

論文

[2046] 中空コンクリートの圧縮靱性の改善と評価

正会員 小柳 洽 (岐阜大学工学部)
 正会員 六郷恵哲 (岐阜大学工学部)
 正会員 ○岩佐正徳 (岐阜大学大学院)
 正会員 近藤吉信 (岐阜大学大学院)

1. まえがき

PCボールやPCパイプは、通常工場において遠心力成形法により作製され、中空円筒状の形状をしている。PCボールやPCパイプ等の中空部材の曲げ耐力と曲げ靱性を改善し強靱化するためには、鋼材の量を増すと同時にコンクリートの圧縮靱性を改善する必要がある。また圧縮を受ける中空コンクリート供試体の最大耐力点以降の変形特性は、中実（中空でない）供試体の特性とは異なることが予想される。

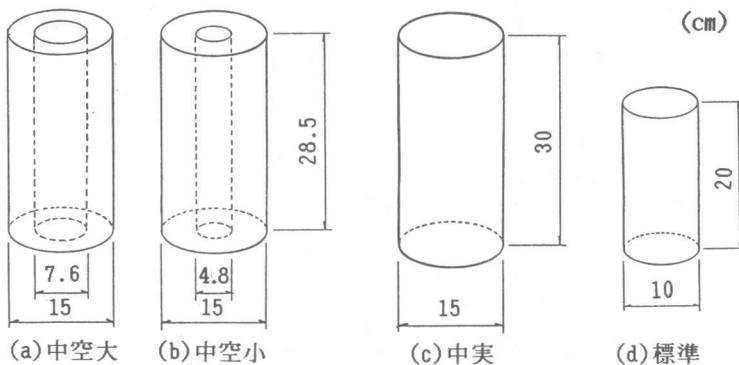
本研究においては、PCボールやPCパイプの高性能化・強靱化の一環として、鋼繊維やスパイラル筋が中空コンクリート供試体の圧縮靱性の改善にどのように影響するかについて検討するとともに、改善されたコンクリートの圧縮靱性の効果を設計へ取り入れる方法について検討する。

2. 実験概要

(1) 試験条件と供試体

表一に示すように、コンクリートの目標強度と補強方法の異なる合計8シリーズについて、図一に示すような4種類の形状の供試体を作製し、圧縮荷重試験を行い、荷重変位曲線を計測し圧縮靱性を求めた。

コンクリートの目標圧縮強度を400kgf/cm²と800kgf/cm²の2種類とした。鋼繊維補強コンクリート（F4、F8シリーズ）には、インデント付ストレート鋼繊維（直径0.5mm、長さ25mm）を容積比で2%混入した。N4NならびにN8Nシリーズでは、普通強度のスパイラル筋（普通丸鋼、直径6mm、引張強度4410kgf/cm²）を用い、N4HならびにN8Hシリーズでは、高強度のスパイラル筋（異形PC鋼棒、直径7.4mm、引張強度14700kgf/cm²）を用いた。普通強度スパイラル筋は外径13.8cm、平均ピッチ2.7cm、高強度スパイラル筋は外径13cm、平均ピッチ2.7cmとした。



図一 供試体の形状

コンクリートの配合とスランブ試験結果を表一2に示す。セメントはすべて早強ポルトランドセメントとし、目標強度が400kgf/cm²の場合にはA E減水剤(PZ-70)を、目標強度が800kgf/cm²の場合には高性能減水剤(NL-4000)を用いた。

図一1に示すように、内径が7.6cmの中空供試体（外径15cm、高さ28.5cm、以下中空大供試体と呼ぶ）と内径が4.8cmの中空供試体（外径15cm、高さ28.5cm、以下中空小供試体と呼ぶ）に加え、中実供試体（外径15cm、高さ30.0cm）を作製した。各シリーズとも、圧縮強度試験用の標準供試体（直径10cm、高さ20cm）を作製した。供試体数は1条件につき原則として4個づつとした。

中空供試体は図一2に示す方法によって作製した。鋼製型枠(φ15x30cm)の底部にドーナツ状の鋼板を配置し供試体の中空部分に相当する芯材（水道管等の保温材）を差し込んだ状態でコンクリートを打設し、テーブルバイブレーターにより振動締固めをしながら上部の鋼板によって芯材の位置を固定した。供試体中空部の寸法精度は±1mm程度であった。本研究においては、遠心力成形法の代わりに通常の打込成形法によって中空供試体を作製したが、コンクリートの圧縮強度が同程度であれば、成形法の違いがコンクリートの破壊性状に及ぼす影響は比較的小さいものと考えた。遠心力成形法により作製した中空供試体に関する実験も今後行う予定である。

(2) 載荷試験方法と靱性の定量化

標準水中養生の後、目標強度が400kgf/cm²のシリーズの場合は材令4週以上で、800kgf/cm²のシリーズの場合は材令2週以上で湿潤状態で圧縮載荷試験を行った。

図一1に示す中実ならびに中空供試体については、供試体全体の圧縮変形として、載荷試験機（容量200tonf）の加圧板間の変位を計測し、荷重変位曲線をXYレコーダに記録した。ただし、

表一1 試験条件

シリーズ名	コンクリート 目標強度 (kgf/cm ²)	鋼繊維 混入率 (%)	スパイラル筋 の 強度種別
N4 F4 N4N N4H	400 " " "	— 2 — —	— — 普通強度 高強度
N8 F8 N8N N8H	800 " " "	— 2 — —	— — 普通強度 高強度



図一2 中空供試体の作製方法

表一2 コンクリートの配合とスランブ試験結果

シリーズ名	目標強度 (kgf/cm ²)	鋼繊維 混入率 (%)	粗骨材 最大寸 法(mm)	水比 比 (%)	細骨 材率 (%)	単体量 (kg/m ³)						スランブ ^o (cm)
						W	C	S	G	鋼繊維	減水剤	
N4, N4N, N4H F4	400 "	— 2	15 "	52 50	50 "	182 200	350 400	866 822	866 822	— 157.0	0.70 1.20	7.0 5.5
N8, N8N, N8H F8	800 "	— 2	" "	30 "	45 47	157 164	525 547	792 749	966 842	— 157.0	13.13 16.41	14.0 10.5

注) 減水剤：目標強度400(kgf/cm²);PZ-70 ;目標強度800(kgf/cm²);NL-4000

加圧板と供試体端部との接触部分の影響により、荷重変位曲線の立ち上がりはゆるやかになるため、最大耐力点以前の変位は供試体に取り付けた変位計（検長15cmのコンプレッソメータ）によって計測した変位を供試体全体の変位に換算して用いた。強度試験用標準供試体（φ10x20cm）の圧縮変形は、供試体に取り付けた変位計（検長18cmのコンプレッソメータ）によって計測した。

载荷試験機の加圧板間の変位速度がほぼ一定（0.1~1.0mm/分程度）となるよう、油圧バルブを手動で調整した。ただし最大耐力点以降の荷重変位曲線の計測にあたっては、急激な破壊が生じる可能性があるN8シリーズでは、必要に応じて载荷除荷を繰り返す操作を行った。

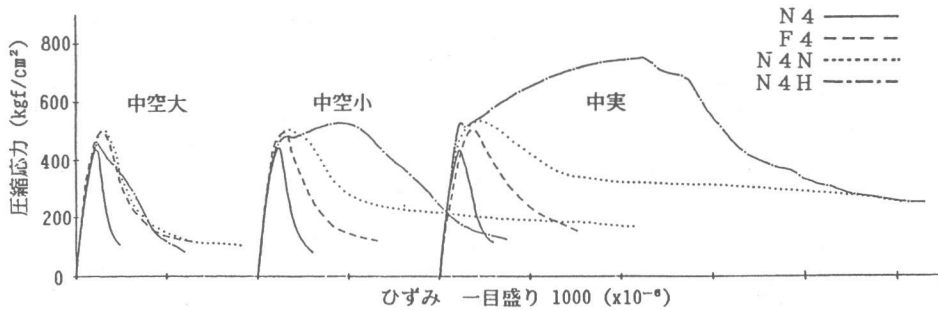
個々の供試体から計測した荷重変位曲線を各条件（供試体4個）ごとに平均して平均曲線を求め、さらに、供試体の断面積と検長を考慮して応力ひずみ曲線に換算した。なお、曲線の平均にあたっては、曲線群の各部位で曲線群にほぼ直行する直線を考え、この直線と曲線群の交点の平均位置を求め、これらの平均位置を順次結んで平均曲線とした。

圧縮靱性を定量化する場合の限界点の取り方については種々の提案が行われている。本研究においては、取り扱いの簡便性のため、応力ひずみ曲線の下降域において応力が強度の1/3に低下する点を限界点とし、この点にいたるまでの応力ひずみ曲線下の面積を圧縮靱性として定量化した。

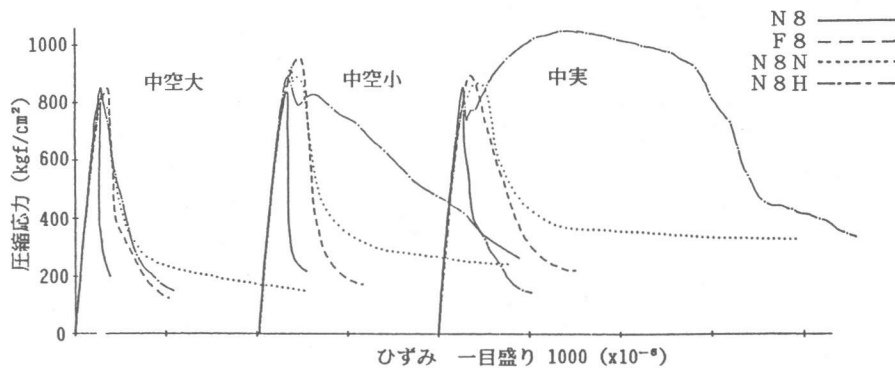
3. 実験結果と考察

(1) 応力ひずみ曲線と破壊性状

得られた圧縮応力ひずみ曲線を図-3に示す。圧縮強度を表-3に示す。高強度スパイラル筋



(a)コンクリート目標強度 400 kgf/cm²



(b)コンクリート目標強度 800 kgf/cm²

図-3 圧縮応力ひずみ曲線

を用いた中実供試体の場合、スパイラル筋の外側のかぶり部分のコンクリートが剝落した時に耐力は一時的に低下するが、スパイラル筋の拘束効果により耐力は再び増加し、見かけの圧縮強度（荷重を初期断面積で除した値）は高くなった。中実供試体に比べ中空供試体では中空部分が大となるほどスパイラル筋の圧縮強度改善効果は少なくなった。一方、スパイラル筋の引張強度が低い場合には中実供試体であっても、スパイラル筋による圧縮強度改善効果はわずかであった。

鋼繊維補強コンクリートの場合、スパイラル筋によって補強した場合に比べ、応力ひずみ曲線の形状に及ぼす中空部分の大きさの影響は小さく、また表面コンクリートの最終的な剝落量も極めて少なかった。

スパイラル筋の引張強度が低い場合、中実供試体ではスパイラル筋は破断した。しかしスパイラル筋の引張強度が高い場合には降伏は生じなかった。高強度スパイラル筋が最終的に降伏していないことは、内部の破砕したコンクリートを取り除いた後に、スパイラル筋が初期の形状寸法を保っていることから判断した。

(2) 圧縮靱性

表一三に圧縮靱性の計測結果を示す。中実供試体(φ15x30cm)と標準供試体(φ10x20cm)から求めた圧縮靱性の値はN4、F4、F8の各シリーズではほぼ同一となり、供試体の大きさの影響は認められなかったが、最大耐力点以降に急激な耐力低下が生じる高強度コンクリート(N8)では、供試体が大きい方が圧縮靱性も大となった。

供試体の中空内径 r_i と外径 r_o との径比 r_i/r_o と、圧縮靱性との関係を図一四に示す。図一四(a)からわかるように、N4シリーズでは径比が圧縮靱性に及ぼす影響はわずかであるのに対し、高強度コンクリート(N8)や鋼繊維補強コンクリート(F4)では径比の増加につれて圧縮靱性は減少した。N4とF4、あるいはN8とF8シリーズの比較からわかるように、コンクリートの圧縮強度が同程度の場合、鋼繊維を2%混入することによって圧縮靱性は2~3倍増加した。

スパイラル筋を用いることによって中実供試体では圧縮靱性は著しく改善されるが、中空部の内径が大きくなりコンクリート部分の肉厚が薄くなるに従って、スパイラル筋の効果は減少した。中空大供試体では、スパイラル筋の効果は鋼繊維の効果とほぼ同程度であった。さらにスパイラル筋の引張強度が高い方が低い場合に比べ圧縮靱性は大きくなった。またコンクリートの圧縮強度が高くなると、鋼繊維・スパイラル筋ともに圧縮靱性の改善の度合は小さくなる傾向を示した。

鋼繊維・スパイラル筋ともに載荷軸と直角方向へのコンクリートの変形を拘束する役割を果しており、スパイラル筋は鋼繊維に比べその拘束力がかなり強い。しかしながら、鋼繊維による補

表一三 圧縮強度,圧縮靱性ならびに換算終局ひずみ

シリーズ名	圧縮強度 fc' (kgf/cm ²)				圧縮靱性 Sc' (kgf/cm ²)				換算終局ひずみ $\epsilon u' [= Sc'/0.8fc']$			
	中空大供試体	中空小供試体	中実供試体	標準供試体	中空大供試体	中空小供試体	中実供試体	標準供試体	中空大供試体	中空小供試体	中実供試体	標準供試体
N4	435	442	430	453	1.11	1.23	1.34	1.37	0.00319	0.00348	0.00390	0.00378
F4	499	493	500	472	2.57	2.64	4.21	4.25	0.00644	0.00669	0.0105	0.0113
N4N	506	504	530	(475)	2.74	10.2	17.4	(1.63)	0.00677	0.0253	0.0410	(0.00429)
N4H	458	525	746	(525)	2.66	8.92	26.4	(1.49)	0.00726	0.0212	0.0442	(0.00355)
N8	850	832	844	858	1.40	1.79	3.14	2.31	0.00206	0.00269	0.00465	0.00337
F8	848	950	884	939	3.01	4.23	5.60	5.79	0.00444	0.00557	0.00792	0.00771
N8N	829	920	858	(806)	3.55	6.16	16.2	(1.94)	0.00535	0.00837	0.0236	(0.00301)
N8H	823	883	1040	(843)	3.39	15.1	34.7	(2.15)	0.00515	0.0214	0.0417	(0.00319)

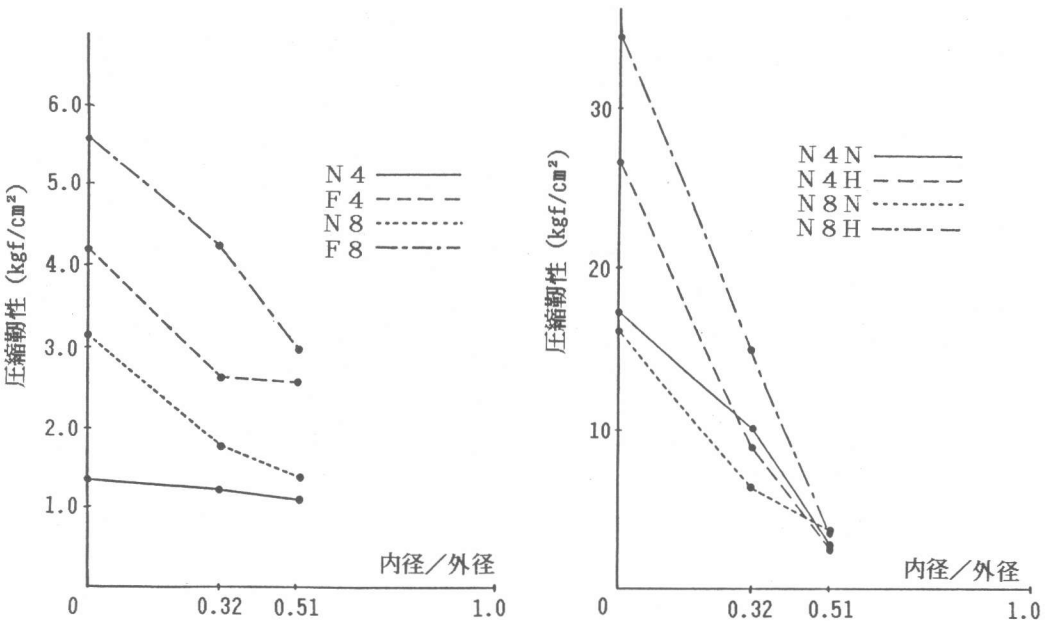
() :スパイラル筋を含まないマトリックスコンクリートのみの値

強に比べスパイラル筋による補強の場合、中空部の内径が大きくなるほど圧縮靱性改善の効果は小さくなった。これは、鋼繊維がコンクリート全体を密実に結び付けて変形を拘束しているのに対し、スパイラル筋はスパイラル筋の内部のコンクリートの変形を外側から押さえるように拘束しているものであり、供試体の中空部の内径が大きくなると拘束される内部のコンクリートの割合が少なくなるとともに、中空部分へのコンクリートの変形を許すため、スパイラル筋が圧縮靱性改善の効果に及ぼす効果は小さくなると考えられる。

(3) 設計への圧縮靱性の反映

RC部材やPC部材の曲げ耐力 M_u の算定、ならびに終局状態におけるつりあい鉄筋比 p_o の算定には、通常コンクリートの圧縮強度 f'_c と終局ひずみ ϵ'_{cu} ($=0.0035$ 程度)の値が用いられる。曲げ耐力に及ぼすコンクリートの応力ひずみ関係や終局ひずみの影響は、通常の低鉄筋比の単鉄筋はり断面の場合には特に問題とはならないが、鉄筋比が高い場合や複鉄筋断面の場合(特に引張鉄筋量に比べ、圧縮鉄筋量が小さい場合)には影響が大となる。鋼繊維の混入やスパイラル筋の使用などによって改善されたコンクリートの圧縮靱性を、設計で従来から用いられている簡便な各種の算定式に反映させる手法を確立することが重要である。

RC部材の曲げ耐力の算定に用いられる図-5に示すような等価応力ブロックの仮定においては、コンクリートの圧縮靱性すなわち ϵ'_{cu} に至るまでの応力ひずみ曲線下の面積は $0.8f'_c \cdot \epsilon'_{cu}$ に相当するものとする。等価応力ブロックの f'_c の代わりに例えば $0.85f'_c$ を用いることも行われているが、この係数(0.85)については、部材の挙動をふまえてさらに検討する必要がある。改善された圧縮靱性をRC部材断面の設計に反映させる方法として、次式によって与えられる換算終局ひずみ ϵ'_u を用いることを筆者らは提案している[1]。



(a) プレーンコンクリートと鋼繊維補強コンクリート (b) スパイラル筋を用いたコンクリート

図-4 圧縮靱性に及ぼす中空内径の影響

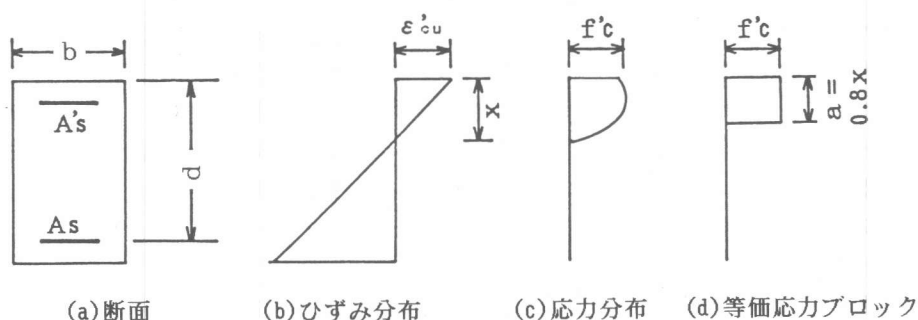


図-5 RCはり断面と等価応力ブロック

$$\varepsilon'_{cu} = \frac{S'_c}{0.8f'_c} \quad (1)$$

S'_c はコンクリートの圧縮靱性であり、 $0.8f'_c$ は圧縮部コンクリートの平均応力に相当する。

圧縮靱性の定量化にあたっては、圧縮靱性の大小をよく表すことができ、かつ簡便な方法を用いれば良い。例えば、本研究において用いているように、応力ひずみ曲線の下降域において応力が圧縮強度 f'_c の1/3に低下する点までの面積として圧縮靱性を定量化することも有効である。ただし、応力ひずみ曲線の下降域の形状は、供試体寸法の影響を受けやすいため、圧縮靱性の定量化にあたっては、供試体の寸法を一定とする必要がある。

圧縮強度 f'_c と圧縮靱性 S'_c とを用いて(1)式により計算した換算終局ひずみの値を表-3に示す。圧縮強度が 400kgf/cm^2 台のプレーンコンクリート(N4)では、換算終局ひずみ ε'_{cu} は0.0035前後となった。鋼繊維補強コンクリートの ε'_{cu} はプレーンコンクリートの約2倍となった。高強度スパイラル筋を用いた場合には ε'_{cu} はプレーンコンクリートの10倍程度(中実供試体)となった。

4. あとがき

中空コンクリートの圧縮靱性の改善と評価について検討した本研究の主な結論は次のとおりである。

(1) 鋼繊維を混入したりスパイラル筋を用いることによりコンクリートの圧縮靱性は改善され、特に後者の場合スパイラル筋の引張強度が高いほどその効果は大であった。しかし鋼繊維を混入することによる圧縮靱性の改善効果に及ばず供試体の中空部の大きさの影響は比較的小さいのに対し、スパイラル筋を使用した場合はコンクリート供試体の中空部分の割合が大きくなるほど小さくなった。

(2) 鋼繊維混入やスパイラル筋の使用によって改善されたコンクリートの圧縮靱性の効果を、RC部材断面の通常の設計に反映させる方法として、圧縮靱性 S'_c をRC部材圧縮域の平均応力(本論文では $0.8f'_c$ と仮定)で除して求めた換算終局ひずみ ε'_{cu} ($=S'_c/(0.8f'_c)$)を用いることを提案した。

【謝辞】本論文を作製するにあたり御協力いただいた卒研究生の武市和己君に感謝します。

参考文献

- 1) 小柳治、六郷恵哲、岩瀬裕之：鉄筋コンクリートはり部材の靱性評価と靱性設計、靱性評価コロキウム論文集、日本コンクリート工学協会、1988