

# 鋼管杭基礎の終局限界状態の向上に関する研究

塩井 幸武\*, 木村 亮\*\*, 長谷川 明\*\*\*, 毛呂 眞\*\*\*\*

## Improvement of ultimate behavior of steel pipe pile foundation

Yukitake SHIOR\*, Makoto KIMURA\*\*, Akira HASEGAWA\*\*\*  
and Makoto MORO\*\*\*\*

### Abstract

Steel pipe piles have been widely used for foundation because of the superior properties in bearing capacity, ductility and easy operation at site. However, since the ultimate resistance for horizontal force is used to be limited by buckling of pile and to be estimated in a small values, it is required to prevent buckling and to use the steel pile up to its ultimate strength.

Paper reports the results of loading tests of group pile foundation models in large scale, adapting concrete packing in pile top, and the successful effect of this method.

**Keywords:** steel pipe pile, horizontal resistance, limit design

### 1. 研究の目的と背景

鋼管杭基礎は最も普遍的な基礎形式で、これまで許容応力度法で設計が行われてきた。しかし、土木建築の構造物の設計方法は世界的に許容応力度法から限界状態設計法へ移行しつつある。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ある。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である。

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て座屈を抑制するとともにせん断補強の効果を図り、杭の破壊は鋼管の曲げ破壊で迎えるようにすることで試験研究計画を立案した。同時に杭頭の破壊時でもフーチングが健全であることが求められるのでこのような大きなモーメントが作用したときのフーチング内部の応力の伝達とひずみの分布も調べることにした。

一方、平成7年1月17日の阪神淡路大震災は土木建築の構造物に多大なる損傷を与えた。いくつもの破壊的な被災例に鑑み、決定的な損壊を防ぐためには終局限界状態でも形状を保持してい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

平成8年10月18日受理

\* 構造工学研究所・教授

\*\* 京都大学工学部交通土木工学科・助教授

\*\*\* 土木工学科・教授

\*\*\*\* 建築工学科・助教授

には被災後の検査や修復が困難であること、基礎を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荷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よく馴染むものである。

## 2. 研究方法

上記の目標を達成するために図-2.1 に示す要領で水平載荷試験を実施した。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、破壊は鋼管の曲げ破壊で迎えられようようにすることをねらったものである。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の向上を図ろうとするもの

である。

本来ならば地盤に打ち込んだ杭基礎の状態で試験を行うのが現実的であるが、目的が充填コンクリートによる杭の変形性能の向上を図るものであるために図-2.1 のモデルでも差し支えないと考えた。これによって正確な試験がやりやすくなり、群杭としての効果の測定、上下2つずつのデータの取得、試験の安全性の確保などの利点が得られた。

試験は相似律を配慮しなくてもよい程度の大型の群杭模型(縮尺 1/3)を用いて通常に作用する鉛直荷重(60 tf)を載荷した状態で、水平荷重を交番で繰り返し(3回)載荷した(図-2.2)。4本の試験杭は上下のフーチングで固定されているために上下端で最大のモーメントが発生する。群杭模型の試験体は4体で表-2.1、図-2.3 に示すとおり、中詰めコンクリートのないもの、全長に中詰めコンクリートを施したもの、杭頭部に3D( $D$ : 杭径)だけコンクリートを詰めた

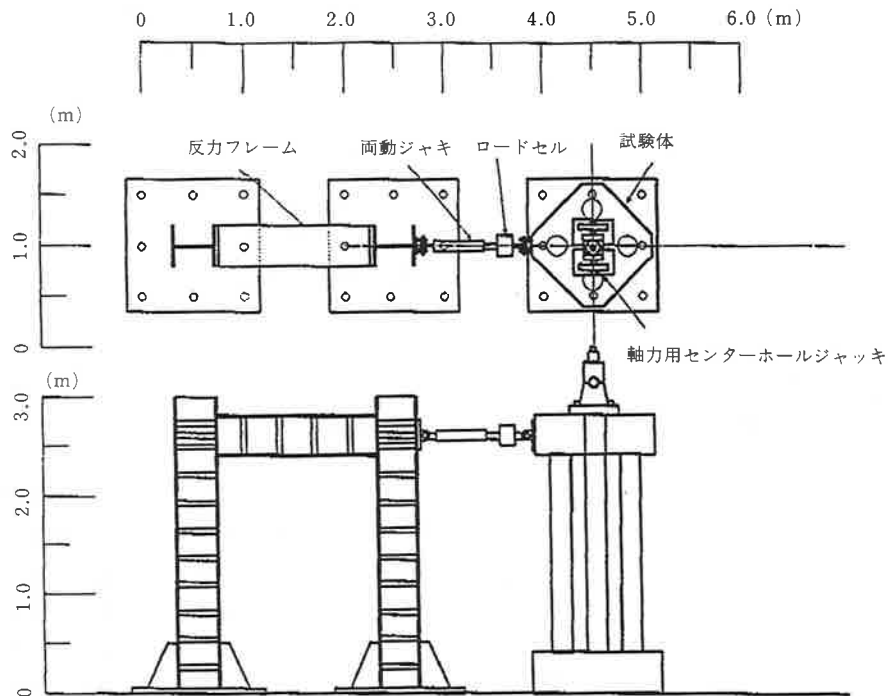


図-2.1 載荷試験装置の概要

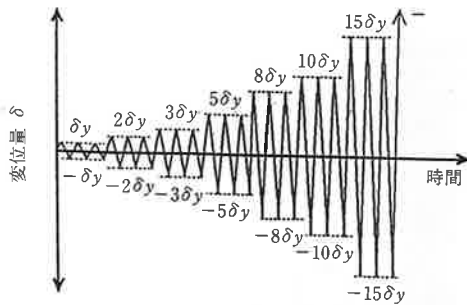


図-2.2 載荷荷重の経路（変位制御）

もの、同じく  $1D$  だけコンクリートを詰めただけのものである。

用いた鋼管は STK400,  $\phi 216.3$ ,  $t 4.5$  で、コンクリートは  $f_c = 400 \text{ kgf/cm}^2$  である。

載荷方法は変位制御で実施し、鉛直荷重  $60 \text{ tf}$  を保持したまま、中詰め無しの状態の鋼管杭のうちでいずれかの杭が水平荷重で降伏ひずみに達するときの計算上のフーチングの変位  $\delta y$  ( $5.26 \text{ mm}$ ) を基準とした。載荷は水平方向に  $\delta y$  の  $1, 2, 3, 5, 8, 10, 15$  倍で各々交番  $3$  回の繰

表-2.1 試験体種類と数量

| No. | 試験体種類      | 試験体の特徴                 | 数 量 |
|-----|------------|------------------------|-----|
| 1   | 中詰め無試験体    | コンクリート中詰め無             | 1 体 |
| 2   | 全長中詰め試験体   | 全長コンクリート中詰め            | 1 体 |
| 3   | 杭頭中詰め試験体 a | 杭頭, 先端部 $1D$ コンクリート中詰め | 1 体 |
| 4   | 杭頭中詰め試験体 b | 杭頭, 先端部 $3D$ コンクリート中詰め | 1 体 |

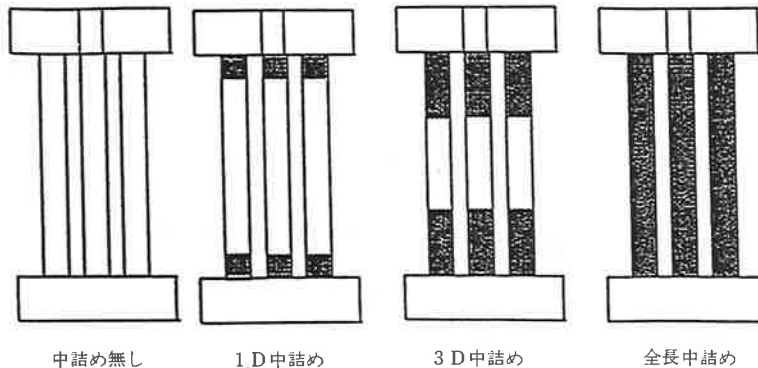


図-2.3 試験体の中詰めコンクリート（黒色部分）

表-2.2 試験体の計測項目と点数

| 計 測 項 目 | 計 器      | 点数/体 |
|---------|----------|------|
| 荷 重     | 荷 重 計    | 2 点  |
| 変 位     | 変 位 計    | 8 点  |
| フーチング傾斜 | 傾 斜 計    | 2 点  |
| ひ ず み   | 1 軸塑性ゲージ | 16 点 |
|         | 3 軸塑性ゲージ | 48 点 |

返しで行い、その後は一方向載荷で  $50\delta y$  に相当する  $26 \text{ cm}$  まで変形せしめた。

計測は表-2.2 に示す項目について行われ、杭およびフーチングのひずみや変形を測定した（図-2.4）。このほか、杭頭部のフーチングへの埋め込み部のひずみも計測している（表-2.3, 図-2.5）。用いた計器と計測のダイアグラムを表-2.4, 図-2.6 に示す。

本試験体の中詰め無しの場合の計算上の

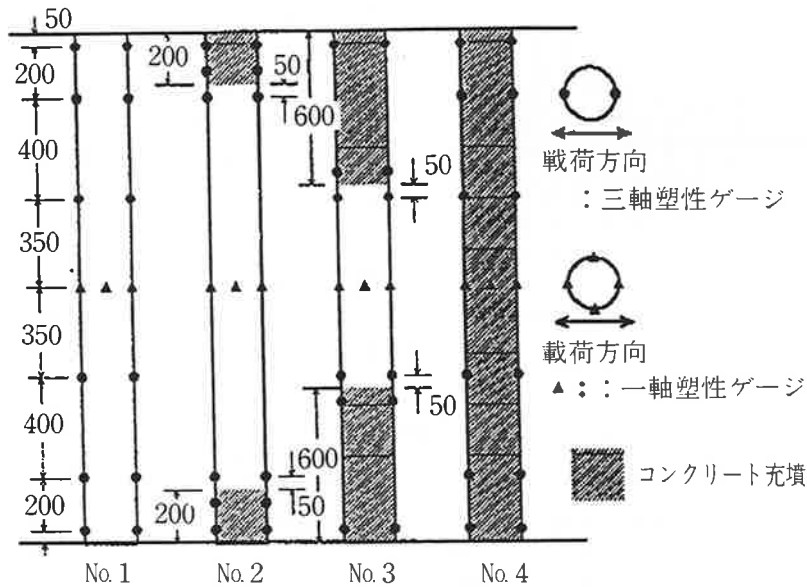


図-2.4 ゲージ位置の概略

表-2.3 杭頭埋め込み部のゲージ位置

| 対 象     | ゲージ種類            | 位 置   |                                     | 本 数    | ゲージ数    |
|---------|------------------|-------|-------------------------------------|--------|---------|
|         |                  | 平 面   | 立 面                                 |        |         |
| 鋼 管     | 2 軸ゲージ<br>(軸, 周) | 載荷の載荷 | フーチング下面より<br>50 mm, 100 mm, 200 mm  | 4 本×上下 | 96      |
| フ ー プ 筋 | 1 軸ゲージ           |       | フーチング下面より<br>100 mm, 200 mm, 300 mm |        | 96      |
| 組 立 筋   |                  |       | フーチング下面より<br>150 mm, 250 mm         |        | 64      |
| フーチング下面 |                  |       | 亀裂ゲージ                               |        | フーチング下面 |

MN 曲線と荷重経路を参考として図-2.7 に示す。

### 3. 試験結果

載荷試験で得られた測定結果の主なものを以下に示す。

#### (1) 荷重変位曲線

図-3.1 は各試験体の水平荷重と水平変位の関係である。中詰め無しのもは 8dy で最大荷重を迎え、このとき、局部座屈の徴候がみられた。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。

全長中詰めのもは 8dy で座屈の徴候が現れるものの、15dy 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みられない。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で実質的な終局限界状態であった。

1D 中詰めは 8dy で最大荷重を迎え、座屈の徴候が現れるが、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。

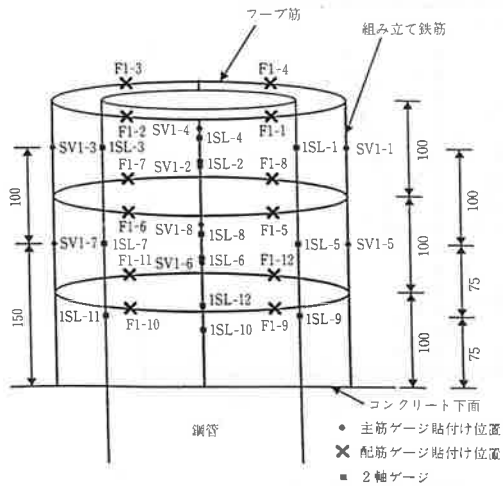


図-2.5 フーチング内の鋼管とフープ筋のゲージ位置

3D 中詰めは 8dy で全長中詰めと 1D 中詰めの中間に相当する最大荷重と局部座屈の徴候がみられるが、その後の変位における耐力の低下は 1D 中詰めよりも少ない。

いずれの試験体においても 15dy では鋼管の下部の円周に沿って塑性座屈がみられ、上部でも塑性座屈もしくはその徴候が発生している。そのために中詰め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ところ、1D 中詰め、3D 中詰めでは座屈部分より中央よりに大きな亀裂が数本みられたが、全長中詰めでは明確な亀裂はほとんどみられなかった。

## (2) 杭体のひずみ

図-3.2 は各試験体の鋼管に発生した荷重段

表-2.4 計測に用いた機器

| 項 目       | 機 器 名    | 型 式             | 数 量  |
|-----------|----------|-----------------|------|
| 荷 重       | 荷 重 計    | TCLP-50B        | 2    |
|           |          | CLC100A         |      |
| 変 形       | 変 位 計    | SDP200R, DP500C | 10   |
|           |          | DP500C          |      |
| フーチング傾斜   | 傾 斜 計    | KB-5AB          | 2    |
| ひ ず み     | 1 軸塑性ゲージ | YFLA-5          | 16/体 |
|           | 3 軸塑性ゲージ | YFLA-5          | 48/体 |
| デ ー タ 取 録 | データロガー   | THS-1100        | 1    |
|           | スイッチボックス | SHW-50A         | 1    |
|           | コンピューター  | Quadra 700      | 1    |

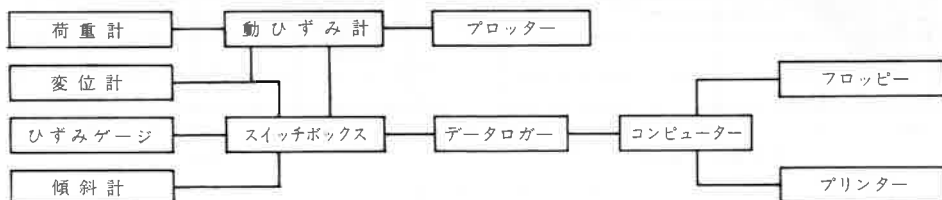


図-2.6 計測ダイアグラム

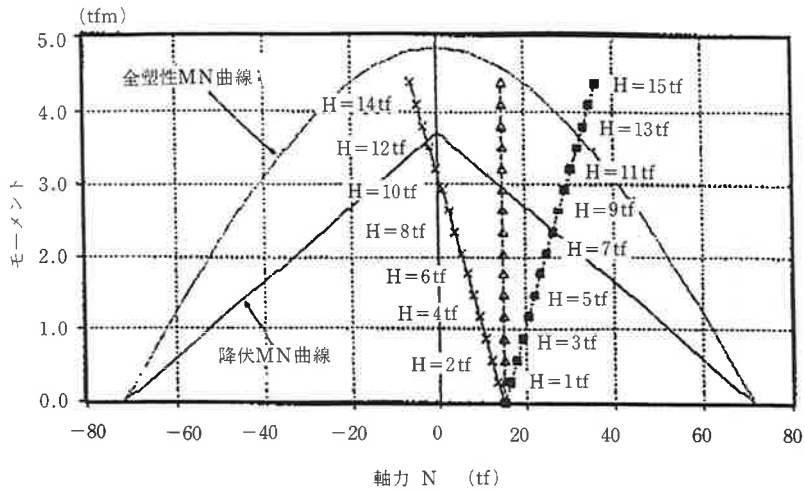


図-2.7 鋼管の降伏，全塑性 MN 曲線と載荷荷重の関係

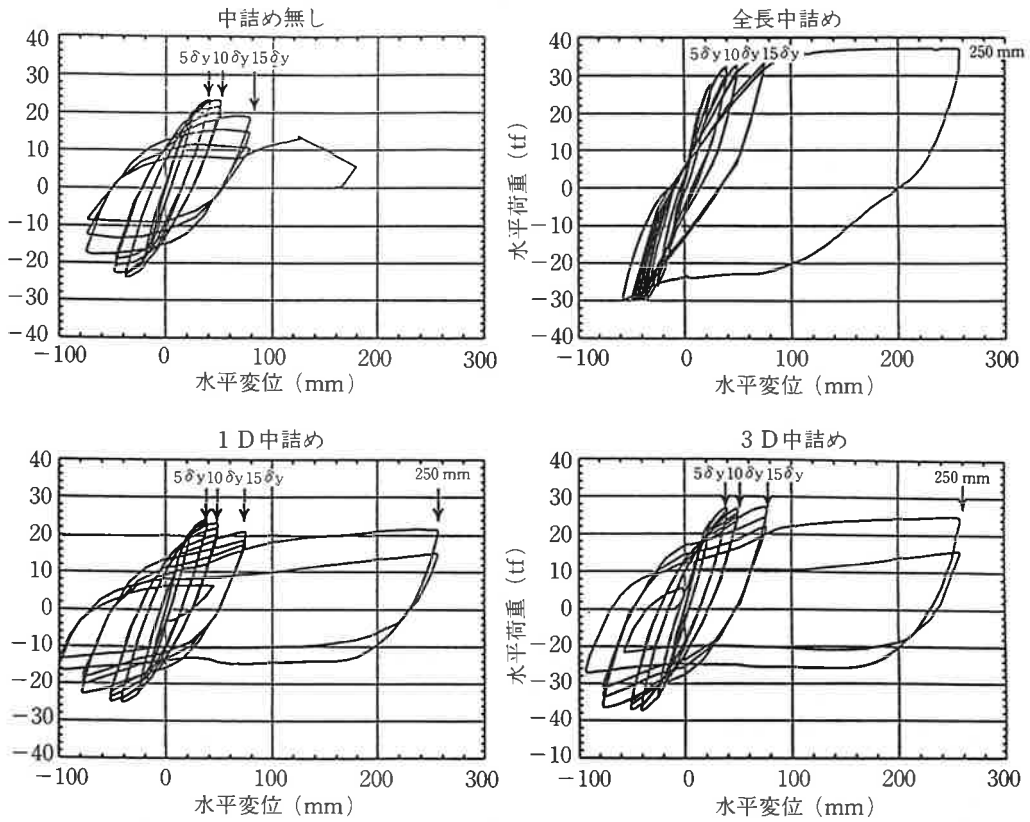


図-3.1 水平荷重と変位の関係

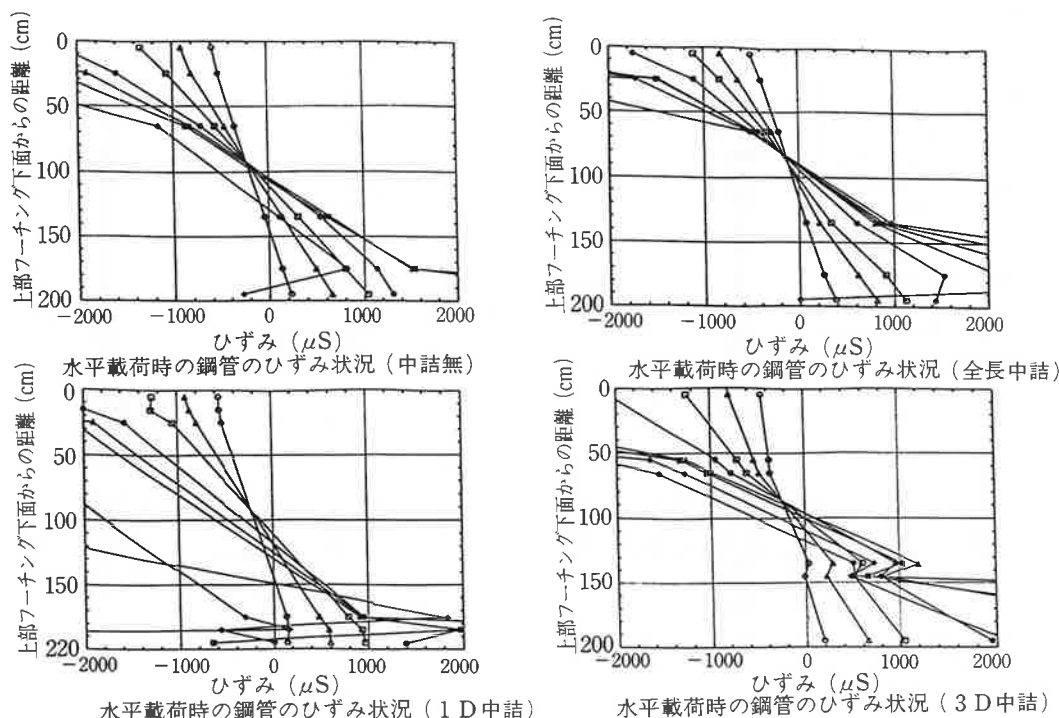


図-3.2 鋼管柱の軸ひずみ分布

階毎のひずみの分布を示す。測定位置は中央の2本の杭の内の一本の荷重ジャッキ側の一連の軸方向のゲージである。1D中詰め、3D中詰めではひずみゲージを中詰めコンクリートの天端を挟むように貼り付けている。図中の○、△、□、●、▲、■および◆印はそれぞれ1 $\delta y$ 、2 $\delta y$ 、3 $\delta y$ 、5 $\delta y$ 、8 $\delta y$ 、10 $\delta y$ および15 $\delta y$ での第一回目の荷重荷重時のひずみを表す。いずれの試験体においても鉛直荷重60tfの荷重時の値は $-240\mu s$ であることが確認している。

いずれも3 $\delta y$ までは線形に近い状態であるが、中立軸は中間点よりも上部になっている。中詰め無しでは10 $\delta y$ まで平面保持の原則に応じて非線形挙動を示しているが、15 $\delta y$ では崩れている。

全長中詰めでは15 $\delta y$ まで中立軸は変わらず、骨組構造での解析ができることを示している。

1D中詰め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 $\delta y$ 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中詰め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。

### (3) 杭頭拘束モーメント

図-3.3、図-3.4は全長中詰めの試験体の荷重方向の両端のジャッキ側①とその反対側③の鋼管の軸方向ひずみを各荷重段階毎に示したものである。ひずみゲージの位置は図-2.4、図-2.5に示すとおりで、杭体の気中部とフーチング埋め込み部の値である。コンクリートが全長にわたって充填されているので応力の乱れが少ない試験体である。

気中の杭体では小さい変位量の荷重段階ではほぼ左右対称のひずみ分布をしており、中立軸は1,350mm付近となっている。水平変位量の大きい荷重段階になると中立軸は変わらないもの

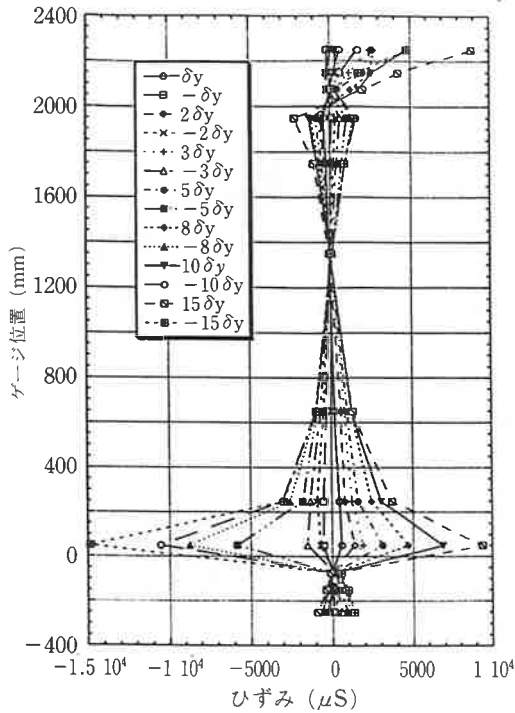


図-3.3 鋼管①のジャッキ側の軸ひずみ分布

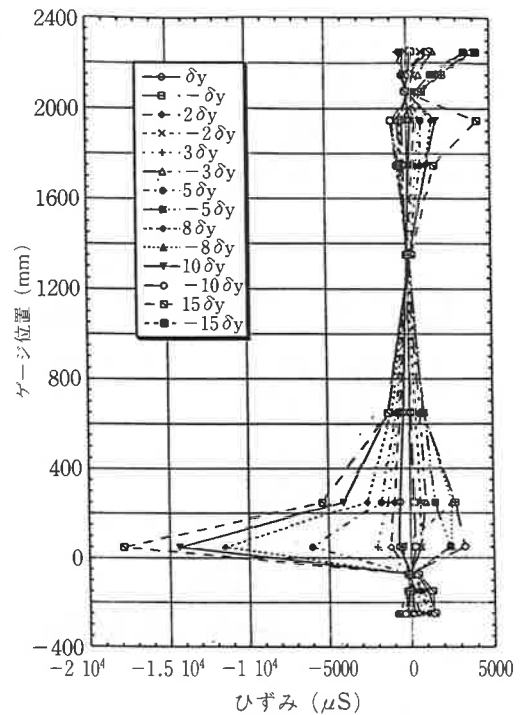


図-3.4 鋼管③のジャッキと反対側の軸ひずみ分布

の下部フーチング付近で大きな塑性ひずみが発生するようになる。5 $\delta y$ 以上になると左右のバランスが崩れ、載荷時の圧縮側のひずみが大きくなって局部座屈に進み始めている。

埋め込み部のゲージはフープジベル（円周上のズレ止め）の間に貼り付けているのですべての応力を表しているとはいいがたいが、一応、埋

め込み部の鋼管のひずみの傾向を示すとみなせる。そのひずみの値は小さく、杭頭のモーメントの大部分は既にフープジベルを通じてフーチング内に伝達されているものとみられる。それでもひずみの値は逆転し、先端で大きな値になっている。また、①杭にあっては下部フーチングの杭は弾性領域に留まっているが、上部

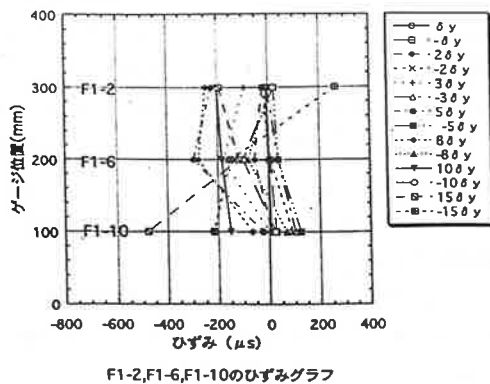


図-3.5 フープ筋のひずみの状況（下部フーチング）

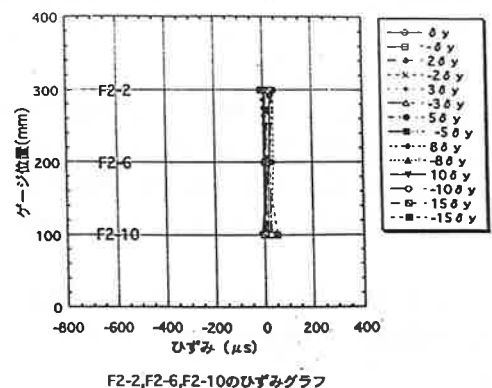


図-3.6 フープ筋のひずみの状況（上部フーチング）



フーチング内では引張応力が拡大している。③杭では下部フーチング内の杭は引張応力が大きいもののやはり弾性領域に留まっており、上部フーチング内では引張応力が大きくなっている。

図-3.5, 図-3.6 は上下のフーチング内の鋼管杭の周りのフープ鉄筋の各荷重段階のひずみを表している。下部フーチングでは4断面とも同様の値となっており、全体にひずみが発生している。しかし、15 $\delta y$  では大きくはずれており、後のフーチングの破損の徴候を示している。上部フーチングではいずれの断面でもフープ筋のひずみは小さく、杭と一体の挙動を示唆している。

以上の他、フーチングの鉛直変位、亀裂の状況、鋼管の3方向ゲージの値などについては機会をあらためて報告することとしたい。

#### 4. 解析および考察

##### (1) 中詰めコンクリートの効果

図-4.1 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、全長中詰めはソイルセメント工法など以外には経済的に困難である。改善の3D中詰めは変形にともなう耐力の低下も少なく、優れているが、経済的には1D中詰めよりは不利である。重要な基礎の大径杭などで

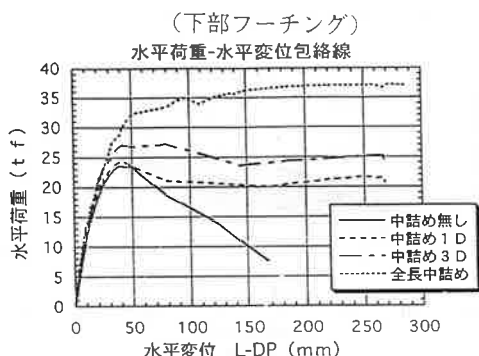


図-4.1 水平荷重-水平変位包絡線

は考慮した方がよい。1D中詰めは現行の道路橋示方書<sup>1)</sup>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) 繰り返しによる耐力低下率

地震などの繰り返し荷重の作用時に水平変位量と繰り返し回数による耐力の低下率を推定するために作成したのが図-4.2である。荷重低下率を縦軸に、水平変位量を横軸に $\delta y$ でとった。荷重低下率は1回目の荷重履歴曲線の最大値で3回目の曲線の最大値を除いたものである。

内部のコンクリートの圧縮抵抗と引張抵抗が微妙に影響して8 $\delta y$ までは10%以内の範囲でばらつくが、10 $\delta y$ 以上では中詰め無しは40%近くになるのに対し、中詰めコンクリートを施工したものは充填量に応じて低下率は最大19%とかなり小さくなる。

##### (3) 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。図-4.3に等価減衰定数と水平変位の関係を示す。

1 $\delta y$ では鋼管と中詰め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的な挙動とならなかったために見掛け上の減衰定数が大きくでているが、その他では変位

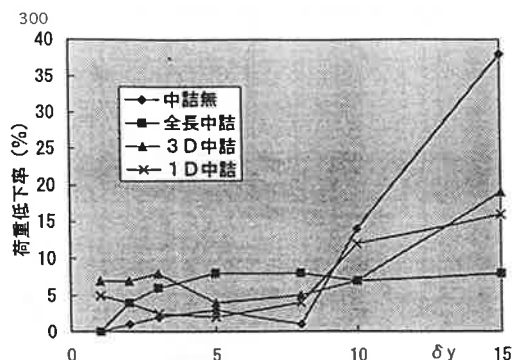


図-4.2 荷重低下率と水平変位の関係

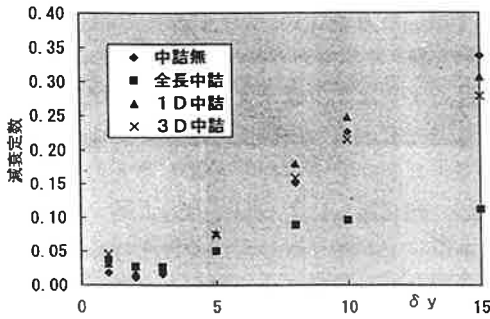


図-4.3 等価減衰率と水平変位の関係

の増加とともに定数の値は大きくなっている。その中でも中詰めコンクリートの充填量の差が顕著に現れ、全長中詰めは弾性体構造部材のような挙動を示している。また、鋼管の塑性座屈がみられ始めた8 $\delta y$ 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。

#### (4) 鋼管の損傷

中詰め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の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。即ち、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。上下のフーチングの回転角と水平荷重の関係を図-4.4、図-4.5に示す。

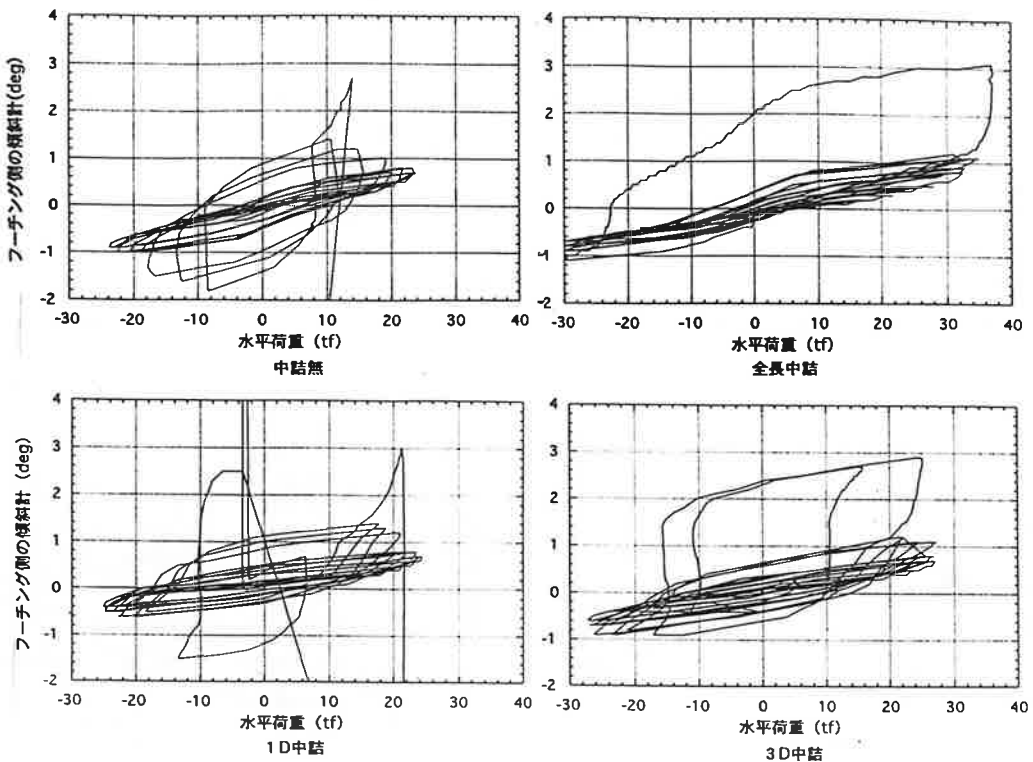


図-4.4 上部フーチングの傾斜角と水平荷重の関係

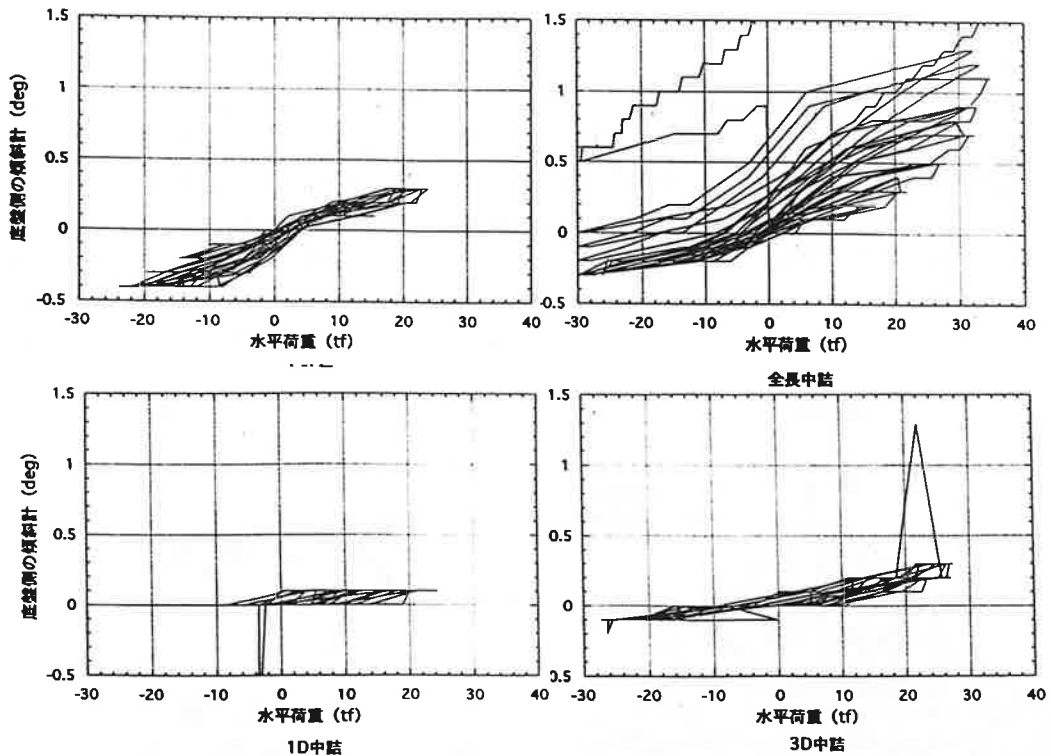


図-4.5 下部フーチングと傾斜角と水平荷重の関係

##### (5) フーチング内の杭頭拘束モーメント

杭頭に発生するモーメントは円滑にフーチングに伝達されなければならない。全長中詰めの試験体では杭頭モーメントに対してフーチング内の抵抗モーメントは著しく小さい。中詰めコンクリートによる杭頭の高い剛性もあって最下段のフープジベル等から大部分のモーメントが円滑にフーチングのコンクリートに伝達されたためと考えられる。それでも明らかに反作用としての抵抗モーメントは存在する。しかし、下部と上部ではたまたま異なる抵抗がみられた。

下部フーチングには亀裂が数本生じたものの鋼管は弾性領域で曲げ抵抗を示した。しかし、①杭では15 $\delta y$ でフープ鉄筋に大きなひずみが現れた。その後、50 $\delta y$ まで一方向载荷する過程で杭の引張側のフーチングの上側コンクリートがこじられるような形でせん断剥離した(図-4.6)。

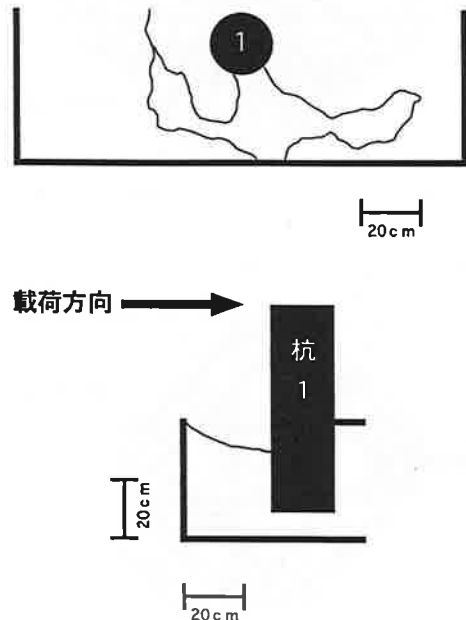


図-4.6 杭①の引張側のフーチングの破損状況

これに対して上部フーチングの杭頭は15 $\phi$ で大きな引張ひずみを示しているが、周りのフープ鉄筋にはそのような徴候は見られない。これはフープ鉄筋を含むコンクリート塊と鋼管の合成体でモーメントを負担しているものと推定される。この時点では上部フーチングには下部より相当多くの数の亀裂が発達しており(図-4.7)、配筋や加力補強材の影響(図-4.8)もあっ

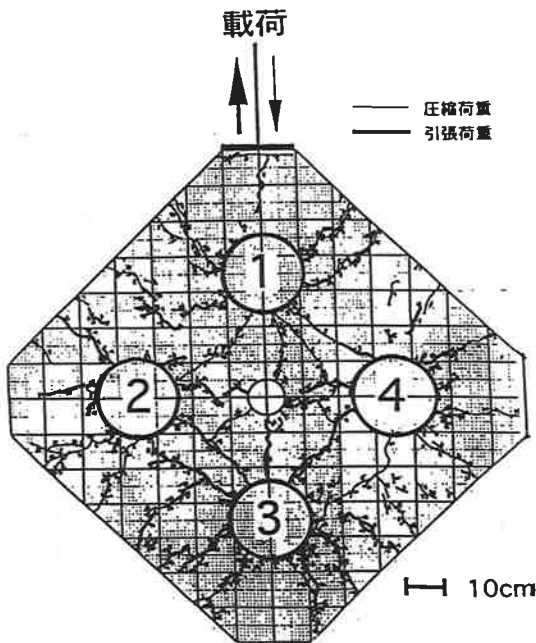


図-4.7 上部フーチング下面の亀裂発生状況

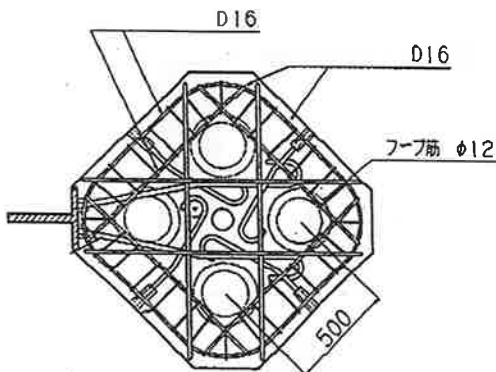


図-4.8 上部フーチング杭頭部の補強状況

て各杭頭を中心にしたブロックの集合体として抵抗したとも考えられる。

(6) 3次元弾塑性有限要素モデルによる解析  
木村らの開発した3次元弾塑性有限要素法<sup>2)</sup>(モデルを図-4.9に示す)に軸力を考慮したM- $\Phi$ 関係(図-4.10)を導入して一連の試験結果に対する非線形解析を行った。M- $\Phi$ 関係は図-4.11のような概念の下に、試験体の材料定数を軸力とともに変化させることによって得られるものとする。

水平荷重と変位の関係を各試験体毎に解析値と実験値で対比したものが図-4.12である。全

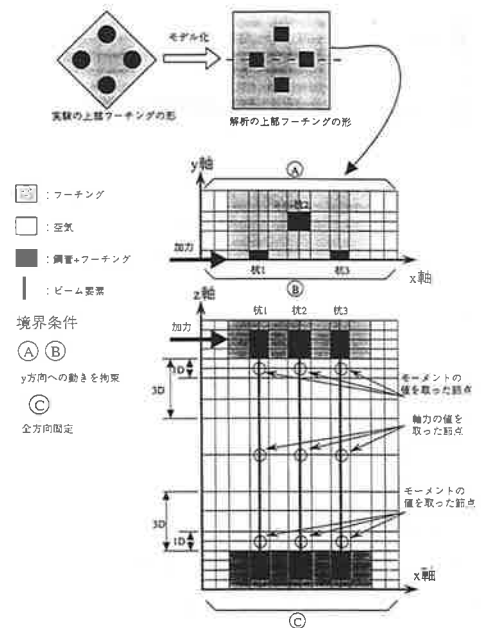


図-4.9 解析に用いたメッシュ詳細図

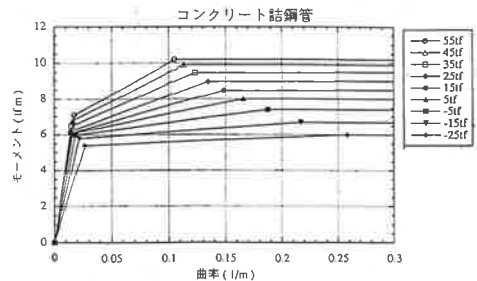
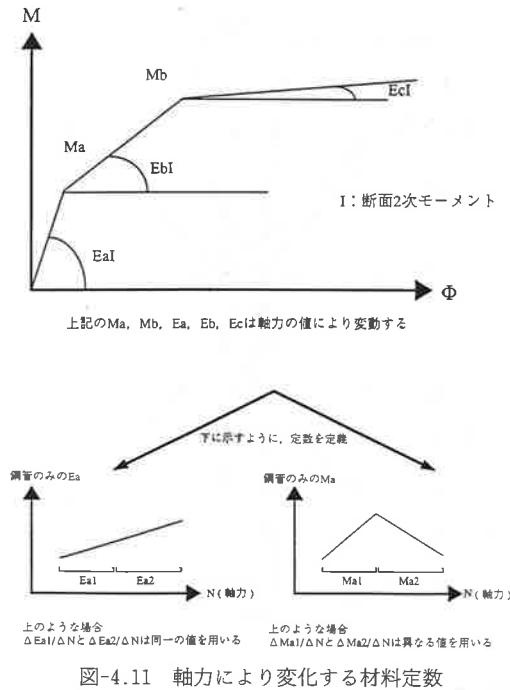


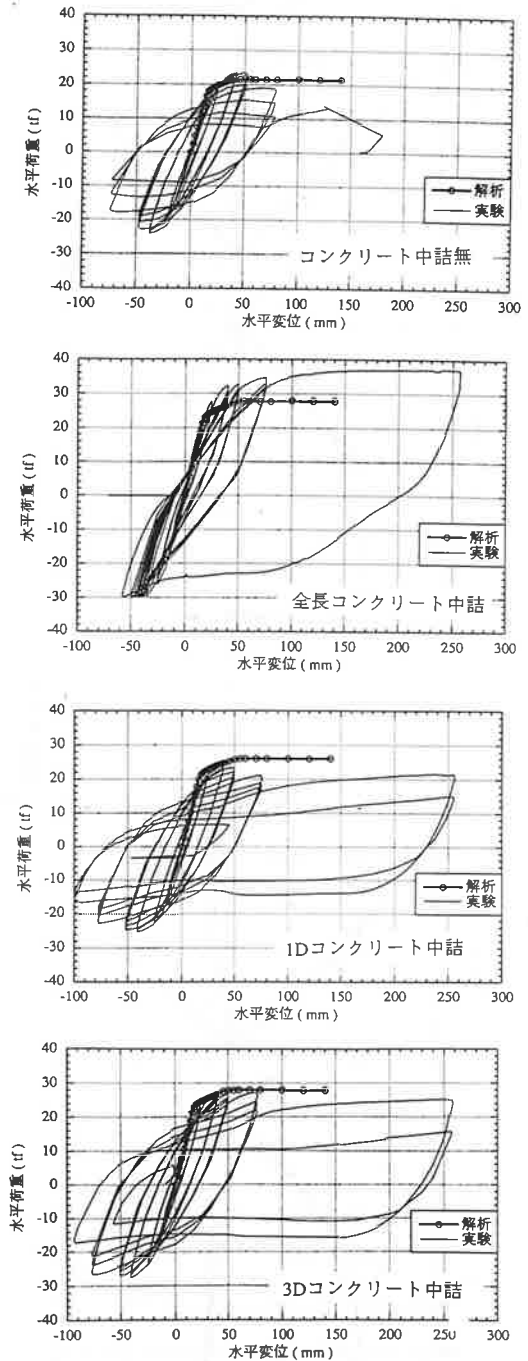
図-4.10 軸力により変化する M- $\Phi$  関係

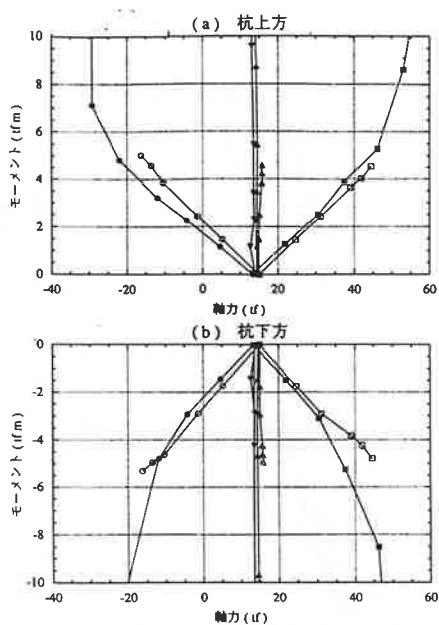


長中詰め以外は良い対応を示している。全長中詰めについては解析では鋼管の軸力負担を 15 tf としたものが、実験では鋼管 5 tf、コンクリート 10 tf で軸力に大きな差があったためである。

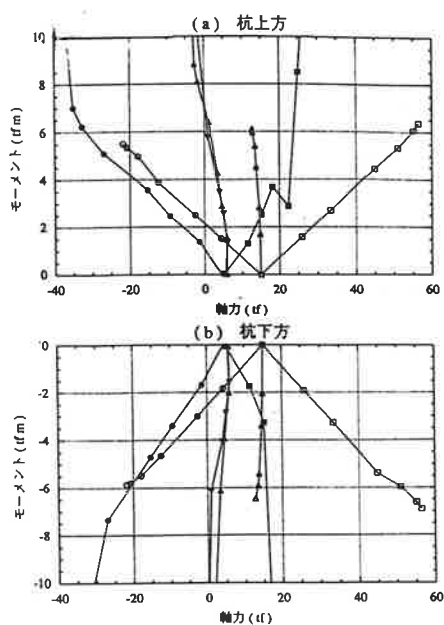
この関係は各試験体の鋼管柱の軸力と曲げモーメント図にも現れている。図-4.13 は試験体の 4 本の柱の上下端の軸力と曲げモーメントを解析値と実験値を比較したものである。同図の全長コンクリート中詰めは水平荷重の前に軸力に 10 tf の差があることを示している。この図の実験値のグラフの始点を解析値の始点に移動すると図-4.14 の通りになり、ほぼ一致する。他の試験体も同様の手法を適用しているので、荷重変位曲線においても他と同じような結果となるはずである。

本解析で、 $3\delta_y$  までの作用荷重と杭基礎の変位、モーメント、杭体の応力等との関係を高い精度で推定することができることが判明した。また、大変形に対しても適切な  $M-\Phi$  の関係、材料定数を設定できれば同様に精度の高い解析が

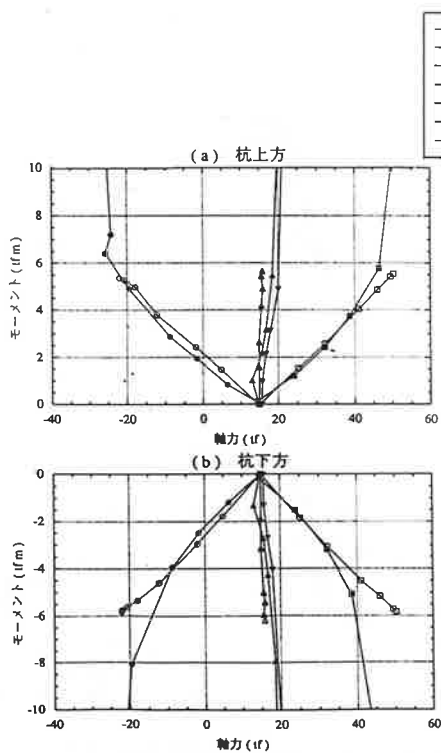




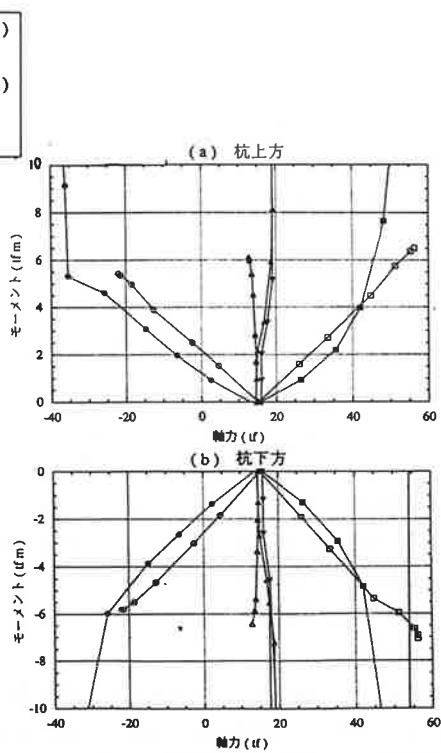
コンクリート中詰無の軸力～モーメント図



全長コンクリート中詰の軸力～モーメント図



1Dコンクリート中詰の軸力～モーメント図



3Dコンクリート中詰の軸力～モーメント図

図-4.13 軸力-モーメント図の解析値と実験値の比較

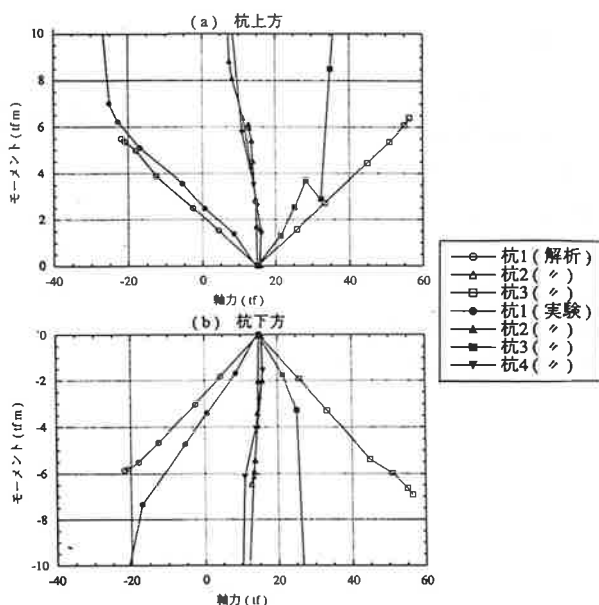


図-4.14 補正後の全長コンクリート中詰の軸力-モーメント図

可能である。

## 5. 結 論

本研究から次のような結論を得ることができた。

(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極めて優れている。それによってせん断耐力の強化、局部座屈の進行の防止、変形性能の向上などを図ることができる。

(2) コンクリートの充填は全長にわたるのが理想であるが、杭頭より  $3D$  ( $D$ : 杭径) の長さでも全長のものに及ばないものの同様の効果が発揮される。現行の道路橋示方書に記載されている  $1D$  でも充填のないものよりも高いせん断耐力と杭径程度の水平変位量まで耐力を保持することが判明した。

(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) コンクリートの充填は繰り返し荷重作用時の繰返し回数による耐荷力の低下を逡減させる効果のあることも判明した。

(5) 杭頭をフーチング内に埋め込む方法で固定した場合、埋め込まれた杭頭部の抵抗モーメントは小さいが、杭頭モーメントに対する反転モーメントとなっている。

(6) コンクリートを充填した鋼管杭の力学的特性を把握するために 3次元弾塑性有限要素法のモデルを用いて一連の載荷試験の結果を解析したところ、一定の変形領域までは試験結果と解析結果の一致を見ることができた。この方法に適用する  $M-\Phi$  の関係、材料定数を適切に設定できれば高い精度の解析が可能であることが判明した。

(7) 試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。

## 謝 辞

本研究は鋼材倶楽部からの大学助成金で実施されたもので、このような機会を提供していただきましたことに厚く御礼を申し上げます。試験の実施にあたっては鋼管杭協会、東京測器研究所の方々、京都大学、八戸工業大学の学生諸君の真摯なる御協力のお蔭で成功裏に終了したことに甚大なる感謝を捧げます。今後は得られたデータをもとに更なる解析を進めて新たな知

見を見出すべく努力を重ねていきたい。

## 参 考 文 献

- 1) 道路橋示方書 IV 下部構造編, 日本道路協会, 平成6年2月
- 2) 木村 亮, 柴田 徹, 八嶋 厚, 杭の水平抵抗に関する3次元弾塑性FEMの開発, 第26回土質工学研究発表会講演集, pp. 1445-1446, 1991