

鋼管杭基礎の終局限界状態の向上に関する研究

IMPROVEMENT OF ULTIMATE BEHAVIOR OF STEEL PIPE PILE FOUNDATION

松田秀高*、塩井幸武**、木村 亮***、長谷川明****

* 八戸工業大学大学院工学研究科土木工学専攻 (〒031 八戸市妙字大開88-1)

** 工博 八戸工業大学教授 構造工学研究所 (〒031 八戸市妙字大開88-1)

*** 工博 京都大学工学部助教授 交通土木工学教室 (〒606 京都市左京区吉田本町)

**** 工博 八戸工業大学教授 土木工学科 (〒031 八戸市妙字大開88-1)

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 measure.

key words: steel pipe pile, horizontal resistance, limit design

1. はじめに

鋼管杭基礎は大型基礎などに使用される一般的な工法で、年間60～100万t o nの鋼管杭が生産されている。鋼管杭基礎は支持力、変形性能、施工性などに優れた特性を持つ基礎工法で、幅広い分野にわたって長く利用されている。

一方、土木建築の構造物の設計方法は、許容応力度法から限界状態設計法への移行が進みつつある。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った。

そこに先の兵庫県南部地震があり、高速道路やビルなど多くの土木建築の構造物が崩壊するという被害があった。いくつかの壊滅的な被災例から、鋼構造物の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することが求められ、早急に基準を改正して構造物に大きな変形性能とせん断耐力を付与することになった。そのような状況の下にて限界状態設計法の導入が急がれるようになり、各種の技術基準の改正はその考え方を取り入れる方向に進んでいる。

基礎でも変形性能とせん断耐力の照査が終局限界状態について必要とされ、その検討が進められている。その中で鋼管杭基礎は地震による水平力に対して終局限界状態を鋼管杭の座屈で迎えることになる。

鋼管杭は円筒形の鋼材という変形追従性のよい特性を持ちながら、小さな変形量で生じる座屈で終局限界となることから、他の基礎形式に対して著しく不利になるといわれていた。

鋼構造物として鋼管杭基礎も、鋼材そのものの終局限界状態まで耐えられるような耐震技術開発のため、一連の水平繰返し載荷試験を行った。すなわち、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の付近まで持続させて、鋼管杭の特性を最大限発揮させるものである。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防ぐとともに、せん断補強の効果も迅速的に期待し、破壊は鋼管の曲げ破壊で迎えるようにするものである。

そこで、充填長の異なる試験体を4体作成し、試験体に鉛直荷重をかけながら変位制御された水平荷重を繰返載荷し、コンクリートを中詰めすることによる効果を調査した。

2. 実験方法

実験装置は図-1に示すようなセットアップとし、載荷は変位制御で繰返水平載荷試験を実施した。ここでは、実験装置、試験体、実験方法および計測について述べる。

3. 実験結果

(1) 繰り返し載荷試験による荷重と変位

全体の試験の基準とした中詰無(図-6)では、荷重変位曲線は3 δy まではほとんど直線的に挙動している。5 δy からはヒステリシスループを描くようになり、全体の剛性も下がり始める傾向となり、8 δy では鋼管に座屈の兆候もあらわれた。一方向載荷では、水平変位13cm付近の荷重変位曲線と8 δy の頂点を結ぶとヒステリシスループ外側包絡線が負の勾配となり、鋼管柱の耐力の劣化が明らかとなった。また、実験終了時に鋼管は写真-2のような提灯座屈の形状となった。

全長中詰(図-7)は、 δy の段階で、中詰無の2 δy に相当する荷重となり、全長中詰の弾性域での剛性は約2倍とすることができる。2 δy 、3 δy 、5 δy では、中詰無の3 δy 、5 δy 、8 δy に相当する荷重となった。相対的に剛性は低下しながらも中詰無の約1.2~1.5倍の値を保っている。ヒステリシスループは2 δy から見られ、次第に大きなループを描くようになった。8 δy からは鋼管に局部座屈の兆候が見られるとともに耐荷力の頭打ち、繰返しによる耐荷力の低下が現れた。一方向載荷は26cm(50 δy 相当)まで行ない、荷

重の増加も低下もない塑性状態となり、明らかに中詰めコンクリートの効果を示す結果となった。

3D中詰(図-8)は、耐力でも剛性でも中詰無と全長中詰の中間的な挙動を示している。すなわち2 δy まではほとんど直線的に挙動し、3 δy ではわずかに剛性の低下とヒステリシスループを示している。これは変位が鋼管柱の空洞部の変形に、影響されたものと考えられる。8 δy では鋼管柱底部に座屈の兆候が見られ、繰返しによる荷重の低下が現れはじめ、耐荷力の方は頭打ちになった。一方向載荷は25cmまで行ない、全長中詰とほぼ同じ効果が現れた。

1D中詰(図-9)は、8 δy までは図-6の中詰無とほとんど同じ挙動を示しており、中詰めコンクリートの効果は現れていない。8 δy では鋼管底部に局部座屈の兆候が見られる。10 δy からは強制変形の繰返しの度に荷重は低下しているものの、中詰無と比較するとその量ははるかに小さなものとなっている。ヒステリシスループは比較的安定し、その包絡線の負の勾配は緩やかなものであった。最後に一方向載荷を26cmまで行なった所、ヒステリシスループの形状は3D中詰に似かよったものになった。

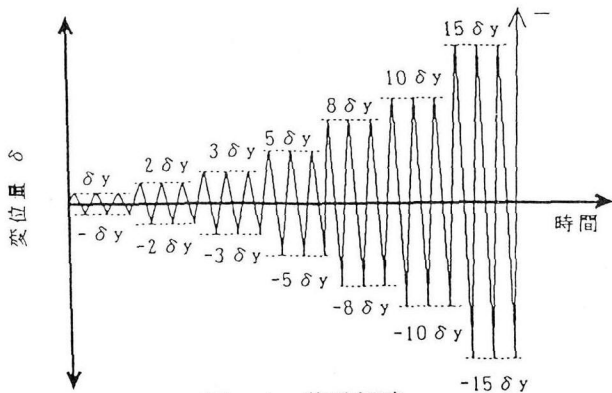


図-4 荷重経路

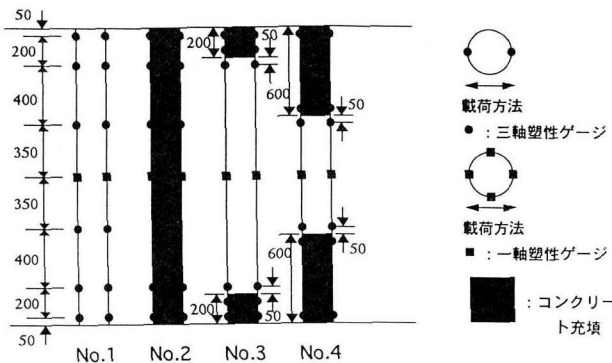


図-5 各試験体ひずみゲージ位置

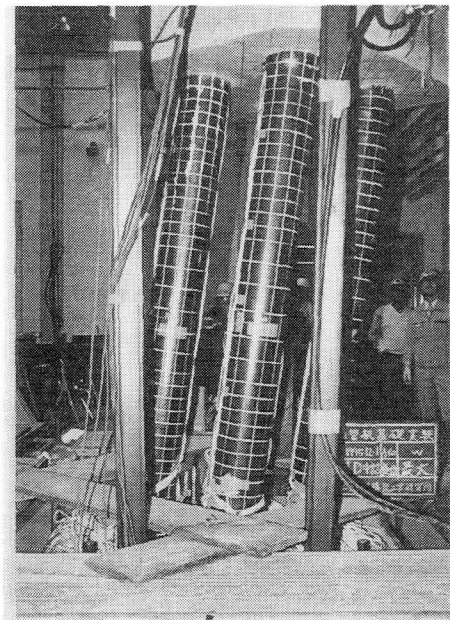


写真-1 一方向載荷最大変位時の鋼管の状況

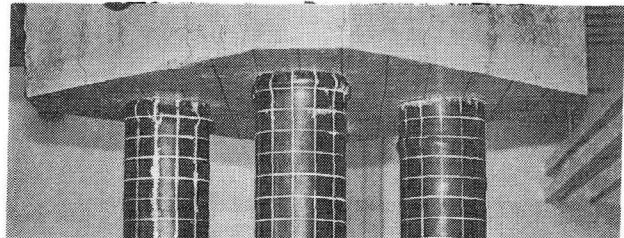


写真-2 鋼管杭杭頭の提灯座屈の状況

(1) 実験装置

装置の左側は鋼製骨組の反力フレームで、右側は鋼管が4本組となった試験体である。その鋼管の上下をコンクリートフーチングで固定している。試験体にはセンターホールジャッキとS E Eケーブルで鉛直荷重をかけ、反力フレームと試験体の間の両動ジャッキで水平荷重をかけた。ただし、両動ジャッキの引張方向は30tfまでの制限がある。

(2) 使用した試験体

試験体は、図-2に示すように杭径 $D=216.3\text{mm}$ 、板厚 $t=4.5\text{mm}$ 、杭長 $L=2600\text{mm}$ （7-チング埋め込み部 $300\text{mm} \times 2 + 2000\text{mm}$ ）のSTK400構造用鋼管4本を、上下のコンクリートフーチングで固定されたもので構成されている。図-3に示すように鋼管群杭は、①中詰めが無い試験体（以下、中詰め無）、②全長に中詰めをした試験体（以下、全長中詰め）、③上下端1D中詰めとなっている試験体（以下、1D中詰め）、および④上下端3Dが中詰めとなっている試験体（以下、3D中詰め）の4試験体を作成した。フーチングおよび中詰めコンクリートのコンクリート強度は28日強度で $407\text{Kg}/\text{cm}^2$ である。

(3) 実験方法

実験方法は、最初にセンターホールジャッキとS

E E Eケーブルによって一定の軸力60tfをかけた。これを維持したまま4本の鋼管の対角線の方に水平荷重を上部フーチングに作用せしめた。载荷は変位制御で行い、コンクリート中詰め無しの計算上の降伏変位 δy （ 5.26mm ）を基準にして、図-4に示すように、 δy 、 $2\delta y$ 、 $3\delta y$ 、 $5\delta y$ 、 $8\delta y$ 、 $10\delta y$ 、および $15\delta y$ の変位を生じる荷重を正負交番で繰返3回ずつそれぞれの試験体にかけた。その後、写真-1に示すように $50\delta y$ に相当する変位まで一方向载荷を行った。

载荷速度は、繰り返しループ毎に変化せしめ、降伏変位 δy と $2\delta y$ では载荷速度 $0.05\text{mm}/\text{min}$ 、 $3\delta y$ と $5\delta y$ では载荷速度 $0.1\text{mm}/\text{min}$ 、 $8\delta y$ 、 $10\delta y$ 载荷速度では $0.2\text{mm}/\text{min}$ 、 $15\delta y$ と一方向载荷では载荷速度 $0.4\text{mm}/\text{min}$ でそれぞれ行った。

(4) 計測

荷重、変位、傾斜およびひずみである。荷重は水平、鉛直の2点、変位はフーチング上部の水平4点、および鉛直4点の計8点、傾斜は上下フーチングコンクリートの上部の2点で計測した。ひずみは、4本の鋼管杭に1軸塑性ゲージを16点、3軸塑性ゲージを48点を、図-5のように張り付け、それぞれ計測することとした。

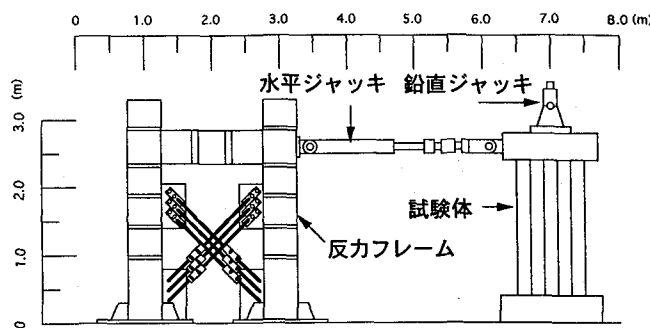


図-1 実験装置

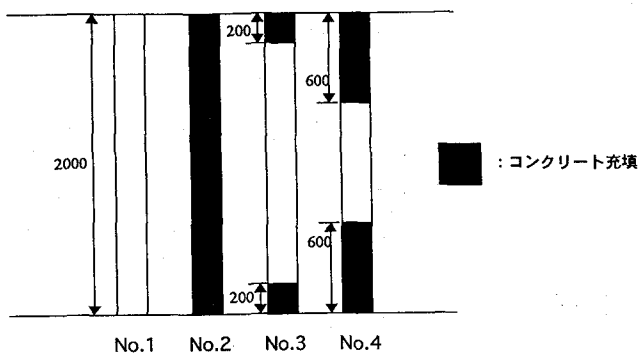


図-3 試験体の種類

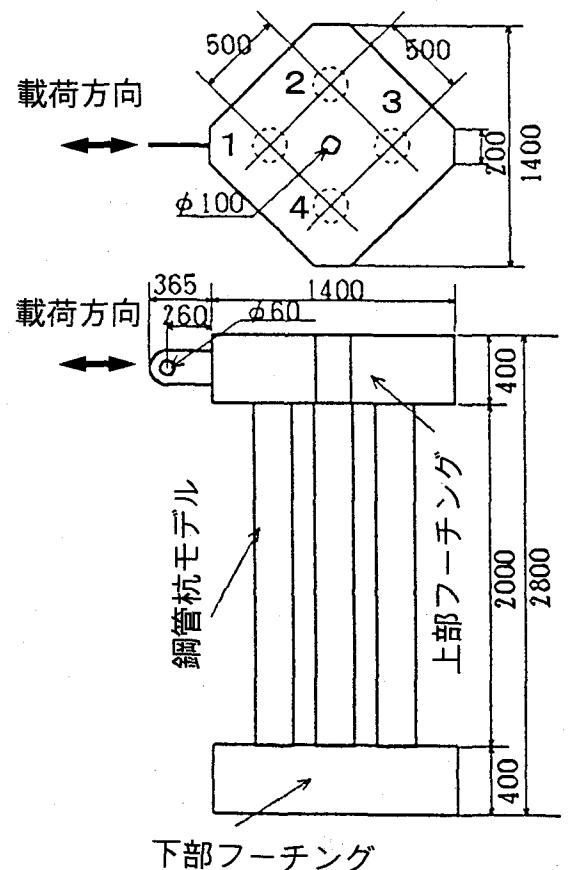


図-2 試験体

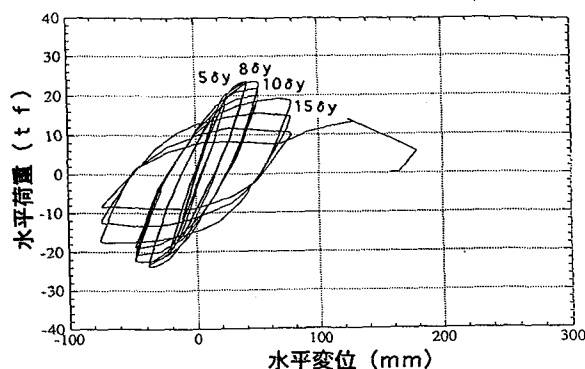


図-6 水平荷重と水平変位の関係(中詰無)

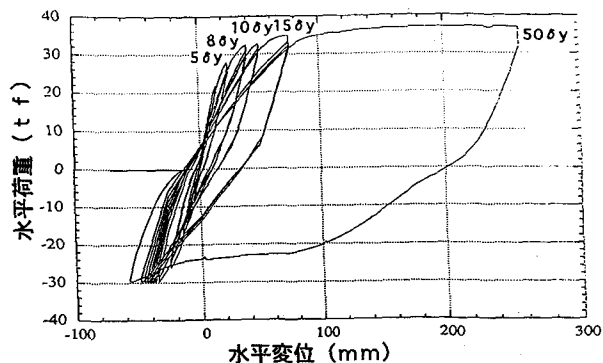


図-7 水平荷重と水平変位の関係(全長中詰)

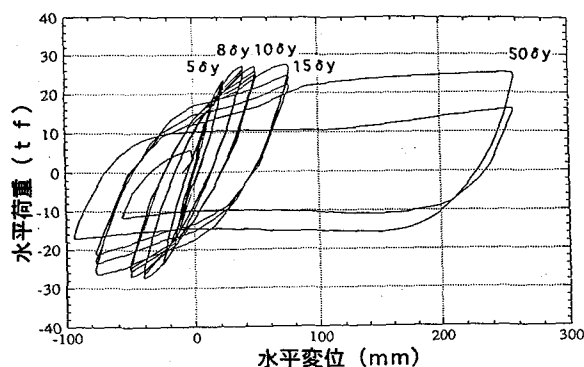


図-8 水平荷重と水平変位の関係(3D中詰)

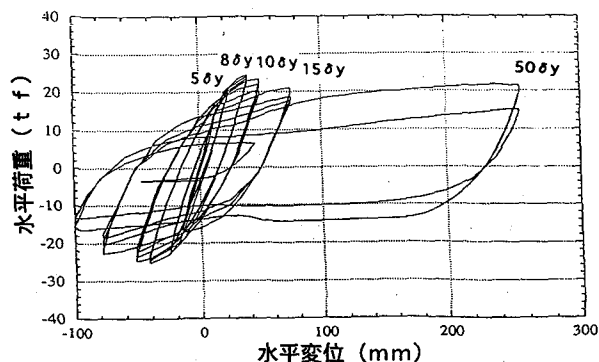


図-9 水平荷重と水平変位の関係(1D中詰)

(2) 荷重低下率

図-10は荷重低下率を表したもので縦軸に荷重低下率、横軸に各 δy を示している。荷重低下率は各降伏変位 δy の3回目の繰り返しループ中の最大水平荷重を、各 δy の1回目の繰り返しループ中の最大水平荷重で除したものである。

中詰無では、 $8\delta y$ 以降急激に低下しており、 $15\delta y$ では低下率が40%近くになっている。これに対して、中詰めコンクリートを詰めたものは荷重低下率が8%から19%までの低下にとどまった。これは中詰めコンクリートの効果があったことを示すものと考えられる。

(3) 減衰定数

図-11は図-6～9の2回目のヒステリシスループから次式による等価減衰定数 h_{eq} を計算した結果を示した。

$$h_{eq} = 1 / 4\pi \times (\Delta W / W_e)$$

ここで、 ΔW 、 W_e はそれぞれヒステリシスループの1サイクルの面積および等価ポテンシャルエネルギーである。

水平変位の量が増加すると減衰定数も大きくなっていることがいえる。中詰無は、減衰定数が最も高く、

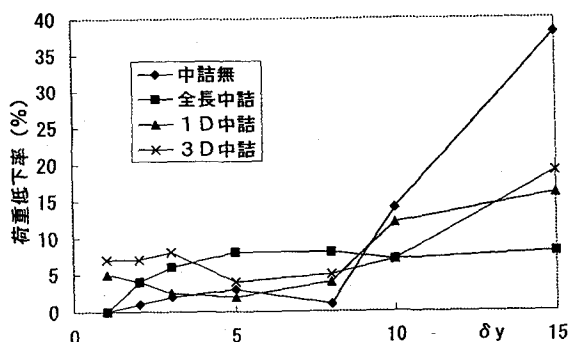


図-10 荷重低下率と水平変位の関係

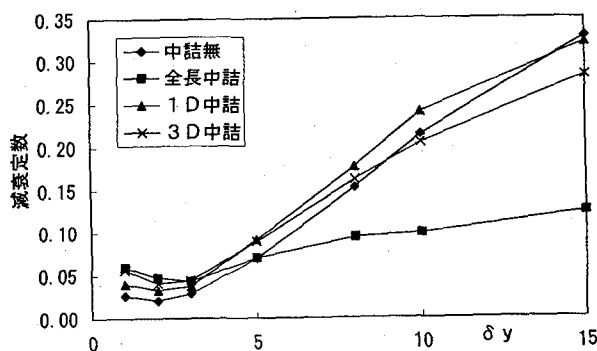


図-11 等価減衰定数と水平変位の関係

荷重が大きくなると、試験体に与えられたエネルギーの損失が大きい。しかし、鋼管にコンクリートの中詰めすればするほど、減衰定数は低くなっていき試験体に吸収されたエネルギーの損失は少なくなる。

また、 $8\delta y$ 以降は全長中詰とその他の鋼管の減衰定数に大きな差が生じていることが示されている。これは、全長中詰以外の試験体では $8\delta y$ 以降鋼管底部に座屈の兆候が現れたことと関係があると思われる。

(4) 中詰めコンクリート充填部の鋼管のひずみ

図-12は、中詰無試験体の4本の鋼管のうち中立軸に位置する鋼管の荷重側面に張り付けられた塑性ひずみゲージの記録である。図の上下が上下フーチングコンクリートの位置にあたる。図中○、△、□、●、▲、■、および◆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 $15\delta y$ のそれぞれ第1回目の荷重載荷時のひずみを表している。なお、水平荷重がなく鉛直荷重のみのときは全域で計算値に近い $-240\mu s$ となっていた。荷重の増大に伴って、上部では圧縮ひずみが増

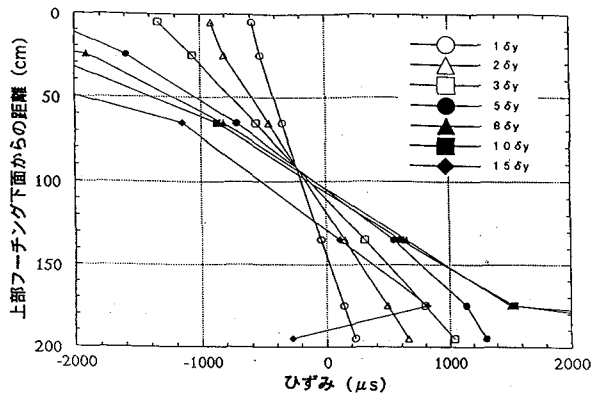


図-12 水平載荷時の鋼管のひずみ状況(中詰無)

大し、下部では圧縮ひずみから引っ張りひずみに変わり値も増大している。ほぼ $3\delta y$ まではひずみの分布が線形となっているが、 $5\delta y$ から直線性が崩れてきている。

図-13は、同じく全長中詰の場合のひずみの状況を描いたものである。中詰無の場合のものに比べ、ひずみが小さく示されている。また、 $3\delta y$ までは直線性があつたものの、 $5\delta y$ からは、上下の杭端から60cmの部分から直線性が折れている。

同様に、図-14の1D中詰の場合は、 $3\delta y$ までの上下1D部分(220mm)のひずみに注目すると、コンクリート中詰部のひずみの直線性が崩れ、中詰無の場合に比べひずみが小さいことが示されている。

同様に、図-15の3D中詰の場合も、上下の3D部分でひずみの直線が折れて、中詰めコンクリートの効果が現れている。これらのひずみの低下から、中詰めコンクリートによってコンクリート充填部の断面は、鋼とコンクリートの複合部材として強度を発揮していると考えられる。

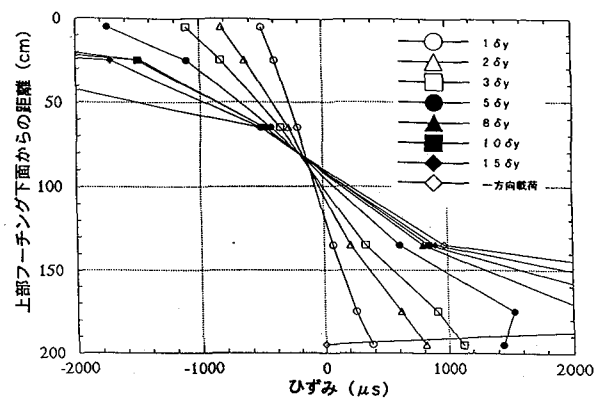


図-13 水平載荷時の鋼管のひずみ状況(全長中詰)

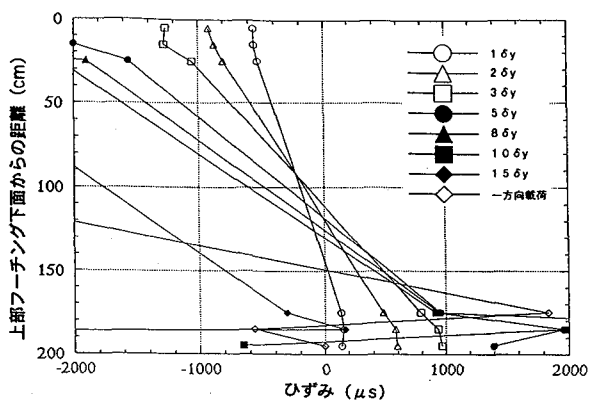


図-14 水平載荷時の鋼管のひずみ状況(1D中詰)

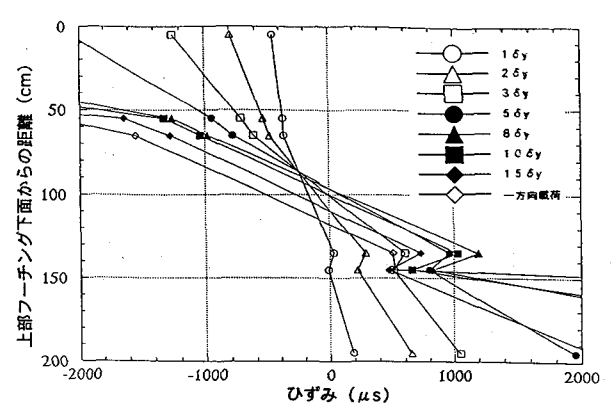


図-15 水平載荷時の鋼管のひずみ状況(3D中詰)

(5) 鋼管杭の中詰めコンクリートの破壊状況

中詰めコンクリートの効果を確認するため、実験終了後ほぼ水平変位を強制的に戻し、鋼管の一部をはぎ取って中詰めコンクリートの破壊状況を調べた。写真-3は1D中詰の杭3の上部で、杭頭から10cmの付近に大きな亀裂があった。図-16は各試験体の中詰めコンクリートの破壊状況を示したものである。大きな亀裂が見られた位置は、1D、3Dともに中詰めコンクリートの中間部であった。この位置が、発生した提灯座屈の位置とは異なっていたことは鋼管とコンクリートの最大曲げひずみの発生する位置が異なっていたことを示す。全長中詰試験体の中詰めコンクリートには大きな亀裂は見つからなかった。

4. 結論

本実験は鋼管杭の杭頭部にコンクリートを中詰めることによる効果を調査し、実験結果を比較検討したものである。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) 鋼管杭基礎の鋼管内にコンクリートを中詰めることによって、水平耐力の強化と、変形性能の大幅な向上を見いだすことができた。
- (2) 中詰めコンクリートは長ければ長いほど水平耐力や高い変形性能は向上するが、1Dのコンクリート中詰でも実用的範囲内で水平耐力や変形性能が優れていることが実証された。
- (3) 中詰めをした鋼管杭基礎は変形の増大とともに減衰定数が大きくなるが、杭本体、中詰めコンクリートともに損傷の程度は軽いものであることが観測された。

謝辞

本研究を行うにあたり、八戸工業大学工学部建築工学科の毛呂眞助教授、鋼管杭協会には、御指導御協力を頂きました。ここに各位に対して深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 柴田明德：最新耐震構造解析，森北出版，pp. 151-159

(1997年9月6日)

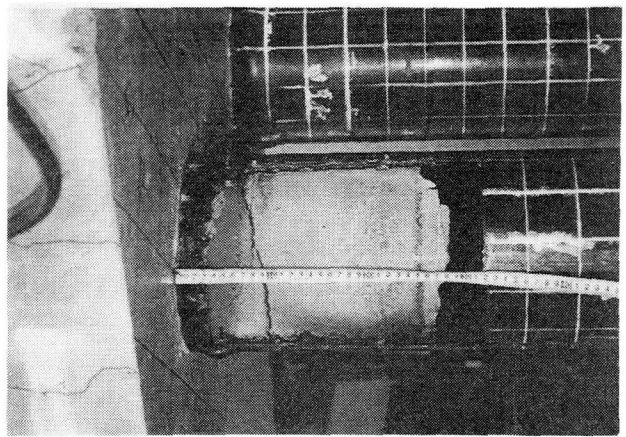


写真-3 中詰めコンクリートの亀裂の状況
(1D中詰)

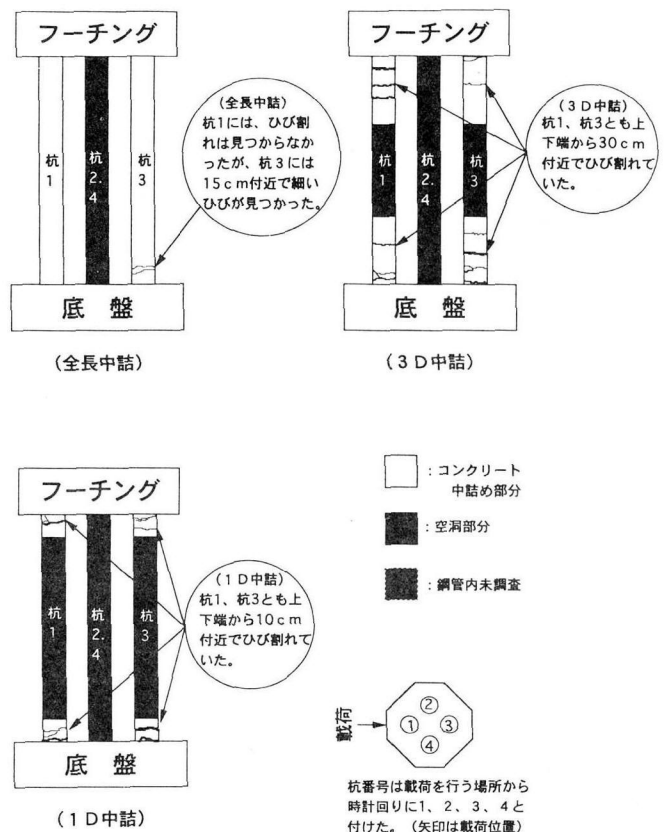


図-16 中詰めコンクリート破壊状況