

# 論文 初期貫通ひびわれを有する鉄筋コンクリートはり部材のせん断耐力

山田昌郎\*1・清宮 理\*2

要旨：温度応力などにより既に貫通ひびわれが存在するはり部材の曲げせん断に関する基本的な力学性状を調べた。主筋として異形PC鋼棒を鋼材比1.30%で配置し、せん断補強鋼材比を0~0.476%の範囲で変化させた20体のはり供試体の曲げせん断載荷試験を行った。供試体軸方向に、0~33tfの引張力（コンクリート引張応力0~27.5kgf/cm<sup>2</sup>）を与え貫通ひびわれの存在する供試体と存在しない供試体を製作した。実験結果から、軸方向引張力と初期ひびわれの存在は、終局せん断耐力の低下を生じなかった。しかしはり部材の初期剛性が低下したわみが大きくなるとともにひびわれ幅の増加も大きかった。  
 キーワード：せん断耐力、軸方向引張力、ひびわれ、鉄筋コンクリートはり、載荷試験

## 1. はじめに

温度変化や乾燥収縮により鉄筋コンクリートはりでは部材軸方向に引張応力が生じる。この引張応力がコンクリートの引張強度以上になるとひびわれが生じる。鉄筋コンクリート製の港湾構造物では、施工直後に部材を貫通したひびわれが生じた事例がいくつか報告されている。

鉄筋コンクリートはり部材のせん断耐力は、設計上コンクリートのせん断強度とせん断補強筋の強度を累加して計算される。その際耐荷機構として、コンクリートを圧縮腹材、せん断補強筋を引張腹材とするトラス機構が仮定される。また軸方向引張力がせん断耐力に与える影響は、デコンプレッションモーメント、すなわち引張力による縁応力を打ち消すのに必要なモーメントの値を用いて、コンクリートのせん断強度の低下度として評価される。

軸方向引張力により初期ひびわれを生じたはり部材のせん断耐力は、これまで十分に検討されていない。初期ひびわれが存在するはり部材におけるトラス機構の生成状況およびコンクリートの圧縮力の伝達状況は、初期ひびわれのない場合と異なる可能性がある。そこで載荷試験により、初期貫通ひびわれが存在するはり部材の曲げせん断耐力の検討を行った。

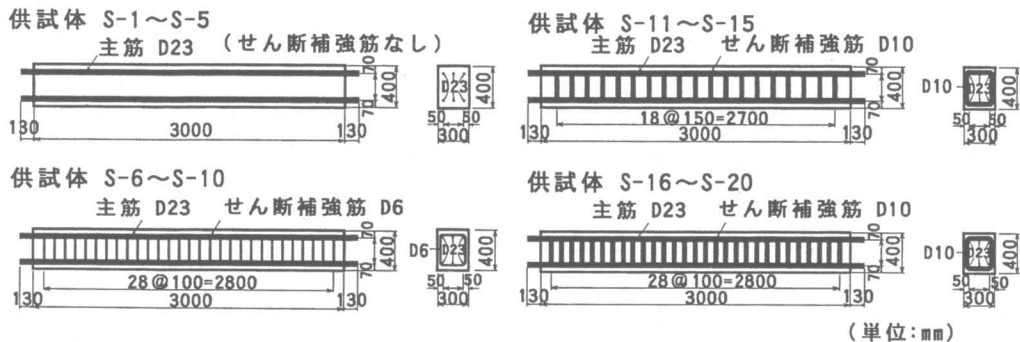


図-1 供試体の構造

\*1 運輸省港湾技術研究所 構造部構造強度研究室、工修（正会員）

\*2 運輸省港湾技術研究所 構造部構造強度研究室長、工博（正会員）

## 2. 実験方法

### 2. 1 供試体の構造

図-1に供試体の構造を示す。基本寸法は、幅300mm、高さ400mmおよび長さ3000mmである。せん断補強筋の配置が異なる4種類のはり供試体を製作した。すなわちせん断補強筋のない供試体、D6のせん断補強筋を10cm間隔に配置した供試体、D10のせん断補強筋を15cm間隔に配置した供試体、およびD10のせん断補強筋を10cm間隔に配置した供試体の4種類である。

各種類で軸方向引張力を変数にするため、それぞれ5体の合計20体の供試体(番号S-1からS-20)を製作した。主筋は異形PC鋼棒で、上下各3本配置した。側面までの純かぶりは50mm、上面あるいは下面までの純かぶりは70mmである。主筋の有効高さは318.5mmである。主筋の鋼材比(引張側主筋断面積/(はりの幅×有効高さ))は1.30%である。主筋ははりの両端から各130mm突出している。これは引張載荷時の治具の定着用である。

### 2. 2 使用材料の性質

鋼材の引張試験結果を表-1に示す。主筋として降伏強度の大きい異形PC鋼棒を使用した理由は、せん断スパン比を3程度にしても曲げ破壊よりもせん断破壊を先行させるためである。

表-1 鋼材の引張試験結果

用途	種類	規格	公称断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/mm <sup>2</sup> )
主筋	異形PC鋼棒 D23	SBPD930/1080	415.5	105	118	$2.18 \times 10^4$
せん断補強筋	異形鉄筋 D6	SD295A	31.67	41	53	$1.85 \times 10^4$
	異形鉄筋 D10	SD295A	71.33	34	48	$1.85 \times 10^4$

注) PC鋼棒の降伏強度は、0.2%耐力

表-2 コンクリートの配合

設計基準強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	粗骨材の最大寸法 (mm)	スラブ <sup>o</sup> (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
240	20	8	55	41.8	153	279	772	1121	0.558

表-2にコンクリートの配合を示す。セメントは、早強ポルトランドセメントである。細骨材は、比重2.59、粗粒率2.47の砂である。粗骨材は、比重2.70、実積率62.2の碎石である。

供試体はコンクリート打設後3日間湿潤養生し、材齢3日で脱型したあと気中養生した。載荷試験は材齢46日から83日の間に行った。供試体と同一条件で養生した直径10cm高さ20cmの円柱管理供試体の強度試験結果を表-3に示す。

### 2. 3 初期ひびわれ導入の方法

軸方向引張力を与えないS-1,S-6,S-11,S-16を除く供試体では、図-2に示すように、反力壁に取り付けたアクチュエータと反力ブロックにそれぞれ治具を取り付け、供試体の両端から突出している主筋をナットで治具に固定した。S-2,S-7,S-12,S-17では11tf、その他の供試体では、ひび

表-3 コンクリート強度試験結果

供試体	圧縮強度*	引張強度*	静弾性係数*	ポアソン比
S-1~S-5	321	28.6	$2.51 \times 10^5$	0.198
S-6~S-20	418	27.0	$2.69 \times 10^5$	0.209

\*) 単位: (kgf/cm<sup>2</sup>)

注) 供試体 S-1~S-5 と S-6~S-20 は同一配合で打設日が異なる。

われが約40cm間隔で均等に生じるまで静的に引張荷したあと、所定の引張力で荷重を保持した。各供試体に与えた軸方向引張力と、与えたひびわれ幅の計測値の平均値を表-4に示す。鉛直荷重開始時の軸方向引張力は0~33tfである。これによるはり断面のコンクリートの平均引張応力は0~27.5kgf/cm<sup>2</sup>である。

### 2. 4 荷重試験の方法

図-2に示すように、荷重フレームに取り付けた油圧ジャッキにより、供試体に鉛直荷重した。ジャッキと供試体の間に、荷重計、荷重治具および荷重板を設置した。荷重板は、回転中心が供試体高さの中心に一致するような球座を有している。荷重板の供試体軸方向の長さは20cmである。支点部分にも同様の荷重板を用いた。せん断スパン長は100cmとした。したがってせん断スパン比は3.14である。鉛直荷重は破壊まで静的単調に行った。この間、アクチュエータを使用して軸方向引張力を一定に保った。鉛直荷重増分0.25tfごとに計測データを取得し、2tfごとにひびわれ状況を観察して記録した。

### 2. 5 計測器の配置

鋼材にはコンクリート打設前にあらかじめひずみゲージを図-3に示すような位置に設置した。 $\pi$ ゲージ(ひびわれ幅計測用)および変位計を、図-4に示す位置に設置した。

## 3. 実験結果とその考察

### 3. 1 ひびわれと破壊の状況

終局時の供試体側面のひびわれ状況の一例を図-5に示す。図中で軸方向引張荷によるひびわれは点線で示してある。

曲げひびわれ発生荷重は、軸方向引張力0の供試体(S-1)で約5tf、引張軸力11tfでひびわれ無しの供試体(S-2)では約2tfであった。軸方向引張力によりひびわれが生じた供試体(S-3, S-4, S-5)では、4~8tfの鉛直荷重により曲げひびわれが生じた。

せん断スパン内に生じた曲げひびわれは、鉛直荷重15tf前後から斜め方向に進展した。このときの鉛直荷重に、軸方向引張力による差はなかった。斜めひびわれは、軸方向引張力によ

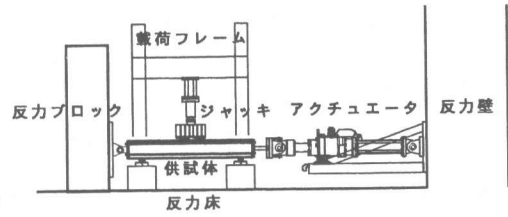


図-2 荷重装置

表-4 各供試体に与えた軸方向引張力とひびわれ幅

供試体	最大引張荷重時		鉛直荷重開始時	
	荷重 (tf)	平均ひびわれ幅 (mm)	荷重 (tf)	平均ひびわれ幅 (mm)
S-1	0	0	0	0
S-2	11	0	11	0
S-3	33	0.106	11	0.058
S-4	33	0.362	22	0.310
S-5	33	0.140	33	0.140
S-6	0	0	0	0
S-7	11	0	11	0
S-8	40	0.091	11	0.048
S-9	40	0.116	22	0.077
S-10	40	0.123	33	0.123
S-11	0	0	0	0
S-12	11	0	11	0
S-13	33	0.155	11	0.089
S-14	33	0.123	22	0.104
S-15	33	0.128	33	0.128
S-16	0	0	0	0
S-17	11	0	11	0
S-18	33	0.141	11	0.089
S-19	33	0.158	22	0.130
S-20	33	0.168	33	0.168

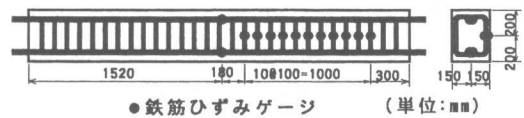


図-3 ひずみゲージ設置位置

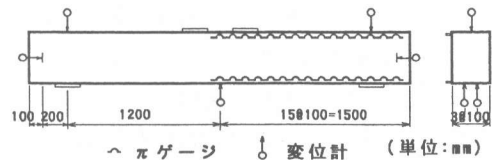


図-4  $\pi$ ゲージ、変位計設置位置

る初期ひびわれを横切って進展した。斜めひびわれの発生状況（角度、位置）に関して軸方向引張力の影響はみられなかった。

斜めひびわれは上方に進展して終局時には上縁に達した。載荷板近傍の上縁コンクリートに圧壊が生じた。供試体S-5では、腹部コンクリートにも、斜めひびわれに沿って圧壊が生じた。図-5では、終局時に幅が顕著に拡大したひびわれを太線で示してある。一部の供試体では支点付近で引張側の主筋位置に割裂ひびわれが生じた。

図-6に、供試体S-20での軸方向引張力によって生じた初期貫通ひびわれの幅の、鉛直載荷による変化の状況を、供試体S-16（軸方向引張力なし）の最大曲げひびわれ幅とあわせて示す。

S-20では載荷点から20cmの位置に生じた幅0.2mm程度の初期ひびわれが、圧縮側では、鉛直載荷14tfの時点で閉じた。すなわち斜めひびわれ発生時には、載荷点に近い初期貫通ひびわれは、上部が閉じて通常の曲げひびわれと同様の状態となっていたことがわかる。

引張側では荷重の増加にほぼ比例してひびわれ幅が増加し終局時に1.6mmに達した。S-20では初期ひびわれの存在により、S-16と比較して同一荷重でのひびわれ幅が、特に荷重の小さい段階でかなり大きかった。

S-20の載荷点から70cmの位置に生じた初期ひびわれは、圧縮側でも終局時まで0.18mmの幅を有していた。このように初期貫通ひびわれが閉じなかった支点付近の断面では、ひびわれ面での骨材のかみあわせと主筋のほぞ作用により、せん断力が伝達されたと考えられる。

### 3. 2 荷重と変形の関係

S-16からS-20までの供試体の荷重たわみ曲線を図-7に示す。初期の曲げ剛性は、貫通ひびわれの存在によって低下した。荷重5tfまでのS-20の曲げ剛性は、S-16の曲げ剛性の約1/5であった。軸方向引張力が大きいほど、初期の曲げ剛性が小さく、たわみが大きかった。ただし、

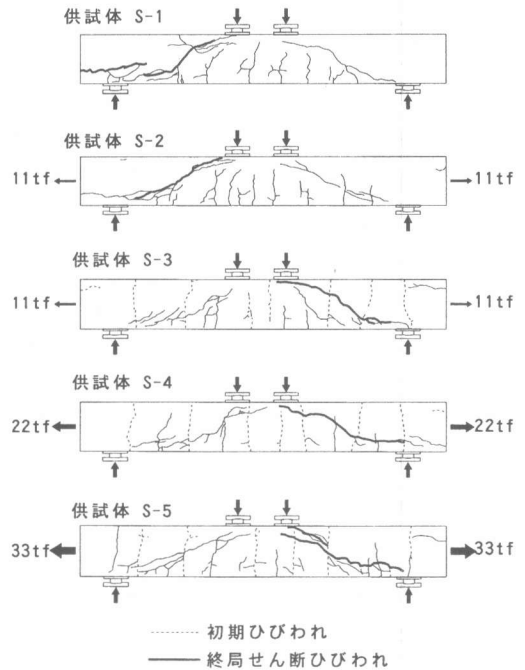


図-5 終局ひびわれ状況

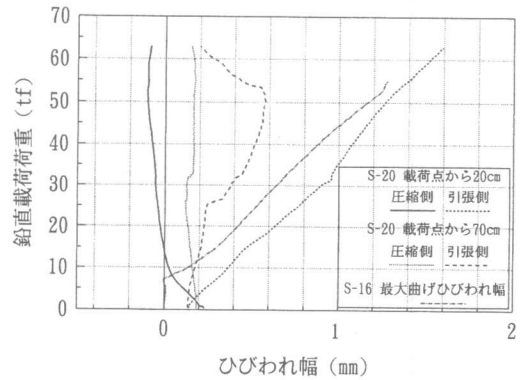


図-6 初期ひびわれ幅の変化

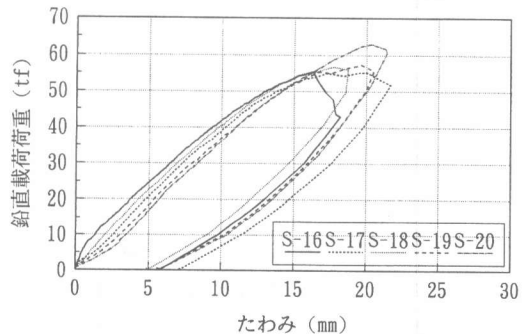


図-7 荷重たわみ曲線

終局に近づくにしたがって、各供試体の曲げ剛性とたわみは、ほぼ一致してきた。

### 3.3 セン断補強筋のひずみ

各供試体について計測されたせん断補強筋のひずみの最大値と荷重の関係の一例を図-8に示す。軸方向引張力によるひびわれが生じた供試体では、鉛直荷重開始前に $100\sim 200 \times 10^{-6}$ のひずみがせん断補強筋に生じた。これらの供試体では、鉛直荷重が斜めひびわれ発生荷重(約15tf)に達するまでは、ひずみの増加は小さかった。鉛直荷重が40tfに達した付近からせん断補強筋が降伏した。軸方向引張力は、斜めひびわれ発生後のせん断補強鋼材のひずみの性状に大きな影響を与えなかった。

### 3.4 耐力

図-9に持続荷重した軸方向引張力と終局鉛直荷重との関係を示す。軸方向引張力11tfの供試体は、各せん断補強筋比について2供試体ある。軸方向引張力0の供試体のデータ点と結んでいるデータ点がひびわれのない供試体、他方がひびわれのある供試体である。せん断補強筋比0.211%と0.317%の供試体では、ひびわれのない供試体の方が耐力が大きかった。軸方向引張力0の供試体より軸方向引張力11tfの供試体の方が耐力が大きくなる傾向がみられた。

コンクリート標準示方書<sup>1)</sup>のせん断耐力算定式と、田村ら<sup>2)</sup>による提案式により、各供試体のせん断耐力を計算した。計算では材料特性値として強度試験結果を用い、安全係数は1.0とした。その結果、表-5に示すように、軸方向引張力によるせん断耐力の低下が予想された。これに対して実験結果では、軸方向引張力の存在により、やや耐力が上昇する傾向がみられた。

軸方向引張力の存在により耐力が上昇する理由として、コンクリートに作用する軸方向圧縮力の軽減が考えられる。実験ではスパン中央断面で上下の主筋のひずみを測定した。この値から主筋の引張力を求めて、軸方向の力の釣合条件からコンクリートに作用した圧縮力を推定した。供試体S-16とS-20における、この圧縮力と鉛直荷重の関係を図-10に示す。軸方向引張力を与えたS-20では、S-16よりも圧縮力が小さい。終局時にはコンクリートの圧壊が生じたことから、圧縮力の軽減により耐力が上昇する可能性がある。今回実験した供試体のように主筋の鋼材比が大きい部材では、軸方向引張力の存在によってせん断耐力が上昇する場合があると考えられる。

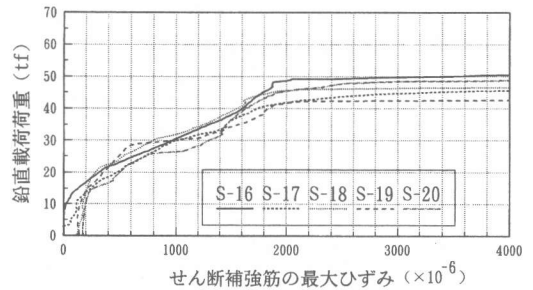


図-8 セン断補強筋のひずみの測定結果

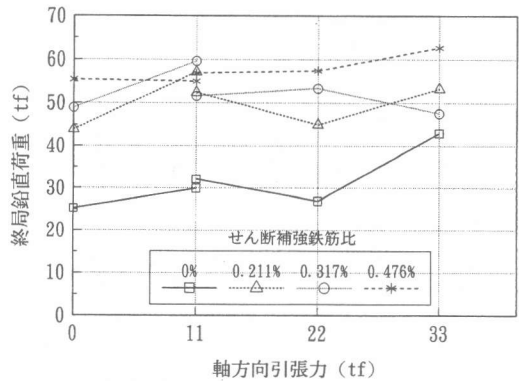


図-9 軸方向引張力と終局鉛直荷重

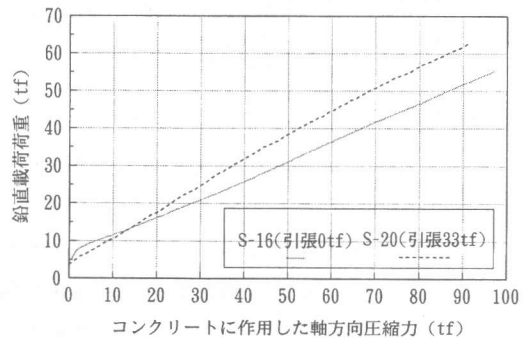


図-10 コンクリートの圧縮力

表-5 各供試体の耐力の計算値と実験値

供試体	せん断補強筋比(%)	軸方向張力(tf)		せん断耐力計算値 (tf)				実験値 (tf)	
		最大	鉛直荷荷時	鉄筋負担分	コンクリート負担分		鉄筋とコンクリートの累加		
					示方書式	田村式	示方書式		田村式
S-1	0	0	0	0	21.39	21.41	21.39	21.41	25.2
S-2	0	11	11	0	20.45	21.17	20.45	21.17	29.9
S-3	0	33	11	0	20.45	21.17	20.45	21.17	32.1
S-4	0	33	22	0	19.50	20.85	19.50	20.85	26.9
S-5	0	33	33	0	18.56	20.42	18.56	20.42	43.0
S-6	0.211	0	0	14.38	23.36	23.38	37.75	37.76	43.9
S-7	0.211	11	11	14.38	22.36	23.13	36.75	37.51	57.1
S-8	0.211	40	11	14.38	22.36	23.13	36.75	37.51	52.4
S-9	0.211	40	22	14.38	21.37	22.80	35.75	37.18	45.0
S-10	0.211	40	33	14.38	20.37	22.35	34.75	36.73	53.3
S-11	0.317	0	0	17.91	23.36	23.38	41.27	41.29	48.9
S-12	0.317	11	11	17.91	22.36	23.13	40.28	41.04	59.6
S-13	0.317	33	11	17.91	22.36	23.13	40.28	41.04	51.6
S-14	0.317	33	22	17.91	21.37	22.80	39.28	40.71	53.4
S-15	0.317	33	33	17.91	20.37	22.35	38.28	40.26	47.6
S-16	0.476	0	0	26.87	23.36	23.38	50.23	50.24	55.4
S-17	0.476	11	11	26.87	22.36	23.13	49.23	49.99	55.0
S-18	0.476	33	11	26.87	22.36	23.13	49.23	49.99	56.8
S-19	0.476	33	22	26.87	21.37	22.80	48.23	49.66	57.4
S-20	0.476	33	33	26.87	20.37	22.35	47.23	49.22	62.7

注)  $\beta_n$  (軸方向引張力の影響を評価する係数) の算定式と算定結果

$M_o$  : デコンプレッションモーメント=0.73tfm(引張力11tf)、1.4tfm(引張力22tf)、2.2tfm(引張力33tf)

$M_d$  : 設計曲げモーメント (計算では $M_d = M_u/2$ とした)

$M_u$  : 終局曲げモーメント=34.3tfm より、

示方書式:  $\beta_n = 1 + 2M_o/M_d = 0.956$ (引張力11tf)、0.912(引張力22tf)、0.868(引張力33tf)

田村式:  $\beta_n = \frac{0.0143}{(M_o/M_u - 0.18)} + 1.08 = 0.989$ (引張力11tf)、0.975(引張力22tf)、0.954(引張力33tf)

#### 4. まとめ

- (1) 今回の供試体ではいずれもせん断ひびわれの進展に伴うコンクリートの圧壊で終局を迎えた。初期貫通ひびわれと軸方向引張力が存在するはり部材の終局せん断耐力は、既往の設計式で予想される低下を示さず、やや上昇する傾向を示した。これはコンクリートの圧壊で終局を迎える場合、従来言われてきた軸方向引張力によるコンクリートのせん断強度の低下の影響よりも、軸方向引張力が圧縮力を軽減させる影響の方が大きかったためと考えられる。
- (2) 曲げモーメントが大きい荷点付近での初期ひびわれは、鉛直荷重の増大とともに圧縮側でひびわれが閉じ、コンクリートの圧縮力とせん断力の伝達がなされた。一方引張側では、鉛直荷重の増加にほぼ比例してひびわれ幅が増大した。支点付近の初期ひびわれは閉じることなく、鋼材とひびわれ界面を介して圧縮力とせん断力が伝達された。
- (3) 今回の供試体では、初期貫通ひびわれの存在により、荷重が小さい段階におけるはりの曲げ剛性は1/5程度に低下し、たわみが大きくなった。ただし終局付近での曲げ剛性とたわみは、初期貫通ひびわれの有無にかかわらず、ほぼ同一の値となった。

#### 参考文献

- 1) 土木学会:平成3年版コンクリート標準示方書 [設計編]、pp.58-61、1991.9
- 2) 田村隆弘、重松恒美、原隆、中野修治:軸方向引張り力を受けるRC梁のせん断耐力に関する実験的研究、コンクリート工学論文集、第2巻第2号、pp.153-160、1991.6