相当する最大荷重と局部座屈の兆候がみられるが、その後の変位における耐力の低下は1D中詰よりも少ない。いずれの試験体においても $15\delta_y$ では鋼管の下部の円周に沿って塑性座屈が見られ、上部でも塑性座屈もしくはその兆候が発生している。そのために中詰コンクリートが著しく破損していると推定して、試験後に座屈部の鋼管を切り取って調べた。Photo.3は1D中詰の鋼管内のコンクリートの状況である。

Fig.6に中詰コンクリートの破壊状況を示す。杭1、杭3についてのみ調査を行った。1D中詰では杭1、杭3とも上下端部から10cm付近のクラックが目立つ。3D

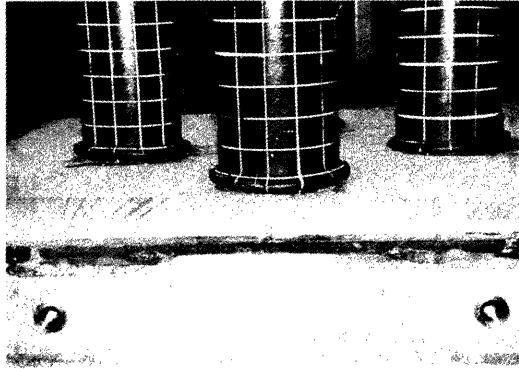


Photo. 2 Buckling zones of 1D-piles

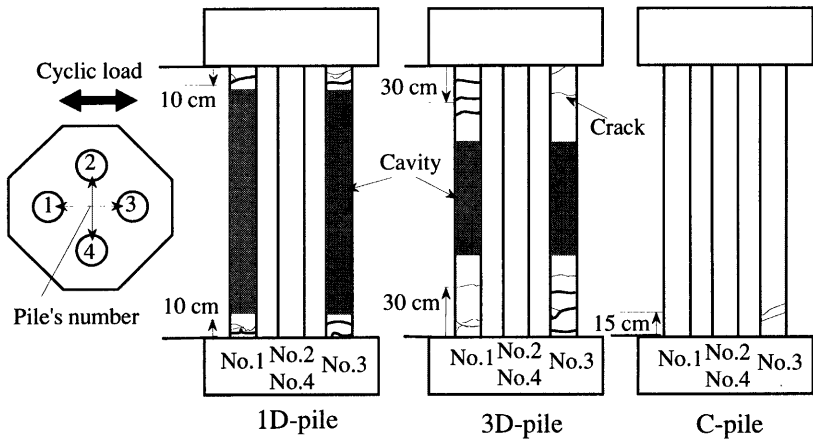


Fig. 6 Failure pattern of filled concrete

中詰では上下端部から30cm付近で大きなクラックが見られた。いずれも座屈部分より中央よりに大きなクラックが入っている。これに対し全長中詰では、杭3のみに下端部から15cmの付近で細いクラックが見られる程度で、明確なクラックはほとんどみられなかった。

Fig. 7は各試験体の水平荷重と水平変位の曲線の包絡線を示したものである。コンクリートの充填を多くすると剛性もわずかに向上するが、最大水平耐力とその後の変形追従性が著しく向上する。しかし、全長中

詰、3D中詰は経済的に不利である。1D中詰は1990年発行の道路橋示方書に示されている方法である。最大水平耐力よりは多少低下するが、杭径程度の変位でも追従できるので、靱性の確保という点からは実用には十分耐えられるものと考えられる。

(2) 杭体のひずみ分布

Fig. 8は、各試験体の4本群杭のうち、中立軸に位置する鋼管（杭2）の荷重側側面に張り付けられた塑性ゲージの記録である。1D中詰、3D中詰杭ではひずみ

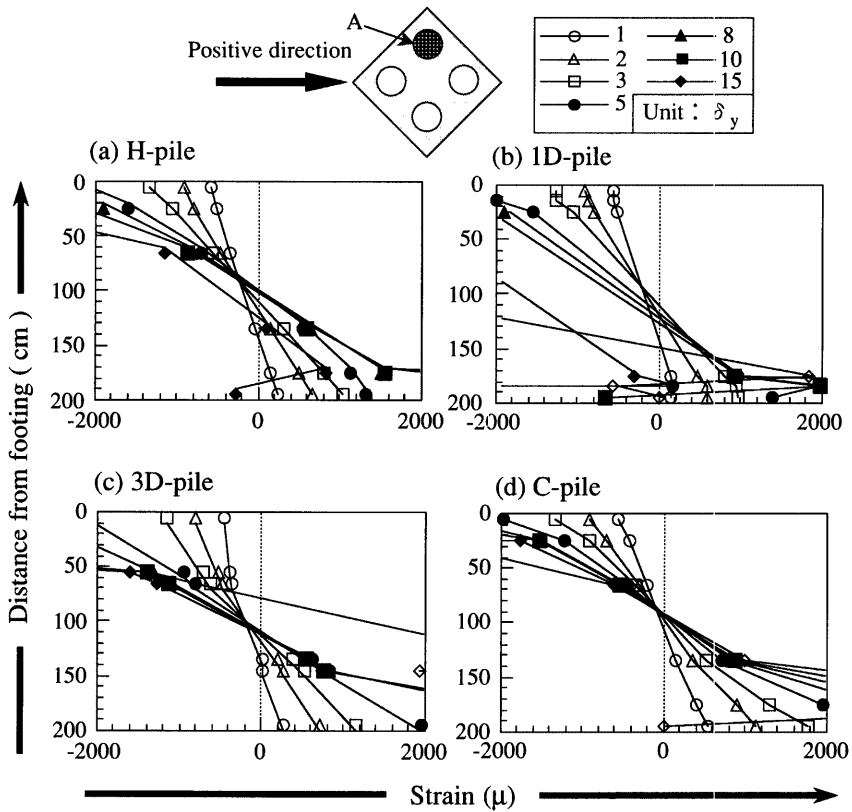


Fig.8 Strain distribution at A and B side



Photo. 3 Failure of filled concrete (1D-pile)

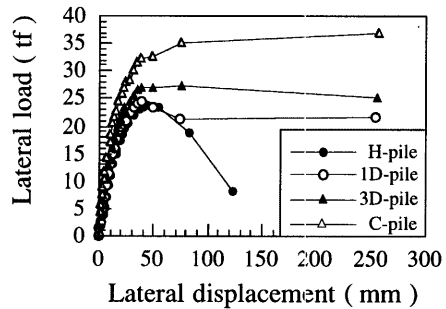


Fig.7 Load envelopes of all pile types

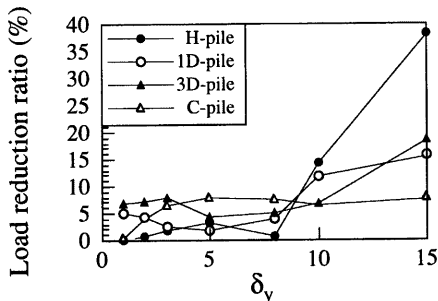


Fig.9 Strength reduction ratio of piles

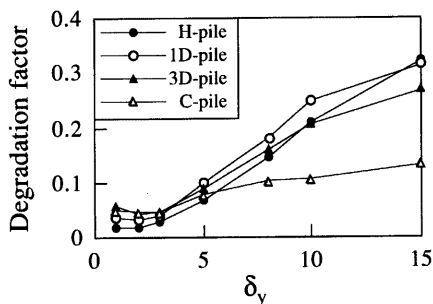


Fig.10 Equivalent degradation factor

ゲージを中詰コンクリートの天端を挟むように貼付けている (Fig.3参照)。図中の○, △, □, ●, ▲, ■および◆印はそれぞれ+1 δ_y , +2 δ_y , +3 δ_y , +5 δ_y , +8 δ_y , +10 δ_y および+15 δ_y での第1回目の荷重載荷時のひずみを表す。いずれの試験体においても鉛直荷重60tfのみ載荷時の値は-240 μs であることを確認している。図から以下のことが読み取れる。

- どの試験体でも荷重の増大に伴って上部では圧縮ひずみが増大し、下部では圧縮ひずみから引張ひずみに変わり値も増加している。はば3 δ_y まではひずみの分布が線形となっているが、中立軸は中間点よりも上部になっている。
- 1D中詰では、拘束モーメントの大きい下部フーチングの付近で鋼管の塑性化が5 δ_y から始まり、中立軸の位置が次第に下がっていくことが推定される。
- 3D中詰試験体でも、下部フーチング側でコンクリー

ト天端を挟んで鋼管のひずみが不連続化し、中立軸の低下の傾向が現れている。

- 全長中詰試験体は、15 δ_y まで載荷しても他の3つの試験体のような中立軸の低下がみられなかった。

(3) 荷重低下率

Fig.9は水平変位量と繰返し回数による荷重低下の様子を示す。縦軸は荷重低下率であり、水平変位量を横軸にとっている。ここで荷重低下率は1回目の繰返し時の荷重で、1回目と3回目の繰返し時の荷重の差を除いたものである。

8 δ_y までは10%以内の範囲でばらつくが、10 δ_y 以降では中詰無の試験体では、40%近くになるのに対し、中詰コンクリートを施工した試験体は充填量に応じて低下率は最大19%とかなり小さくなる。

(4) 減衰定数

地震時の変位の進行に応じて減衰がどのようになるかを推定するために荷重履歴曲線から減衰定数を算出した。Fig.10に等価減衰定数と水平変位の関係を示す。

1 δ_y では、鋼管と中詰およびフーチングのコンクリートとの付着の影響を受けて、必ずしも弾性的な挙動をとらなかったために、見掛け上の減衰定数は大きくでているが、その他では変位の増加とともに定数の値は大きくなっている。その中でも、中詰コンクリートの充填量の差が顕著に現れ、全長中詰は弾性体構造部材のような挙動を示している。また、鋼管の塑性座屈が見られ始めた8 δ_y から定数の値が大きくなっているのは、鋼管の塑性変形によるエネルギーの吸収が効果的であることを示している。

(5) 鋼管の損傷

中詰コンクリートを施工することによって、鋼管の局部座屈とその進展による耐力の低下を防ぐことができることは既述の通りであるが、鋼管柱の塑性座屈は下部で著しい。当初は、鋼管の上下の端部から同じデータを2つずつ得られるものと考えたが、モーメントの中立軸が柱の中間点よりも上になり、結果的に鋼管下部のモーメントが最大となって塑性状態が先行した。その原因は上部フーチングの回転変形にある。すなわち、下部フーチングは床にボルトで固定されているためにボルトの伸びの分しか回転できないが、上部フーチングは鋼管柱の回転変形と軸変形による大きな回転ができるために、杭頭の拘束モーメントを緩和することになった。

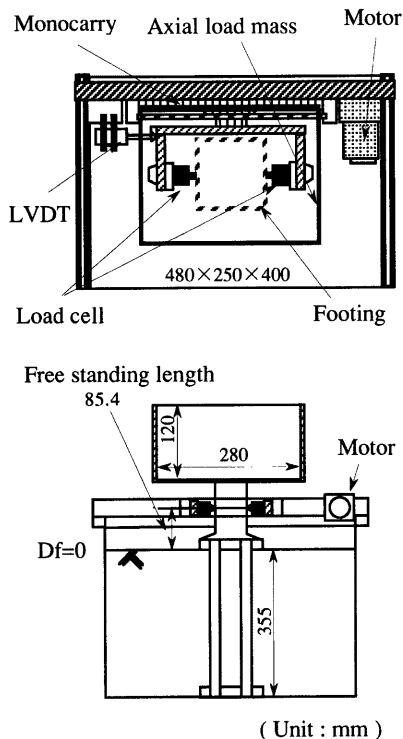


Fig.11 Test apparatus

3. 遠心載荷実験

これまで気中で行われた、大縮尺鋼管杭模型実験について述べてきた。そしてその結果から、鋼管杭に中詰コンクリートを施すことにより座屈が抑えられ、せん断耐力が向上することがわかった。しかし、現実には杭基礎は地盤中で用いられるものであり、地盤中の鋼管杭に対し実験を行う必要がある。そこで以下の項目を実験目的として遠心載荷実験を実施した。

- ・繰返し水平載荷時における座屈現象が水平耐力に与える影響の確認
- ・コンクリート中詰の効果の確認
- ・気中と土中との杭の挙動

3.1 実験概要

Fig.11に実験装置を示す。杭配列は4本群杭のボックス配列とし、杭中心間隔は2.5D (D: 杭径) である。

Table 2 Properties of centrifugal test pile

Scale	Centrifugal	Prototype
Length (m)	0.38	15.2
Diameter (mm)	25.4	1016
Steel thickness (mm)	0.5	20
D/t	50.8	50.8
Stiffness (kgf-cm ²)	3.33×10^5	8.52×10^{11}
Axial load per pile (tf)	0.22	352

フーチングに橋脚および上載荷重を設置することで、各杭に軸力をかけている。また、モーターを回転、逆回転させることによりモノキャリアを動かして水平方向の繰返し水平載荷を行った(木村ら, 1995)。また、根入れ深さを変化させることで、杭の水平抵抗に対するフーチング前面の土圧の影響を検討することができる。ただし、今回の全ての実験は根入れ深さをゼロとして行った。載荷点高さは地表面から8.54cmであり、杭頭部には回転モーメントが働く。

模型杭の諸元をTable 2に示す。鋼管の座屈の程度は、杭径肉厚比 (D/t) に左右されるため、模型杭の選定にあたってはこの点に特に注意した。その結果、模型杭の杭径肉厚比は、上記の気中での大縮尺模型実験での模型杭の値に近い値となった。

地盤材料には豊浦標準砂を用い、ホッパーによる気中落下法で相対密度が約90%の密な地盤を作成した。

軸力の決定にあたっては、まず1G下で模型杭の圧縮試験を実施し、軸方向座屈荷重を調べた。その結果、約1.4tfで座屈することがわかった。そこで40G下で杭1本当たり座屈荷重の0.16倍の軸力がかかるよう上載荷重を設置し、繰返し水平載荷を行った。

繰返し水平載荷は変位制御で行い、載荷速度は5.8mm/minである。載荷方法は杭径で規準化した変位 (δ/d) で、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%、40%、45%、50%で各々3回ずつ繰返し載荷し、その後杭径の100%まで変位させた。計測項目は載荷点の荷重、水平変位、杭体に貼付したひずみゲージの値である。

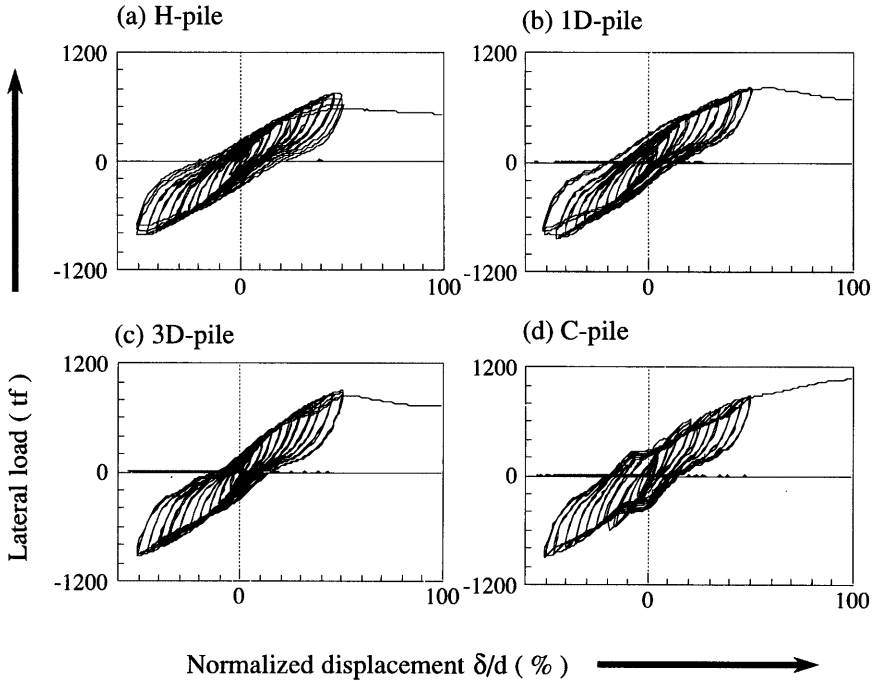


Fig.12 Load-displacement relations

3.2 実験結果および考察

以下、試験結果はすべてプロトタイプ換算して示す。また、水平変位は杭径で規格化している。

(1) 荷重～変位関係

Fig.12に各模型杭を用いたときの荷重～変位関係を示す。中詰無の場合、繰返し幅が杭径の50%になると、はじめて繰返す度に荷重の低下が見られた。その後荷重～変位曲線は緩やかな負勾配となり、少しずつ耐力が低下していく。気中での大縮尺模型実験結果と比較すると、最大荷重を迎える変位が大きくなり、その後杭径程度まで変位させたときの变形追従性も優れている。これは遠心載荷実験では杭の剛性が大きいことや、地盤中で載荷しているため、水平力に対し杭のみでなく地盤でも抵抗するためと考えられる。1D中詰、3D中詰の模型杭では、繰返し時の荷重の低下は見られず、

同変位での荷重はこの順に大きくなる。そして杭径の50%をすぎた辺りで最大荷重を迎えた後、荷重変位曲線は緩やかな負勾配となり、わずかに耐力が低下していく。一方全長中詰では繰返し幅が杭径の20%の時に荷重の低下が見られた。これは杭頭とフーチングの固定が不十分で、フーチングが少し抜け出てしまったためである。しかし、水平耐力は杭径程度の変位に至るまで増加し続けた。

実験終了後の杭の破壊状況のスケッチをFig.13に示す。中詰無ではフーチング直下の杭頭部と地中部で座屈が見られた。これは載荷が進むにつれフーチングに回転が生じ、杭頭固定状態とも言えども回転が卓越する状態となり、杭の地中部でも大きなモーメントが発生したためである。また、中詰長が長くなると、座屈の程度が軽減される様子がわかる。

Fig.14に荷重変位関係の包絡線を示す。コンクリートの充填を多くすると、剛性や最大水平耐力が向上す

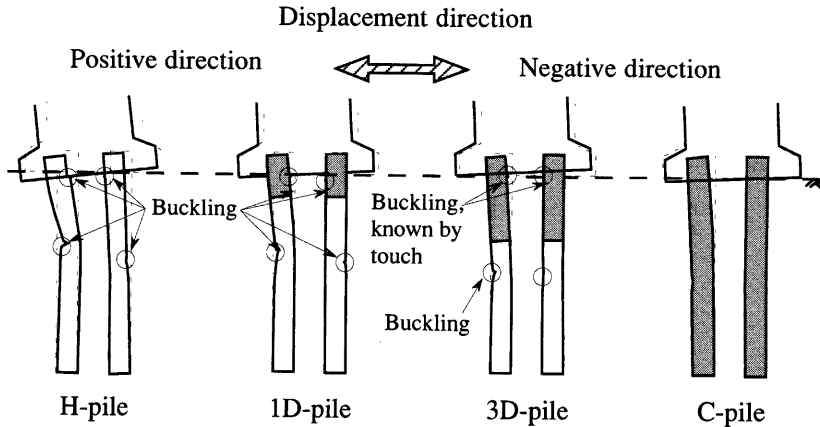


Fig.13 Failure pattern of piles

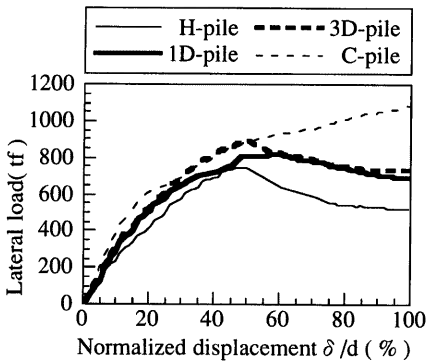


Fig.14 Load envelopes from load-displacement curve

ることがわかる。しかし、繰返し後の変形追従性については1D中詰と3D中詰を比較したときに、顕著な差が見られない。全長中詰では杭径の100%まで変位させ続けても荷重は増加し続ける。

(2) ひずみ分布

中詰無、全長中詰の載荷方向に対して後方に位置する杭のひずみ分布をFig.15に示す。中詰無では杭径の10%までひずみの分布は線形である。その後、杭頭、地中部で塑性化がすすみ、40%で繰返し時には8000 μ となる。一方、全長中詰では杭径の40%でも分布は線

形であり、塑性化はあまり進まない。1D、3D中詰のひずみ分布についても同様の分布が見られた。

Fig.16に中詰無の杭体のひずみ履歴と杭の破損状況を示す。(a)は載荷方向に対して前方の杭、(b)は後方の杭を示す。図中矢印は座屈の生じた点を表す。杭の破損状況とひずみが蓄積し座屈に至る様子がよく理解できる。

(3) 荷重低下率

Fig.17は荷重低下率を示す。荷重低下率の定義は、気中で大縮尺模型実験と同様である。全長中詰以外のどの中詰長の杭でも、繰返し幅が45%まででは荷重の低下は見られない。50%で繰返し時に中詰無では20%近くになるのに対し、中詰コンクリートを施工した試験体は、充填量に応じて低下率は最大5%とかなり小さくなる。全長中詰で見られる荷重の低下は先に述べたように、フーチングが抜け出したためと思われる。より詳細な耐力特性を検討するには、今後50%以上の繰返し実験が必要と考えられる。

(4) 等価減衰定数

等価減衰定数と水平変位の関係をFig.18に示す。地盤の影響を受けてか減衰定数は気中で大縮尺模型実験での値と比べ小さくなった。またその分布も杭径の25%まで減少しており、複雑なものとなった。しかし、杭径の30%以降変位が大きくなるにつれ減衰定数が増加する傾向が見られ、鋼管の塑性変形によるエネルギー

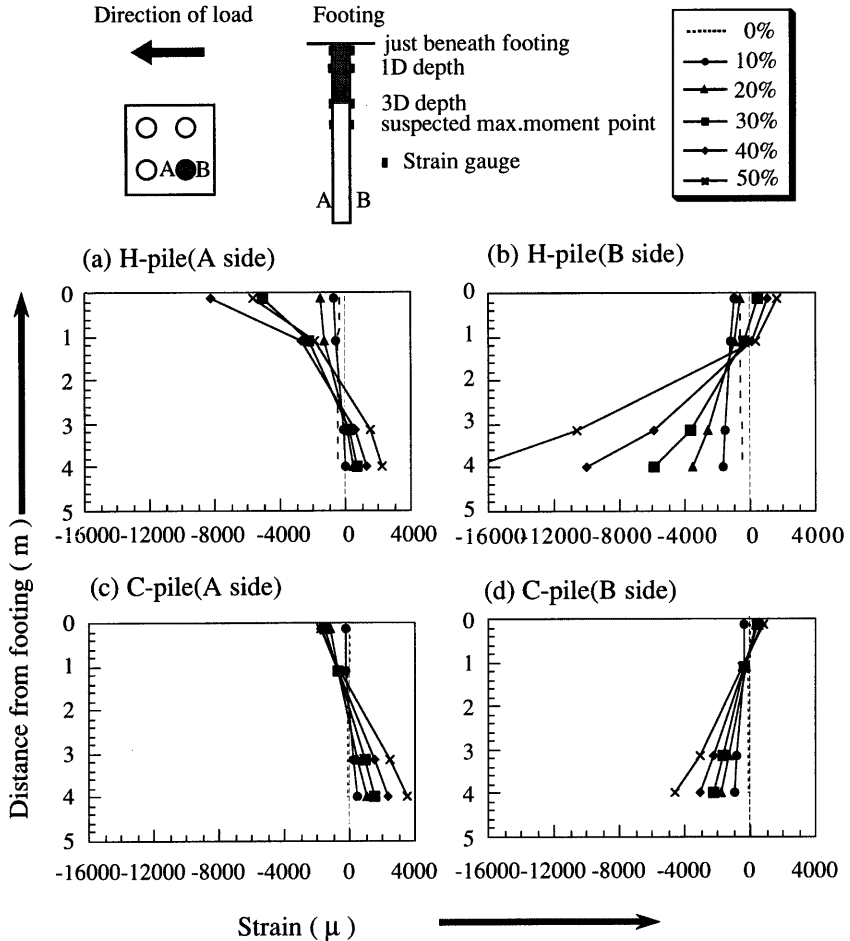


Fig.15 Strain distribution along the pile

の吸収の様子がわかる。今回の実験で最大繰返し幅である杭径の50%での等価減衰定数を見てみると、中詰コンクリートの充填量の差が顕著に現れている。

4. 結論

空中での大縮尺模型実験、40G下での遠心載荷実験より、次のような結論を得た。

1) 鋼管杭基礎の終局限界状態を向上させるためには、鋼管杭の内部をコンクリートで充填する方法が優

れている。中詰コンクリートを施すことにより、せん断耐力の強化、局部座屈の進行の防止、変形性能の向上などの効果を期待できる。

2) 中詰コンクリートの充填量は全長にわたるのが理想であるが、杭頭より、3D(D:杭径)の長さでも、同様の効果が発揮される。中詰長さが1Dのものでも、中詰無に比べると高いせん断耐力を保有し、杭径程度の変位量まで耐力を保持する。

3) 大きな水平変位の際に杭の固定端に発生する座屈は塑性座屈で、座屈形状がせん断耐力に及ぼす影

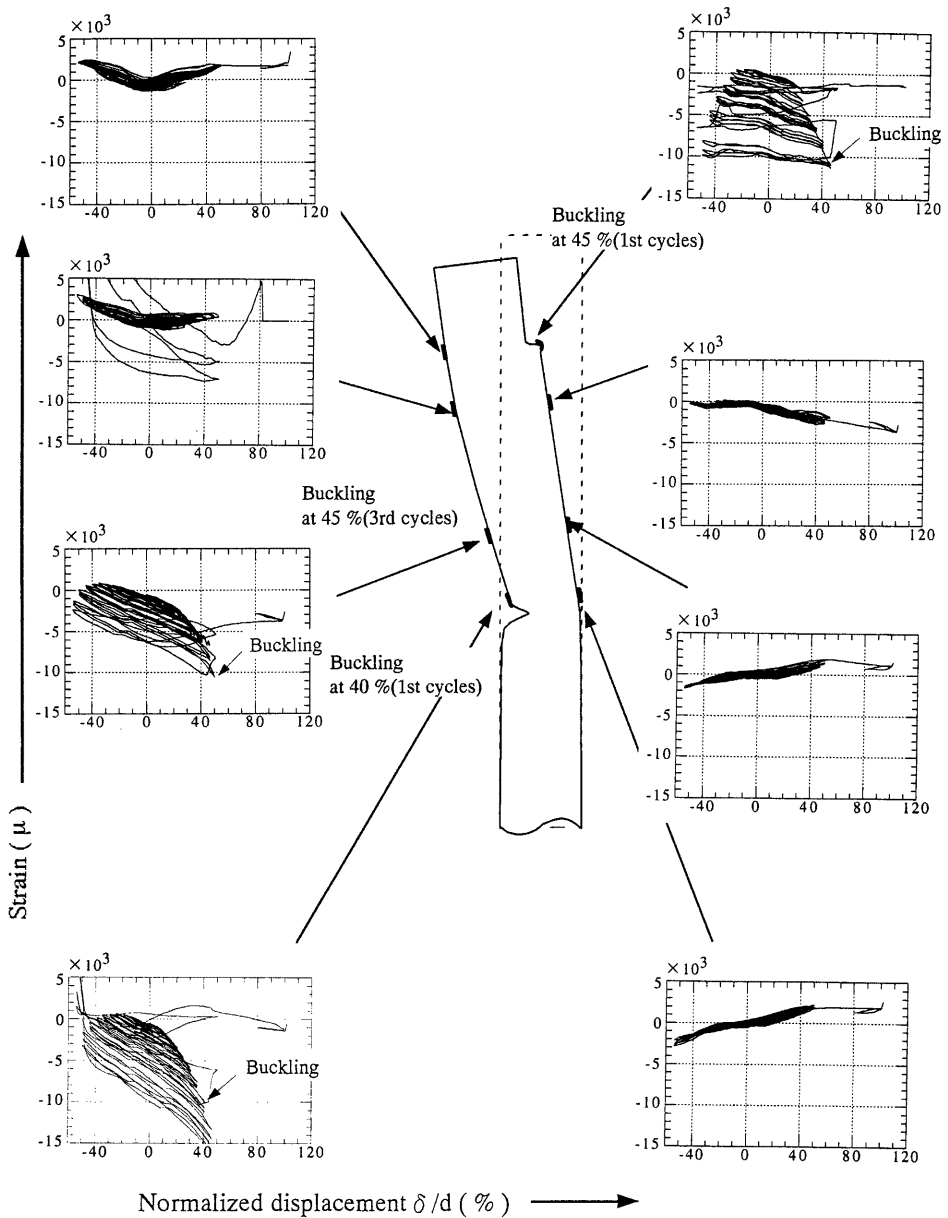


Fig.16(a) Strain history and failure condition (H-pile, front pile, $\delta/d=100\%$)

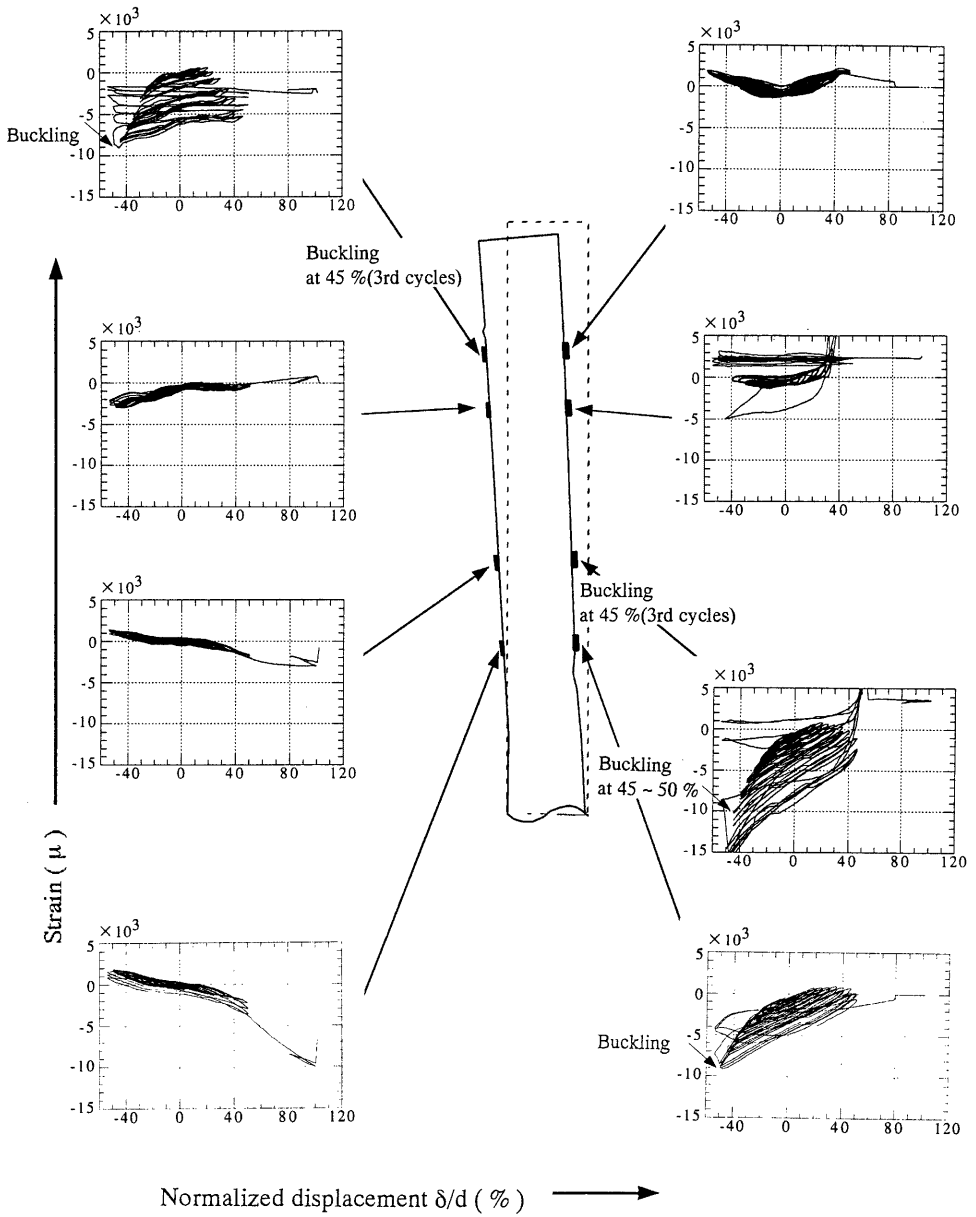


Fig.16(b) Strain history and failure condition (H-pile, back pile, $\delta/d=100\%$)

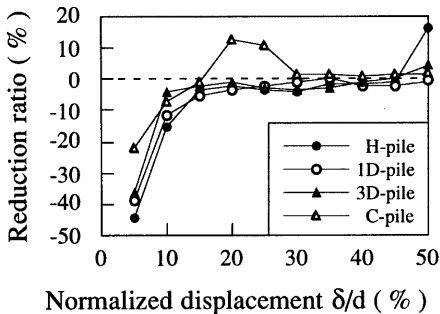


Fig.17 Strength reduction ratio

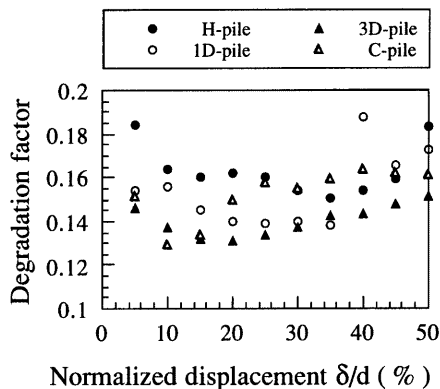


Fig.18 Equivalent degradation factor

響は無視することができる。しかし、塑性座屈の原因となる鋼材の塑性変形と併せて減衰定数の増大には大きく寄与している。

- 4) コンクリートを充填することにより、繰返し載荷時の繰返し回数による耐荷力の低下を防ぐ効果もある。
- 5) 気中での大縮尺模型実験では、上部フーチングの回転変形のために下部フーチング側の鋼管のモーメントが最大となり、座屈現象が先行した。杭頭およびフーチングの回転角の杭頭モーメントに及ぼす影響が大きいことが確認できた。
- 6) 土中の杭に水平力を与えた時、杭のみでなく地盤でもその抵抗を受け持つ。そのため気中と地盤中での両実験を比較すると、地中では繰返し時の耐荷力の低下の見られる変位が気中での実験よりも大きくなった。また、杭径まで変位させたときの荷重変位曲線の形状も両者で異なる。
- 7) 遠心載荷実験ではフーチングの回転により、杭体にも大きな曲げモーメントが発生し、そのためフーチング直下に加えて杭地中部においても座屈が見られた。

謝 辞

気中での鋼管群杭大縮尺模型実験は、八戸工業大学との共同研究の成果である。八戸工業大学構造工学研究所 塩井幸武教授、同土木工学科 長谷川明教授、同建築工学科 毛呂真助教授および八戸工業大学の学生の方々に多大の協力を得ました。深く感謝申し上げます。

参考文献

- 木村 亮・足立紀尚・小林秀人 (1995) : 水平力を受ける鉄筋コンクリート群杭の終局挙動に関する遠心模型実験, 京都大学防災研究所年報, 第38号 B-2, pp.67-82.
- 塩井幸武・木村 亮ほか (1996) : 鋼管杭基礎の終局水平耐力に関する模型実験, 第31回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1735-1738.
- 社団法人 日本道路協会 (1990) : 道路橋示方書・同解説, I共通編IV下部構造編.

Experimental Study on Ultimate Lateral Resistance of Axially-Loaded Steel Piles

Makoto KIMURA*, Toru YAMANAKA**, Yoshinori FUKUBAYASHI* and Atsushi YOSHIDA*

*Graduate School of Engineering, Kyoto University

**Nihon-Kokudokaihatu, Co. Ltd.

Synopsis

In order to investigate the resistance of axially-loaded steel piles subjected to the cyclic lateral load, a model consisting of 4 steel pipe columns was tested. From the model tests the mechanisms for the decrease in lateral bearing capacity of steel pipe column were known. As the column is laterally loaded, the compression stress at the top and bottom part of the column increases. Once the compression stress reaches the limiting value, the top and bottom of column will cripple due to the large compression force. Consequently, the lateral bearing capacity will decrease. This lateral bearing capacity can be increased, if the concrete is cast inside the pipe.

To make a more realistic model, an experiment on 4 steel pipe piles embedded in sand was investigated. Under the centrifugal force field, the cyclic load is applied to the axially-loaded model piles. From this model test the ultimate strength and the behavior of axially-loaded steel pipe piles to the cyclic lateral load can be examined. In addition, this experiment helped to verify the effect of concrete cast inside a pile.

Keywords: steel group piles, cyclic lateral load, ultimate lateral resistance, axial load, cast concrete