

論文

[2164] 円形鋼管で補強したコンクリート充填角形鋼管柱に関する実験的研究

蛭川利彦^{*1}・崎野健治^{*2}

1. はじめに

著者らは、コンクリート充填角形鋼管柱の軸方向縮みの累積や耐力低下等の耐震性能の劣化を改善する方法として、角形鋼管内部に円形鋼管を埋設し補強することを提案している。これは、埋設円形鋼管の横拘束効果により柱の軸方向縮みを抑制し、コンクリートの圧潰や角形鋼管の局部座屈の進展を防ごうとするものである。著者らは既に柱端部の塑性ヒンジ領域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(せん断スパン比 2.0)の一定軸力下(軸力比 $N/No=0.3$, No は角形鋼管と充填コンクリートの軸圧縮耐力の単純累加値 N は載荷軸力)での繰返し曲げせん断実験を行い、この補強方法が大変形時の耐震性能をよく改善することを明らかにした。また、この実験では、補強を施した柱にはヒンジ領域だけでなく材軸中央部にも角形鋼管に膨らみが確認され、中央部も補強する必要があることが示唆された¹⁾。本論では前回の実験結果を踏まえ、補強範囲を材軸中央部まで広げた柱も実験の対象に加え、高軸力(軸力比 0.6)および中軸力(軸力比 0.4)の一定軸力下における繰返し曲げせん断実験を行い、その弾塑性性状を明らかにするとともに、補強方法の有効性について検証する。

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スケールでせん断スパン比2.5、角形鋼管は $\square-200 \times 200 \times 5.55$ である。実験は補強用円形鋼管(165.2φ-4.73)の有無・方法詳細および軸力比を実験変数として、9体の試験体について行った。試験体一覧を表1に示す。補強方法は柱の塑性ヒンジ領域を材端から柱せいり範囲と考え、その部分をのみ円形鋼管で補強したものおよびその円形鋼管を柱梁接合部に定着したもの、柱内法部を補強したものおよびその円形鋼管を柱梁接合部に定着したものの4種類(前者2方法を局部補強、後者2方法を全補強と呼ぶ)で、比較のために補強無しの従来柱についても実験を行った。円形鋼管を柱梁接合部に定着したものは円形鋼管に曲げモーメントも負担させようとするものであるが、実構造物においては柱梁接合部の補強にもなると思われる。定着していないものは円形鋼管を主にコンクリートの横拘束に用いようとするものである。柱梁接合部は外ダイヤフラム形式で円形鋼管はダイヤフラムや角形鋼管とは直接接合されていない。また、円形鋼管の両端には、コンクリートに大きな支圧応力が

表1 試験体および実験結果一覧

試験体名	軸力比 N/No	角形鋼管 の種類	$c\sigma_B$ (kg/cm ²)	埋設円形鋼管補強の 範囲	exQu (t)		Ru' (×10 ⁻² rad)		exMu (t・m)		Ru (×10 ⁻² rad)	
					正側	負側	正側	負側	正側	負側	正側	負側
A4	0.4	A	374	補強無し	23.8	25.4	0.85	0.85	12.4	13.2	0.85	0.85
B4				柱端部	25.7	27.1	0.85	0.85	13.4	14.1	1.00	1.00
D4				柱内法部	26.7	26.9	1.00	1.00	14.1	14.1	1.50	1.50
E4				柱全長	33.1	34.3	1.40	1.00	17.4	17.7	1.40	1.00
A6	0.6	B	359	補強無し	19.9	20.1	0.50	0.50	10.4	10.5	0.51	0.50
B6				柱端部	20.8	20.4	0.81	0.86	11.2	11.0	1.00	1.00
C6				柱端部+柱梁接合部	21.7	22.5	1.00	1.00	11.7	12.1	1.00	1.00
D6				柱内法部	22.2	22.1	0.80	1.30	12.3	12.2	1.50	1.25
E6				柱全長	26.9	27.3	0.83	0.84	14.3	14.5	0.83	0.84

注) N: 載荷軸力 No: コンクリート充填角形鋼管柱の軸圧縮耐力(埋設円形鋼管の耐力は無視) $c\sigma_B$: コンクリートのシリンダー強度
exQu: 最大せん断力実験値 Ru': 最大せん断力時の部材角 exMu: 曲げ耐力実験値(軸力による付加曲げを考慮) Ru: 曲げ耐力時の部材角

*1 九州大学助手 工学部建築学科、工修(正会員)

*2 九州大学教授 工学部建築学科、工博(正会員)

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付けられている。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 2 に示す。充填コンクリートのシリンダー強度は、表 1 に示してある。軸力比(N/No)は高層建物の下層の中柱を想定して 0.4 および外柱を想定して 0.6 とした。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 P C 棒鋼で締結し、水平力を串型油圧ジャッキで、一定軸力を油圧試験機で荷重した。加力ビームには平行保持装置を取り付け、試験体に逆対称変形が生じるようにした。水平力の荷重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、変位振幅を部材角で $\pm 0.5 \times 10^{-2} \text{rad}$ ずつ増加させ、 $\pm 2.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ までは同一振幅で 3 サイクルづつ、それを超えると各 1 サイクルの計 14 サイクルの繰り返し荷重を行なった。

3. 実験結果および考察

3.1 せん断力-部材角関係

図 3(a)~(i) に各試験体のせん断力 Q と部材角 R の関係を示す。各試験体とも履歴ループは紡錘形で、柱の上下端で曲げ破壊したと思われる。

a) 中軸力比シリーズ 各試験体とも $R = 1.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ 程度の部材角で最大せん断力に達している。最大せん断力は B4, D4 試験体はほぼ同じで、A4 試験体より若干高い、E4 試験体は他の試験

体より最大せん断力がかかなり高い。補強無しの A4 試験体では $R = 1.5 \times 10^{-2} \text{rad}$ より大きな変形で耐力低下を生じたが、補強有りの他の試験体では大変形時においても耐力低下は小さく、円形鋼管で補強することにより靱性が確保されることが分かる。

b) 高軸力比シリーズ 最大せん断力は A6, B6 試験体はほぼ等しく、C6, D6 試験体もほぼ同じで前者より若干高い。E6 試験体は他の試験体より最大せん断力がかかなり高い。補強無しの A6 試験体では $R = 0.5 \times 10^{-2} \text{rad}$ の部材角で最大せん断力に達した後、 $R = 1.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ のサイクルで大きな耐力低下が生じた。端部補強の B6, C6 試験体は $R = 1.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ の部材角で最大せん断力に達した後 $R = 1.5 \times 10^{-2} \text{rad}$ のサイクルで大きな耐力低下が生じた。これらの 3 体の試験体については 50% 以上の大きな耐力低下が生じており、軸方向縮みが 60~70mm と大きくなった時点で実験を終了した。全補強の D6, E6 試験体は大変形時においてもほとんど耐力低下を生じておらず、高軸力下において靱性を確保するためには、材軸中央部も補強する必要があるといえる。

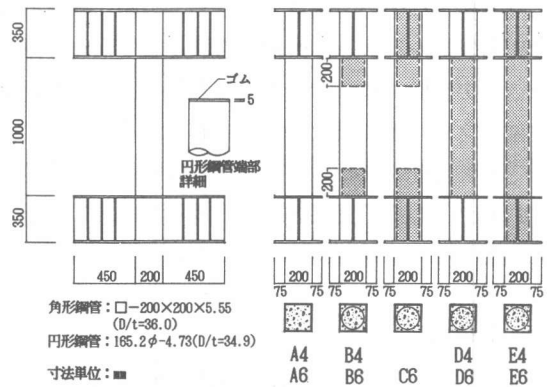


図1 試験体形状・寸法

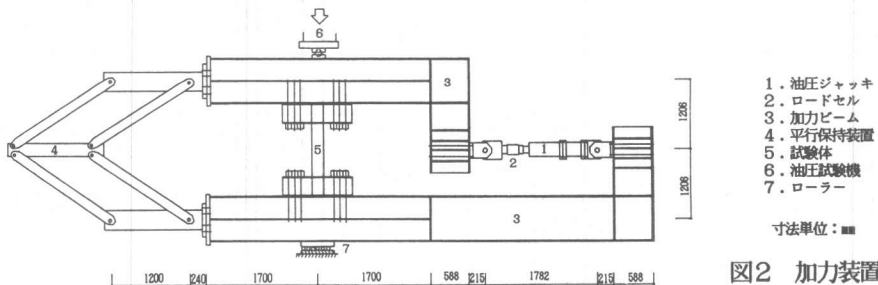


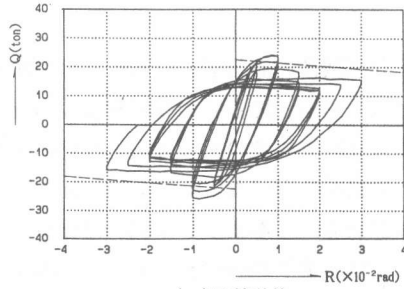
図2 加力装置

表2 鋼材の機械的性質

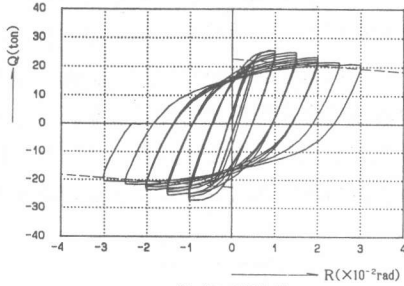
	σ_y (t/cm^2)	σ_u (t/cm^2)	$\frac{\sigma_y}{\sigma_u}$	ϕ (%)	ϵ_{st} (%)	sE (t/cm^2)
角形鋼管A	3.007	4.162	0.72	31.7	2.10	2122
角形鋼管B	3.441	4.663	0.74	26.3	1.70	2206
円形鋼管	3.345	4.455	0.75	28.3	1.80	2186

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

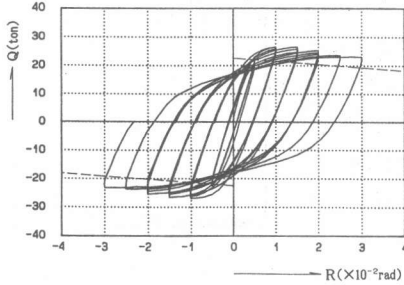
----- SRC規準式による崩壊線(円形鋼管無視)
 - - - - - SRC規準式による崩壊線(円形鋼管考慮)



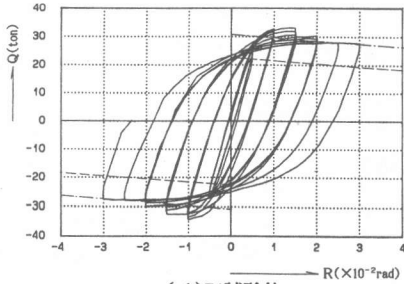
(a)A4試験体



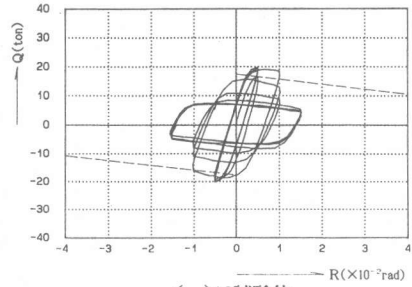
(b)B4試験体



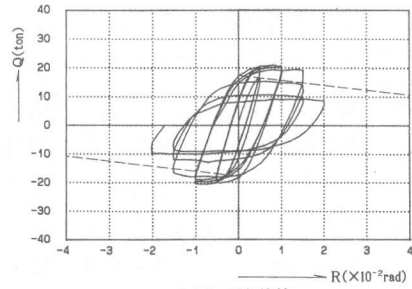
(c)D4試験体



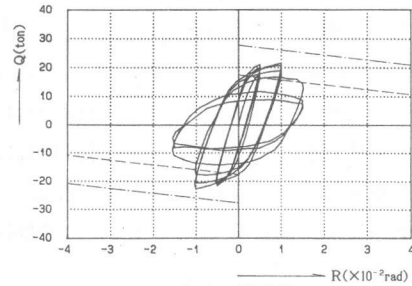
(d)E4試験体



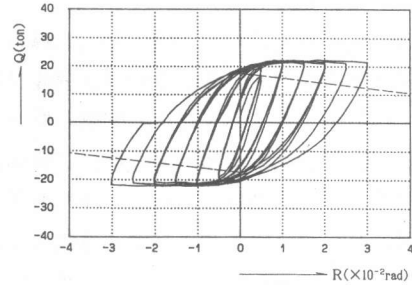
(e)A6試験体



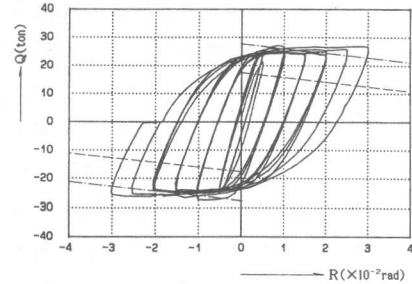
(f)B6試験体



(g)C6試験体



(h)D6試験体



(i)E6試験体

図3 せん断力-一部材角関係

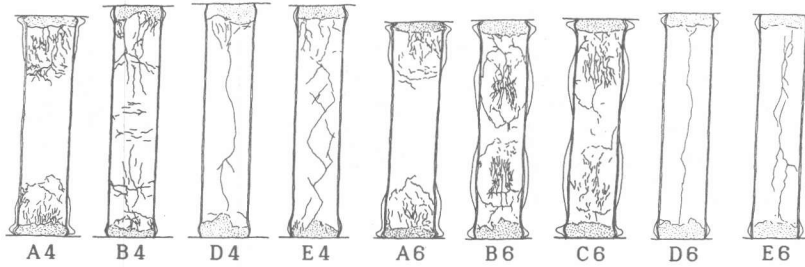


図4 破壊状況

3.2 破壊性状

実験後の試験体の破壊状況を図4に示す。各試験体とも材端より5~6cmの所で角形鋼管が局部座屈を生じており、大きく膨らみ破壊に至っている。無補強のA4,A6試験体では材端より15cm程度の所、端部補強のB6,C6試験体では材端より27cm程度の所にも大きな膨らみを生じている。また、角形鋼管を剥ぎ取り充填コンクリートの状況を調べたところ、A4,A6試験体では材端より30cm程度の所まで圧潰を生じていたが、材軸中央部にはあまりひび割れは発生していなかった。補強のある試験体では、圧潰が生じていたのは材端より10cm程度の所までであったが、端部補強の高軸力下のB6,C6試験体では、無補強部である材端より20~40cmの範囲にも圧潰が生じていた。また、中軸力下のB4試験体には、埋設円形鋼管の切れ目部分付近に多くのひび割れが生じていた。全補強のD4,E4,D6,E6試験体には、あまりひび割れは生じていないが、材軸中央部に縦ひび割れが生じていた。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、E4,D6,E6試験体では柱端部より5cm程度の所に局部座屈が生じ、大きく膨らんでいた。特にE6試験体の膨らみは大きい。D4試験体は柱端部より5cm程度の所、B6試験体は円形鋼管の両端部、C6試験体は梁際に若干膨らみを生じていた。B4試験体では膨らみは生じていない。

3.3 軸方向縮み

図5に各サイクル終了時の軸方向縮み量を示す。中軸力下の場合、補強無しのA4試験体は $R=1.5 \times 10^{-2} \text{rad}$ の1サイクル目より軸縮み量が急増しているが、円形鋼管で補強した他の試験体は比較的軸縮みがよく抑制されている。高軸力下の場合、補強無しのA6試験体および端部補強のC6試験体は $R=1.0 \times 10^{-2} \text{rad}$ の2サイクル目、B6試験体は $R=1.5 \times 10^{-2} \text{rad}$ の1サイクル目より軸縮み量が急増している。しかし、全補強のD6,E6試験体は前者に比べ明らかに軸縮み量が小さい。端部補強の柱では、材軸中央部で大きな膨らみを生じており、ここでかなりの軸縮みを生じたと思われる。高軸力下の場合には柱材軸中央部も補強する必要があるといえる。しかし、全補強の柱でも軸力比0.4の場合と比べると、実験終了時点では3倍以上の大きな軸縮みが生じており、これで軸縮みが抑制で

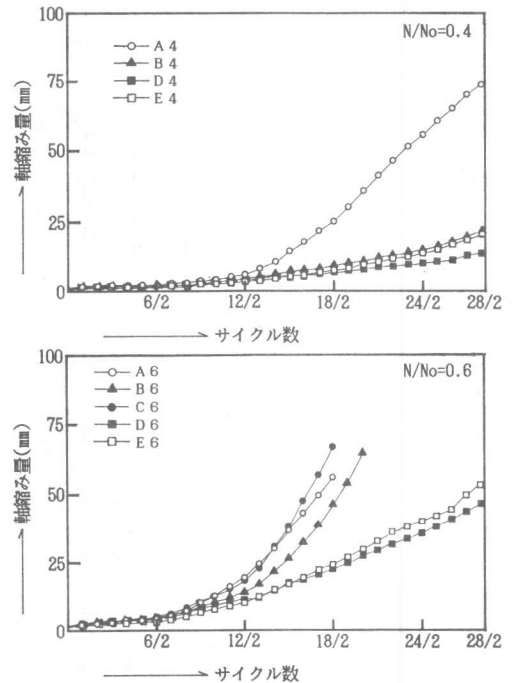


図5 各サイクル終了時の軸縮み量

きたと言えるのかどうかには疑問がある。表3には載荷軸力と各種軸圧縮耐力の関係を示している。軸力比 0.6 の場合の載荷軸力は円形鋼管とその内部の充填コンクリートの圧縮耐力の和の約 1.1 倍であり、載荷軸力をこの部分のみでは支持できず、大きな軸縮みを生じてしまったともいえる。また、柱内法部補強の D4, D6 試験体は円形鋼管を柱梁接合部に定着した E4, E6 試験体より若干軸縮み量が小さくなっている。これは E4, E6 試験体では埋設円形鋼管が曲げモーメントも負担しているためと思われ、円形鋼管の局部座屈の大きさとも対応している。

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。)により求めてみた。計算には一般化累加強度を用い、埋設円形鋼管の耐力を無視した場合と考慮した場合について行っている。計算によるモーメント M と軸力 N の相関曲線および実験結果を図6に示す。実験結果は $R = 1.5 \times 10^{-2}$ rad までに観察された正側・負側の最大曲げモーメントの平均値で、軸力による付加曲げモーメントを含んでいる。両軸力比の場合とも、各試験体の実験結果は円形鋼管の耐力を無視した計算耐力よりは大きく、SRC 規準式は耐力の下限値を押さえているといえる。E4, E6 試験体は、同軸力比の他の試験体より実験値がかなり大きくなっているが、これは埋設円形鋼管が曲げモーメントを負担しているためと考えられ、円形鋼管の耐力を考慮した計算結果とほぼ対応している。B4, D4 試験体が A4 より、D6 試験体が A6 より耐力が若干高い理由として

表3 載荷軸力と各種軸圧縮耐力との関係

内訳	軸圧縮耐力(t)	
	中軸力	高軸力
載荷軸力 N	105.3	165.9
角形鋼管+角形鋼管内コンクリート No	263.3 (0.40)	276.5 (0.60)
角形鋼管内コンクリート	133.4 (0.79)	128.1 (1.30)
角形鋼管	129.8 (0.81)	148.5 (1.12)
円形鋼管+円形鋼管内コンクリート	151.4 (0.70)	148.2 (1.12)
円形鋼管内コンクリート	71.2 (1.48)	68.4 (2.43)
角形鋼管+円形鋼管+コンクリート	334.2 (0.32)	347.9 (0.48)

注) 軸圧縮耐力欄の()は載荷軸力との比を示す。

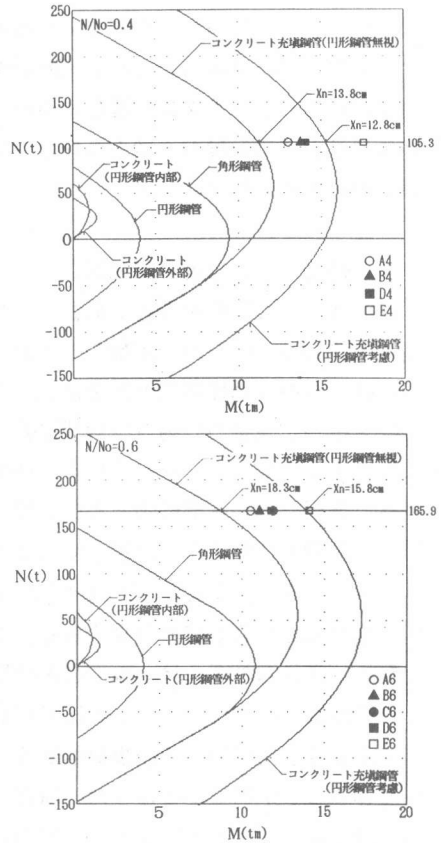


図6 M-N相関曲線

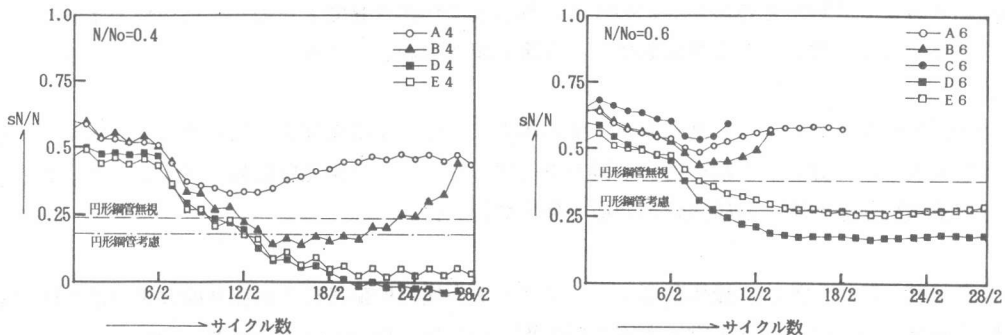


図7 角形鋼管の負担軸力

は、埋設円形鋼管の横拘束効果により、円形鋼管内部のコンクリートの耐力が上昇したことが考えられる。また、断面解析上は B6, C6試験体はそれぞれ D6, E6試験体と同じ耐力となるが、実験結果は前者のほうが下回っている。これは、材軸中央部の無補強部分のコンクリートが圧潰したことにより、コンクリートが十分に軸力を負担できなかったためと思われるが、現象を明らかにするためには材長に沿った部材の解析が必要となる。

3.5 角形鋼管の負担軸力

角形鋼管の材軸中央ウェブに3軸、フランジに2軸のストレインゲージを貼付して、ひずみを測定した。図7にひずみ測定値から平面応力場を仮定して求めた、各除荷点の角形鋼管が負担している軸力 sN (各ゲージの平均値)を載荷軸力 N で無次元化して示す。B4, B6, C6試験体では角形鋼管に降伏を生じており、それまでの範囲について示す。降伏の判定にはミーゼスの降伏条件を用いた。また図には参考のため、SRC規準により計算した曲げ耐力時に鋼管が負担する軸力も示す。両軸力比とも、サイクルが進むにつれ角形鋼管の負担軸力は減少してゆくが、A4, B4, A6, B6, C6試験体は途中で負担軸力が増大に転じている。A4, A6, B6, C6試験体では負担軸力が曲げ耐力時の計算上の軸力に達していない。

4. 結論および今後の研究課題

柱内部に円形鋼管を埋設し補強したコンクリート充填角形鋼管柱の中軸力(軸力比 0.4)および高軸力(軸力比 0.6)の一定軸力下における繰返し曲げせん断実験を行い、以下の結果を得た。

- 1) 中軸力の場合には柱端部のみを補強することで耐力低下および軸方向縮み量を少なくすることができるが、高軸力の場合には端部補強の柱では無補強部分のコンクリートの圧潰により、補強効果は小さくなる。しかし、柱を全補強することにより、高軸力の場合でも靱性に富んだ柱とすることができ、端部補強および無補強の柱に比べ軸方向縮み量もかなり抑制できる。
- 2) 円形鋼管を柱梁接合部に定着することにより、曲げ耐力は上昇する。これは円形鋼管が曲げモーメントを負担するためと考えられる。また、柱梁接合部に定着せず補強する場合も、無補強の場合に比べ若干耐力が高くなる。これは円形鋼管の横拘束効果のによるものと思われる。ただし、高軸力の場合には、端部のみを補強では全補強の場合ほどの耐力上昇は望めない。これは、無補強部分のコンクリートの圧潰が原因と考えられる。

以上より、円形鋼管で埋設補強することで、コンクリート充填角形鋼管柱の耐震性能をよく改善できることが明らかとなった。補強方法としては、特に高耐力を期待したい場合を除き、柱の軸方向縮みを抑えるという点より柱内法部のみを補強する方法が有効であると考えられる。しかし、この方法においても高軸力下では軸方向縮みを十分に抑制しているとはいえない。どの程度の軸方向縮み量まで許容できるのか、どの程度の軸力まで作用させてよいのか等について定量的に評価するためには、検討すべき問題も多く、今後の研究課題といえる。

[謝辞] 実験にあたっては、九州大学学生鳥越秀二、小土手博文両君、ならびに九州大学文部技官藤原文夫、川口晃、青木治の各氏の協力を得ました。ここに深く感謝致します。また、この研究は文部省科学研究費一般研究Cの助成を受けて行った。

[参考文献] 1) 崎野健治, 蛭川利彦: コンクリート充填角形鋼管柱の耐震性能改善方法に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.797-802, 1992.5