

論文

[2138] コンクリート充填角形鋼管柱の耐震性能改善法に関する 実験的研究

正会員 崎野健治 (九州大学建築学科)

正会員○蟻川利彦 (九州大学建築学科)

1. はじめに

コンクリート充填鋼管構造は、靱性のある耐震的な挙動を示すことが知られており、最近では集合住宅等の超高層建物で用いられてきている。しかし、コンクリート充填鋼管柱は、超高層建物の下層の柱のように大きな軸力を受けている場合に、地震力のような大きな繰返しせん断力を受けると、塑性ヒンジ領域の鋼管の局部座屈や充填コンクリートの圧潰により、材軸方向に大きな縮みを生じるという欠点を持っている。材軸方向の縮みは、地震後の修復が困難なことや建具等の二次部材の破損・落下を招き危険であり、大きな問題となる。しかし、軸縮みの定量的把握やそれを抑制する方法についてはあまり研究がなされていないのが現状である。円形鋼管を用いれば軸縮み量のある程度低減する事ができるが、平面計画上、加工上の納まりや断面効率より、実際の建物では円形の柱はあまり用いられない。軸縮み量を低減することは角形鋼管の板厚を厚くすることでも可能であるが、円形に比べ、角形は構造的にコンクリートの拘束効果が小さく局部座屈も発生しやすいので、効果を上げるためにはかなり板厚を厚くしなくてはならないと考えられ、あまり賢明な方法ではない。また、日本の超高層建物の設計では、原則的には梁崩壊形の設計がなされるため、大きな軸縮みを生じるのは、崩壊メカニズム形成時に塑性ヒンジとなることが避けられない一階の柱脚のみと考えられるので、建物としてはこの部分の軸縮みを抑制する補強を施せばよいことになる。そこで、著者らは軸縮みの抑制を含むコンクリート充填角形鋼管柱の耐震性能を改善する方法として、円形鋼管を塑性ヒンジ領域に局部的に埋設し補強する方法を提案する。これは円形鋼管の拘束効果で塑性ヒンジ領域のコンクリートの圧潰や鋼管の局部座屈を抑制しようとするものである。本論では、このような柱の一定軸力下での繰返し曲げせん断実験を行い、弾塑性性状を明らかにするとともに、補強の有効性の検討を行う。

2. 実験概要

試験体の形状・寸法を図1に示す。試験体は実大の約3分の1スケールで、角形鋼管は□-200×200×5.58、充填コンクリートのシリンダー強度 σ_c は317kg/cm²である。実験は補強用円形鋼管(165.2φ-4.74)の有無・方法詳細を変数として、3体の試験体について行った。A試験体は補強無しの従来柱である。B試験体は柱の塑性ヒンジ領域を材端から柱せいの範囲と考え、その部分にコンクリートの横拘束にのみ使用する目的で円形鋼管を埋設補強したものである。C試験体は耐力の上昇や、この実験では直接関係ないが柱梁接合部の性状改善を考慮して埋設円形鋼管を柱梁接合部まで通して補強したものである。B、C試験体とも円形鋼管はダイヤフラムや角形鋼管とは接合されておらず、両端にはコンクリートに大きな支圧力が生じるのを防ぐため、厚さ5mmのゴムが端部縁に沿って貼りつけられている。試験体製作時には、円形鋼管を柱天端に設けたコンクリート打設孔より番線で釣下げて所定の位置にセットした。鋼管は角形、円形とも市販のものを用いたが、焼鈍を行い残留応力を除去した。鋼材の焼鈍後の機械的性質を表1に示す。軸力比は高層建物の下層の中柱を想定して0.3とした。また、せん断スパン比は2.0である。

加力装置を図2に示す。試験体の上下の鋼梁を加力ビームにPC棒鋼で締結し、水平力を串型油圧ジャッキ（容量：圧縮・引張 50ton）で载荷した。一定軸力は油圧試験機（容量：500ton）により载荷した。加力ビームには平行保持装置を取付け試験体に逆対称変形が生じるようにした。水平力の载荷は変位制御により行った。柱の両ウェブの外側に各1本ずつ設置した変位計で柱内法間の相対水平変位を測定し、平均値を柱内法長さで除したものを部材角として、変位振幅は部材角で $\pm 0.5 \times 10^{-2}$ rad ずつ増加させ、 $\pm 2.0 \times 10^{-2}$ radまでは同一振幅で3サイクルずつ、それを超えると各1サイクルの計14サイクルの繰返し载荷を行なった。

3. 実験結果および考察

3.1 せん断力-部材角関係

図3(a)~(c)に各試験体のせん断力 Q と部材角 R の関係を示す。各試験体とも $R = 1.0 \times 10^{-2}$ radの1サイクル目で最大耐力に達している（但し、C試験体の正加力方向は $R = 1.5 \times 10^{-2}$ rad）。最大耐力はA, B試験体はほぼ同じであるが、C試験体はかなり高い。各試験体とも履歴ループは紡錘形の安定したもので、柱の上下端で曲げ破壊したと思われる。繰返し回数が増加するにつれてA試験体では耐力低下が生じたが、B, C試験体では大変形時においても耐力低下はほとんど生じなかった。図6に正加力方向の各除荷点でのせん断力を最大耐力で無次元化して示す。

3.2 破壊性状

各試験体とも $R = 1.0 \times 10^{-2}$ radの1サイクル目に角形鋼管上下端の圧縮フランジ面に若干の膨らみが生じ、3サイクル目でははっきりとわかる程度に膨らんだ。 $R = 1.5 \times 10^{-2}$ radの1サイクル目にはウェブ面にも膨らみが生じ始めた。その後サイクルが進むにつれ角形鋼管の膨らみは大きくなっていったが、膨らみはA試験体が一番大きく、B試験体が一番小さかった。図5に実験後の試験体の状況を示す。補強有りのB, C試験体も円形鋼管の外側のコンクリートは圧潰している。さらにB, C試験体には材軸中央部にもひび割れが生じている。これは特にC試験体にお

表1 鋼材の機械的性質

	σ_y (t/cm ²)	σ_u (t/cm ²)	$\frac{\sigma_y}{\sigma_u}$	ϕ (%)	ϵ_{st} (%)	sE (t/cm ²)
角形鋼管	3.102	4.240	0.73	25.3	2.32	2150
円形鋼管	3.290	4.263	0.77	28.2	2.43	2070

注) σ_y :降伏点応力度 σ_u :引張強さ ϕ :伸び
 ϵ_{st} :ひずみ硬化開始時ひずみ sE:ヤング率

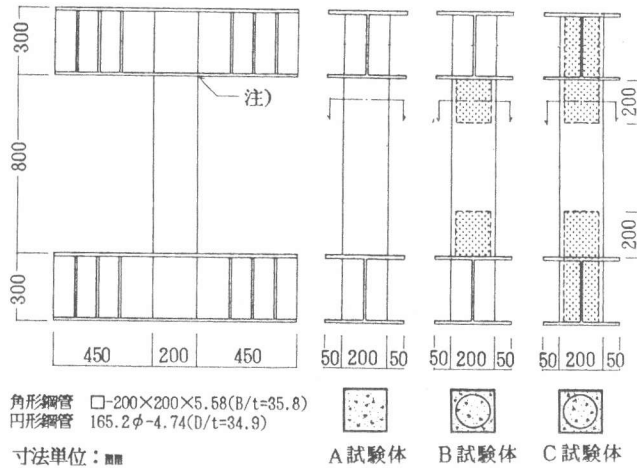


図1 試験体形状・寸法

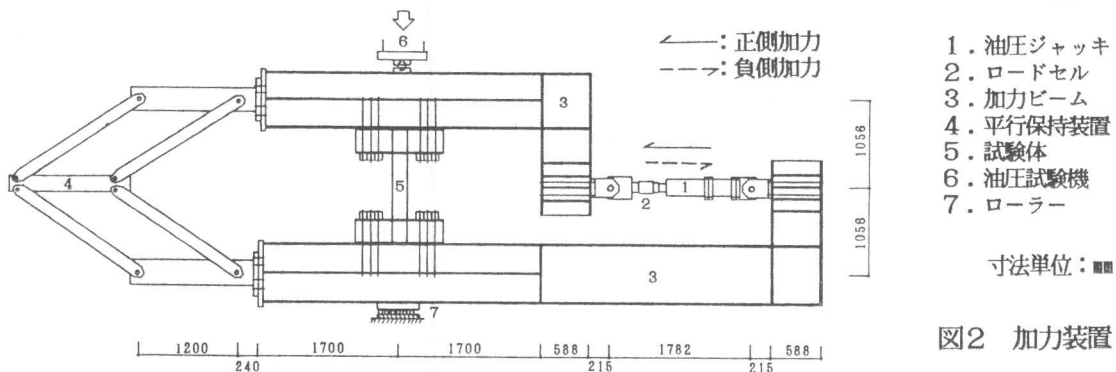
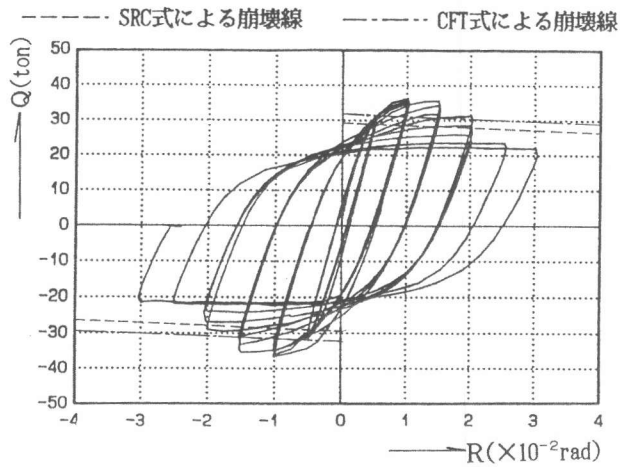
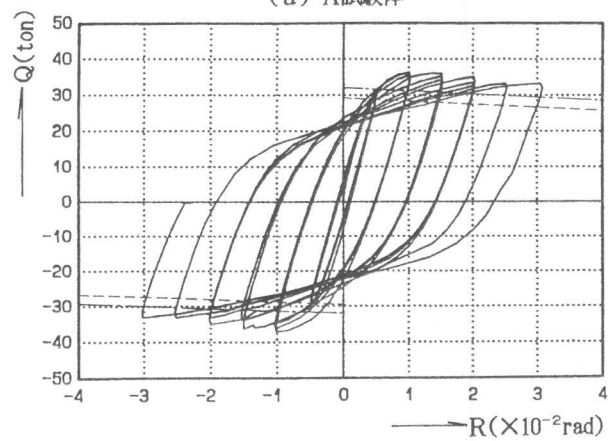


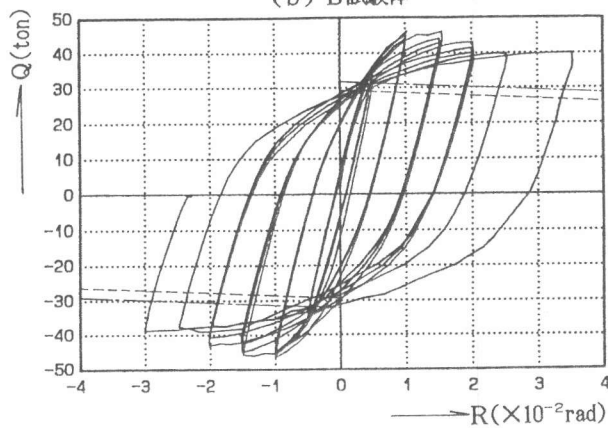
図2 加力装置



(a) A試験体

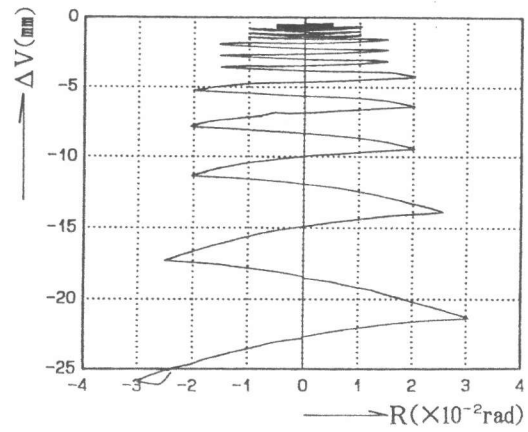


(b) B試験体

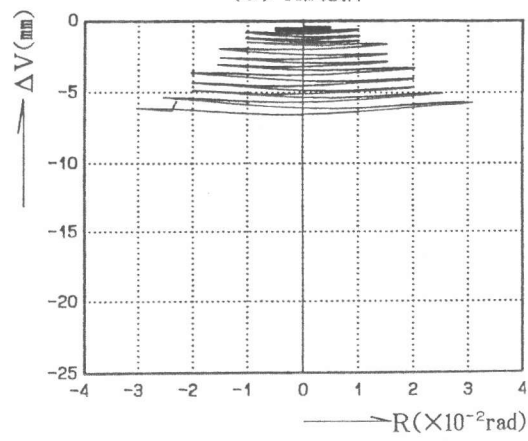


(c) C試験体

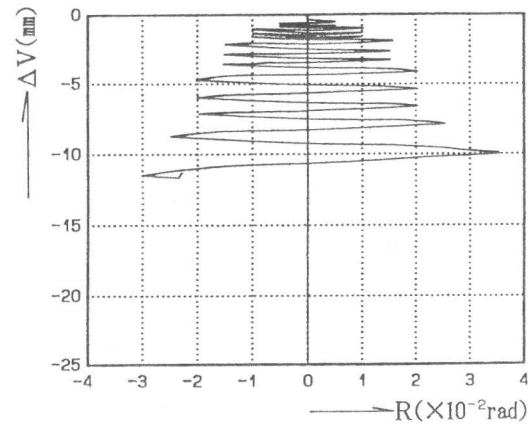
図3 せん断力-部材角関係



(a) A試験体



(b) B試験体



(c) C試験体

図4 鉛直変位-部材角関係

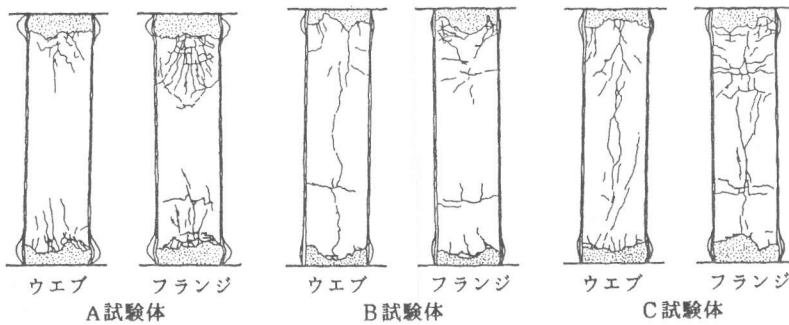


図5 破壊性状

いて顕著である。また、コンクリートをはつり取って埋設円形鋼管の状況を調べたところ、C試験体には柱端部より4cm程度の所に局部座屈が生じていたが、B試験体には生じていなかった。

3.3 鉛直変位-部材角関係

図4(a)~(c)に鉛直変位 ΔV と部材角 R との関係を示す。鉛直変位はフランジ面において鋼梁間の距離の変化を測定し、伸びを正として示している。各試験体とも軸縮みを生じているが、その量は $R=1.5 \times 10^{-2}$ radのサイクルまではほとんど変わらない。しかし、 $R=2.0 \times 10^{-2}$ radのサイクルからは差が顕著に現れ、A試験体の軸縮み量が一番大きく、次にC試験体が大きかった。 $R=3.0 \times 10^{-2}$ radの負加力方向ピーク時にはA試験体はB試験体の約4倍、C試験体は約2倍の軸縮みを生じている。

3.4 最大耐力

各試験体とも柱端部で曲げ破壊していると考えられるので、コンクリート充填角形鋼管柱の終局曲げ耐力(埋設円形鋼管の耐力は無視)を日本建築学会「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(1987)」(以下SRC規準と書く。)およびCFT設計式¹⁾により求めてみた。CFT設計式とは、建設省委託の新都市型集合住宅システム開発プロジェクトの一環で研究・作成された式¹⁾で、SRC規準式と異なり、鋼管の拘束効果によるコンクリート強度の上昇を考慮している(表2脚注の式参照)。実験結果および計算結果を表2に、計算式によるM-N相関曲線を

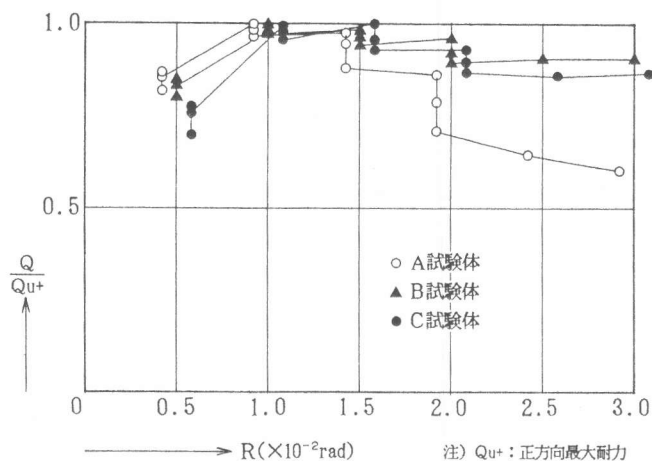


図6 各除荷点での耐力低下

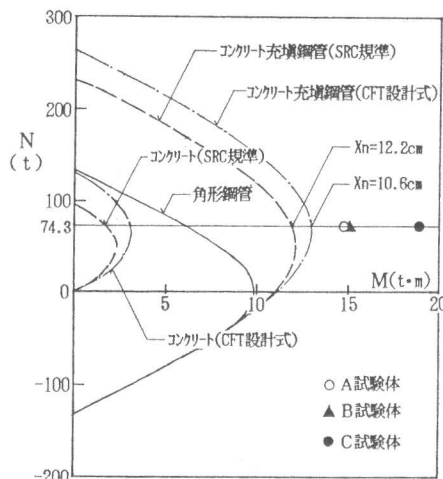


図7 M-N相関曲線

表2 曲げ耐力一覧

試験体名	方向	$e_x Q_u$ (t)	$e_x M_u'$ (t·m)	R (10 ⁻² rad)	$e_x M_u$ (t·m)	$c_{11} M_u$ (t·m)	$\frac{e_x M_u}{c_{11} M_u}$	$c_{12} M_u$ (t·m)	$\frac{e_x M_u}{c_{12} M_u}$	$c_{13} M_u$ (t·m)	$\frac{e_x M_u}{c_{13} M_u}$		
A	+	36.4	14.6	1.0	14.9	11.8	1.26	12.9	1.16	17.1	1.10		
	-	36.6	14.6	1.0	14.9		1.26		1.16				
B	+	36.5	14.6	1.0	14.9		1.26		1.16			(17.1) [*]	(0.87) [*]
	-	37.1	14.8	1.0	15.1		1.28		1.17			(17.1) [*]	(0.88) [*]
C	+	46.2	18.5	1.5	18.9		1.60		1.47			17.1	1.10
	-	46.6	18.6	1.0	18.9		1.60		1.47			17.1	1.10

注) $e_x Q_u$: 最大せん断力実験値 $e_x M_u'$: 曲げ耐力実験値 (軸力による付加曲げを含まない。)
 R : 最大せん断力時の部材角 $e_x M_u$: 曲げ耐力実験値 (軸力による付加曲げを含む。)
 $c_{11} M_u$: SRC規準式による終局曲げ耐力 (一般化累加強度 $c \sigma_B' = 0.85 c \sigma_B$)
 $c_{12} M_u$: CFT設計式による終局曲げ耐力 (一般化累加強度 $c \sigma_B' = c \sigma_B + 21(t/D)^2 s \sigma_y$)
 $c_{13} M_u$: CFT設計式による終局曲げ耐力に円形鋼管の全塑性モーメントを単純累加した耐力
 t : 角形鋼管の板厚 B : 角形鋼管のせい $c \sigma_B$: コンクリートのシリンダー強度
 $c \sigma_B'$: コンクリート全塑性曲げ耐力を求める際の矩形のストレスブロックの強度
^{*}: ()はB試験体では力学的には円形鋼管の曲げ耐力を累加できないため、数値が参考値であることを示す。

図7に示す。実験結果は軸力による付加曲げモーメントを含んでいる。AおよびB試験体の実験結果はSRC規準式よりは大きく、CFT設計式にはほぼよい対応をしている。これはSRC規準式は鋼管のコンクリートへの拘束効果を考慮に入れていないためと思われる。CFT設計式に対しても実験結果が若干高いのは、角形鋼管のひずみ硬化や鋼梁からの拘束効果によるものであろう。C試験体の実験結果は、A、B試験体より耐力がかなり大きくなっているが、表2に示すようにCFT設計式による曲げ耐力に埋設円形鋼管の全塑性モーメントを単純累加した値とよく一致している。

3.5 埋設円形鋼管のひずみ

埋設円形鋼管には2軸のワイヤーストレインゲージを貼付して、ひずみを測定した。フランジ位置の鋼管円周方向ひずみ ε_θ および材軸方向ひずみ ε_z およびゲージ貼付位置を図8に示す。C試験体は0.1%以上の大きな ε_z が生じていることから、円形鋼管はかなりの曲げモーメントを負担していると思われる。B試験体の ε_z はCの半分以下であり、圧縮側のひずみに比べ引張側のひずみはかなり小さくなっている。これは圧縮力はコンクリートの支圧力により円形鋼管に入りやすいが、引張力は入りにくいことを示している。ミーゼスの降伏条件および平面応力場でせん断力が零として降伏現象の有無を判定すると、C試験体は $R=1.5 \times 10^{-2}$ radの2サイクル目の正加力側で降伏しているが、B試験体には降伏は生じていない結果となった。 ε_θ の大きさは $R=1.5 \times 10^{-2}$ radまではB、C試験体であまり変わらないが、それ以後はC試験体はかなり大きくなっており、円形鋼管の拘束力が弱まってこの部分のコンクリートが軸縮みを生じたとも考えられる。また、B試験体では ε_θ と ε_z がほぼ同じ大きさであるが、C試験体では ε_θ は ε_z の半分程度である。

3.6 角形鋼管のひずみ

角形鋼管のウェブ材軸中央に3軸のワイヤーストレインゲージを貼付して、ひずみを測定し

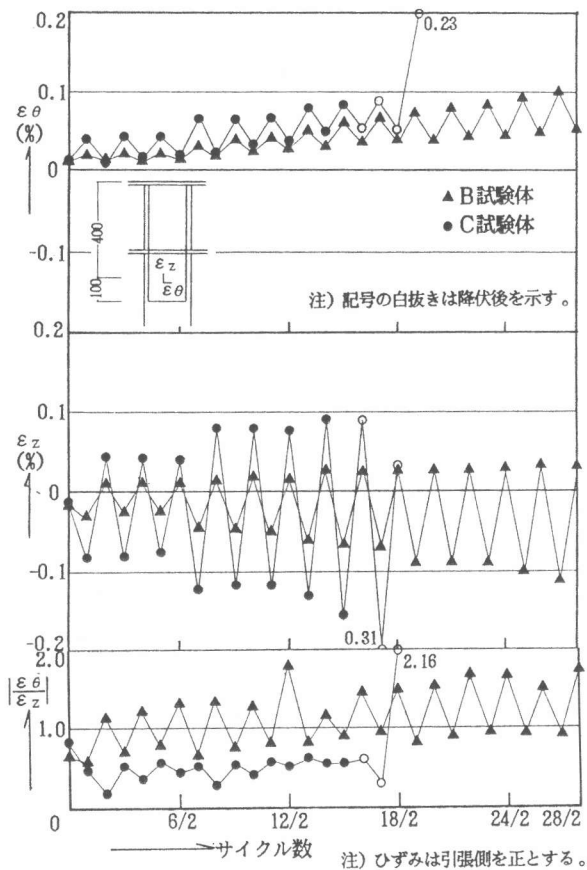


図8 埋設円形鋼管のひずみ

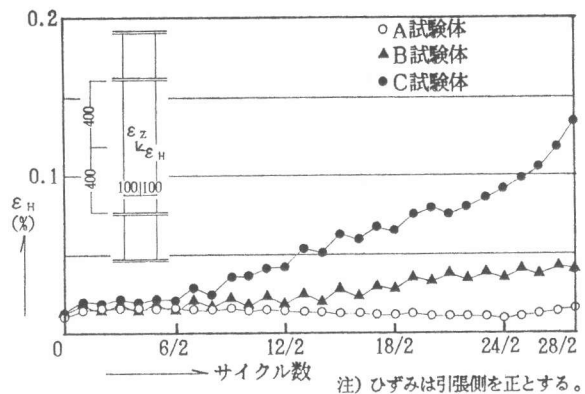


図9 角形鋼管の水平方向ひずみ

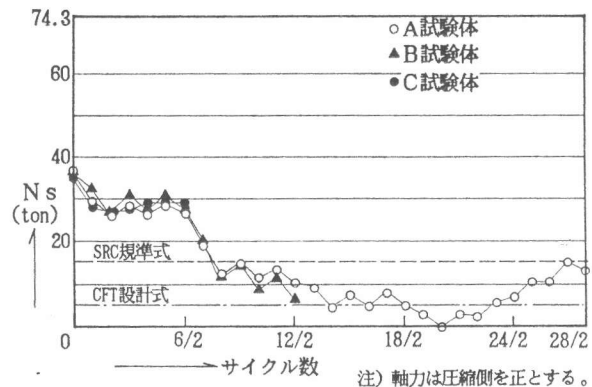


図10 角形鋼管の負担軸力

た。図9に各試験体の両ウェブの水平方向ひずみの平均値 ε_H を示す。補強有りの試験体は、無し試験体に比べ ε_H がかなり大きく、材軸中央部で角形鋼管が膨らんでいるといえ、コンクリートがこの部分でかなりの軸縮みを生じている可能性がある。また、図10にひずみ測定値から平面応力場を仮定して求めた角形鋼管が負担する軸力を、鋼管が降伏するまでの範囲について示す。また、参考のために曲げ耐力計算から求まる鋼管の負担軸力もあわせて示す。なお、降伏の判定はミーゼスの降伏条件を用いて行った。図10より最大耐力以後はほとんどの軸力をコンクリートで負担しているのが分かる。軸力を全てコンクリートが負担すると考えた場合、コンクリート柱の平均軸方向応力度は $0.657\sigma_B$ でかなりの高軸力となる。また、BおよびC試験体はウェブが降伏していることから（Bは片面のみ）、鋼管のコンクリートへの拘束効果が弱まり、材軸中央部のコンクリートが軸縮みしやすくなったともいえる。

4. 結論および今後の研究課題

柱端部を埋設円形鋼管で局部補強したコンクリート充填角形鋼管柱の一定軸力（軸力比 0.3）下での繰返し曲げせん断実験を行い、以下の結果を得た。

- 1) 柱端部のみを補強することの最大耐力に対する影響はほとんど無い。しかし、柱梁接合部まで通して補強することによりかなり耐力が上昇する。これは、埋設円形鋼管が曲げを負担しているためと思われる。
- 2) 柱端部の補強により大変形時の耐力低下を抑制することができる。
- 3) 柱の軸縮み量は部材角 1.5×10^{-2} rad までは補強の有無、補強方法詳細にかかわらずほとんど変わらないが、それを超えると差が顕著に現れ、端部のみ補強した柱が最も小さく、補強無しの柱が最も大きい。柱梁接合部を通して補強した柱の縮み量が端部のみ補強した柱のそれより大きい原因としては、埋設円形鋼管が曲げを負担して降伏し、コンクリートに対する拘束効果が減少したことと、耐力が上昇し角形鋼管が材軸中央部で降伏して拘束効果が弱まり、その部分のコンクリートがより大きな軸縮みを生じたことの二点が考えられる。

よって、円形鋼管の埋設補強はコンクリート充填角形鋼管柱の大変形時の耐震性能をかなり改善できることが明らかとなった。補強方法としては、柱の軸縮みを抑えるという点では端部のみ補強のほうが有効であるが、柱梁接合部まで通して補強することにより柱の耐力の上昇を期待できる。どちらの補強法が優れているかということは使用目的や状況によるであろう。また、どちらの補強方法も軸縮みを十分に抑制しているとはいえ、超高層建物の下層の外柱では起こり得る軸力比 0.6 程度の高軸力を受けた場合の補強効果には疑問が残る。また、角形鋼管の水平方向ひずみの測定結果をみると、埋設円形鋼管で補強した柱は材軸中央部で角形鋼管が膨らんでおり、この部分でコンクリートに軸縮みが生じている可能性がある。これは、材軸中央部も埋設円形鋼管で補強する必要があることを示唆している。埋設円形鋼管補強の有効性を明らかにするためには、高軸力下における柱の弾塑性性状や補強範囲の検討を行う必要があると思われる。

[謝辞] 実験にあたっては、九州大学文部技官藤原文夫、川口晃、青木治、久島昭久の各氏、ならびに九州大学学生西本晃治君の協力を得ました。ここに深く感謝致します。

[参考文献] 1) (財)日本建築センター：新都市型躯体構造システム（その2）コンクリート充填鋼管柱構造性能評価委員会報告書，1989年3月