

論文 中空式二重鋼管合成柱の変位靱性能に関する実験的研究

杉本 雅人*¹・柳下 文夫*²・谷平 勉*³・園田 恵一郎*⁴

要旨: 同心円上に配置された二つの鋼管の間をコンクリートで充填することにより、鉄筋を使用しない非常にシンプルな構造である中空式二重鋼管合成柱を構築することができる。その力学特性を把握するために行った一定軸力下における正負交番の繰り返し載荷実験の結果、降伏後、鋼管の座屈が認められるもののその耐力はおよそ降伏変位の8倍を超えるまで減少することはなく、一般的な鉄筋コンクリートと比較しても十分な変形性能を確保できることが分かった。

キーワード: 二重鋼管, 合成柱, 交番繰り返し載荷, 変位靱性能

1. はじめに

近年の高速道路網の整備においては、建設用地等の制限もあり、路線計画上高さ50m～100mの高橋脚橋梁の建設が必要になってきている。また、平成7年の兵庫県南部地震以降、鉄筋コンクリート柱には多くの耐震補強がなされており、その方法の一つとして、鋼板の巻き立てによる補強がなされている。これは、コンクリートを鋼板、帯鉄筋等で横拘束したコンファインドコンクリートが曲げ靱性改善に有効であることが、実験および解析で明らかにされており¹⁾、その効果が最も容易に得ることができる方法であるためである。

本研究は、上記した理由によるコンクリート充填鋼管合成柱の優れた力学特性、靱性に注目し、さらに、地震力作用時に構造に不利となる自重による慣性力の軽減を図るために、内部にもう一つの鋼管を配することで、コンクリートの拘束効果を保持しながら中空にした中空式二重鋼管合成柱の力学特性、主に変位靱性能を把握することを目的としている。また、本研究では、コンクリートの拘束効果が高く、応力集中

が少ない円形断面のものを対象にした実験的研究であり、中空式二重鋼管合成柱をモデル化した柱供試体を用いて、一定軸力下における静的正負交番繰り返し載荷実験を行ったものである。

2. 供試体

実験に用いた供試体の諸元を図-1、表-1に、使用した材料を表-2に示す。

供試体は、想定した直径4.5mの橋脚に対して1/10のモデルとし、完全充填タイプと中空タイプの2種類、せん断スパン比2種類、鋼材量2種類の計6体を作製した。充填タイプは、鋼管内にコンクリートを充填することで作製し、中空タイプは、径の異なる2つの鋼管を同心円上に配置し、その隙間にコンクリートを充填して作製した。これらの供試体は、鋼管と中詰めコンクリートから構成され、鉄筋を使用しない非常にシンプルな構造形式である。また、スタッドジベルのような鋼管とコンクリートの付着力向上を図る措置はとっていない。

フーチング内に埋め込んだ柱は、鉄筋(SD345,D19)を鉛直方向に100mm間隔、水平方

*1 日本国土開発(株) 技術開発研究所 土木研究室 (正会員)

*2 近畿大学 理工学部 土木工学科 助教授 工博 (正会員)

*3 近畿大学 理工学部 土木工学科 教授 工博 (正会員)

*4 大阪市立大学 工学部 土木工学科 教授 工博 (正会員)

表-1 供試体の諸元

供試体	外径 D ₁ (mm)	内径 D ₂ (mm)	高さ H (mm)	外鋼板厚 t ₁ (mm)	内鋼板厚 t ₂ (mm)	コンクリート断面積 A _c (mm ²)	鋼材断面積 A _s (mm ²)
(a)DSP-3-23	450	300	1350	2.3	1.6	88360	4768
(b)DSP-5-23	450	300	2250	2.3	1.6	88360	4768
(c)DSP-3-20	450	300	1350	2.0	1.6	88360	4340
(d)DSP-5-20	450	300	2250	2.0	1.6	88360	4340
(e)SSP-3-23	450	—	1350	2.3	—	159040	3268
(f)SSP-5-23	450	—	1350	2.0	—	159040	3268

表-2 使用材料

コンクリート		鋼材		鉄筋	
設計基準強度	21N/mm ²	規格	SPCC-S	規格	SD295A, SD345
圧縮強度	23N/mm ²	引張強度	280N/mm ²	引張強度	452N/mm ² , 544N/mm ²
弾性係数	20kN/mm ²	降伏強度	196N/mm ²	降伏強度	342N/mm ² , 394N/mm ²
粗骨材最大寸法	20mm	弾性係数	210kN/mm ²	弾性係数	210kN/mm ² , 210kN/mm ²

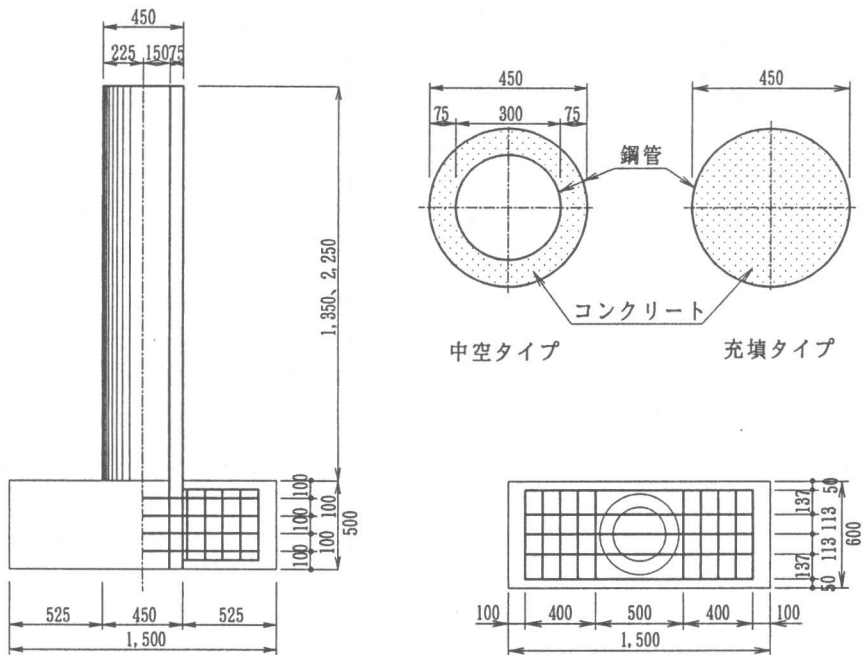


図-1 供試体

向に 113mm 間隔で 3 列に配置し、計 10 本 (2865mm²) を鋼管に貫通させることで固定した。

3. 載荷方法

載荷装置の概要を図-2 に示す。

図に示すとおり、載荷方法は従来用いられてきた供試体上部における直接載荷ではなく、供試体上部に鋼製のピンを取り付けヒンジ構造と

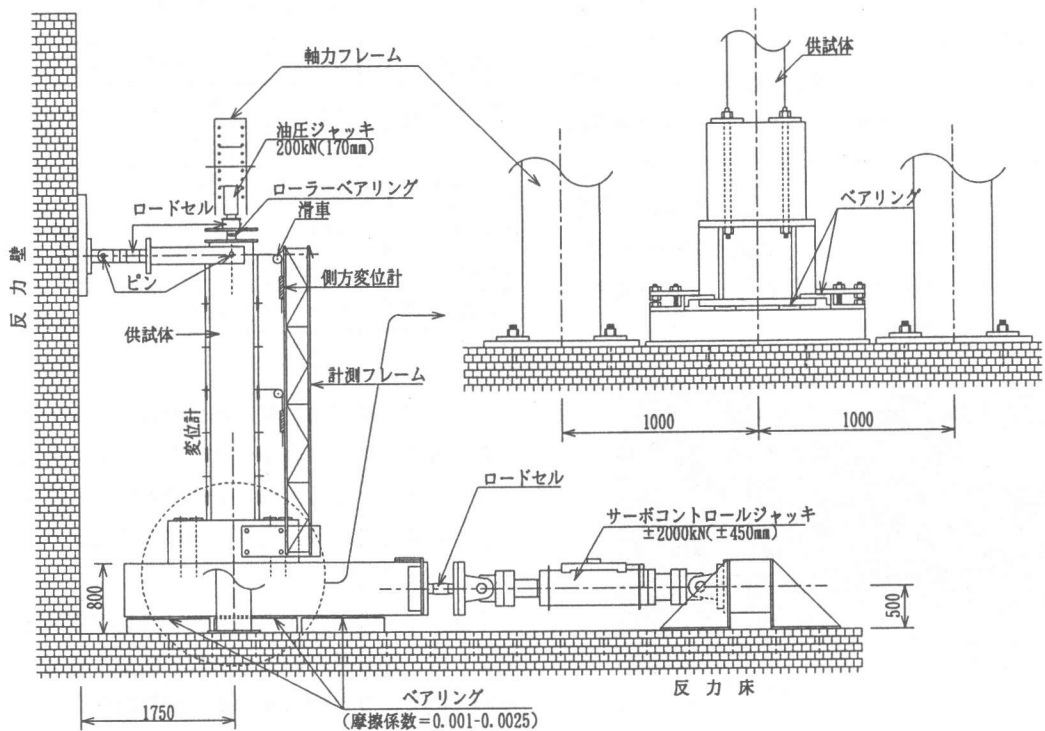


図-2 載荷装置の概要

した上で、供試体の下部に取り付けたスライディングベッドを押し引きすることとした。なお、スライディングベッド底面には摩擦を軽減するためにベアリングを取り付けた。また、軸方向力の載荷にはストローク 170mm で載荷能力 500kN の油圧ジャッキを、水平方向の載荷にはストローク ± 450mm で載荷能力 ± 2000kN の高圧油圧ジャッキを使用した。

水平方向、軸方向それぞれの荷重の制御方法は、次のとおりとした。

(1) 水平方向荷重

(a) $1\delta y$ から $8\delta y$ まで

鋼管のひずみが、引張側において、あらかじめ行った鋼材の引張試験より求められた降伏ひずみに達した時点の水平変位量をその供試体の降伏変位量 $1\delta y$ とし、その整数倍の変位制御による漸増正負交番繰り返し載荷（3回繰り返し）を行った。

(b) $9\delta y$ から破壊まで

$9\delta y$, $10\delta y$ は繰り返しを行わず正負交番載荷を行い、それ以降破壊に至るまでは、単純載荷を行った。

(2) 軸方向荷重

軸方向荷重は、常時一定とし、すべての供試体において $160\text{kN}(0.98\text{N}/\text{mm}^2)$ とした。

4. 実験結果

4.1 破壊状況

実験後の供試体の破壊状況を写真-1, 2に示す。写真からわかるとおり、破壊の形態は外側鋼管の座屈によるものと思われる、これは、どのタイプの供試体についても同様であった。しかしながら、この座屈現象は、 $2\delta y$ の時点から認められたものの、その後即座に破壊に至ることはなく、この状態を繰り返しながら終局状態にまで至った。

また、柱最下部（フーチングとの境界）には、鋼管の抜け出しが認められた。抜け出し量は、

充填タイプで約 3.7mm, 中空タイプで 3.3mm ~ 4.3mm であった。しかし、フーチング底面の鋼管には抜け出しの形跡は認められず、さらに、フーチング上面から 50mm の位置の鋼管に貼り付けておいたひずみゲージの値にも、3.3mm から 4.3mm の変位に対応するような値は認められなかったため、柱最下部の極近傍での鋼管の伸び量であり、塑性ヒンジが形成されていると推測される。

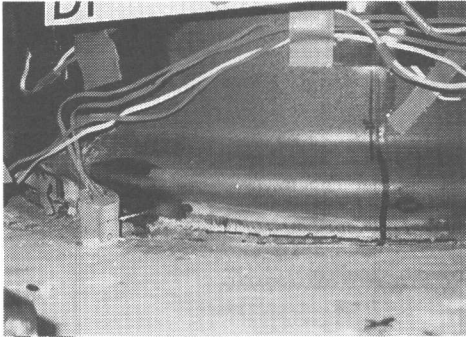


写真-1 実験後の供試体(SSP-3-23)

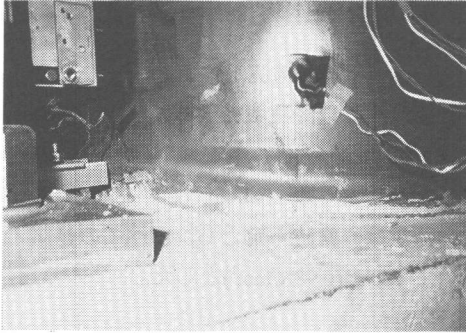


写真-2 実験後の供試体(DSP-3-23)

4.2 荷重-変位(P-δ)関係

実験から得たそれぞれの供試体の荷重と変位の関係を、図-3の(a)~(f)に示す。また、表-3に荷重-変位曲線より求めた降伏時の荷重(P_y), 降伏時の変位(δy), 終局荷重(P_u)を示す。以下、各パラメータごとの考察を行う。

(1) 充填タイプと中空タイプ

図-3の(a),(b)の中空タイプと(e),(f)の充填タイプの比較を行うと、中空タイプの載荷曲線の方がより逆S字を描いているが、充填タイプに

表-3 実験結果一覧

供試体	P_y (kN)	δy (mm)	P_u (kN)
(a)DSP-3-23	129.8	7.6	153.3
(b)DSP-5-23	70.5	11.0	96.3
(c)DSP-3-20	124.3	6.5	147.8
(d)DSP-5-20	70.8	10.0	100.8
(e)SSP-3-23	99.0	7.0	121.3
(f)SSP-5-23	56.7	11.1	71.7

比べて中空タイプの方が、降伏荷重、終局荷重ともに大きいことが分かった。また、変位量については、どちらも $8\delta y$ までは耐力の減少もなく推移しており、変形能は同等であると言うことができる。

中空タイプの耐力が充填タイプに比べて大きいことは、鋼材量が内側に鋼管を配した分だけ多いためであり予想に易いが、変形能が同等であったことから、中空にしても内側からコンクリートを拘束することでコンクリート充填鋼管の優れた特性を再現でき、高耐力が実現できるということが確認できた。

(2) せん断スパン比(a/D)

せん断スパン比の相違による荷重-変位曲線形状の差異は、ほとんど認められなかった。このことから、せん断スパン比が 3.0 程度でもせん断スパン比 5.0 と同様に、せん断の影響よりも曲げの影響が卓越しているものと思われる。このことより、高橋脚はもとより、通常の高さの橋脚に本構造を適用したとしても、せん断破壊が卓越することがないものと推察できる。

(3) 鋼材量

図-3の(a)と(c), (b)と(d)を比較することによって、使用した鋼材量の差による違いを考察する。(a)と(c), (b)と(d)を比較すると、断面の鋼材比にして約 5.4%と約 4.9%であるが、降伏荷重、変位、終局荷重にほとんど差異が認められない。しかしながら、前述したとおり充填タイプ(同コンクリート断面による鋼材比約 3.7%)と中空タイプの耐力に明確な差異が認められる

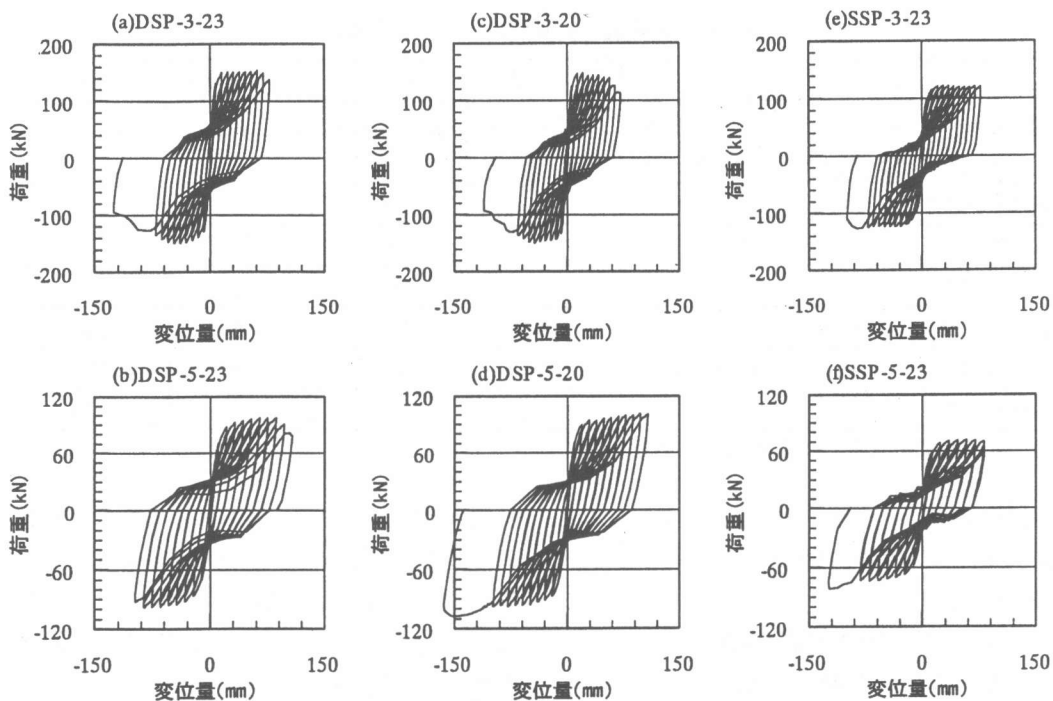


図-3 荷重と変位の関係

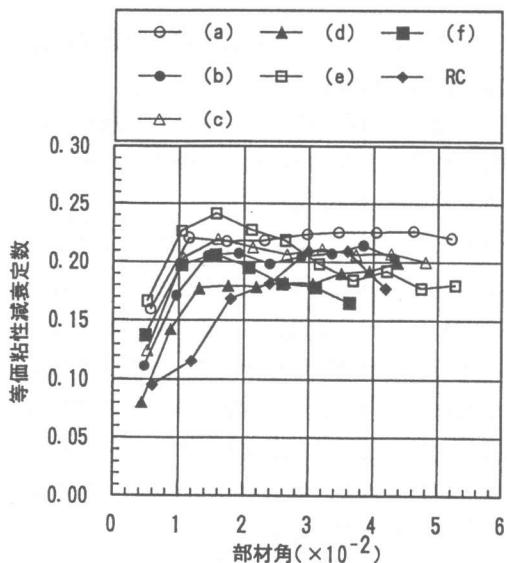


図-4 等価粘性減衰定数と部材角

ことから、鋼材量を増やすことによる耐力の増加は、見込むことができると思われる。中空タイプにおいて差異が認められなかった理由としては、鋼材比の差が小さかったことが挙げら

れる。

4.3 変位靱性能

ここでの変位靱性能は、実験結果の荷重-変位曲線から求めた等価粘性減衰定数 heq を用いて評価することとした。なお、等価粘性減衰定数 heq は、載荷荷重と載荷点変位による荷重-変位曲線の1サイクル目の履歴から求めた。等価粘性減衰定数と部材角の関係を図-4に示す。

図中には、合成柱と同様な実験を行ったRC供試体のものについても示す。RC供試体の諸元は、供試体高さ 2160mm、断面幅 300mm、断面高 450mm、主鉄筋比 2.4%(26xD13)、主鉄筋かぶり 28.5mm、帯鉄筋量 D6@100 である。なお、使用した材料は表-2に示したものであり、鉄筋はSD295Aを使用した。RC供試体と比較すると、中空タイプは同部材角での等価粘性減衰定数は総じて大きいと言え、充填タイプと比較すると、充填タイプは部材角が 0.015 を越えたあたりから減少傾向を示すが、中空タイプは、大きな変化は認められなかった。以上より、中空タイプ

表-4 計算値と実験値のモーメント比較

供試体	計 算 値		実 験 値		実験値/計算値	
	降伏モーメント My.cal(kN·m)	終局モーメント Mu.cal(kN·m)	降伏モーメント My.test(kN·m)	最大モーメント Mu.test(kN·m) ^{※1}	My.test/My.cal	Mu.test/Mu.cal
(a)DSP-3-23	107.7	175.8	175.2	211.2	1.63	1.20
(b)DSP-5-23	107.7	175.8	158.6	226.8	1.47	1.29
(c)DSP-3-20	98.4	162.1	167.8	197.7	1.71	1.22
(d)DSP-5-20	98.4	162.1	159.3	238.6	1.62	1.47
(e)SSP-3-23	89.1	135.7	133.7	170.3	1.50	1.25
(f)SSP-5-23	89.1	135.7	127.6	168.5	1.43	1.24

※1 P- δ 効果を考慮した荷重より求めたモーメント

は従来の鉄筋コンクリート断面や充填タイプのものと比べて、大きな変位靱性能を有することが分かった。

4. 4 実験値と計算値の比較

実験で得られた降伏、最大モーメント(My.test, Mu.test)と、供試体の鋼材量を鉄筋量に置き換えて、鉄筋コンクリート断面として計算した計算値²⁾の(My.cal, Mu.cal)比較を表-4に示す。なお、計算上の降伏モーメントは、最縁鋼材が降伏応力度に達した時、また、終局モーメントは、コンクリートのひずみが0.0035に達した時とした。表に示すとおり、どの供試体においても実験値は計算値を上回っており、その比の範囲は、降伏モーメントMyにおいて1.43～1.70、終局モーメントMuにおいて1.20～1.47であった。

このことから、降伏時には、計算値に比べて前述したとおりの大きめの値を示すが、終局時は、降伏時より小さくなるという傾向が分かる。この理由として、実験値の終局モーメントを多数の繰り返し後の最大荷重から計算したため、終局時の荷重が低下していることが考えられる。

5. まとめ

中空式二重鋼管合成柱の力学特性、主に変位靱性能を把握するために、一定軸力下における静的正負交番繰り返し載荷実験を行った。実験で得られた結果を以下に示す。

(1)破壊状況は、鋼管の座屈によるものであるが、その座屈現象は $2\delta_y$ の時点から認められるものの、終局に至った時の変位量は $8\delta_y$ を越えており、さらに、 $8\delta_y$ までに耐力の減少も認められなかった。

(2)充填タイプと中空タイプは、ほとんど同様な挙動を示し、耐力も計算値を上回る値を示した。

(3)せん断スパン比の相違による実験結果の違いは、認められなかった。

(4)変位靱性能は、鉄筋コンクリート断面と比較した結果、二重鋼管合成柱が同等以上のものを有することが分かった。

(5)中空式二重鋼管合成柱は、鉄筋コンクリート断面の主鉄筋量を鋼材量に置き換えることで、鉄筋コンクリート断面としてその耐力を決定することで、安全側の値を得ることが確認できた。

今後は、コンクリートの破壊状況の確認や鋼材量を変化させた場合の耐力についての解析を行うことによって、本構造の特性についての更なる研究を進めていく所存である。

【参考文献】

- 1)日本コンクリート工学協会：「コンクリート系構造物の耐震技術」に関するシンポジウム論文報告集，1997.4
- 2)土木学会：コンクリート標準示方書（平成8年）設計編