論文　薄肉スパイラル鋼管で拘束した円形 RC 柱の力学的特性

諸石　祥子[*1]・佐藤　立美[*2]

要旨：本論文は、RC 柱の変形性能の向上と崩壊防止を目的とし、薄肉スパイラル鋼管で柱の側面を連続的に拘束・補強した円形 RC 柱を提案し、その力学的特性を実験的に検証したものである。実験因子は、薄肉スパイラル鋼管の板厚、作用軸力比、柱長さ/径比とし、適切な板厚の薄肉スパイラル鋼管で拘束された円形 RC 柱は、最大耐力、変形性能の著しく向上することが確認できた。さらに、実験結果から破壊形式を判別する推定式を提案し、実施設計に必要な柱の靭性等級との整合性も検証した。

キーワード：薄肉スパイラル鋼管、円柱、コンファインド効果、靭性等級

1.　はじめに

従来の RC 長方形柱では、大変形時にはカバーコンクリートの剥落を防ぐことができず、剥落による断面の減少により軸力支持能力が低下して RC 柱の圧壊に至る例が多数見られている。

本論では、大変形時にも断面の減少が生じないように、全断面を薄肉スパイラル鋼管(以下 T.S.S)で拘束した新しいシステムの円形 RC 柱を提案し、その力学的特性を明らかにする。

さらに、T.S.S の拘束効果が RC 柱に与える影響を確認し、提案した RC 柱を実施設計で使用する場合に必要な靭性等級を判別することを目的としている。

2.　提案した T.S.S で拘束した柱の概要

2.1　提案した柱の特徴

写真 - 1　T.S.S

本論で提案した円形 RC 柱は、幅 150mm、厚さ t=0.6～1.2mm の非常に薄く軽い T.S.S を構造材として使用していることが特徴である。

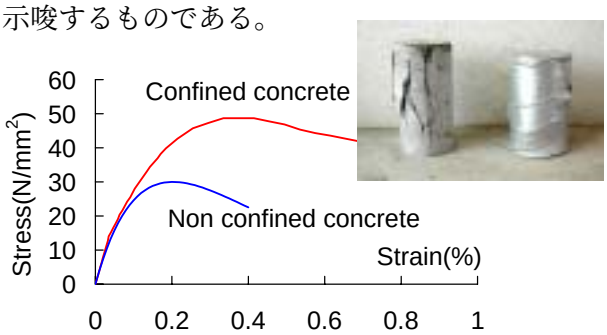
写真－1 に示す T.S.S は、薄肉鋼板をスパイラル上に巻上げ加工したものであり、軸方向の強度・剛性は非常に小さく設計上期待できないが、コンクリートの拘束効果、および、帯筋と同様な剪断補強効果は期待できるものである。

提案した円形 RC 柱の主筋は薄肉スパイラル鋼管の内面に接するように等間隔に配筋し、鋼管内部にコンクリートを充填したもので、帯筋は使用していない。

2.2　T.S.S の拘束効果

図－1 に、厚さ t=0.4mm の T.S.S で拘束した直径 φ=100mm、高さ H=200mm のコンクリートと、拘束のないコンクリートの圧縮試験結果及び圧縮試験後の破壊状況の例を示す。

図－1 により、T.S.S で拘束することで最大耐力は約 1.6 倍、最大耐力時の歪は約 2 倍となっていることがわかる。これの結果は、鋼管の厚さが柱径φの 0.4%でも、コンクリートの見かけの強度と変形性能を上昇させる効果があることを示唆するものである。



図－1　一軸圧縮試験における応力－歪曲線

*1 株式会社　塩見　(正会員)
*2 広島工業大学　建設工学科　教授　工博　(正会員)

3. 実験概要

3.1 試験体計画と実験計画

全試験体とも、主筋は 16-D13(SD295)、コンクリート設計強度は F_c=30N/mm^2 で計画した。

本実験の変動因子は、柱長さ比（H/φ=2.5、3.5、4.0）、軸力比（n=N/A_c・F_c=0.3、0.6）、T.S.S の厚さ t である。なお、T.S.S の厚さは、0.6mm(2t/φ＝0.4%)及び 1.2mm(2t/φ=0.8%)の 2 種類とし、この径厚比 2t/φは、長方形柱の帯筋比 p_w と同等の意味を持つものである。試験体断面図を図－2 に示すが、鋼管とスタブの間隔は 10mm とした。

試験体概要を表－1、使用材料強度を表－2 に示す。なお、試験体名は以下のように決定した。

[OC4－40－3]

n×10　H/φ×10　2t/φ×1000

N：軸力(kN)

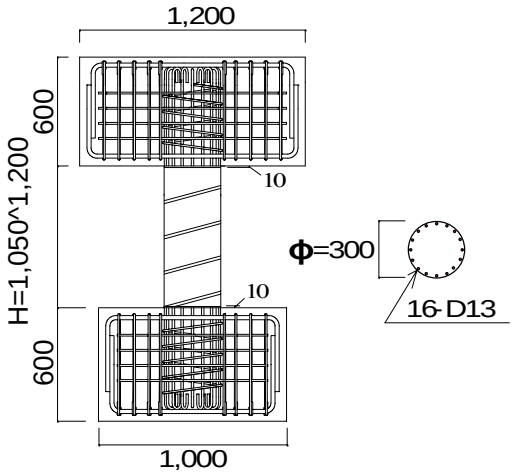
n：軸力比

表－1　試験体概要

試験体名	n	H/φ	2t/φ(%)
OC4-25-3	0.3	2.5	0.4
OC4-25-5	0.6		0.4
OC8-25-3	0.3		0.8
OC8-25-5	0.6		0.8
OC4-35-3	0.3	3.5	0.4
OC4-35-6	0.6		0.4
OC8-35-3	0.3		0.8
OC8-35-6	0.6		0.8
OC4-40-3	0.3	4.0	0.4
OC4-40-6	0.6		0.4
OC8-40-3	0.3		0.8
OC8-40-6	0.6		0.8

表－2　使用材料強度

	引張ひずみ	降伏強度		引張強度	
	(%)	(kN)	(N/mm^2)	(kN)	(N/mm^2)
D13	21.4	256.9	337.7	368.6	468.1
T.S.S	－	4.49	299	5.53	368



図－2　試験体配筋図

3.2 水平載荷による試験体の破壊形式

実験は、2 軸載荷装置を使用し、所定の軸力を載荷後、部材角 R=0.5%毎の漸増部材角で正負交番各 2 回の繰返し載荷を行い、部材角 R=5.0%まで載荷することを目標とした。

部材角 R=5.0%以下で崩壊した試験体を含め一定軸力下での水平載荷実験における試験体の破壊形式を、以下に示す 3 条件に分類した。

(1) 鋼管が破断し急激に圧壊した場合

(2) 剪断破壊型の場合。これらはいずれも部材角 R<3%で最大水平耐力の 80%以下に耐力が低下している。

(3) 変形性能の優れた曲げ破壊型の場合。

3.3 実験結果

提案した円形 RC 柱の全試験体 12 体の実験結果を表－3 に示す。表－3 の靱性率 μ は、主筋降伏時の部材角(R_y）と、最大耐力以後に主筋引張降伏時耐力まで耐力低下した時の部材角(R_u）との比(μ=R_u/R_y)として求めている。

また、各試験体の一定軸力下での挙動として、水平耐力－部材角(P-R)関係、及び軸方向歪－部材角(ε$_{axial}$-R)関係を径厚比 2t/φ 毎に表－4、5 に示す。なお、表－4、5 の▼は最大耐力時を示したものである。

表－4、5 に示すように、各試験体の挙動の差異は実験因子による明確な傾向があることを示している。ここでは、2 種類の 2t/φに対し、軸力比 n と柱長さ比 H/φが試験体に与える影響を考察する。

(1) 径厚比 2t/φ＝0.4%の場合

表－4 に示す P-R 関係より、軸力比 n=0.3 の試験体の場合、最大耐力以後、H/φ=2.5 は R=1.0%、H/φ=3.5 は R=1.5%、H/φ=4.0 は R=4.5%まで最大耐力時の耐力の 80%以上を保持しており、H/φが大きいほど、変形性能が優れている。また ε$_{axial}$-R 関係も H/φが大きいほど、試験体の軸方向歪は小さくなっている。

一方、高軸力比の n=0.5、0.6 の試験体の場合、

表－3　2 軸載荷実験結果一覧表

試験体名	σ_b (N/mm^2)	軸力比 n	軸力 N (kN)	最大水平耐力時 Q_{max} 耐力 (kN)	R (%)	ε_{axial} (%)	$0.8Q_{max}$ R (%)	ε_{axial} (%)	破壊形式
OC4-25-3	35.9	0.3	730	349	0.98	0.10	1.00	0.12	(1)
OC4-25-5	32.8	0.5	1161	382	0.45	0.06	0.47	0.07	(1)
OC8-25-3	35.9	0.3	730	396	2.30	0.18	3.35	0.33	(2)
OC8-25-5	32.4	0.5	1146	376	0.99	0.14	1.47	0.20	(2)
OC4-35-3	31.3	0.3	663	279	0.89	0.04	1.49	0.16	(2)
OC4-35-6	36.6	0.6	1285	285	0.50	0.02	0.76	0.17	(1)
OC8-35-3	33.7	0.3	715	287	2.35	0.09	4.98	0.15	(3)
OC8-35-6	32.5	0.6	1380	291	1.45	0.13	2.09	0.46	(2)
OC4-40-3	25.6	0.3	570	204	1.45	0.08	3.92	0.32	(3)
OC4-40-6	25.6	0.6	1125	236	1.35	0.19	1.97	0.24	(1)
OC8-40-3	33.1	0.3	664	228	2.54	0.00	5.00	0.10	(3)
OC8-40-6	33.1	0.6	1394	287	0.89	0.12	3.50	0.59	(3)

H/φ＝0.4 を除いた 2 体は、R=0.5%で最大耐力に達し、R=1.0%では鋼管が破断、その後、急激な耐力低下を生じ、圧壊している。

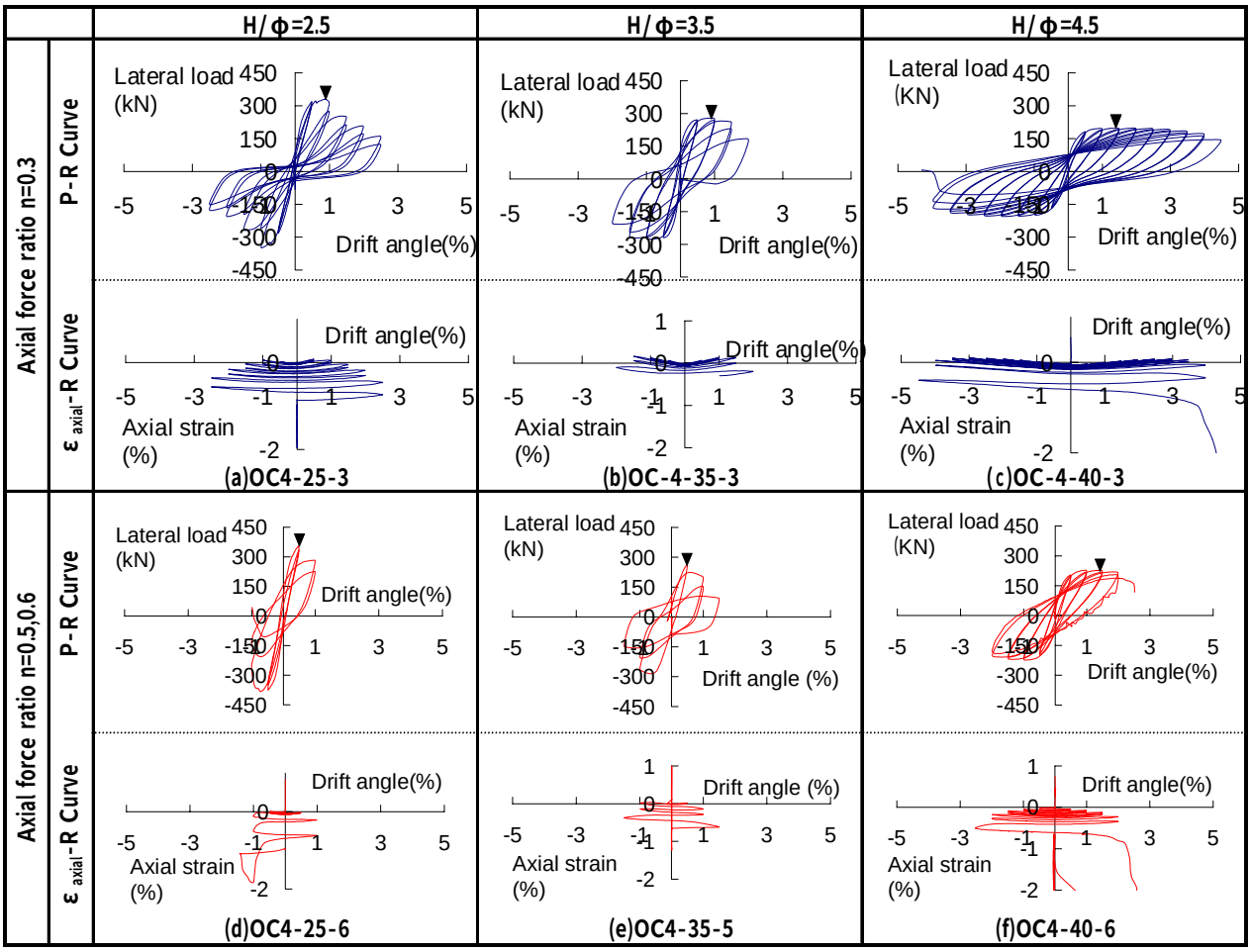
これらの試験体の ε_{axial}-R 関係を見ると、試験体の軸方向歪が急速に増大している事がわかる。

径厚比 2t/**φ**＝0.4%の場合、軸力比 n が小さくかつ柱長さ比の大きい試験体のみ、変形性能に優れた曲げ破壊型となることがわかった。

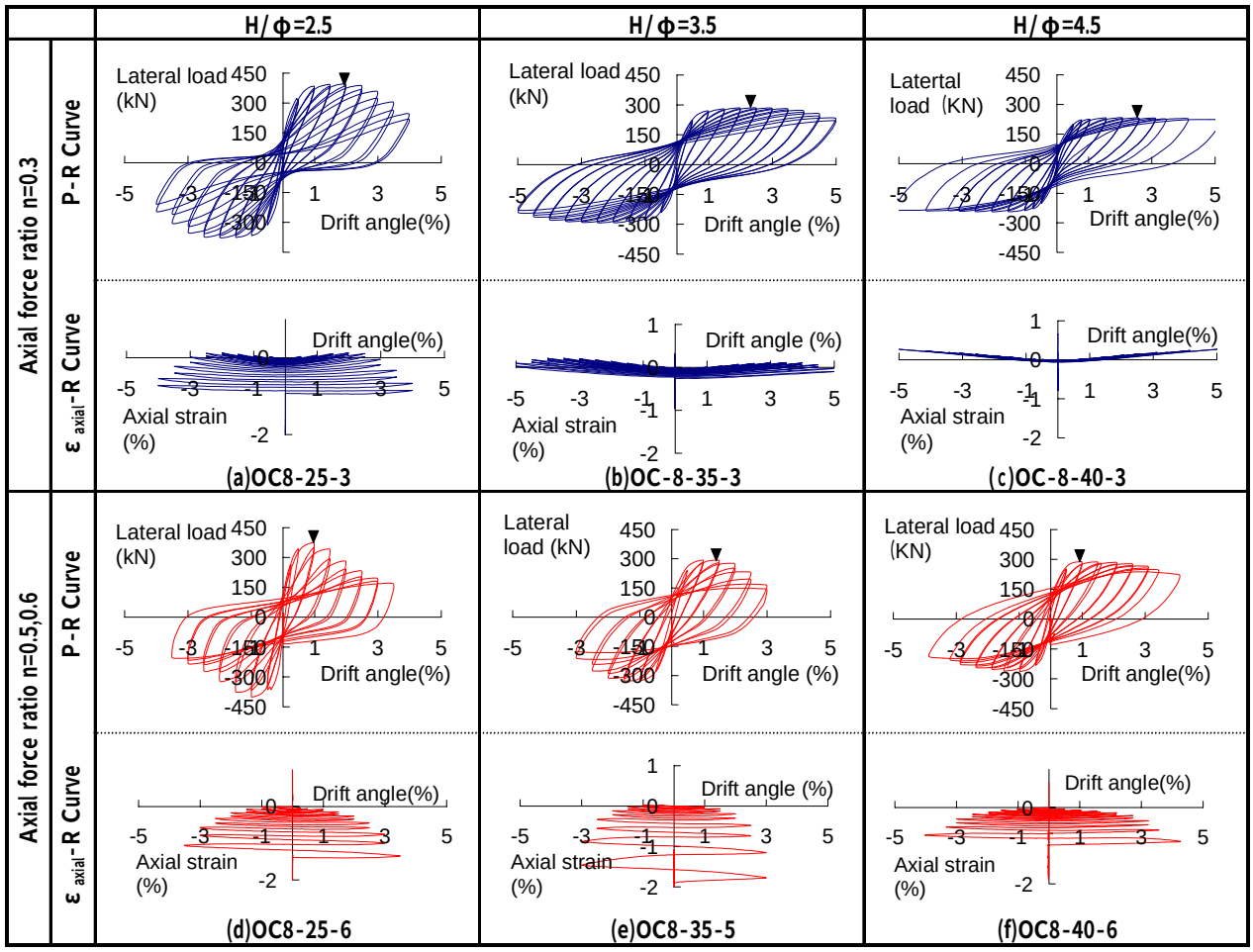
2）径厚比 2t/φ＝0.8%の場合

表－5 の P-R 関係より、軸力比 n=0.3 場合、H/φ=2.5 は剪断破壊型となっているが、最大耐力後の耐力低下は比較的緩やかである。その他 2 体の試験体は、P-R 関係からわかるように変形性能に優れた曲げ破壊形式であった。

表－4　径厚比 2t/φ＝0.4%の水平耐力－部材角曲線・軸方向歪部材角曲線



表－5　径厚比 2t/φ＝0.8%の水平耐力－部材角曲線・軸方向歪部材角曲線



ε_{axial}－R 関係からも、曲げ破壊する試験体の軸方向歪の蓄積は非常に小さいことがわかる。

軸力比 n=0.5、0.6 の場合は、H/φの大きいものほど最大耐力以後の耐力低下が緩やかで、H/φ＝4.0 の試験体は、曲げ破壊している。また、軸力比が大きいことで、試験体の軸方向歪の蓄積はいずれの試験体とも大きいが、T.S.S が破断し圧壊した試験体はなかった。

全試験体の P-R 関係、ε_{axial}-R 関係及び破壊形式等により、提案した円形 RC 柱の特性として、2t/**φ**、H/φともに小さいほど、最大耐力後の体力低下が急速となり変形性能が低下し、同時に、試験体の軸方向歪の増大が大きくなる傾向が認められる。さらに、この傾向は、載荷軸力が大きいほど顕著である。また、全試験体とも最大耐力時の軸方向歪は ε_{axial}＝0.2%以下であり、最大耐力時の 80%まで耐力低下した時の軸方向歪 ε_{axial}＝0.6%以下であった。

4.　最大水平耐力の評価

図－3 に水平載荷実験における軸力と最大水平耐力の実験値 Q_{ex}、日本建築学会の靭性保証型設計指針(案)の修正 B 法による終局剪断耐力 Q_u、RC 構造計算規準による軸力 N と終局曲げ耐力 Q_M の関係を示す。なお、修正 B 法では、円形断面を同面積の角型断面に、T.S.S は帯筋に置換しているが、コンクリートの強度は拘束応力度を考慮した Richart[2)]の提案式を、T.S.S を使用した場合に変形した式(3)を用いている。

図－3 に示すように、RC 構造計算規準による計算値は、実験値をかなり過小評価していることがわかる。そこで、実験値を適切に評価するため、コンクリートの拘束効果による見かけの強度上昇、鉄筋の降伏後の強度上昇を考慮した新たな評価式を作成した。

このとき、拘束コンクリートの最大耐力時歪 ε_b は 2.2 で記した一軸圧縮試験結果より ε_b=0.3%

と仮定し、応力－歪関係は、最大耐力までは (1)式による梅村 e 関数、最大耐力以降は回帰解析による式(2)を使用した。

また、鉄筋の降伏以後の強度上昇は、ヤング係数 E_s を 1/150×E_s として算出した。

試験体の曲げ耐力計算は、コンクリートの最大歪を ε_u=0.4～1.0%の範囲で行ったが、ここでは、ε_u=0.6%を使用した結果を示している。

$$\sigma_c = 6.75\left(e^{-0.812\xi} - e^{-1.218}\right) \times {}_c\sigma_b \qquad (1)$$

$$\sigma_{c'} = {}_c\sigma_b (0.003/\xi)^{0.23} \qquad (2)$$

$$\begin{aligned} {}_c\sigma_b &= \sigma_b + k \cdot {}_c\sigma_r \\ &= \sigma_b + 4.1 \cdot 2t/(\phi - 2t) \cdot \sigma_{sy} \end{aligned} \qquad (3)$$

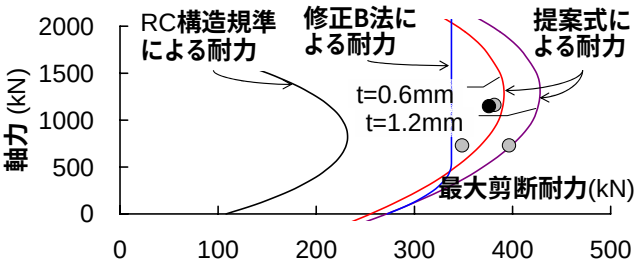
但し、　$\xi = \varepsilon / \varepsilon_b$

σ_c ：最大耐力までのコンクリート応力度

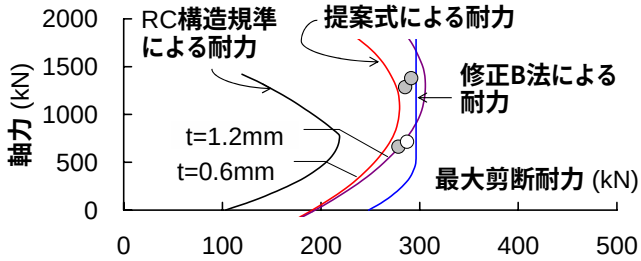
$\sigma_{c'}$：最大耐力以後のコンクリート応力度

${}_c\sigma_r$ ：T.S.S による拘束応力度

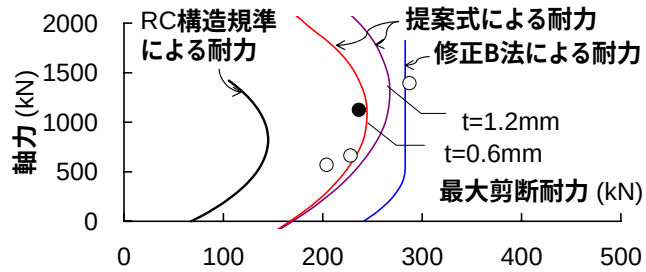
σ_{sy} ：T.S.S の引張降伏強度



(a) H/φ=2.5



(b) H/φ=3.5



(c) H/φ=4.0

図－3　N－Q_{max} 関係

以上の仮定により求めた終局曲げ耐力 Q_M は、図－3 に示すように、実験値と非常に近似した評価となっていることがわかる。但し、修正 B 法による終局剪断耐力 Q_u は、せん断破壊する試験体の耐力を十分評価しているとはいえないことから、さらに検討が必要である。

5.　靭性等級の判別と終局耐力計算値

日本建築センター「改正建築基準法施工令新耐震基準に基づく構造計算指針・同解説」の形状による靭性等級では、FA 材の柱の条件は、曲げ破壊するもので、柱長さ比は 2.5 以上、軸力比が 0.35 以下、引張鉄筋比 P_t が 0.8%以下をいずれも満足しなければならない。

上記の基準によると、本論の試験体は、引張鉄筋比 P_t=0.9%であることから FB 材、さらに高軸力比の場合には FC 材と判定されるが、表－6 に示す実験値の靭性率 μ を元に靱性等級の判別した場合、これら FB、FC 材と判定される本論の試験体は、表－7 に示す結果を得る。

表－7 より、修正 B 法による終局剪断耐力 Q_u と、提案式による終局剪断耐力 Q_M との比 Q_M/Q_u を見ると、FA 材と判定した柱は Q_M/Q_u=0.8 以下、FB 材の柱は Q_M/Q_u=0.9、FC 材の柱は Q_M/Q_u=0.88～0.97、FD 材の柱は Q_M/Q_u =0.94～1.16 である。

表－6　靭性等級の判別 [1)]

靭性等級	μ	
FA	μ≧6	特に靭性に富む
FB	μ≧4	比較的靭性がある
FC	μ≧2	靭性が劣る
FD	μ＜2	かなり靭性が劣る

表－7　終局耐力計算値の比較

試験体名	Q_{ex}/Q_M	Q_{ex}/Q_U	Q_M/Q_U	靭性率 μ	靭性等級
OC4-25-3	0.93	1.03	1.11	1.0	FD
OC4-25-5	0.98	1.13	1.16	-	FD
OC8-25-3	1.00	0.90	0.90	4.6	FB
OC8-25-5	0.88	0.85	0.97	3.6	FC
OC4-35-3	1.04	0.94	0.91	3.9	FC
OC4-35-6	1.02	0.96	0.94	1.3	FD
OC8-35-3	1.00	0.72	0.72	8.8	FA
OC8-35-6	1.00	0.74	0.74	3.8	FC
OC4-40-3	0.92	0.72	0.78	8.2	FA
OC4-40-6	0.95	0.84	0.88	3.4	FC
OC8-40-3	0.98	0.60	0.61	9.8	FA
OC8-40-6	1.07	0.75	0.70	6.1	FA

ここで、FA、FD 材は Q_M/Q_u により明確に判別することができるが、FB、FC 材は判別し難い。そこで実験における破壊形式を加え、靭性等級を判別する。

6. 実験結果の破壊形式と靭性等級の判別

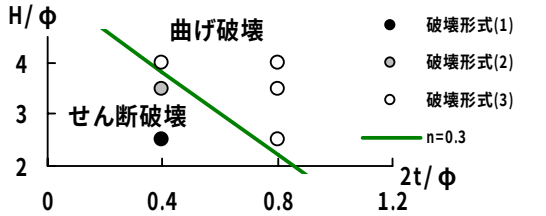
表－6 による靭性等級における判別では、破壊形式（1)、(2)の剪断破壊型の試験体は FC、FD 材のいずれかに判定され、また、破壊形式(3)の曲げ破壊型の試験体は全て、FA、または FB 材と判定される。

全 12 体の破壊形式は、図－4 に示す H/φ、2t/φ、n の関係より、FC、FD 材と判定される剪断破壊型の試験体（破壊形式(1)、(2)）と FA、FB 材と判定される曲げ破壊型の試験体（破壊形式(3)）は、式(4)の判別式で判定できる。この判別式は図－4 中に示すように、実験結果に基づく破壊の定義の判別より算出したものである。

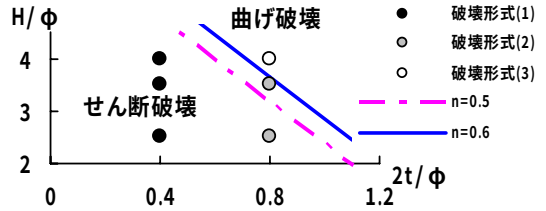
$$H/\phi = 4 + n/0.21 - 4 \times 2t/\phi \qquad (4)$$

これより、提案した円形 RC 柱を変形性能に優れた曲げ破壊型の試験体とする為には、提案した式(4)による判別式の上方にくるよう、試験体を計画することで可能となる。

以上より、T.S.S に適切な厚さを確保すれば、高軸力下においても十分な変形性能を持ち、靭性等級を FA 材と判定できることが確認できた。



(a) 軸力比 n＝0.3 の場合



(b) 軸力比 n＝0.5、0.6 の場合

図－4 破壊形式の区別

7. 結論

以上の実験結果から、T.S.S で拘束した円形 RC 柱の力学的特性を以下に示す。

1) T.S.S で拘束した円形 RC 柱が、曲げ破壊先行型となる場合、大変形時にも耐力低下は少なく、非常に変形性能の優れた RC 柱となる。

2) T.S.S 自体がせん断補強筋として効果的に機能することを確認した。

3) 最大水平耐力は、 コンクリートの終局歪を ε_u=0.6%と仮定し、コンクリート拘束効果による見かけの強度上昇、鉄筋の降伏以降の耐力上昇を考慮した評価式で近似した値が得られる。

4) 試験体の計画は、FB、FC として設計されているが、T.S.S の拘束効果により、適切な形状とすることで FA の性能を持つ。

具体的には以下のとおりである。

・軸力比 n=0.3 の時、H/φ=4.0 の場合、2t/φ=0.4%以上、H/φ=3.5 の場合、2t/φ=0.8%以上とすると FA と判定できる。

・軸力比 n=0.5、0.6 の場合で、H/φ=4.0 の場合、2t/φ=0.8%以上とすると FA と判定できる。

参考文献

1. (社)日本コンクリート工学協会 コンクリート構造物の靭性評価研究委員会:コンクリート構造物の靭性とその評価法に関するコロキウム、S63.3/28、29、pp.I-18、20
2. 諸石、宇吹、佐藤:薄肉スパイラル鋼管で拘束した円形 RC 柱の力学的特性に関する実験的研究 その 1、2、日本建築学会全国大会学術梗概集、2001
3. 諸石、佐藤:薄肉スパイラル鋼管で拘束した円形 RC 柱の力学的特性に関する実験的研究 その 1、2、3、日本建築学会全国大会学術梗概集、2002
4. Shoko Moroishi、 Tatsumi Sato:The mechanical characteristics of circular RC columns confined by Thin Steel Spiral tube、 Fib2002 Osaka、Proceedings of the 1st fib Congress pp.535-544