

論文

[2047] 鉄筋コンクリート短柱の靱性向上に関する薄肉中空管の拘束効果について

正会員 佐藤 立美 (広島工大建築学科)

正会員○井伏 克則 (宇都宮大学大学院)

1.はじめに:コンクリートの横方向変形を拘束すると軸方向耐力は上昇し変形性能も向上する。本論では、コンクリートの横方向変形を拘束する方法として薄肉鋼板の中空管を使用した場合について、最初に圧縮試験によりその拘束効果を実験的に検証した。次いで、その結果を利用して、一般に脆性的破壊となりやすい鉄筋コンクリート短柱の脆性破壊防止と変形性能向上を目的として、鉄筋コンクリート短柱の主筋内部のコンクリートの横方向変形を薄肉中空管で拘束する工法を提案すると共に、薄肉中空管埋設柱の変形性能に関する実験結果を以下に示した。本論は、中低層の鉄筋コンクリート造の建物における短柱の変形性能に着目したものであり、比較的低軸力下での変形性能向上の可能性を論じたものである。

2.薄肉中空管の拘束効果に関する実験概要:ここでは薄肉鋼板の中空管内部にコンクリートを充填した試験体の圧縮試験により薄肉中空管の拘束効果を検証した。試験体の形状は、いずれも直径 ϕ 、高さ $h=2\phi$ の円筒状である。試験体の種類は、表1に示す通りであり、使用薄肉中空管の管径 ϕ は、 $\phi=100, 125, 150, 200\text{mm}$ 及び 250mm の5種類とし、板厚 t は $t=0.4, 0.6\text{mm}$ 及び 1.2mm の3種類としたが、 $t=0.6\text{mm}$ 及び 1.2mm のものは管径 $\phi=125\text{mm}$ 及び 150mm の2種類のみである。いずれの薄肉中空管も、幅 150mm の薄肉鋼板を巻き上げ加工したもので、互いの鋼板端部は比較的ルーズな「はげ」で連結されている。また、 $t \leq 0.6\text{mm}$ の鋼板では半径方向の剛性を上げるため鋼板を波板状に加工し巻き上げている。実験方法は、JIS A1108に準拠するものとしたが、軸方向の変位量は変位計で、試験体中央部での薄肉中空管の軸方向、円周方向歪を歪ゲージにより、圧縮荷重と同時測定した。なお、本論文の試験体に使用した全ての各種鋼材の強度試験結果は表2に示す通りである。

3.拘束コンクリートの圧縮試験結果:表1に使用コンクリートの平均強度 F_c と拘束コンクリートの見かけの強度 $F_{c'}$ を示す。コンクリート強度及び拘束鋼材量により見かけの強度のばらつきは大きい、いずれもシリンダー強度を大きく上回っている。 $F_{c'} = F_c + k \cdot \sigma_r$ とし、拘束係数 k の平均値を実験結果から算出すると、板厚 $t=0.4\text{mm}$ の時は $k=4.0$ であり、 $t=0.6\text{mm}$ の時は $k=2.7$ であり、 $t=1.2\text{mm}$ の時は $k=2.9$ であった。見かけのコンクリートの強度上昇率と拘束鋼板の板厚比(t/D , t :板厚 D :管径)との関係を図1に、拘束鋼板の側圧力との関係を図2に示した。図1, 図2より拘束コンクリートの強度上昇率は、板厚比

表1 薄肉中空管の圧縮試験体概要及び実験結果表

試験体 No.	薄肉中空管		個数 (体)	F_c kg/cm^2	$F_{c'}$ kg/cm^2
	板厚(mm)	管径(mm)			
T 1100	t=0.4	$\phi=100$	3	278.9	390.6~464.3
T 1100	t=0.4	$\phi=100$	3	247.6	329.5~346.0
T 1125	t=0.4	$\phi=125$	3	278.9	377.3~403.4
T 1125	t=0.4	$\phi=125$	3	247.6	311.6~330.8
T 1150	t=0.4	$\phi=150$	3	278.9	364.5~367.9
T 1150	t=0.4	$\phi=150$	3	247.6	276.1~293.5
T 1200	t=0.4	$\phi=200$	3	209.1	281.3~292.9
T 1250	t=0.4	$\phi=250$	3	197.3	256.8~273.3
T 2125	t=0.6	$\phi=125$	3	250.0	322.9~349.0
T 2150	t=0.6	$\phi=150$	3	235.7	315.8~327.6
T 3125	t=1.2	$\phi=125$	3	250.0	403.6~412.6
T 3150	t=1.2	$\phi=150$	3	235.7	361.8~372.4

注) F_c : 直径 ϕ 、高さ 2ϕ のシリンダー強度
 $F_{c'}$: 拘束コンクリートのシリンダー強度

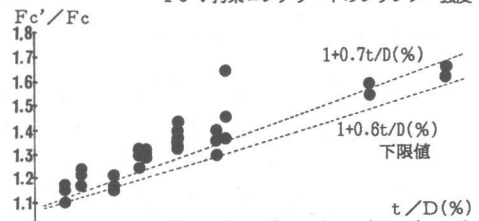


図1 板厚比とコンクリート強度

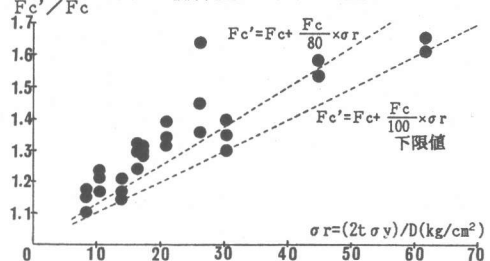


図2 側圧力とコンクリート強度

表2 各種鋼材強度一覧表

種類	σ_y (kg/mm^2)	σ_u (kg/mm^2)	
棒	D 1 0	37.51	53.57
	D 1 3	35.43	52.47
	D 1 6	36.38	56.58
鋼	t=0.4	25.90	35.00
	t=0.6, ϕ 125用	31.40	38.53
	t=0.6, ϕ 150用	32.04	38.64
板	t=1.2, ϕ 125用	28.08	37.29
	t=1.2, ϕ 150用	27.80	37.13

や側圧力 σ_r の小さい領域で特に上昇率が大きく、必ずしも比例関係にあるとは言いきれないが図中の直線に示すような下限値を考えれば安全側の評価が可能である。また、変形性能については、図3に示すように通常のコンクリートの場合、最大耐力時の歪 $\epsilon_c = 0.2\%$ 前後で最大耐力に達し、圧壊時の歪 $\epsilon_u = 0.3 \sim 0.4\%$ で圧壊するのに対し、薄肉中空管による拘束コンクリートでは、 $\epsilon_c = 0.5 \sim 1.0\%$ であり、 $\epsilon_u = 15\%$ にも達する場合がある。拘束コンクリートのみかけの強度が、コンクリート強度 F_c 迄耐力低下する時の歪は、

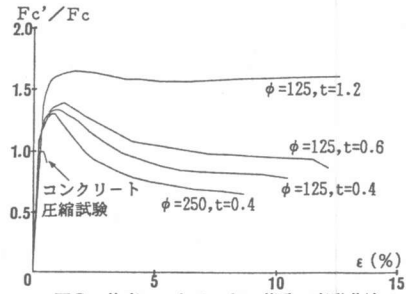


図3 拘束コンクリートの荷重-変形曲線

板厚により異なり、例えば、 $\phi = 125$ の試験体の場合、板厚 $t = 0.4\text{mm}$ では 3.5% 、 $t = 0.6\text{mm}$ では 6% 前後であるが、 $t = 1.2\text{mm}$ の場合、薄肉中空管の破断が生じる迄ほとんど耐力低下を起こさず、著しい変形性能の改善が見られた。なお、本実験で使用した薄肉中空管のみの圧縮試験結果では、数%程度の軸方向変形時には、鋼管の軸方向圧縮応力度は鋼板の降伏応力度の $1/3$ 以下となっており、主として「はぜ」部分で変形を吸収しているため、鋼板の圧縮応力度は非常に小さい事が判明した。更に、各試験体とも最大耐力に達する以前の薄肉中空管表面の軸方向歪は試験体全体の平均軸方向歪の $1/4$ 以下となっており、薄肉中空管にコンクリートが充填されても、鋼板とコンクリート

の間の付着による応力伝達は少なく、薄肉中空管は主として「はぜ」部分で軸方向変形を吸収している状況が明確であった。従って本実験で使用した形状の薄肉中空管による拘束方法であれば鋼板は主としてHOOP TENSION作用のみを持っていると結論できる。最大耐力以降では鋼板の軸方向・円周方向歪とも降伏歪に達し純剪断状態のような計測結果が得られているが終局時にはいずれも円周方向の引張力により鋼板が垂直に切断しており大変形時にも圧縮抵抗よりHOOP TENSION効果が卓越していることが確認されている。

4. 鉄筋コンクリート短柱の剪断断実験の概要: 前節の実験はコンクリート全断面を拘束した試験体に関するものであり、この結果をRC柱に利用する場合、RC柱の全てのコンクリートの横方向変形を拘束するのが望ましいが、防火・防錆等の問題を考慮し、ここでは図4に示すように、従来工法のRC柱の主筋内部のみを薄肉中空管で拘束する方法を採用し実験的に検証する事とした。試験体は表3に示す通り、いずれも断面は $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ で、柱のクリアスパンは 40cm ($M/Qd = 1.0$)の短柱とし、柱に作用させる軸力は $N = 0.3A_c F_c$ と一定とした。柱の試験体の設計においては、曲げ・剪断耐力とも建築学会耐力式により検討し、剪断破壊が先行するように従来工法の鉄筋コンクリート短柱の配筋を決定した後に、管径 $\phi = 125\text{mm}$ 又は $\phi = 150\text{mm}$ の拘束用薄肉中空管を柱主筋内部に埋設する事とした。従って、試験体の剪断耐力はHOOP量で決定するものと考えており、本実験は薄肉中空管の埋設による耐力及び変形性能の向上を確認するための実験となっている。拘束断面積比 $I = A_p(\text{拘束断面積})/A_c(\text{全断面積})$ は、管径 $\phi = 125\text{mm}$ で 20% 、 $\phi = 150\text{mm}$ で 28% である。また、大変形時に

表3 RC短柱のせん断断実験試験体概要

試験体 No.	断面形式	主筋	埋設薄肉中空管 (管径及び肉厚)	Pt (%)	コンクリート強度 (kg/cm^2)	
C0C0M1	I	4-D16	φ=125, t=0.4	0.84	224.0	
C10.4	II			0.84	224.0	
C20.4	III			0.87	265.3	
C30.4	II			0.84	265.3	
C40.4	III	φ=150, t=0.4	0.87	265.3		
C0C0M2	I	4-D13	φ=125, t=0.6	0.41	235.7	
C50.6	II			0.41	235.7	
C51.2	II			0.41	235.7	
C60.6	II			0.41	235.7	
C61.2	II			φ=150, t=1.2	0.41	235.7
C70.6	III			φ=150, t=0.6	0.75	235.7
C71.2	III			φ=150, t=1.2	0.75	235.7

注) 柱径は、全て $25\text{cm} \times 25\text{cm}$ で、 $M/Qd = 1.0$ である。
HOOPは全てD10 @100で、 $P_w = 0.57(\%)$ である。
C20.4, C40.4, C70.6, C71.2は、補助主筋 8-D10を薄肉中空管内部に配筋した。断面形式については、図4参照。

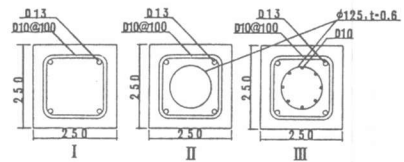


図4 試験体の断面形式

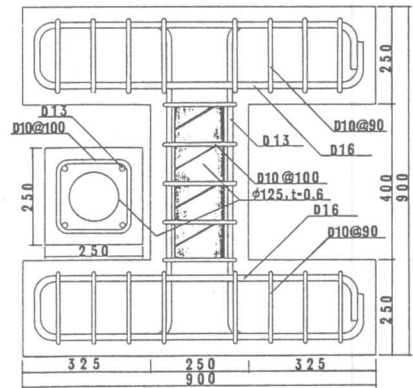


図5 試験体の配筋図(C50.6)

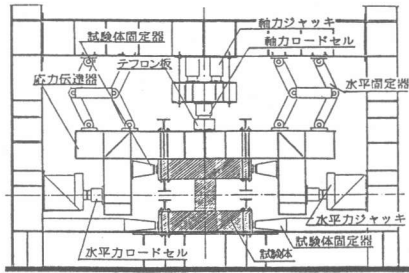


図6 実験装置概要図

柱主筋が座屈することによる曲げ抵抗の減少を防止する目的で、薄肉中空管内部に縦筋を配置し、曲げ補強を行った試験体も作製した。柱内に埋設する薄肉中空管は、柱のクリアスパン部のみとし、梁内に薄肉中空管が入らないようにしている。これは、薄肉中空管には出来るだけ圧縮力を作させない様にするためと梁内に薄肉中空管が入ることによる梁・柱接合部の耐力が明らかでない事及び梁配筋が困難になる事等による。試験方法は、図5に示した試験装置により一定軸力を作させた後、部材角 $R=1/800, 1/400, 1/200, 1/100, 1/50$ で正負各2回繰り返し水平載荷した後正側加力で部材角 $R=1/25$ 迄は荷重・変形を計測し以後、崩壊迄加力することを原則とした。

5. 鉄筋コンクリート短柱の剪断実験結果:表4に各変位制御値内での最大荷重の一覧表を示し、図7~図8に荷重-変形曲線の代表例を示した。実験結果によると、従来工法のRC短柱では、 $R \leq 1/200$ で最大耐力に達し、以後急速に破壊の進行する典型的剪断破壊となっている。しかし、薄肉中空管形状や中空管内部の曲げ補強筋の有無にかかわらず、薄肉中空管を埋設した短柱では、いずれも $R=1/200$ 迄の挙動において従来工法の短柱と顕著な差異は認められないが、以後、 $R=1/100$ 迄は耐力が上昇し、最大耐力に達した以降は、カバコンクリートの剥離を生じたが、 $R=1/50$ でも顕著な耐力低下を示さず、崩壊時部材角はいずれも $R > 1/20$ であった。崩壊時には、薄肉中空管板厚 $t=0.4\text{mm}$ および $t=0.6\text{mm}$ の場合、薄肉中空管の一部に破断が生じていることが確認されたが、板厚 $t=1.2\text{mm}$ の場合は薄肉中空管の破断は生じていない。破壊形式は、コンクリート表面の亀裂状況や破壊過程等により剪断破壊と判断したが、試験体によっては曲げ破壊する部材と同様な荷重-変形曲線が得られており、破壊性状の変化が見られる。特に、図8に示す管径 $\phi=150\text{mm}$ 、板厚 $t=1.2\text{mm}$ で補助主筋を有する試験体のP- δ 曲線では、部材角 $R=1/25$ 迄ほとんど耐力低下はなく、靱性向上の目的をよく達成している。また一般に、H00Pの挙動は繰り返し加力により次第に歪が累積しながら降伏歪に達するが、薄肉中空管の歪は、最大耐力時までにはほぼ完全弾性的挙動を示している。この事よりH00P内部のコンクリートは、変形の増大と共に亀裂が進展するが、薄肉中空管内部のコンクリートは最大耐力まで亀裂が進展しない事と理解する事ができる。なお、薄肉中空管の有無による初期剛性の顕著な差異は認められなかった。図9~図11は、最大耐力以後の耐力低下率を薄肉中空管の板厚別に図示したものである。これらの図によると、薄肉中空管の板厚が等しい場合は、最大耐力後の耐力低下は拘

表4 RC短柱の実験結果一覧表

試験体 No.	R=1/800		R=1/400		R=1/200		R=1/100		R=1/50		R=1/25		Q _{max} 実験値	Q _{cal} 計算値	Q _{max} / Q _{cal}
	$\delta=0.5\text{mm}$	$\delta=1.0\text{mm}$	$\delta=2.0\text{mm}$	$\delta=4.0\text{mm}$	$\delta=8.0\text{mm}$	$\delta=16\text{mm}$	$\delta=32\text{mm}$	$\delta=64\text{mm}$	$\delta=128\text{mm}$	$\delta=256\text{mm}$	$\delta=512\text{mm}$	$\delta=1024\text{mm}$			
C0C0M1	17.47	18.89	*A 20.04	*B 20.00	20.04	18.08	1.11								
C10.4	13.00	17.83	19.33	18.93	13.97	7.90	19.33	19.21	1.01						
C20.4	14.50	17.25	21.56	23.75	22.19	17.83	23.75	21.08	1.13						
C30.4	14.00	17.63	21.25	23.63	23.38	19.25	23.63	20.02	1.18						
C40.4	14.50	17.38	21.25	24.50	24.88	20.25	24.88	20.88	1.19						
C0C0M2	17.51	18.43	20.88	18.76	13.24	20.88	17.51	1.19							
C50.6	17.69	19.81	21.66	21.96	20.21	15.27	21.96	19.38	1.13						
C51.2	16.71	18.06	18.28	18.30	16.59	15.04	18.30	20.89	0.88						
C60.6	16.39	18.13	20.00	21.46	19.58	17.41	21.46	19.10	1.12						
C61.2	16.32	18.55	20.29	20.28	18.11	18.02	20.29	20.29	1.00						
C70.6	16.45	18.52	21.55	22.78	20.95	17.08	22.78	20.28	1.12						
C71.2	15.22	17.50	19.75	21.29	21.30	20.64	21.30	21.58	0.99						

注) *Aの耐力は $\delta=3\text{mm}$ の時の値である。 *Bの耐力は $\delta=3.24\text{mm}$ の時の値で、直後に試験体は崩壊した。

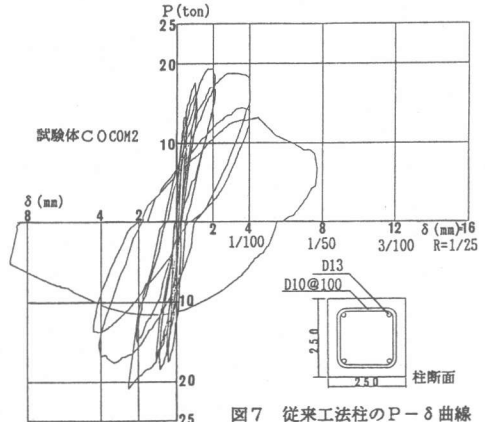


図7 従来工法柱のP- δ 曲線

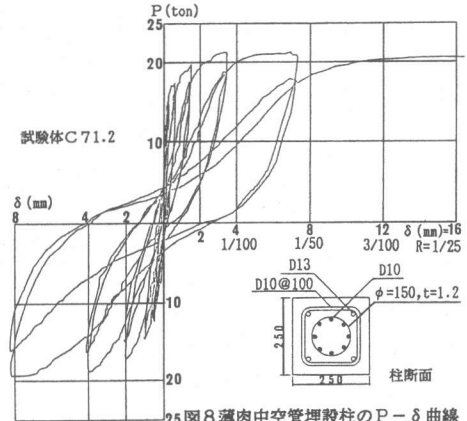


図8 薄肉中空管埋設柱のP- δ 曲線

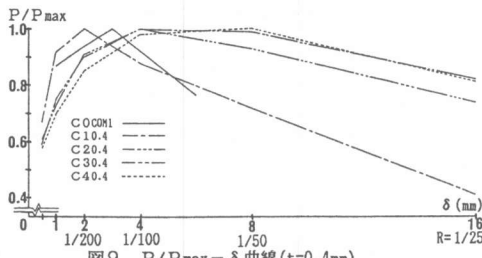


図9 P/Pmax- δ 曲線 ($t=0.4\text{mm}$)

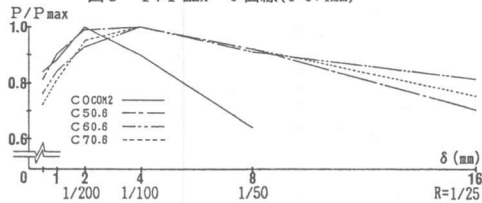


図10 P/Pmax- δ 曲線 ($t=0.6\text{mm}$)

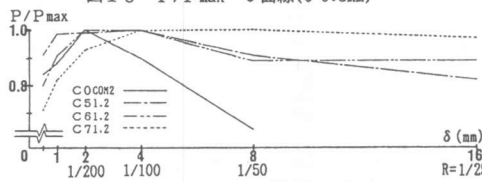


図11 P/Pmax- δ 曲線 ($t=1.2\text{mm}$)

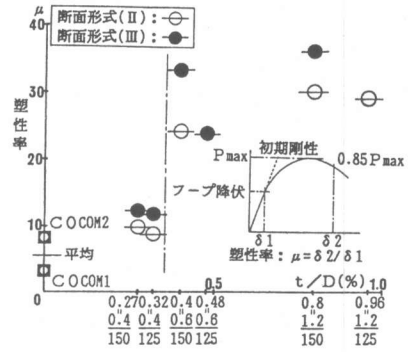


図12 板厚比と塑性率

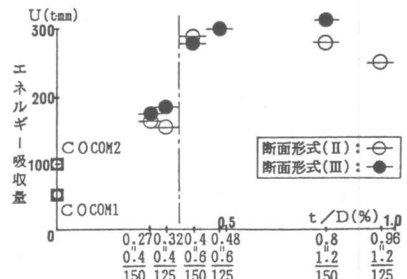


図13 板厚比とエネルギー吸収量

束断面積比の大きい方が小さく、更に補助主筋があるものが最も耐力低下が小さいと言えるが、薄肉中空管の板厚の差については、ばらつきが生じており、必ずしも板厚が厚いと耐力低下率が小さいとは言えない。これは、試験体精度と実験条件の若干の差異等に起因するものと考えている。いずれにしても本論の実験では、薄肉中空管を埋設した柱の場合、従来工法柱の保有剪断耐力度で計算される耐力 Q_u を、部材角 $R=1/50$ でもほぼ満足している結果が得られた。図12は、板厚比と塑性率の関係を示したものであり、図13は、板厚比と試験体の全エネルギー吸収量の関係である。ここで塑性率 μ は、柱主筋が最大耐力時以降に、どの試験体も降伏したため、フープ降伏時変位 δ_1 と最大耐力 P_{max} 以降 $0.85P_{max}$ となった時点の変位 δ_2 により、図12中に示す方法で求めたものであるが、従来工法の柱に比べて板厚 $t=0.6\text{mm}$ 以上の薄肉中空管を使用した場合に塑性率の向上が大きく、板厚 $t=0.6\text{mm}$ と $t=1.2\text{mm}$ ではさほど顕著な差異がみられない。また、薄肉中空管内に縦筋を配置した場合、一般に塑性率の向上がみられる。試験体崩壊迄の全エネルギー吸収量の比較でも板厚 $t=0.6\text{mm}$ と $t=1.2\text{mm}$ の薄肉中空管板厚の差異はみられなかったが、板厚 $t=0.4\text{mm}$ の場合に比べて約1.5倍、従来工法の柱に比べて約3倍以上のエネルギー吸収量となっている。

6.まとめ:以上、2種類の実験結果より薄肉中空管の拘束効果及びRC短柱の靱性向上に対する薄肉中空管の効果として以下のような結論を得た。①本実験で使用した形状の薄肉中空管による拘束方法であれば、鋼板は主としてHOOPTENSION効果のみであり、軸力の負担率はきわめて小さい。②薄肉中空管の拘束係数 k は、板厚比の小さいものは大きく、板厚比が大きくなると減少する傾向もある。但し、板厚比の大きいものほど圧縮時の靱性が大きくなり、靱性向上のためには、拘束係数 k は小さくても板厚比 t/D の大きいものを使用するのが良い。③薄肉中空管を埋設したRC短柱の場合、 $R \leq 1/200$ 迄の挙動は従来工法の短柱と大差なく、また最大耐力もHOOPTENSION量で決定するため耐力の向上は望めない。しかし、変形性能の改良は著しく、剪断破壊する柱でも $R=1/50$ 迄は設計耐力を安全に保持する事が可能である。また、大変形時にカバーコンクリート部が剝落し、断面積の減少があるにもかかわらず、終局状態まで安全に軸力を保持できるため十分な変形性能を有する短柱の設計が可能である。④適切な薄肉中空管の埋設で、靱性率・エネルギー吸収量共に、従来工法の短柱の3倍以上とする事が可能である。本実験結果からは、埋設する薄肉中空管は可能な限り拘束断面積比が大きいかつ $t/D \geq 4 \times 10^{-3}$ が望ましいと言える。⑤ $t/D = 8 \times 10^{-3}$ の薄肉中空管を使用し、かつ内部に補強主筋を配置した場合、 $R=1/25$ 迄の変形性能が確保された。これは、本論で提案した薄肉中空管埋設工法がRC短柱の靱性向上に対し有効であることを示唆していると考えている。