

論文
[2004] 中空円筒はり部材の曲げ破壊性状

正会員 小柳 治 (岐阜大学工学部)

正会員 六郷恵哲 (岐阜大学工学部)

正会員○小山秀紀 (岐阜大学大学院)

縄田初夫 (東海コンクリート工業)

1. まえがき

PC鋼材を使用したPCパイルやPCポールの靱性(高荷重レベルにおける変形性能)を改善するには、スパイラル筋による横拘束効果をもることが一般に有効である。しかし横拘束効果が大きすぎる場合には結果としてPC鋼材の破断が生じるため、PC鋼材の延び能力(破断時までのひずみ量)を改善したり〔1〕延び能力の大きい鋼材とPC鋼材とを組み合わせること〔2〕が有効とされている。また十分な横拘束が行われていても圧縮側鋼材の座屈により破壊に至る場合や、スパイラル筋の破断に至る場合がある。そこで本研究においては、PCパイルやPCポールの強靱化手法を確立することを目的として、鋼材量やコンクリート種別を変化させ、高強度スパイラル筋により横拘束した中空円筒はり部材の曲げ破壊性状について実験的に検討した。まず、作製ならびに試験が容易な小型はり供試体を用いて、スパイラル筋ピッチ、鋼材種別、コンクリート種別、中空部内径等の各種要因の影響について検討した後に、これらの要因のうちで特に重要なスパイラル筋のピッチの効果について実物大はり供試体により確認した。

2. 小型はり供試体の曲げ破壊性状

2.1 実験概要

表-1に示すように、軸方向筋として用いる鋼材の種類(異形鉄筋, 高強度鉄筋, PC鋼棒), モーメントスパン内のスパイラル筋のピッチ〔0(スパイラル筋なし), 3, 5, 8cm〕, はりの断面形状(中空大, 中空小, 中実), コンクリートの種類(プレーンコンクリート, 鋼繊維補強コンクリート)を主な実験要因とし、これらを変化させた10種類の試験条件(A~Kシリーズ)を設定し、それぞれ2体ずつ小型はり供試体を作製した。鋼材の

表-1 小型はり供試体の実験計画

シリーズ	コンクリート ^{*1)} 鋼繊維混入量(%)*2)	スパイラル筋 ^{*3)}		中空部の内径(cm)	軸方向筋の種類		
		有無	ピッチ(cm)				
A	-	無	-	10.7 (中空大)	PC鋼棒 ^{*4)}		
B		有	5		-	異形鉄筋 ^{*5)}	
C						高強度鉄筋 ^{*6)}	
D						PC鋼棒 ^{*4)}	
F							3
G							8
H				5			
I		8.1(中空小)					
J		2	無	-	10.7		
K		有	5	(中空大)			

*1) 4週目標強度600kgf/cm²

*2) 0.5×20mm インデント付きストレートファイバー

*3) 降伏点強度 144kgf/mm², 直径 7.4mm

*4) 降伏点強度 141kgf/mm², 直径 9.2mm

*5) 降伏点強度 38kgf/mm², 直径 9.53mm

*6) 降伏点強度 66kgf/mm², 直径 9.2mm

降伏強度を表-1に注として示す。図-1に示すように、供試体の寸法は、全長250cm, 外径20cm, 軸方向筋配置径15.6cmとし、軸方向筋の外周にスパイラル筋を配置した。スパイラル筋のピッチはモーメントスパン内でのみ変化させ、せん断スパン内においては、せん断補強筋としてピッチ

が5cmのスパイラル筋を用いた。なお、PC鋼棒にはプレストレスを導入していない。

通常のパイラやポールは鋼製型枠を用いて工場内で遠心力成形法により作製されているが、本実験では硬質紙製パイプを型枠として用いた。コンクリートの打設は、テーブルバイブレーターにより振動締め固めをしながらコンクリートを投入した。図-2に供試体作製略図を示す。養生方法は湿布養生とした。

湿布養生終了後、材令8週で各シリーズの小型はり供試体の曲げ試験を行った。図-1に示

すように、小型はり供試体の荷重についてはモーメントスパン25cm、せん断スパン100cmとし、対称2点曲げとした。供試体の断面不整による誤差の影響を小さくするため打設面を横にし、軸方向筋位置が上下端に1本ずつるように調整して供試体を試験機に設置した。なお、供試体端部における付着破壊を防ぐため、あらかじめ引張側の軸方向筋を供試体両端の鋼板にナット止めた。

荷重は一方単調荷重で、荷重、荷重点下の変位(たわみ)、供試体上下縁のコンクリートひずみを計測した。また変位速度がほぼ一定となるように油圧バルブを手動で調整して行ない、圧縮側鋼材の座屈、引張側鋼材の破断など明確な破壊現象が確認できたら荷重を中止し、また大変形となり危険な状態となった場合にも荷重を中止した。

2.2 結果と考察

表-2に小型はり供試体の曲げ試験の結果の一覧表を示し、得られた荷重-変位曲線を実験要因別にまとめ図-3~6に示す。

(1) 軸方向筋の種類を変化させた場合

図-3に軸方向筋として用いた鋼材の種類を変化させた場合の荷重-変位曲線

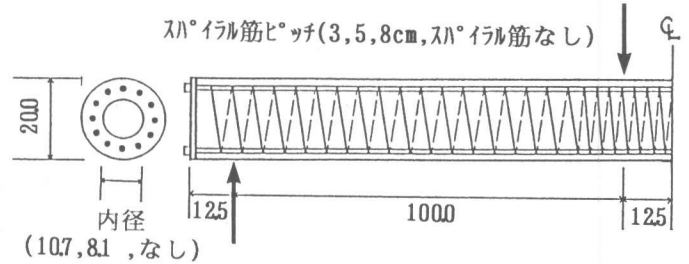


図-1 小型はり供試体の供試体寸法 (cm)

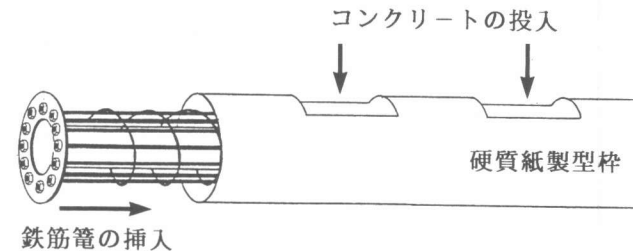


図-2 小型はり供試体作製の略図

表-2 小型はり供試体の実験結果

シリーズ	降伏荷重 (tonf)	最大荷重 (tonf)	破壊モード	終局変位 ^{*1} (mm)	コンクリート強度 (kgf/cm ²)
A	11.4	11.4	圧縮側鋼材座屈	34(1.0)	750
B	4.4	5.5		載荷中止	750
C	6.6	7.5		127(-)	798
D	11.6	13.7		92(2.7)	742
F	11.4	14.1	引張側鋼材破断	118(3.5)	793
G	11.4	12.6	圧縮側鋼材座屈	53(1.6)	793
H	11.0	14.0	引張側鋼材破断	94(2.8)	775
I	11.5	13.7		92(2.7)	798
J	10.7	11.6	圧縮側鋼材座屈	49(1.4)	891
K	11.6	14.2	引張側鋼材破断	91(2.7)	845

*1 ()内はAに対する比

を示す。鋼材の降伏強度が高くなるに従って耐力は増加しているが、荷重が大きいため圧縮側の鋼材の座屈が早期に生じ、高荷重レベルにおける変形能は小さくなるのがわかる。リブの小さいP C鋼棒や高強度鉄筋を用いた場合、モーメントスパン内にスターラップやスパイラル筋が存在するとそこから曲げひびわれが進展し、ひびわれの分散性が悪くなる傾向がみられた。リブの大きい通常の異形鉄筋を用いた小型はり供試体（Bシリーズ）ではひびわれ分散性は良好であった

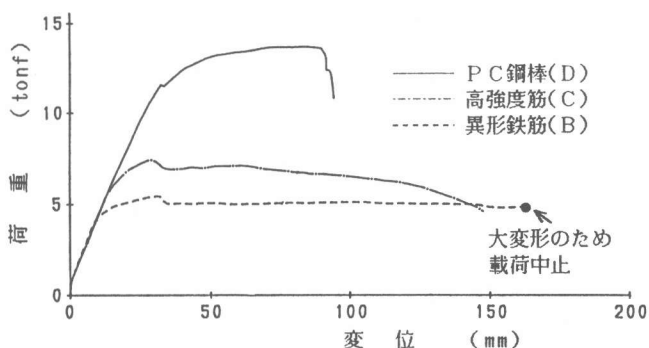


図-3 軸方向筋の種類を変化させた場合

(2) 断面の中空部内径を変化させた場合

図-4に断面の中空部内径を変化させた場合についての荷重-変位曲線を示す。破壊モードは、断面が中空大（内径10.7cm）の小型はり供試体では圧縮側鋼材の座屈、断面が中空小（内径8.1cm）の小型はり供試体と断面が中実の小型はり供試体では引張側鋼材の破断となり差はみられたが、荷重-変位曲線はほぼ同じ形状となった。これは、中空大、中空小、中実断面の小型はり供試体において、大変形時の中立軸位置が中空大断面の中空部の上部にあり中空部のコンクリートによる影響が少ないため荷重-変位曲線の形状はほぼ同一となったと考える。

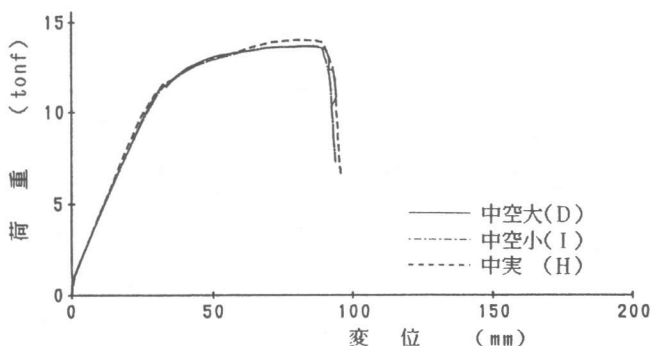


図-4 断面の中空部内径を変化させた場合 (DとIはほとんど一致)

(3) コンクリート種類を変化させた場合

図-5にプレーンコンクリートと鋼繊維補強コンクリートを用いた小型はり供試体の荷重-変位曲線を示す。スパイラル筋を用いなかった場合、プレーンコンクリートを使用した小型はり供試体では最大荷重後コンクリートの圧壊と圧縮側鋼材の座屈がほぼ同時におこり急激に荷重が低下したのに対し、鋼繊維補強コンクリートを使用した小型はり供試体

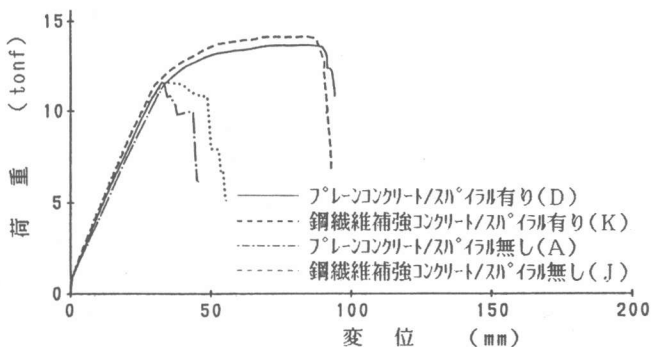
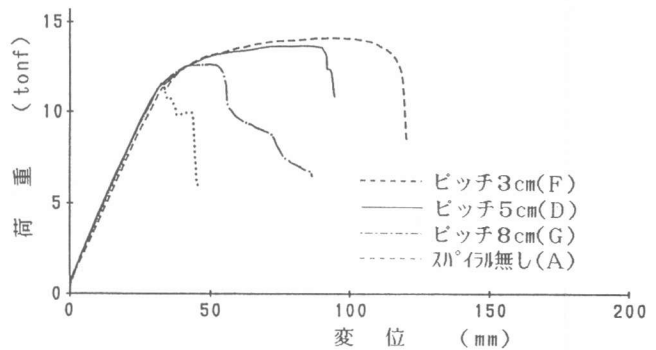


図-5 コンクリート種類を変化させた場合

ではブレンコンクリートを用いた小型はり供試体に比べ荷重の低下の度合はゆるやかとなった。スパイラル筋があるブレンコンクリートを用いたはり（Dシリーズ）では、はり上縁コンクリートの圧壊は、スパイラル筋が無いはり（Aシリーズ）とほぼ同程度のはりの変位（約35mm）で始まるが、その後スパイラル筋の拘束効果により圧縮側鋼材の座屈は遅れ、変位が約90mm程度で座屈が生じる。スパイラル筋を用いた場合にはコンクリートの種別の違いは破壊モードに見られるだけであり、荷重－変位曲線の形状はほぼ同一となった。鋼繊維補強コンクリートとスパイラル筋を用いたはり（Kシリーズ）では、引張側の鋼材の破断が生じたが、これは鋼繊維補強コンクリートでは大きなひびわれが集中し、P C鋼棒の伸び変形がひびわれ部分のP C鋼棒に集中するためと考えられる。

（４）スパイラル筋のピッチを変化させた場合

図－６にスパイラル筋のピッチを3cm,5cm,8cmとした小型はり供試体及びスパイラル筋のない小型はり供試体の荷重－変位曲線を示す。降伏荷重については4シリーズとも違いはみられなかったが、スパイラル筋のピッチが小さいほどスパイラル筋の横拘束効果により最大荷重が高くなった。さらにスパイラル筋のピッチが小さいほど小型はり供試体の変



図－６ スパイラル筋のピッチを変化させた場合

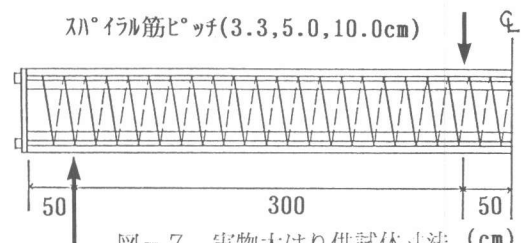
形性能が改善される。終局時における破壊モードはスパイラル筋のない小型はり供試体とピッチが8cm,5cmの小型はり供試体では圧縮側鋼材の座屈となったが、ピッチが3cmの小型はり供試体では引張側鋼材の破断となった。すなわち表－２にも示すように5cmピッチと3cmピッチを境に破壊モードが圧縮側鋼材の座屈から引張側鋼材の破断へと変わっている。実際の設計を行う際には引張側鋼材は十分変形するが破断する前に圧縮側鋼材が座屈し、徐々に荷重の低下が生じるように破壊形式を制御できることが望ましいと考えられる。引張側鋼材（P C鋼棒）の伸び能力を最大限有効に活用する上での有効なスパイラル筋のピッチが存在する。今回行った小型はり供試体の曲げ試験の条件の範囲ではスパイラル筋のピッチは5cm程度である。

3. 実物大はり供試体の曲げ破壊性状

3. 1 実験概要

スパイラル筋のピッチを10cm,5cm,3.3cmと変化した3種類の試験条件を定めそれぞれ1体ずつ実物大はり供試体を遠心力成形法にて作製した。

供試体は図－7,8に示すように全長800cm 外径60cm,内径40cm,軸方向筋配置径を53.0cm



図－7 実物大はり供試体寸法 (cm)

とし、スパイラル筋を軸方向筋の外周に配置した。鋼材には、異形鉄筋（直径11mm, $f_{sy}=55\text{kgf/mm}^2$ ）およびPC鋼棒（直径9.2mm, $f_{sy}=125\text{kgf/mm}^2$ ）を用い、スパイラル筋には小型はり供試体の場合と同じく高強度スパイラル筋（直径7.4mm, $f_{sy}=144\text{kgf/mm}^2$ ）を用いた。異形鉄筋とPC鋼棒は3:1の比率である。なお、PC鋼棒にはプレストレスを6.36ton/本 導入した。コンクリートの目標強度を 850kgf/cm^2 （試験時の圧縮強度 969kgf/cm^2 ）とした。図-7に示すようにモーメントスパン100cm,せん断スパン 300cmとして、荷重は一方方向単調荷重として変位速度がほぼ一定となるように油圧バルブを手動で調整して行い、荷重、中央点変位、上下縁ひずみを計測した。

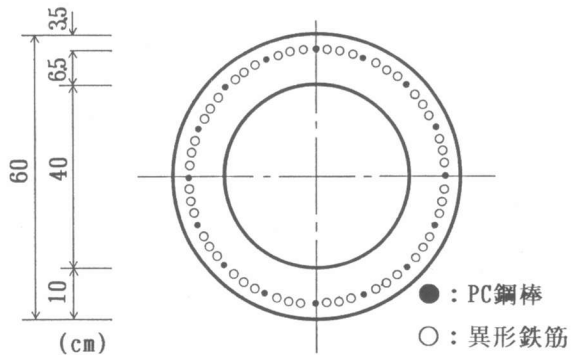


図-8 実物大はり供試体断面寸法
(軸筋の外側にらせん鉄筋を配置)

図-7に示すようにモーメントスパン100cm,せん断スパン 300cmとして、荷重は一方方向単調荷重として変位速度がほぼ一定となるように油圧バルブを手動で調整して行い、荷重、中央点変位、上下縁ひずみを計測した。

3.2 結果と考察

表-3に実験結果を通常のはりの曲げ理論から求めた設計用の計算値とともに示す。3本の実物大

表-3 実物大はり供試体の実験結果

供試体 No.	ひびわれ荷重 (tonf)		最大荷重 (tonf)		終局変位 (mm)	破壊モード
	実験値	計算値	実験値	計算値		
B33	15.5		69.6		223	スパイラル筋の破断
B50	15.6	15.9	68.1	56.7	164	スパイラル筋の破断
B100	15.7		67.4		121	スパイラル筋の破断

はり供試体の荷重-変位曲線を同一グラフにまとめたものを図-9に示す。なおスパイラル筋を用いない実物大はり供試体（無拘束はり供試体）については実験を行っていないが、小型はり供試体の結果を考慮すると図-9中の矢印（↓）のように破壊すると考えられるため以下においてはこのことを考慮して考察する。

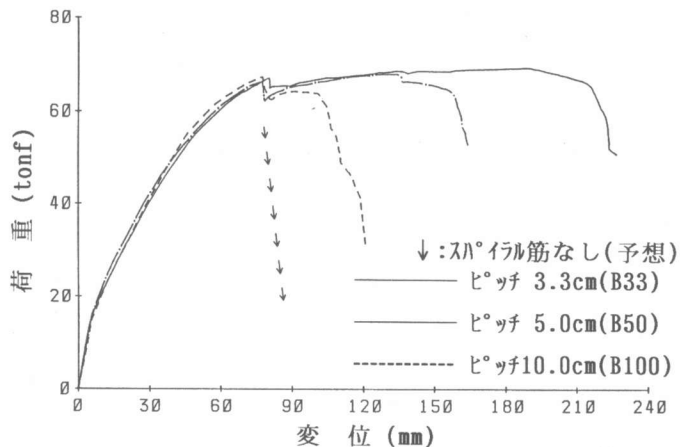


図-9 実物大はり供試体の荷重-変位曲線

表-3より、ひびわれ荷重については、いずれの実物大はり供試体とも違いはみられずほぼ計算値と一致した。小型はり供試体の曲げ試験においてみられたように荷重-変位曲線においてもかぶりコンクリート剥落後に一時的に耐力が低下した。図-9よりスパイラル筋のピッチを10cm,5cm,3.3cmと小さくしていくに従って最大耐力はわずかに増加し、いずれも計算値を上回った。ピッチを小さくするにつれて終局変位は著しく増加しており、無拘束はり供試体の終局変位と比較するとスパイラル筋のピッチ

子が10cmの実物大はり供試体で1.6倍、ピッチが5cmの実物大はり供試体で2.1倍、ピッチが3.3cmの実物大はり供試体で2.9倍となった。破壊モードについては、3本ともスパイラル筋の破断となった。これは断面寸法が小さい小型はり供試体と比べ、断面寸法が大きい実物大はり供試体においてはスパイラル筋にかかる力が大きくなるためである。スパイラル筋の破断による破壊形式は、破壊時に急激に耐力が低下する引張側鋼材の破断と、破壊時に徐々に耐力が低下する圧縮側鋼材の座屈との中間の形式と考えられ、破壊の脆性を考慮すると、より好ましい破壊モードとしては圧縮側鋼材の座屈、スパイラル筋の破断、引張側鋼材の破断の順であると考えられる。

実物大はり供試体において、スパイラル筋のピッチを変化させることによって変形能を改善することが可能であった。実物大はりの曲げ試験の条件の範囲では無拘束はり供試体に比べ変形能が3倍近く高まった。しかしこのように高い変形能が必要となる場合は現状において多くはなく、このためスパイラル筋をより密にし必要以上の変形能を得ることは、必ずしも有効的なスパイラル筋の活用法とは言いがたい。そこでスパイラル筋を用いることによって期待できる効果のひとつとして耐力の向上効果が考えられ、軸方向筋としてさらに高強度な鋼材を用いることにより所要の変形能を減らすことなく部材を高耐力とすることが期待できる。

4. まとめ

硬質紙製型枠を用い実験室で作製した中空円筒断面をもつ小型はり供試体（外径20cm、長さ250cm）と、遠心力成形により工場で作製した実物大はり供試体（外径60cm、長さ800cm）の載荷試験を行い、次の結果を得た。

(1) 小型はり供試体の曲げ試験より、スパイラル筋で横拘束した場合には、ブレンコンクリートを用いた中空断面の場合に比べ、鋼繊維補強コンクリートを用いた場合や中実断面の場合には、荷重-変位曲線の形状には違いはみられなかったが、破壊モードが圧縮側鋼材の座屈から引張側鋼材の破断へと変化した。

(2) 小型はり供試体、実物大はり供試体ともスパイラル筋のピッチが小さいほど最大荷重は大となり、変形能が大きくなった。

(3) スパイラル筋のピッチ等を変化させることにより、軸方向筋として用いる鋼材を有効的に活用するよう破壊モード（圧縮側鋼材の座屈、スパイラル筋の破断、引張側鋼材の破断）を制御した断面設計を行うことが可能である。

〔参考文献〕

[1] 西山峰広, 六車 照, 渡辺史夫: 高一様伸び鋼棒と横拘束作用による高強度P C くの曲げ靱性改善 コンクリート工学年次講演会論文集 9-2 PP.477~482 1987

[2] 池田尚治, 椿 龍哉, 山口隆裕: プレストレストコンクリートくの靱性向上に関する研究 コンクリート工学年次講演会論文集 第4回 PP.365~368 1982

〔謝辞〕高周波熱練（株）より高強度スパイラル筋を提供していただいたことに謝意を表します。