

論文 中空式二重鋼管合成柱の曲げ挙動に及ぼす軸方向鉄筋の影響

柳下 文夫^{*1}・谷平 勉^{*2}・鬼頭 宏明^{*3}・園田 恵一郎^{*4}

要旨：中空式二重鋼管合成柱の耐震安全性を検討するために、モデル試験体を用いて静的正負繰返し載荷実験を行った。実験結果から、柱脚近傍に中込コンクリートを配さない場合、同部の内側鋼管に部分座屈が生じ、耐力が減じられると共にじん性の大幅な低下が示されたことから、中込コンクリートの有効性が確認された。また、軸方向鉄筋を配することにより鋼管に生じる損傷を分散させることができ、結果として耐荷力の安定とじん性の改善が図られた。

キーワード：二重鋼管，軸方向鉄筋，合成構造，柱，じん性，耐震性，座屈

1. はじめに

同心に配置された鋼材外筒と鋼材内筒とを有し、両者間にコンクリートが充填されて一体化された中空式二重鋼管合成柱は、高橋脚の耐震性向上の命題である地震時の慣性力の低減を可能にし、さらに、優れた施工性からもたらされる省力化による経済的性能をも期待できる構造形式といえる。

既に筆者らは中空式二重鋼管合成柱の充填コンクリート厚さを主要因とした実験を行い、同構造

形式が、耐震設計上の重要な要求項目（例えば、十分な変形性能を有すること）を具備した形式であることを検証し報告¹⁾した。しかし、すべての試験体における最終破壊が鋼管の局部座屈部に生じる破断によるものであったことから、その性能強化と安定性の検討が必要となった。

そこで本論文は、さらなるじん性改善に着目し、下層セグメント内に軸方向鉄筋を配した試験体を中心に行った載荷実験を通して、中空式二重鋼管合成柱の高じん性域における耐荷力の安定と

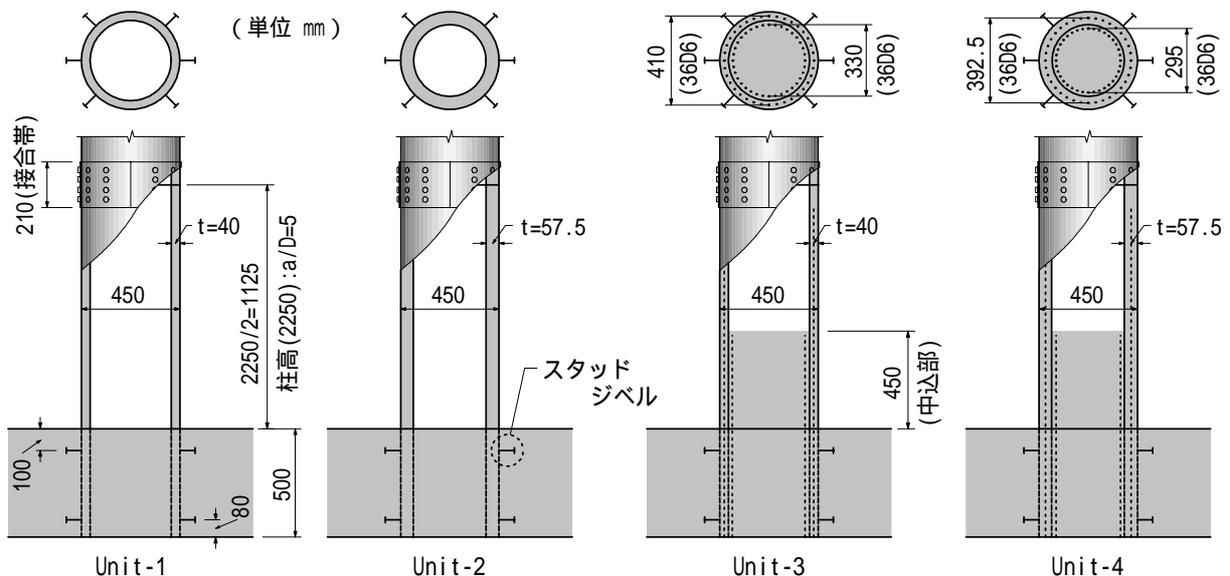


図 - 1 試験体の形状と寸法

*1 近畿大学助教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)
 *2 近畿大学教授 理工学部土木工学科 工博 (正会員)
 *3 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科 博士(工学) (正会員)
 *4 大阪工業大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

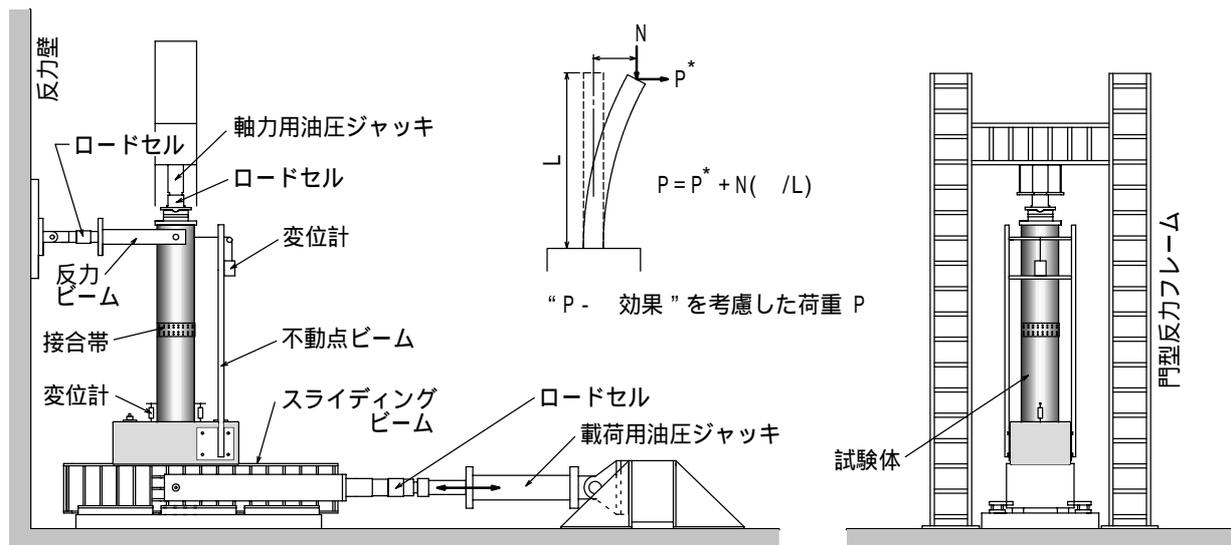


図 - 2 荷重装置と試験体

変形性能等について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料と試験体

柱部に打設されたコンクリートは早強コンクリートであり、実圧縮強度は $20\text{N}/\text{mm}^2$ である。また、鋼管は材質SS400の平鋼板を造管して使用した。その機械的性質は、実降伏点強度 $259\text{N}/\text{mm}^2$ 、実破断強度 $445\text{N}/\text{mm}^2$ である。

本実験に用いた試験体の形状と寸法を図 - 1 に示す。試験体は文献[1]と同様に、想定した直径 4.5m の円形断面を有する橋脚に対して $1/10$ モデルとしている。実験要因は、充填コンクリート厚さ(Unit-1,3: 40mm)(Unit-2,4: 57.5mm)、軸方向鉄筋(Unit-1,2: 無し)(Unit-3,4: 2段配筋、各段36-D6)、中込コンクリート(Unit-1,2: 無し)(Unit-3,4: 有り、柱基部において外側鋼管直径分の高さまで打設)等である。試験体は、基本的構造において、鋼管間での補剛材や鋼管とコンクリートとの付着を確保するための措置もとっていない極めてシンプルなサンドイッチ合成構造を形成している。なお、狭隘な二重鋼管間に確実にコンクリートを打設するため柱を上下に分割してセグメント化し、それぞれを 4mm 厚の鋼板結合帯を用いて高力ボルト(F10T-M16: 上下各20本)と隅肉溶接により結合した。さらに、基部内における

鋼管の定着は、外側鋼管に放射状に溶着した 13mm 頭付きスタッドジベル(12本)により確保した。

ここで、中込コンクリートの影響を調べる目的で作製したUnit-1,2に対して、文献[1]で扱った同中込コンクリート有りの試験体を基準試験体(Unit-A: 充填コンクリート厚 40mm)(Unit-B: 充填コンクリート厚 57.5mm)と位置づけ、後述の荷重-変形関係および等価粘性減衰定数等で両者の比較検討を行い、その影響について考察した。なお、両基準試験体に用いた鋼管はUnit-1~4のものと同じの平鋼板を使用しており、中込コンクリートの高さがUnit-3,4と同様であること、コンクリートの実圧縮強度も $21\text{N}/\text{mm}^2$ であったこと等から、本比較は妥当なものとする。

2.2 荷重方法と測定項目

図 - 2 に荷重方法を示す。本装置は、大変形時においてP-効果を忠実に再現できる特徴を有している。試験体は、浮き上がりを防止したスライディングビーム上にPC鋼棒を用いて固定され、さらに、反力壁と試験体頂部を両端ピン支持の反力ビームで連結した。荷重は、複動式油圧ジャッキを用い、 156kN ($0.98\text{N}/\text{mm}^2$)の一定軸力下において、スライディングビームを直接水平滑動させる方法で正負交番繰り返し荷重を行った。荷重は柱頭水平方向の変位制御で、部材角 $1/200$ 、 $1/$

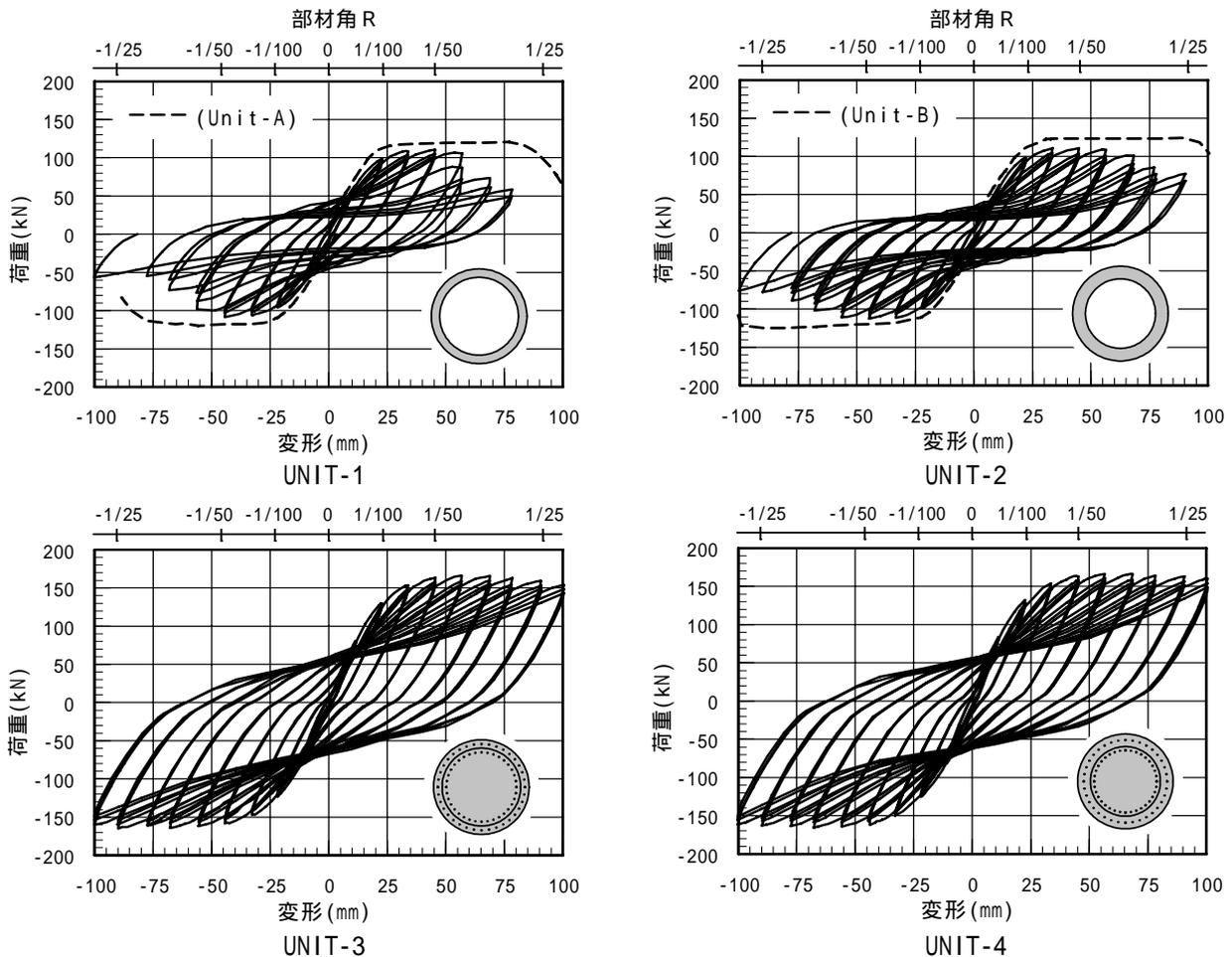


図 - 3 各試験体の荷重 - 変形関係

100, 1/67, 1/50, 1/40, 1/33, 1/29, 1/25, 1/22.5 で各 3 回の正負繰り返し載荷を行った。

測定および観察項目は、載荷荷重、柱頭水平変位、柱最下部の検長120mm間の軸方向平均ひずみ量、ひずみゲージを用いた定着部内を含む外側鋼管および内側鋼管の軸方向ひずみ、鋼管基部近傍の座屈の状況等である。なお、鋼管座屈の発現やその進行状況の確認は目視で行った。

3. 実験結果と考察

図 - 3 に各試験体の荷重 - 変形関係を示す。また、各鋼管柱の破壊の要因とその過程を知る上で有用な資料の一つとなる、実験後の外側鋼管と内側鋼管の座屈状況を写真 - 1 に示す。

3.1 中込コンクリートの影響 (Unit-1,2)

荷重 - 変形関係から見たそれぞれの試験体の破壊進行状況は次の通りである。Unit-1の場合、部材角 $R=1/40$ の繰り返し中に大きな耐力低下を起

こし、その後の大変形時に至っては最大耐力のほぼ50%まで耐力を低下させた。またUnit-2の場合は、部材角 $R=1/40$ 以降においてUnit-1に見られたような急激な耐力低下は示さなかったものの、 $R=1/25$ に至るまでに最大耐力の約70%まで段階的に耐力を低下させた。これらの現象を鋼管の座屈の発生状況にあわせて考察する。Unit-1およびUnit-2の外側鋼管の座屈は柱最下部において局部座屈 (Unit-1の提灯部は基部上面から約45mmの範囲に集中し、Unit-2の同約60mmに対して75%程度であった) として生じた。しかし、内部鋼管の座屈形態は、Unit-1においては基部上面から180mmの範囲、そしてUnit-2では基部上面から130mmの範囲でそれぞれ部分座屈として発生した。すなわち、Unit-1およびUnit-2とも、最大耐力の低下の程度、基準試験体に比した場合の最大耐力に至るまでの剛性の低下および最大耐力の低下等のすべてが、中込コンクリートの存在

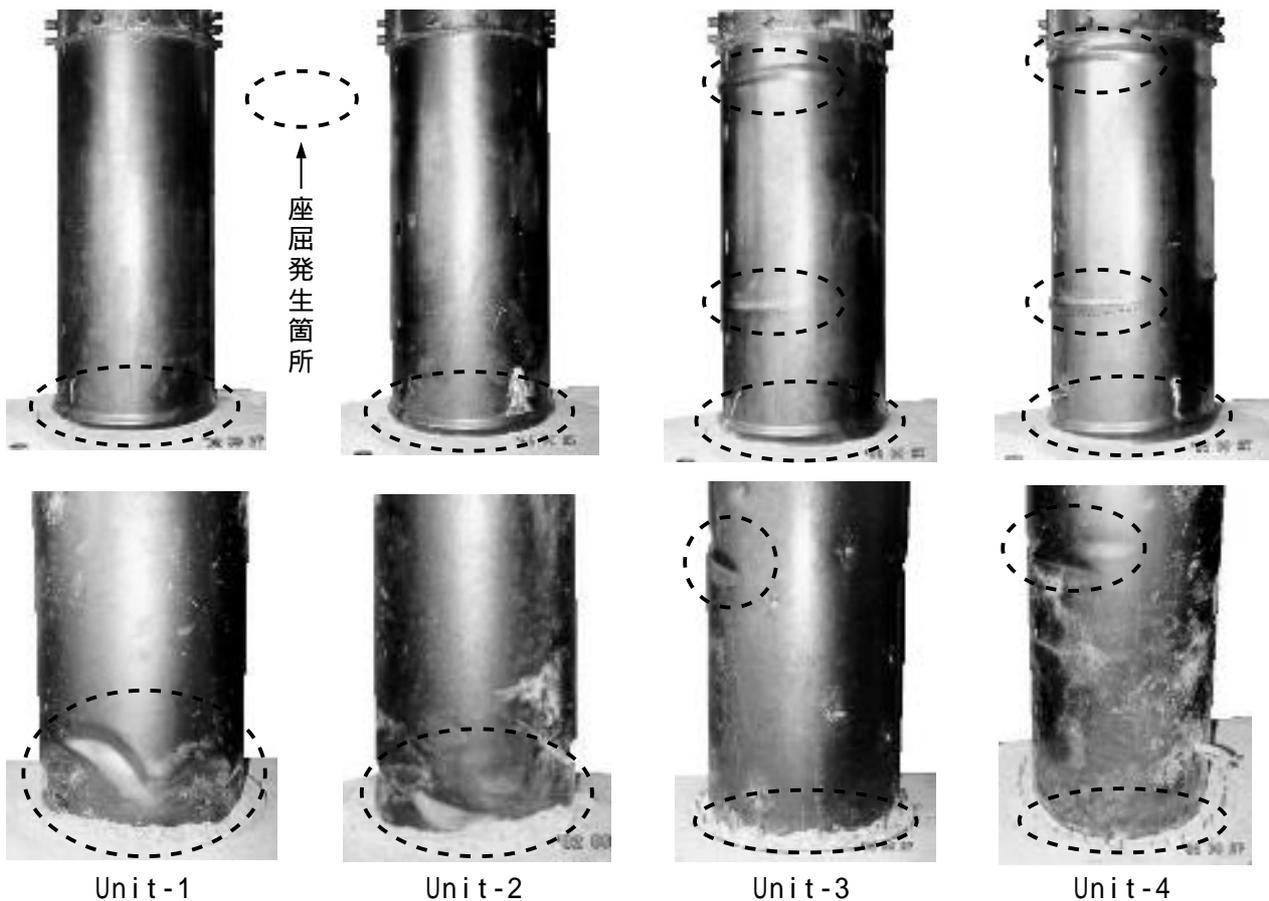


写真 - 1 外側鋼管(上段)および内側鋼管(下段)の座屈発生状況

と基部近傍の内側鋼管の部分座屈の影響によるものと考えられる。

3.2 軸方向鉄筋の影響 (Unit-1,2)

中空式二重鋼管合成柱は、耐震性に対して好適な橋脚の構造形式であることのみならず、省力化に立脚した優れた施工性がその大きな特徴であるといえる。他方、文献[1]で示したように、同合成柱の最終破壊点が柱最下部に生じた鋼管の局部座屈部の破断によるものであったことから、巨視的に破壊過程の安定化を図る目的で、若干の施工性を犠牲にした形で軸方向鉄筋を配した試験体 Unit-3 および Unit-4 を作製した。荷重 - 変形関係から分かるように、両試験体とも部材角 $R=1/22.5$ に及ぶ大変形時に至るまで殆ど耐力低下をせず、極めて安定した挙動を示したといえる。その大きな要因として、軸方向鉄筋を配することによる損傷の分散化が考えられる。写真 - 1 から明らかのように、両試験体とも、外側鋼管には3箇所(柱最下部、中込コンクリート上面近傍、接合

帯近傍下部)、内側鋼管には2箇所(柱最下部、中込コンクリート上面近傍)に明確な座屈が生じている。しかし、内側鋼管の柱最下部においては、中込コンクリート部に配された軸方向鉄筋が周辺のコンクリートの圧壊部を小さくし、軸方向鉄筋自体の存在とあわせて内側鋼管の座屈を抑制したことから、基準試験体(内側鋼管座屈部の中込コンクリート部の圧壊が Unit-3,4 に比して顕著であった)に見られたような鋭角な座屈形状を呈さなかった。なお、二重鋼管間のコンクリートの圧縮に対する損傷は、Unit-3 および Unit-4 とともに3箇所の外側鋼管部の座屈部に確認されたが、その範囲は小さく比較的軽微であった。また、同二重鋼管間のコンクリートに生じた引張りひ割れは、コンクリート厚が薄い Unit-3 (40mm) は Unit-4 (57.5mm) に比して、本数および方向性も異なるものであった。ここで、中空式二重鋼管合成柱の最下セグメントに軸方向鉄筋を配する作業は、著しく作業性を損なうものではなかったことを付記し

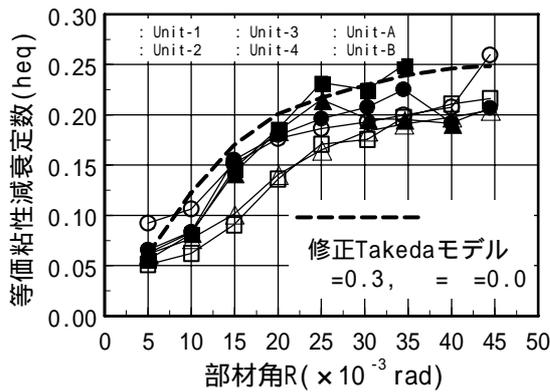


図 - 6 各試験体の等価粘性減衰定数 heq

て、図 - 5 にすべての試験体の内側鋼管表面ひずみの推移を示す。中込コンクリートと内側鋼管の付着の有無が、基部内鋼管の挙動（特に、引張りひずみ）に及ぼす影響が認められた。

3.4 等価粘性減衰定数 (heq)

図 - 6 に各変位サイクル 1 回目の履歴面積に基づいて算出した等価粘性減衰定数 heq を示す。いずれの試験体も大変形時まで heq の値は上昇傾向にあり、概ね良好な履歴吸収が期待できる。なお、中込コンクリートの影響は部材角 20×10^{-3} ($R=1/50$) 以降において若干見られる程度であった。軸方向鉄筋を配した試験体の heq は、配さない試験体に比して 2.5% ~ 5% 小さな値を示した。

3.5 終局曲げ耐力 (Mu)

表 - 1 に終局曲げ耐力の比較を示す。表中 $Mu \cdot exp$ は実験値、 $Mu \cdot cal$ は通常の RC 曲げ理論（鋼材の応力 - ひずみ関係は“完全弾塑性型”）で算出した値を示す。なお、軸方向鉄筋は同等の面積を持つ円環に置換して計算を行った。また、鋼管柱に打設されたコンクリートは相当量の拘束効果が期待できるが、二重鋼管間の薄い試験体 (Unit-1, 3: 40mm) に対しては、道路橋示方書²⁾「コンクリートを充填した鋼製橋脚」に示された拘束されたコンクリートの軸方向強度 2_{ck} (ck : 無拘束コンクリートの圧縮強度) を用いた計算値にあわせて、拘束効果を減じた 1.5_{ck} に対する値も記した。実験値との比較の結果、中空式二重鋼管合成柱の終局曲げ耐力は、通常の曲げ理論で十分に評価できることが確認された。なお、二重鋼管間の薄い試験体では拘束効果を減じる必要性が示され

表 - 1 断面耐力の比較 (実験値と計算値)

Unit No.	柱最下部位置		
	$Mu \cdot exp$ (k·Nm)	$Mu \cdot cal$ (k·Nm)	$\frac{Mu \cdot exp}{Mu \cdot cal}$
1 (2 _{ck})	246.7	260.8	0.95
1 (1.5 _{ck})		249.2	0.99
2 (2 _{ck})	251.3	257.6	0.98
3 (2 _{ck})	372.8	406.5	0.92
3 (1.5 _{ck})		380.3	0.98
4 (2 _{ck})	373.4	384.6	0.97
Unit No.	中込コンクリート上面位置		
	$Mu \cdot exp$ (k·Nm)	$Mu \cdot cal$ (k·Nm)	$\frac{Mu \cdot exp}{Mu \cdot cal}$
3 (2 _{ck})	298.2	314.9	0.95
3 (1.5 _{ck})		301.6	0.99
4 (2 _{ck})	298.7	312.3	0.96

た。本実験シリーズの主たる試験体である Unit-3 および Unit-4 について、柱最下部位置と中込コンクリート上面位置での実験値と計算値の比がほぼ同様な値を示したことから、同合成柱に軸方向鉄筋を配して耐力調整を行うことで、同構造体の損傷を分散できることが確認された。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 中空式二重鋼管合成柱の脚部に打設される中込コンクリートには内側鋼管の部分座屈を抑制する働きがあり、その結果、剛性・最大耐力・じん性等が著しく改善される。
- (2) 軸方向鉄筋を中空式二重鋼管合成柱内に配することで材軸方向に対して耐力調整が可能になり、損傷の分散化を図ることができる。このことは、大変形時における鋼管の局部座屈部の破断を回避させることに繋がり、じん性は更に改善されることになる。

参考文献

- 1) 柳下, 谷平, 鬼頭, 園田: 中空式二重鋼管合成柱の繰り返し挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 2, pp. 1327-1332, 2002
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 1996