

鋼管構造における中詰めコンクリートの効果

長谷川 明*、塩井 幸武**

* 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)

** 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)

兵庫県南部地震における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、特に構造物に大きな変形性能とせん断耐力が求められている。橋脚に使用される鋼管は、材料自身の延性が高いにも関わらず終局限界状態を鋼管の座屈で迎えることになり材料の有効な強度を発揮できない。これを改善する方法としてコンクリートを鋼管内に中詰める方法がある。本文は、コンクリートで中詰めされた鋼管の変形性能と終局耐力の改善状況について水平載荷実験から得られた知見について述べるものである。

key words: steel pipe, concrete packing, horizontal resistance, limit design

1. はじめに

兵庫県南部地震では、高速道路やビルなど多くの土木建築の構造物の崩壊する被害が発生した。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、特に構造物に大きな変形性能とせん断耐力が求められている。これに対し、鋼管は材料自身の持つ強度や延性などの性能が高いにも関わらず終局限界状態を鋼管の座屈で迎えることになり、材料の有効な強度を十分に発揮できない。

これを改善する方法としてコンクリートを鋼管内に中詰めることが考えられる。そこで、中詰めされた鋼管試験体を作成し水平載荷試験を行って、変形性能とせん断耐力の改善状況を調査した。中詰め長さの効果を検証するため、中詰め長さの異なる試験体を4体作成し、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ることによる効果を調査した。これによって、鋼管の座屈を防止し、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、鋼管の特性を最大限発揮させることができる。この結果鋼管の破壊は、曲げ破壊で迎えることができる。

2. 実験方法

実験装置を図-1に示す。ここでは、実験装置、試験体および実験方法について述べる。

(1) 実験装置

装置の左は鋼製骨組の反力フレームで、右は鋼管が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。試験体の上部フーチングにはセンターホールジャッキとSE

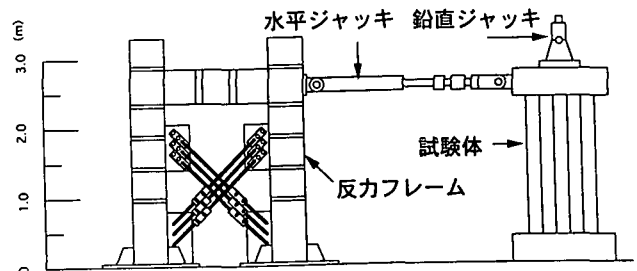


図-1 実験装置

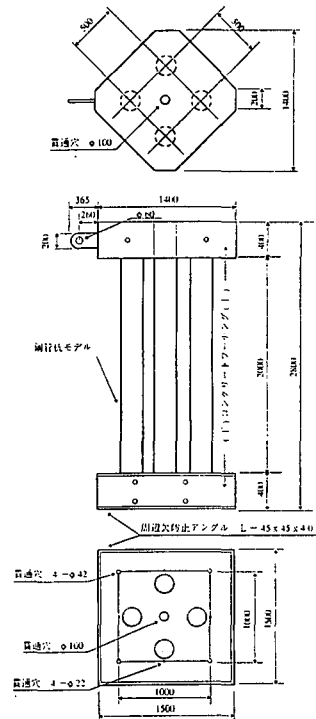


図-2 試験体

EEケーブルで鉛直荷重をかけ、反力フレームと試験体間の両動ジャッキで交番の水平荷重をかけた。

(2) 試験体

試験体は、図-2に示すように径 $D=216.3\text{mm}$ 、板厚 $t=4.5\text{mm}$ 、長さ $L=2600\text{mm}$ （コンクリート埋め込み部 $300\text{mm}\times 2+2000\text{mm}$ ）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。これは、1回の試験で圧縮側、引張側および中立軸上の3種の載荷状況を同時に発生できることと、試験の安全性を考慮したことによるものである。

鋼管は、①中詰めが無い試験体（中詰無と略）、②全長に中詰めをした試験体（全長中詰）、③上下端1D（D：管径）中詰めとなっている試験体（1D中詰）、および④上下端3Dが中詰めとなっている試験体（3D中詰）の4試験体を作成した。上下コンクリート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 kgf/cm^2 である。

(3) 実験方法

最初にセンターホールジャッキとSEEケーブルによって軸力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コンクリートに作用させた。荷重は変位制御で行い、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、 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、 $50\delta y$ に相当する変位（約 260mm ）まで一方向荷重を行った。

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-3）では、荷重変位曲線は $3\delta y$ まではほとんど直線的に挙動している。 $5\delta y$ 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る。また、繰り返し載荷によっても剛性が低下していることが見える。 $8\delta y$ では鋼管に座屈の兆候もあらわれた。一方向荷重では、水平変位 13cm 付近の荷重変位曲線と $8\delta y$ 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-1のような提灯座屈の形状となった。

全長中詰（図-4）は、 δy の段階で、中詰無の $2\delta y$ 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倍と言うことができる。 $2\delta y$ 、 $3\delta y$ 、 $5\delta y$ では、それぞれ中詰無の $3\delta y$ 、 $5\delta y$ 、 $8\delta y$ に相当する荷重が測定され、変位の増大に伴って剛性の増加率が高く中詰無の約1.2~1.5倍の値を保っている。ヒステリシスループは $2\delta y$

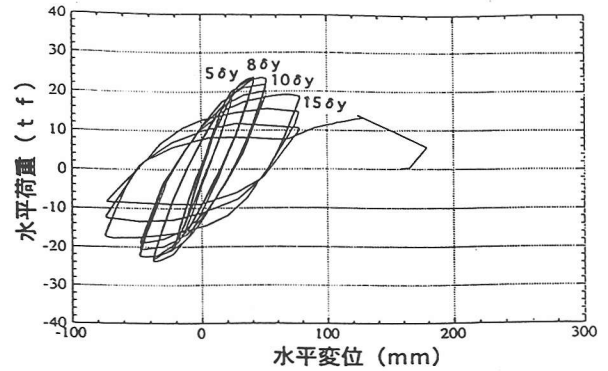


図-3 水平荷重と水平変位の関係(中詰無)

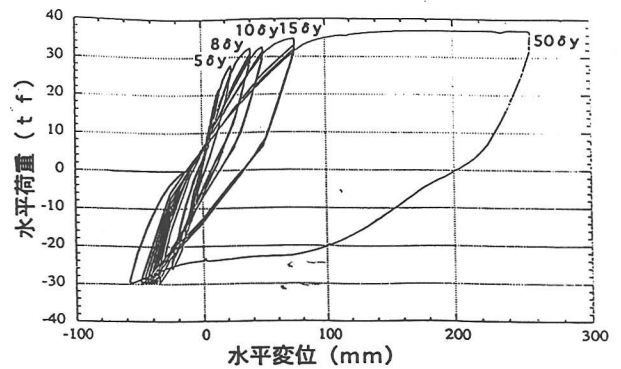


図-4 水平荷重と水平変位の関係(全長中詰)

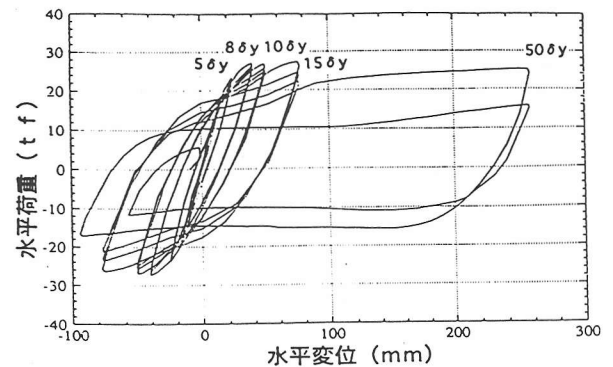


図-5 水平荷重と水平変位の関係(3D中詰)

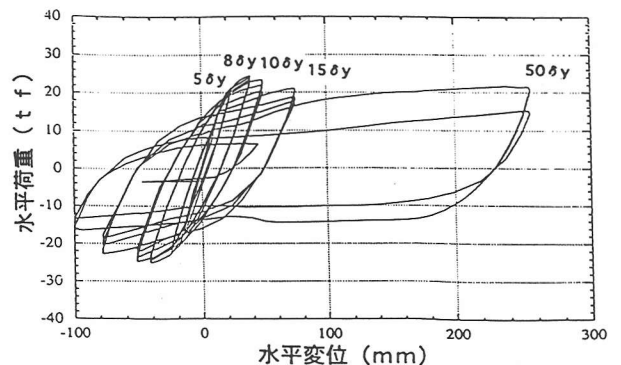


図-6 水平荷重と水平変位の関係(1D中詰)

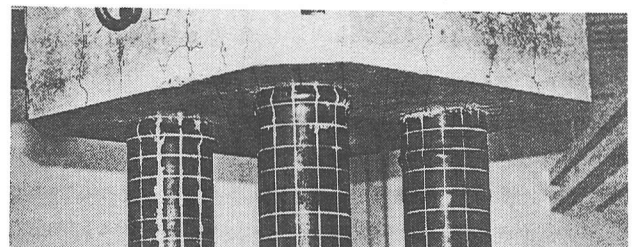


写真-1 鋼管頭部の提灯座屈の状況

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わずかに現れた。一方向荷重は26 cm (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。この結果、中詰めコンクリートによって変形性能と水平耐荷力が大きく改善されていることがわかる。

3D中詰 (図-5) 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。一方向荷重は25 cmまで行ない、全長中詰とほぼ同じ効果が現れた。

1D中詰 (図-6) 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。最後に一方向荷重を26 cm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。

(2) 荷重低下率

図-7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。ここで述べる荷重低下率は各降伏変位 δy の3回目の繰返しループ中の最大水平荷重を、各 δy の1回目の繰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 δy 以降急激に低下しており、15 δy 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ており、中詰めコンクリートの効果を示すものと考えられる。

(3) 減衰定数

図-8は図-3~6の2回目のヒステリシスループから、ヒステリシスループの1サイクルの面積 ΔW と等価ポテンシャルエネルギー We を求め、次式によって等価減衰定数 h_{eq} を計算した結果である。

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

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、荷重が大きくなると、試験体に与えられたエネ

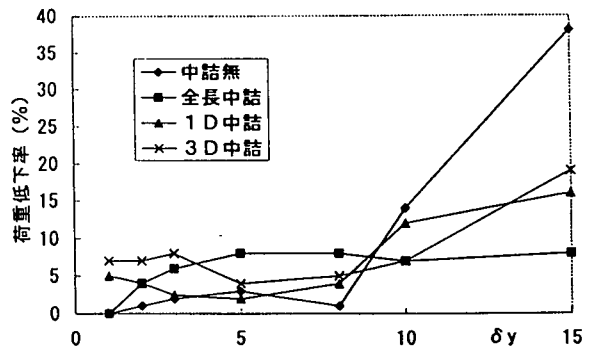


図-7 荷重低下率と水平変位の関係

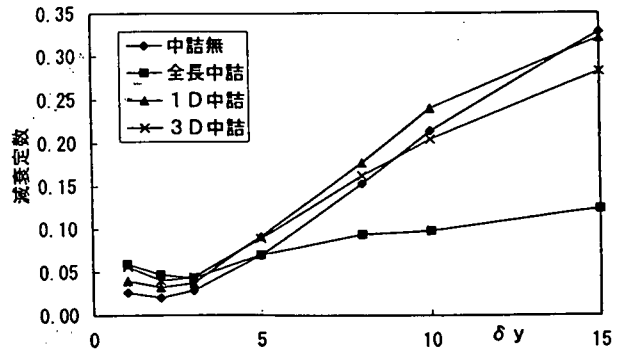


図-8 等価減衰定数と水平変位の関係

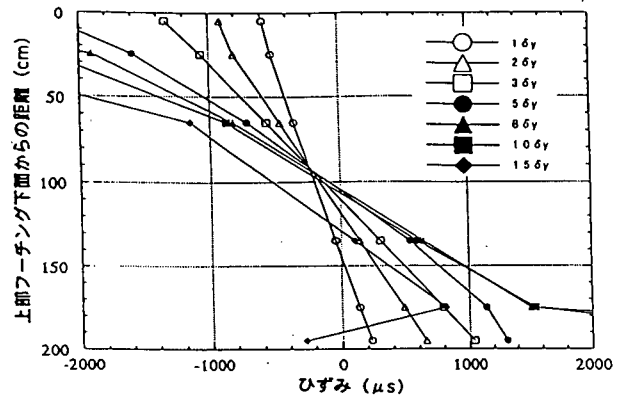


図-9 水平載荷時の鋼管のひずみ状況(中詰無)

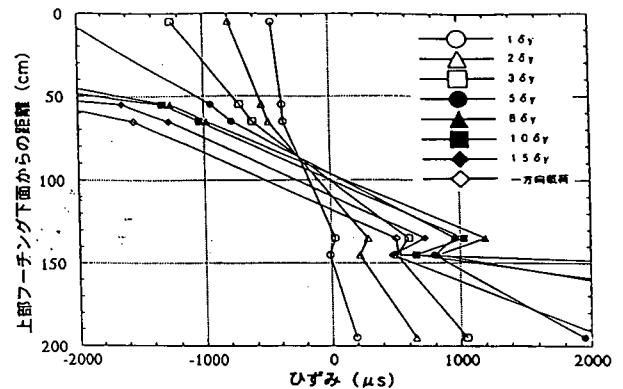


図-10 水平載荷時の鋼管のひずみ状況(3D中詰)

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、中詰めコンクリートと鋼管の合成作用の存在が大きく影響していると考えられる。

(4) 中詰めコンクリート充填部の鋼管のひずみ

図-9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載荷側側面に張り付けられた塑性ひずみゲージの記録である。荷重の増大に伴って、上部では圧縮ひずみが、下部では引張ひずみがそれぞれ増大している。

同様に、図-10の3D中詰の場合は、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影響が現れている。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發揮していると考えられる。

(5) 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-2は1D中詰と3D中詰の上部で、1Dの頭部から10cmの付近に大きな亀裂が1本認められたただけであった。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。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

本実験により得られた結果をまとめると次のようになる。

(1) 鋼管内にコンクリートを中詰めすることによって、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

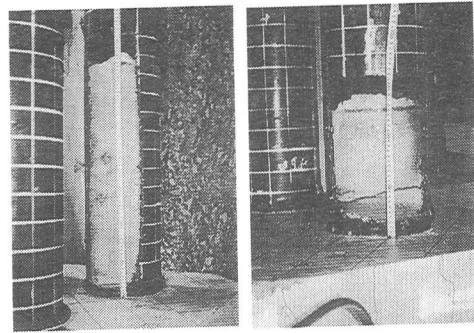


写真-2 中詰めコンクリートの亀裂の状況
(左1D中詰、右3D中詰)

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) 中詰めをした鋼管は変形の増大とともに減衰定数が大きくなるが、鋼管および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。

(4) 中詰めされた鋼管においても、座屈現象が見られたが、この発生時のひずみは塑性域に達していることから、この座屈は塑性座屈と考えられ弾性座屈とは異なるものである。

これらを総合すると鋼管内に中詰めされたコンクリートは次の2つの機能を持つと考えられる。

(1) 弾性座屈変形を機械的に拘束することで鋼管の性能を改善する。

(2) 鋼管と一体となった複合断面として、抵抗曲げモーメントを改善する。

謝辞

本研究を進めるにあたり、京都大学木村亮助教授、八戸工業大学毛呂眞助教授および鋼材倶楽部の指導と協力を受けた。ここに感謝申し上げます。

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3月31日)

The effect of concrete packed in steel pipe structures

Akira HASEGAWA and Yukitake SHIOI

Steel pipes has the superior properties in bearing capacity and ductility. However, since the ultimate resistance for horizontal force is limited by buckling of pipe and estimated in a small values, it is required to prevent buckling and to utilize the steel pipe up to its ultimate strength. Paper reports the results of loading tests of steel pipe structure models in large scale, adapting concrete packing in pile top, and the successful effect, with this measure.