

正負繰返し荷重を受ける軽量鉄筋コンクリートばりの曲げ・せん断試験

[せん断ひびわれ幅におよぼす供試体寸法の影響について]

小 池 狭 千 朗*

The Effect of the Dimensions of test Specimens on the shear crack width of Lightweight Reinforced Concrete Beams under Cyclic Loading

Sachio KOIKE

軽量鉄筋コンクリートばりのせん断ひびわれ幅におよぼすせん断スパン比, 主筋比, あばら筋比, コンクリート強度並びに供試体寸法などの影響については不明な点が多い。本研究は静載荷並びに塑性域の正負繰返し荷重を受け, 供試体寸法を4種類にかえた合計20体の軽量 RC について曲げ, せん断試験を実施し, 供試体寸法の相違があばら筋の補強効果にどのような影響を与えるかを調べてきたが, このうちせん断ひびわれ幅におよぼすあばら筋比の影響が供試体寸法の相違によってどのような影響を受けるかを調べたものである。

1. まえがき

鉄筋コンクリート部材の曲げひびわれについては, 実験的にも, 理論的にもある程度解明され, 曲げひびわれ幅の制御が実施設計において, 何らかの形で取入れられている。しかしながら, せん断ひびわれ幅については, ソビエトの設計規準を除いて, Leonhardt, Walther⁽¹⁾による実験結果と Placas, Reagan⁽²⁾の実験式等においての資料が見られるのみである。ソビエトの設計規準によるせん断ひびわれ幅の推定値も満足できる結果は与えないとも言われており, 実用設計にせん断ひびわれ幅の制御を取り入れることは, いまだ達成されていない。これは前述のようにせん断ひびわれ幅についての資料が少なく, せん断ひびわれ幅を推定する推定式として, 信頼できるものが見あたらなためとも考えられる。

著者は静載荷並びに塑性域の正負繰返し荷重を受ける15×30cm断面の軽量鉄筋コンクリートばりのせん断耐力と変形性能におよぼすあばら筋の補強効果について調べてきた。今回, 供試体の相違があばら筋の補強効果にどのような影響をおよぼすかは不明な点が多いため, スケール比を4種, あばら筋比を5種, 合計20体の軽量 RC ばかりについて静載荷並び

に正負繰返し曲げ・せん断試験を実施し, 供試体寸法の相違がはりのせん断耐力と変形性能にどのような影響を与えるかを調べた。本研究はこれらのうち, せん断ひびわれ幅におよぼすあばら筋の補強効果が供試体寸法の相違によって, どのような影響を受けるかを調べたもので, 小試験体で得られたひびわれ幅の値を大きな試験体のひびわれ幅の推定に役立てるための基礎資料とするのが目的である。

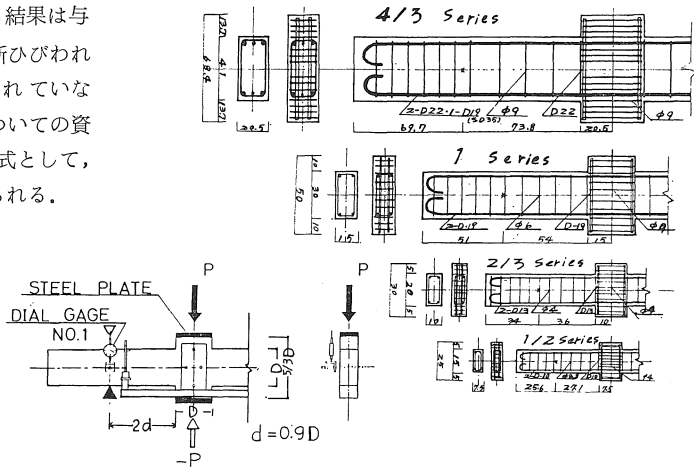


図-1 供試体の概要

* 建築学科

表1 供試体の詳細

供試体記号	断面寸法 b × D (cm)	主筋	引張鉄筋比 ρ (%)	あばら筋	あばら筋比 P_w (%)	あばら筋間 隔 (cm)	せん断 スパン比 a/d
⅓ B I ₁ -S	20.5 × 41	2-D, 22	1.40	φ9	0	—	2.0
⅓ B II ₁ -C	20.5 × 41	2-D, 22	1.40	φ9	0.35	17.70	2.0
⅓ B III ₁ -C	20.5 × 41	2-D, 22	1.40	φ9	0.65	9.53	2.0
⅓ B IV ₁ -C	20.5 × 41	2-D, 22	1.40	φ9	0.95	6.53	2.0
⅓ B V ₁ -S	20.5 × 41	2-D, 22	1.40	φ9	1.25	4.96	2.0
B I ₂ -S	15 × 30	2-D, 19	1.40	φ6	0	1 —	2.0
B II ₂ -C	15 × 30	2-D, 19	1.40	φ6	0.35	10.67	2.0
B III ₂ -C	15 × 30	2-D, 19	1.40	φ6	0.65	5.74	2.0
B IV ₂ -C	15 × 30	2-D, 19	1.40	φ6	0.95	3.93	2.0
B V ₂ -S	15 × 30	2-D, 19	1.40	φ6	1.25	2.99	2.0
⅓ B I ₂ -S	10 × 20	2-D, 13	1.40	φ4	0	—	2.0
⅓ B II ₂ -C	10 × 20	2-D, 13	1.40	φ4	0.35	7.14	2.0
⅓ B III ₂ -C	10 × 20	2-D, 13	1.40	φ4	0.65	3.85	2.0
⅓ B IV ₂ -C	10 × 20	2-D, 13	1.40	φ4	0.95	2.63	2.0
⅓ B V ₂ -S	10 × 20	2-D, 13	1.40	φ4	1.25	2.00	2.0
⅓ B I ₂ -S	7.53 × 15.06	2-D, 10	1.40	φ3.2	0	—	2.0
⅓ B II ₂ -C	7.53 × 15.06	2-D, 10	1.40	φ3.2	0.35	6.45	2.0
⅓ B III ₂ -C	7.53 × 15.06	2-D, 10	1.40	φ3.2	0.65	3.47	2.0
⅓ B IV ₂ -C	7.53 × 15.06	2-D, 10	1.40	φ3.2	0.95	2.38	2.0
⅓ B V ₂ -S	7.53 × 15.06	2-D, 10	1.40	φ3.2	1.25	1.81	2.0

表2 軽量骨材の物理的性質

	最大寸法	粗粒率	比重	
			表乾	絶乾
細骨材	2.5mm	2.66	1.90	1.76
粗骨材	15 mm	6.50	1.36	1.30

表3 コンクリートの調査表と物理的性質

調合	セメント	水	細骨材	粗骨材	配合割合	水セメント比	設計強度	細骨材率	自然空気量
400	1.78	606	471	0.160	44.5	12	320	48.0	4
kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	(% - 水)	cm	°/Wt	°/Wt	°/vl
コンクリート	引張強度 (F _c)	引張弾性率 (F _{sp})	ヤング率	スランピング	空気量				
1/2 B	280 kg/cm ²	20.0 kg/cm ²	1.35 × 10 ⁴ kg/cm ²						
1 B	320 kg/cm ²	31.0 kg/cm ²	1.48 × 10 ⁴ kg/cm ²	10.1 cm	3.3% vl				
4/3 B	345 kg/cm ²	32.2 kg/cm ²	1.50 × 10 ⁴ kg/cm ²						
2/3 B	340 kg/cm ²	31.4 kg/cm ²	1.66 × 10 ⁴ kg/cm ²	10.5 cm	1.4% vl				

2. 試験方法

(1) 供試体および実験計画

図-1 および表-1 に各供試体の概要と詳細を示す。供試体寸法は 15×30cm 断面のほりを prototype のほりとし、寸法比で ⅓, 1/2, ⅔ および 1/2 の 4 種類のほり断面 (⅓ シリーズ: 断面 20.5×41cm, 長さ 328cm, せん断スパン 73.8cm, 1 シリーズ: 断面 15×30cm, 長さ 240cm, せん断スパン 54cm, ⅔ シリーズ: 断面 10×20cm, 長さ 160cm, せん断スパン 36cm, 1/2 シリーズ: 断面 7.5×15cm, 長さ 120.4cm, せん断スパン 27.1cm) とした。表中, 記号 “S” は静載荷, “C” は繰返し載荷を示す。せん断スパン比はすべて 2.0 とした。あばら筋比は 0 から 1.25% まで 5 種類 (記号 I : あばら筋比 P_w=0%, V : P_w=1.25%, II : P_w=0.35%, III : P_w=0.65%, IV : P_w=0.95%) である。あばら筋の直径は ⅓ シリーズでは 9mm, 1 シリーズでは 6mm, ⅔ シリーズでは 4mm, 1/2 シリーズでは 3.2mm であるため, 供試体寸法の異なるほりのあばら筋比を同一にするため, あばら筋の間隔を操作してあばら筋比

表4 鉄筋の物理的性質

	断面積	降伏強さ	引張強さ	伸び率
D 22	3.81cm ²	3849kg/cm ²	5916kg/cm ²	25.8%
D 19	2.87	3770	5620	27.0
D 13	1.27	3828	5710	28.4
D 10	0.71	3918	5874	27.9
φ 9	0.64	4589	4802	10.3
φ 6	0.28	5172	5485	6.6
φ 4	0.13	4756	5156	6.5
φ 3.2	0.08	6104	6625	5.8

表5 載荷方法

試験体記号	試験体 個数	載荷方法	荷重段階	
			荷重振幅 (ton)	繰返し回数
⅓ B I ₂ -S	1	単調漸増	破壊まで漸増正載荷	
⅓ B II ₂ -C	1	漸増正負 繰返し	3.56ton/cycle の荷重増加	ピッチ 2.22mm の変形制御
⅓ B III ₂ -C	1			
⅓ B IV ₂ -C	1			
⅓ B V ₂ -S	1	単調漸増	破壊まで漸増正載荷	
B I ₂ -S	1	単調漸増	破壊まで漸増正載荷	
B II ₂ -C	1	漸増正負 繰返し	2.0ton/cycle の荷重増加	ピッチ 1.67mm の変形制御
B III ₂ -C	1			
B IV ₂ -C	1			
B V ₂ -S	1	単調漸増	破壊まで漸増正載荷	
⅓ B I ₂ -S	1	単調漸増	破壊まで漸増正載荷	
⅓ B II ₂ -C	1	漸増正負 繰返し	0.89ton/cycle の荷重増加	ピッチ 1.113mm の変形制御
⅓ B III ₂ -C	1			
⅓ B IV ₂ -C	1			
⅓ B V ₂ -S	1	単調漸増	破壊まで漸増正載荷	
1/2 B I ₂ -S	1	単調漸増	破壊まで漸増正載荷	
1/2 B II ₂ -C	1	漸増正負 繰返し	0.5ton/cycle の荷重増加	ピッチ 0.833mm の変形制御
1/2 B III ₂ -C	1			
1/2 B IV ₂ -C	1			
1/2 B V ₂ -S	1	単調漸増	破壊まで漸増正載荷	

を合わせた。したがって, あばら筋比は各はりごとに同一にすることができたが, あばら筋間隔は正確にはスケール比どおりとはなっていない。I および V シリーズは静載荷で 8 体, II, III および VI シリーズは正負繰返し載荷で 12 体, 合計 20 体の柱型付き中央集中載荷単純はりによる曲げ・せん断試験を実施した。

主筋には表-1 に示すように, D10 から D22 までの SD35 異形鉄筋を複筋はり (P_t=P_c=1.40%) として使用した。はりの下端から主筋の中心までの距離はすべてはりせいの 0.1 倍とした。あばら筋は φ9 から φ3.2 までの 4 種類の鉄線素材を図-1 に示すように閉鎖型にし, 端部を 135° に曲げて配筋した。柱型部分には主筋と同じ径の軸筋を各コーナーに一本, 計 4 本配し, ⅓ と 1 シリーズでは φ9 鉄線を, ⅔ と 1/2 シリーズでは φ6 鉄線を閉鎖型の帯筋として, 非常に密に配筋し, 柱型部分に曲げひびわれが発生し, 剛性が低下しないようにした。これらの帯筋は非常に有効にきき, 柱型内部には曲げひびわれは全く発生しなかった。たわみの測定のために, 柱型の中央部にボルトを 4 本 (⅓ と 1 シリーズは φ16mm, ⅔ と 1/2 シリーズは φ13mm) 埋め込んだ。さらに支点位置のほりの中央部にねじを切ったボルト (⅓ と 1 シリーズは φ16, ⅔

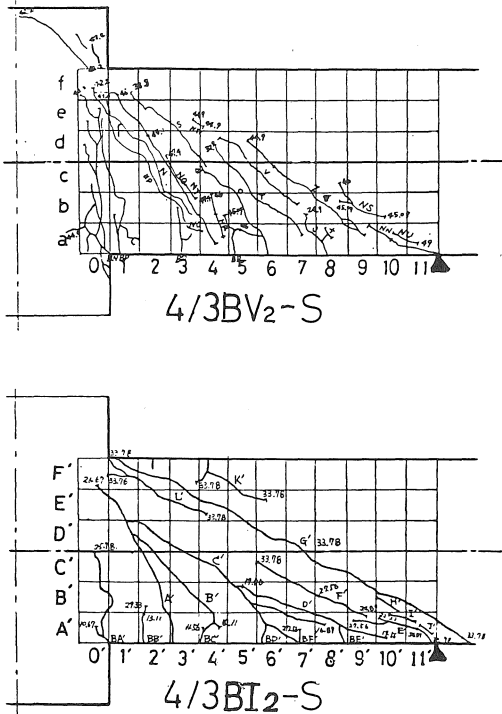


図-2 4/3BI₂-S と 4/3BV₂-S ばりのひびわれ伸展状況

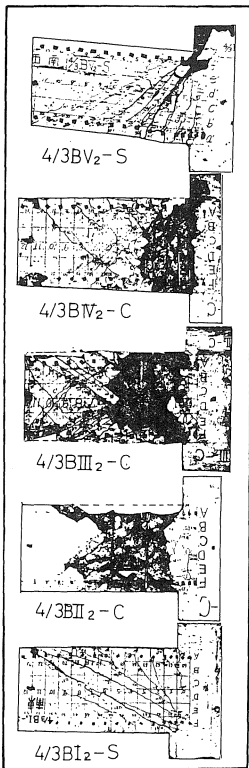


図-3 4/3Bシリーズの破壊状況

と1/2シリーズはφ13)を詰め込み、たわみの計測に利用した。繰返し荷重は試験体を上下に回転させて行うため、各試験体の両端部の端面の中央部にφ22mmの鉄筋を埋め込んだ。

(2) 使用材料

使用した軽量骨材の物理的性質を表-2に示す。骨材は細、粗量材とも非造粒形の人工軽骨材を使用した。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。コンクリートの調合表を表-3に示す。コンクリートの平均圧縮強度は1/2および1/3シリーズでは、材令40~70日で280Kg/cm²、1シリーズでは材令260日で320Kg/cm²、4/3シリーズでは材令730日で345Kg/cm²であった。4/3BI₂-C ばりはテスト時の失敗のため、同一調合

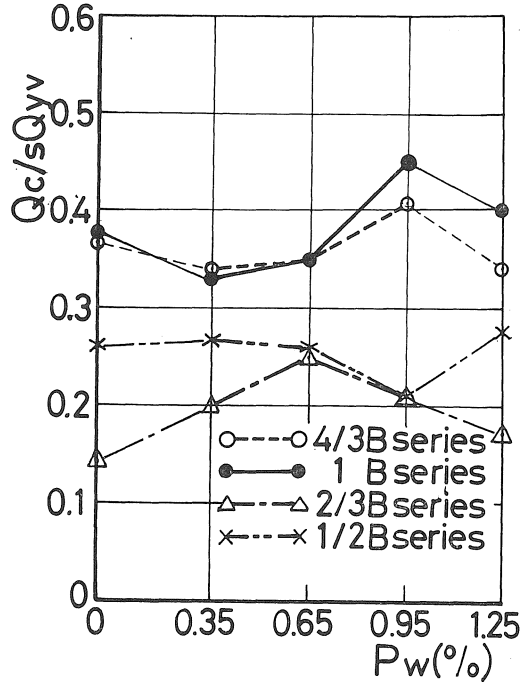


図-4 せん断初ひびわれ耐力とあばら筋比の関係

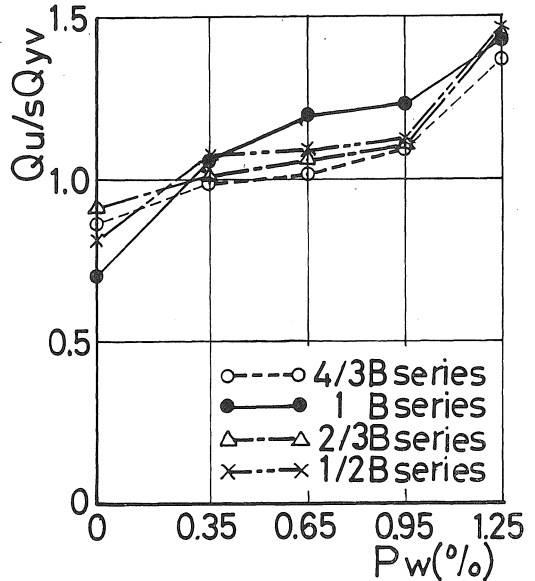


図-5 最大耐力とあばら筋比の関係

で試験体を再作製し、材令300日でテストした。このときの圧縮強度は340Kg/cm²であった。表-4に使用した鉄筋の物理的性質を示す。SD35異形鉄筋D10~D22は主筋に使用し、鉄線素材φ9~φ3.2はあばら筋、フープ筋として使用した。

(3) 荷重および測定方法

荷重には100トン静荷重万能試験機を使用した。本機

は疲労試験を主たる目的としているため、柱間隔が狭く、そのために繰返し载荷では、試験機の上部、固定耐圧盤の近くにレールをつくり、これに台車をぶら上げ、この台車からのフックを利用して、供試体の両端に埋め込んだ丸鋼 ($\phi 22\text{mm}$) にこのフックをかけ、各繰返しサイクルの荷重が正負に逆転することに、供試体を試験機の外に滑り出させ、回転させて試験機の中に入れ載荷させるという方法で、正負の繰返し曲げ・せん断試験を実施した。試験には、はりの最大耐力に応じて、最大荷重 ± 100 トン ($\frac{1}{3}$ シリーズ), ± 50 トン (1 シリーズ), ± 20 トン ($\frac{2}{3}$ シリーズ), ± 10 トン ($\frac{1}{2}$ シリーズ) で試験機を使用した。载荷は単純ばりの中央の柱型部分に薄いゴムを敷き、その上に 3.5cm の厚さの鉄板をのせ、鉄板の全面に荷重をかけた。

載荷方法を表-5 に示す。静载荷“S”と漸増正負繰返し载荷“C”の2種類とした。繰返し载荷のはりでは各サイクル毎に降伏荷重の $\frac{1}{6}$ ($\frac{1}{3}$ シリーズでは 3.56 トン, Prototype の1シリーズでは 2 トン, $\frac{2}{3}$ シリーズでは 0.89 トン, $\frac{1}{2}$ シリーズでは 0.5 トン) づつ荷重を上げて試験を行い、はりの降伏以後は破壊までピッチ $R=3.09 \times 10^{-3}\text{rad}$ のたわみ角 (Prototype の1シリーズで 1.67mm) のたわみ角で変形制御により試験した。個々の供試体の載荷履歴は表-6 の右端の覽に示す。

たわみの計測は図-1 に示すように、柱型部分に埋め込んだ4本のボルトで固定した $\phi 38\text{mm}$ のたわみ計測用のバーを介して、柱型端部と支点との相対たわみを、精度 $\frac{1}{100}\text{mm}$ 、ストローク 30mm と 50mm のダイヤルゲージを用いて、左右のスパン別々に測定した。

せん断ひびわれ幅と曲げひびわれ幅の測定は、静载荷のはりでは各荷重段毎に、正負繰返し载荷のはりでは降伏荷重までは処女載荷々重段毎に、降伏以後は各サイクルの正負の最大荷重時に、100倍、60倍および20倍のクラック幅測微鏡を用いて、全てのひびわれに記号をつけて、ひびわれ幅を計測した。せん断ひびわれ幅の計測位置は、目測でひびわれ幅が最大と思われる位置に印しをつけて、常に同一位置で測定した。

3. 実験結果とその考察

試験結果のうち、せん断初ひびわれ耐力、降伏耐力および最大耐力とその変位を表-6 に示す。Q はせん断力、 τ はせん断応力度で $\tau = Q/bjd$ ($j=7/8$) で求めたもの、R はたわみ角で $R = \delta/a$ rad (δ はたわみ、a はせん断スパン長さ) で求めたもの、N はその荷重に達するまでの繰返しサイクルの回数を示す。添字 c はせん断ひびわれ発生時を添字 y ははりの曲げ降伏時を、添字 u は最大荷重時を示す。破壊の項の記号“B”は曲げ破壊を、“S”はせん断破壊または正負の繰返しにより脆性的にせん断破壊した部材の破壊を示す。降伏荷重の示して

ないはりは、最大耐力が降伏荷重に達せずせん断破壊したことを示している。 $\frac{1}{3}$ BIII₂-C はりはあやまって最初に降伏荷重にまで載荷させてしまったため、再度試験体を同一調合で作製し、テストした値を示す。

(1) ひびわれ伸展状況と破壊状況

柱型端部よりやや離れた位置に発生した曲げひびわれが荷重点の方向に曲がりはじめたときの荷重を傾めせん断ひびわれ発生荷重とみなした。また、この傾めひびわれとは別にはりのウエブの中に曲げひびわれとは関係なく、単独にウエブにはほぼ 45° に発生するひびわれがあり、これを斜めせん断ひびわれと名付け、このひびわれの発生するときの荷重を斜めせん断ひびわれ発生荷重とみなした。表-6 の添字 c のせん断ひびわれ荷重の値はこれらの内、早く発生した荷重を記したものである。

図-2 は $\frac{1}{3}$ BI₂-S ばかりと $\frac{1}{3}$ BV₂-S ばかりのひびわれ伸展状況を示したものである。 $\frac{1}{3}$ BI₂-S ばかりでは $P=33.78$ トンのとき G' のせん断ひびわれ (斜めせん断ひびわれ) が発生し、はりは破壊したが、 $\frac{1}{3}$ BV₂-S ばかりでは、 $P=53.4$ トンで柱型の上部のコンクリートが圧潰して破壊している。

図-3 に $\frac{1}{3}$ B シリーズの供試体の破壊状況を示す。あばら筋の配筋してない I₂-S ばかりでは、すべて曲げ降伏荷重より低い荷重でせん断破壊した。これらのはりでは最大耐力時に柱型端部と支点とを結ぶ斜めせん断ひびわれが発生し、はり作用を失ったために耐力が急げさに低下し、非常にねばりの乏しい性状を示した。あばら筋比 1.25% の V₂-S ばかりではすべてのはりが大変形になるまで耐え、かつ非常に大きな靱性を示したが、大きな供試体の方が耐力、変形性能ともにやや劣る性状を示した。正負繰返し载荷のはりでは、いずれのはりも降伏荷重に達する前に、正負の繰返し荷重により、はりのウエブに X 型にせん断ひびわれが多数発生した。これらの X 型のせん断ひびわれの幅は、はりが降伏するまではあまり大きく開口しないが、塑性域の正負繰返しの領域に入ると、変形が大きくなり、これらの X 型のせん断ひびわれの幅も徐々に大きくなり、さらに大変形時には荷重の正負の逆転時にせん断ひびわれの両側のコンクリート部分が閉じるときにコンクリート相互がきしみ合い、ついにはウエブ部分のコンクリートが徐々に剝落しはじめる。さらに载荷が進むと、この部分のコンクリートが剝落して、はり作用を失ない脆性的にせん断破壊した。あばら筋比の高いはりほど、あばら筋がウエブの X 型のせん断ひびわれの幅が広がるのを防止するためと、大変形時にはあばら筋の間隔が狭いほど X 型ひびわれに囲まれた菱形のコンクリート塊が剝落するのを防ぐため、あばら筋比の低いはりも大変形にいたるまで比較的大きな耐力を保持した。

a d	Pw %	はり 記号	載荷 方法	せん断初ひびわれ発生時				降伏荷重時				最大荷重時				積荷方法	破壊	
				Qc	Tc	Rc	N	Qy	Ty	Ry	N	Qu	Tu	Ru	N			
				t	Kg/cm	×10 ⁻³	回	t	Kg/cm	×10 ⁻³	回	t	Kg/cm	×10 ⁻³	回			
2.0	0	⅓BI ₂ -S	静	E W	7.11	10.74	1.15 1.03		—	—	—		16.90	25.53	8.52 5.53	静載荷	B	
	0.35	⅓BII ₂ -C	+	E W E W	7.11 6.22	10.74 9.40	1.22 0.98 1.25 0.85	4 4	19.35 18.67	29.23 28.21	6.07 7.68 6.75 5.66	11 11	19.45 19.04	29.39 28.77	7.38 9.04 7.99 6.54	11 11	漸増荷重繰返し載荷 P=±3.6t, ±7.1t, ±10.7t, ±14.2t, ±17.8t, ±21.3t, ±24.9t, ±28.4t, ±32.0t, ±35.6t, 以後9回ピッチ2.22MM変形制御	S
	0.65	⅓BIII ₂ -C	+	E W E W	6.22 8.00	9.40 12.09	0.88 1.04 0.83 0.60	4 4	18.60 18.00	28.10 27.19	5.42 5.75 7.66 4.66	11 11	20.30 19.48	30.67 29.43	16.57 18.06 18.06 11.02	14 15	漸増荷重繰返し載荷 P=±3.6t, ±7.1t, ±10.7t, ±14.2t, ±17.8t, ±21.3t, ±24.9t, ±28.4t, ±32.0t, ±35.6t, 以後11回ピッチ2.22MM変形制御	S
	0.95	⅓BIV ₂ -C	+	E W E W	8.00 8.00	12.09 12.09	1.14 1.27 1.27 1.23	5 5	17.78 17.78	26.87 26.87	4.21 4.57 3.77 4.15	11 11	21.15 21.60	31.95 32.63	23.89 24.09 15.70 18.06	16 14	漸増荷重繰返し載荷 P=±3.6t, ±7.1t, ±10.7t, ±14.2t, ±17.8t, ±21.3t, ±24.9t, ±28.4t, ±32.0t, ±35.6t, 以後12回ピッチ2.22MM変形制御	S
	1.25	⅓BV ₂ -S	静	E W	6.67	10.08	0.89 1.12		19.80 19.20	29.91 29.01	5.03 7.43		26.70	40.34	52.13 64.36	静載荷	B	
	0	BI ₂ -S	静	E W	3.75	10.58	1.13 1.26		—	—	—		7.00	19.75	3.21 11.63	静載荷	S	
	0.35	BII ₂ -C	+	E W E W	3.50 3.00	9.88 8.47	1.00 1.15 0.87 0.80	4 3	10.3 10.8	29.07 30.48	7.16 9.26 7.19 5.81	12 12	10.70 10.56	30.19 29.80	9.31 12.35 8.94 12.35	13 13	漸増荷重繰返し載荷 P=±2t, ±4t, ±6t, ±8t, ±10t, ±12t, ±14t, ±16t, ±18t, ±19t, ±20t, ±21t, 以後10回ピッチ1.67MM変形制御	S
	0.65	BIII ₂ -C	+	E W E W	4.00 3.00	11.29 8.47	1.04 1.46 0.91 0.94	4 3	10.5 10.0	29.63 28.22	6.18 6.43 5.28 5.76	12 12	12.15 11.87	34.30 33.50	20.98 21.60 17.19 18.52	16 15	漸増荷重繰返し載荷 P=±2t, ±4t, ±6t, ±8t, ±10t, ±12t, ±14t, ±16t, ±18t, ±19t, ±20t, ±21.68t, 以後12回ピッチ1.67MM変形制御	S
	0.95	BIV ₂ -C	+	E W E W	4.00 5.00	11.29 14.11	1.11 1.15 1.84 1.73	4 5	10.5 10.0	29.63 28.22	3.89 5.58 8.45 4.29	12 12	12.59 12.38	35.53 34.93	22.50 24.69 15.90 21.61	17 16	漸増荷重繰返し載荷 P=±2t, ±4t, ±6t, ±8t, ±10t, ±12t, ±14t, ±16t, ±18t, ±19t, ±20t, ±21.10t, 以後11回ピッチ1.67MM変形制御	S
	1.25	BV ₂ -S	静	E W	4.00	11.29	1.28 1.37		10.0	28.22	4.81 6.76		14.36	40.52	62.13 72.22	静載荷	B	
	0	⅓BI ₂ -S	静	E W	0.667	4.24	0.24 0.44		—	—	—		4.222	26.81	8.06 9.00	静載荷	S	
	0.35	⅓BII ₂ -C	+	E W E W	0.667 1.200	4.24 7.62	0.18 0.78 1.08 0.39	2 3	4.560 4.650	28.96 29.53	5.97 12.35 5.58 7.12	11 11	4.650 4.810	29.52 30.54	6.81 13.57 13.20 15.43	11 12	漸増荷重繰返し載荷 P=±0.89t, ±1.78t, ±2.67t, ±3.56t, ±4.40t, ±5.33t, ±6.22t, ±7.11t, ±8.00t, ±8.89t, 以後9回ピッチ1.113MM変形制御	S
0.65	⅓BIII ₂ -C	+	E W E W	1.56 0.80	9.91 5.08	0.65 1.15 0.34 0.62	4 4 2 4	4.50 4.25	28.57 26.98	3.89 5.31 4.35 3.31	11 11	5.01 4.85	31.81 30.79	13.55 13.17 15.05 11.98	16 17	漸増荷重繰返し載荷 P=±0.89t, ±1.78t, ±2.67t, ±3.56t, ±4.40t, ±5.33t, ±6.22t, ±7.11t, ±8.00t, ±8.89t, 以後13回ピッチ1.113MM変形制御	S	
0.95	⅓BIV ₂ -C	+	E W E W	1.000 1.000	6.35 6.35	0.72 0.11 0.28 1.03	3 3	4.600 4.445	29.21 28.23	5.59 5.98 4.14 10.14	11 11	5.320 5.180	33.78 32.89	23.23 27.78 20.89 27.42	16 15	漸増荷重繰返し載荷 P=±0.89t, ±1.78t, ±2.67t, ±3.56t, ±4.40t, ±5.33t, ±6.22t, ±7.11t, ±8.00t, ±8.89t, 以後11回ピッチ1.113MM変形制御	S	
1.25	⅓BV ₂ -S	静	E W	0.800	5.08	0.75 0.31		4.667	29.64	7.89 4.73		6.730	42.73	52.78 49.87	静載荷	B		
0	½BI ₂ -S	静	E W	0.675	7.82	0.48 1.19		—	—	—		2.125	24.62	4.88 10.96	静載荷	S		
0.35	½BII ₂ -C	+	E W E W	0.725 0.725	8.40 8.40	1.50 0.49 0.62 0.96	3 3	2.625 2.750	30.41 31.86	10.23 5.31 7.33 8.29	11 11	2.840 2.885	32.90 33.43	15.38 7.94 9.63 12.30	12 11	漸増荷重繰返し載荷 P=±0.5t, ±1.0t, ±1.5t, ±2.0t, ±2.5t, ±3.0t, ±3.5t, ±4.0t, ±4.5t, ±5.0t, 以後11回ピッチ0.835MM変形制御	S	
0.65	½BIII ₂ -C	+	E W E W	0.725 0.720	8.40 8.34	1.77 0.52 0.55 1.64	3 3	2.750 2.700	31.86 31.28	11.78 7.55 8.86 11.50	11 11	2.850 2.880	33.02 33.37	24.60 20.37 20.44 21.52	14 13	漸増荷重繰返し載荷 P=±0.5t, ±1.0t, ±1.5t, ±2.0t, ±2.5t, ±3.0t, ±3.5t, ±4.0t, ±4.5t, ±5.0t, 以後14回ピッチ0.835MM変形制御	S	
0.95	½BIV ₂ -C	+	E W E W	0.625 0.500	7.24 5.79	0.46 1.44 0.96 0.57	3 3	2.625 2.700	30.41 31.28	5.83 6.20 10.78 7.31	11 11	3.035 2.845	35.16 32.96	28.52 30.75 21.51 15.17	17 14	漸増荷重繰返し載荷 P=±0.5t, ±1.0t, ±1.5t, ±2.0t, ±2.5t, ±3.0t, ±3.5t, ±4.0t, ±4.5t, ±5.0t, 以後11回ピッチ0.835MM変形制御	S	
1.25	½BV ₂ -S	静	E W	0.725	8.40	1.00 1.49	0	2.630	30.47	6.15 11.07		3.845	44.55	79.04 101.14	静載荷	B		

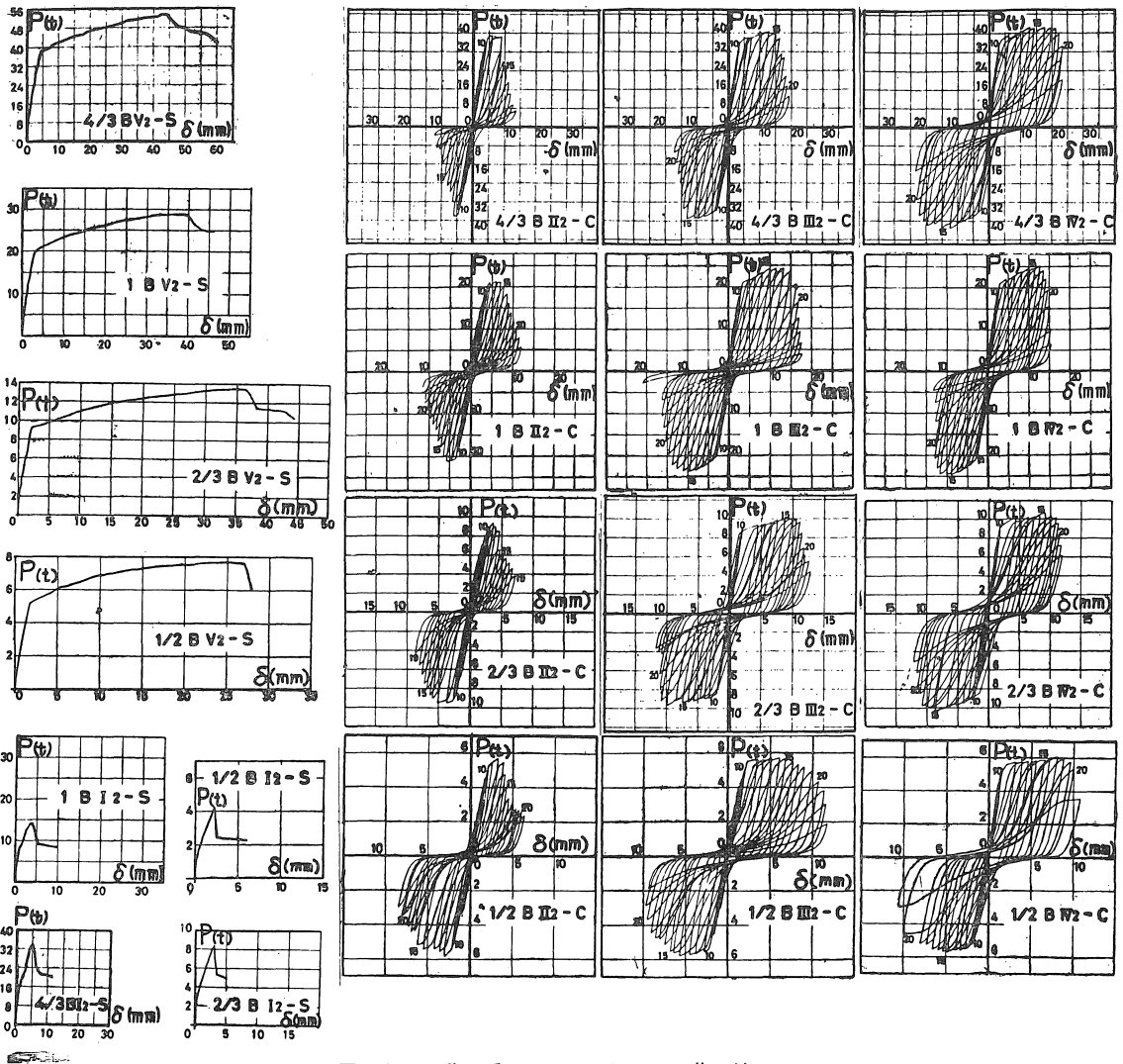


図-6 荷重—たわみ曲線

(2) せん断耐力とあばら筋比の関係

図-4にせん断初ひびわれ耐力とあばら筋比の関係を示す。縦軸の分母 ${}_sQ_{yv}$ は同じ寸法のあばら筋比 $P_w = 1.25\%$ の静載荷のはり (V-S ばり) の曲げ降伏時のせん断耐力を意味する。図-4より 1Bシリーズが最も高く、 $\frac{2}{3}B$ シリーズが最も低い値を示している。 $Q_c / {}_sQ_{yv}$ の値は0.15~0.45の間にあり、かなりのばらつきを示している。せん断初ひびわれ荷重はあばら筋量の多少には関係ないとするのが定説になっているようであり、今回のテストではかなりばらつきを示しており、一方この図によれば、供試体寸法の影響が出ているかどうか不明である。しかしながら $\frac{2}{3}B$ と B、 $\frac{2}{3}B$ と $\frac{1}{2}B$ シリーズを群と考えると、大きな試験体の方が高い値を示しており、一般に小試験体の方が高い値を示すと言われる点とは相反している。せん断初ひびわれ荷重は同条件のはりでもそ

の値にかなり大きなばらつきを示す点から考えて、やはり今回のテストのみでは、供試体寸法の影響については結論付けることはできないと考えられる。

図-5に最大耐力とあばら筋比の関係を示す。1BI2-S ばりは $Q_u / {}_sQ_{yv}$ の値が0.70を示し、最も低い耐力を示しているが、同一条件のはりの前回のテスト⁽⁴⁾によれば0.95を示しており、I2-S ばりでは同一条件のはりでの値のばらつきが非常に大きく、供試体寸法の影響については、これぐらいの試験体数ではつかみえない。あばら筋比1.25%のシリーズのはりでは、 $Q_u / {}_sQ_{yv}$ の値は $\frac{1}{2}BV$ ばりで1.47、 $\frac{2}{3}BV$ ばりで1.44、1BV ばりで1.44、 $\frac{3}{4}BV$ ばりで1.37を示し、寸法の大きな供試体ほどやや低い値を示した。正負繰返し載荷のはりでは、あばら筋比が増加すると最大耐力およびそのときの変形量とともに増加する傾向にあるが、0.65%から0.95%にあ

表 7

	Beam identification	Permanent loading	Temporary loading	Shear cracks Width (mm) (Permanent loading)	
I	1/2BI ₂ -S	6.632	9.948	0.012	
	2/3BI ₂ -S	6.632	9.948	0.03, 0.024, 0.02, 0.02, 0.015, 0.015	
	1 BI ₂ -S	6.632	9.948	—	
	4/3BI ₂ -S	6.632	9.948	—	
II	1/2BII ₂ -C	7.696	11.543	+0.017 -0.054, 0.047, 0.04, 0.037, 0.02, 0.014	
	2/3BII ₂ -C	7.696	11.543	+0.034, 0.028, 0.028, 0.022, 0.015 -0.058, 0.028	
	1 BII ₂ -C	7.696	11.543	+0.07, 0.06, 0.05 -0.07, 0.06, 0.03, 0.03, 0.02, 0.01	
	4/3BII ₂ -C	7.696	11.543	+0.02, 0.01 -0.03, 0.02, 0.02, 0.02	
III	1/2BIII ₂ -C	9.82	14.73	+0.14, 0.09, 0.08, 0.07, 0.06, 0.03 -0.13, 0.10, 0.09, 0.04, 0.04, 0.03, 0.02	
	2/3BIII ₂ -C	9.82	14.73	+0.287, 0.03, 0.027, 0.023, 0.022, 0.022, 0.015, 0.015 -0.03, 0.027, 0.015	
	1B III ₂ -C	9.82	14.73	+0.12, 0.06, 0.05, 0.05, 0.04, 0.04, 0.04, 0.03, 0.03 -0.10, 0.06, 0.06, 0.05, 0.05, 0.05, 0.04, 0.04, 0.03	and three cracks and four cracks
	4/3BIII ₂ -C	9.82	14.73	+0.11, 0.10, 0.06, 0.06, 0.04, 0.04, 0.03, 0.02 -0.10, 0.05, 0.05, 0.04, 0.04, 0.04, 0.03, 0.03	and five cracks and three cracks
IV	1/2BIV ₂ -C	11.95	17.92	+0.16, 0.15, 0.14, 0.10, 0.10, 0.07, 0.06, 0.06, 0.05 -0.297, 0.099, 0.08, 0.078, 0.07, 0.06,	and eight cracks
	2/3BIV ₂ -C	11.95	17.92	+0.134, 0.075, 0.061, 0.045, 0.045, 0.044 -0.21, 0.09, 0.089, 0.075, 0.074, 0.059, 0.059	and seven cracks and seven cracks
	1 BIV ₂ -C	11.95	17.92	+0.08, 0.07, 0.06, 0.06, 0.05, 0.04, 0.04, 0.04 -0.35, 0.25, 0.22, 0.18, 0.15, 0.13, 0.12, 0.12, 0.12	and three cracks and sixteen cracks
	4/3BIV ₂ -C	11.95	17.92	+0.08, 0.07, 0.05, 0.05, 0.04, 0.04, 0.04, 0.03, 0.03 -0.07, 0.05, 0.05, 0.05, 0.04, 0.04, 0.04, 0.03, 0.03	and three cracks and five cracks
V	1/2BV ₂ -S	13.72	20.58	0.19, 0.17, 0.17, 0.12, 0.08, 0.06, 0.05	and four cracks
	2/3BV ₂ -S	13.72	20.58	0.15, 0.103, 0.101, 0.078, 0.075, 0.071	and ten cracks
	1 BV ₂ -S	13.72	20.58	0.10, 0.10, 0.10, 0.10, 0.10, 0.05, 0.05, 0.05	
	4/3BV ₂ -S	13.72	20.58	0.13, 0.11, 0.09, 0.08, 0.08, 0.06, 0.06, 0.06	and seven cracks

らば筋を増加させた場合は、あばら筋量の増加のわりに耐力および変形量の向上は少なくなっている。供試体本数が少なく、この結果のみで断定することはできないが、今回の試験では供試体寸法の影響とみられる法則のようなものはみられず、値にややばらつきがみられるが、ほぼ同じような傾向を示している。図-6に荷重-変形曲線を示す。

(3) 長期荷重時のせん断ひびわれ幅

表-7に長期荷重時のせん断ひびわれ幅の実測値をスケール比をかけて、Prototypeの1Bシリーズのほりに換算した値を示す。この表は scale effect がないものとして作成したものである。静載荷のほりではいずれも0.2mmよりは小さく、Vシリーズほりでは小試験体の方がやや大きな値を示している。長期荷重時のV-Sほりのひびわれ幅の合計は、Prototypeの1B-Sほりに換算すると、1/2Bほりで1.11mm、3/8Bほりで1.05mm、1Bほりで1.41mm、5/8Bほりで0.82mmとなり、5/8Bほりの値がやや低いものの、今回の試験では供試体寸法の影響はあまり認められなかった。

学会の長期許容せん断応力度の規定にしたがえば、あばら筋比を増加させると許容せん断力を増加させること

ができる。この規定にしたがって求めた長期許容せん断力は1BII₂-Cほりで7.70トン、1BIII₂-Cほりで9.82トン、1BIV₂-Cほりで11.95トン、1BI₂-Sほりで6.63トン、1BV₂-Sほりで13.72トンとなり、あばら筋比を増加させることによりかなり大きな耐力まで許容していることがわかる。

$$Q_A = b_j \{ \alpha f_s + 0.5 w_f t (P_w - 0.002) \}$$

Q_A : ほりの許容せん断力

f_s : コンクリートの許容せん断応力度

w_f t : あばら筋のせん断補強用許容引張長応力度

P_w : あばら筋比

一方、あばら筋比を増加させるとひびわれ幅をおさえることはできるが、荷重が大きくなるにしたがって、ひびわれ幅はやはり増大する。あばら筋比の増加とともに許容耐力は上式によって大きくなるため、許容耐力時のひびわれ幅はかなり大きく、表-7に示すごとく長期荷重時のせん断ひびわれ幅は0.35%、0.62%および0.95%のあばら筋比のほりの順に、かえってひびわれ幅が大きくなっており、一部では無視できない値を示している。このひびわれ幅は15×30cm断面という中型のほりの結果

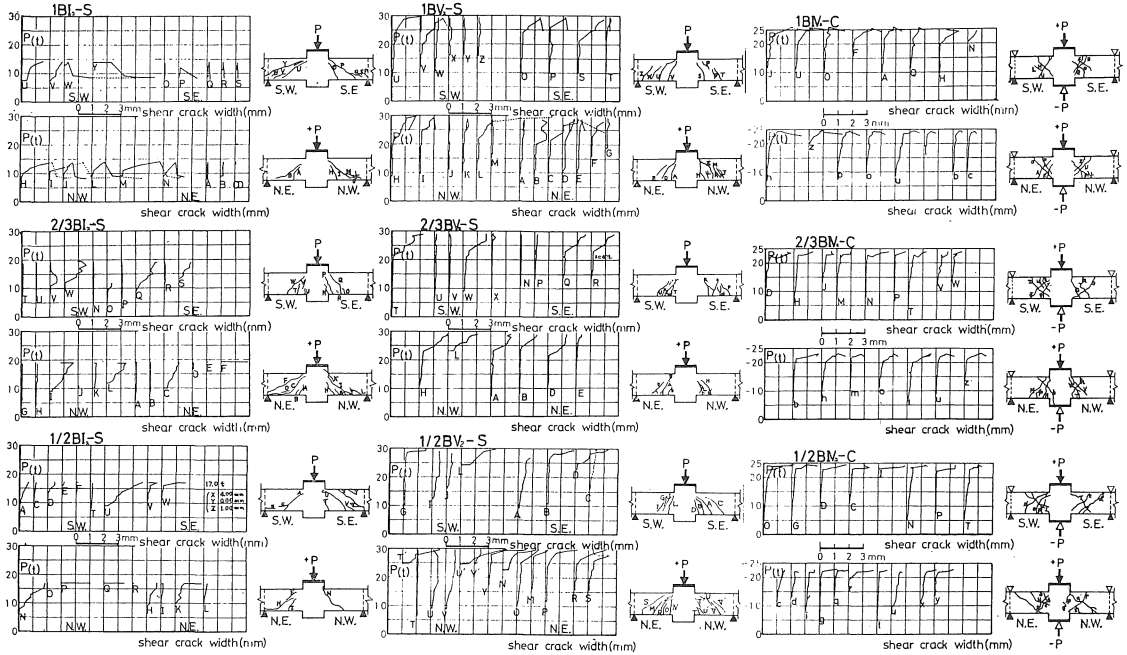


図-7 prototype のはりに換算したせん断ひびわれ幅の拡大状況

であり、これより大きな実大のはりに近い試験体の場合には、寸法比に応じてもっと大きな幅のひびわれが発生すると推定される。

(4) せん断ひびわれ幅の拡大状況

図-7 に主要なせん断ひびわれ幅の拡大状況を示す。縦軸には Prototype のはりに換算した荷重を、横軸には Prototype のはりに換算したせん断ひびわれ幅をとり、各荷重段ごとに測定したせん断ひびわれ幅をプロットした。せん断ひびわれはコンクリートの弱い部分から入るために、ひびわれ発生荷重、発生位置、ひびわれ幅等が非常にまちまちで、図に示すかうに、ばらつきが大きい。荷重とせん断ひびわれ幅とあばら筋比との関係を調べるために、多数発生しているせん断ひびわれのうち、主要なせん断ひびわれ3~4個の平均のせん断ひびわれを求め、これと荷重との関係をあばら筋比ごとに示したものが図-8である。図-8の荷重と平均せん断ひびわれ幅は15×30cm断面の Prototype のはりに換算したものである。いずれの供試体寸法のはりでも、あばら筋比が増加するにつれてせん断ひびわれ幅は減少する傾向を示しており、あばら筋の追加がひびわれの制御に役立つことを示している。さらに、図-8では、各あばら筋比において、供試体寸法の影響が認められるほどの傾向はみられない。供試体の本数も少なく、これだけで実験式をつくることはできないので、今後、試験体の本数を増してこれらの点を検討する必要がある。

一方、place と Regan⁽²⁾ は実験結果をまとめて次のような斜めひびわれ幅の推定式を提案している。

$$W_{max} = \frac{S \cdot \sin \theta}{1.70 \times 10^5 P_w (F_c)^{1/3}} \cdot \left(\frac{Q_D - Q_C}{bd} \right) \quad (Kg, cm)$$

F_c : コンクリートの設計基準強度 (Kg/cm²)

P_w : あばら筋比 ($P = w A_w / b_s$)

S : せん断補強筋間隔 (cm)

θ : せん断補強筋が材軸となす角度

Q_D : 設計用せん断力 (Kg)

Q_C : コンクリートが分担するせん断力 (Kg)

bd : 断面の幅と有効せい (cm)

W_{max} : 最大斜めひびわれ幅 (cm)

今回、実験に使用した条件を本式に代入すると、今回の実験結果に比して非常に小さな値を示した。上式はあばら筋比とあばら筋間隔が決まると、 W_{max} と Q とが直線的な関係にあることを示しているが、図-8による今回の試験結果は、ほぼ放物線で表示できる関係を示している。これらの相違については、今後とも検討する必要がある。

測定したひびわれ幅と供試体寸法との関係の評価する一つの方法として、各荷重段におけるせん断ひびわれ幅の総和と荷重または繰返しサイクルとの関係を Prototype の 15×30cm 断面のはりに換算して図-9に示す。図-9 (a) と (e) は静載荷時のものである。あばら筋

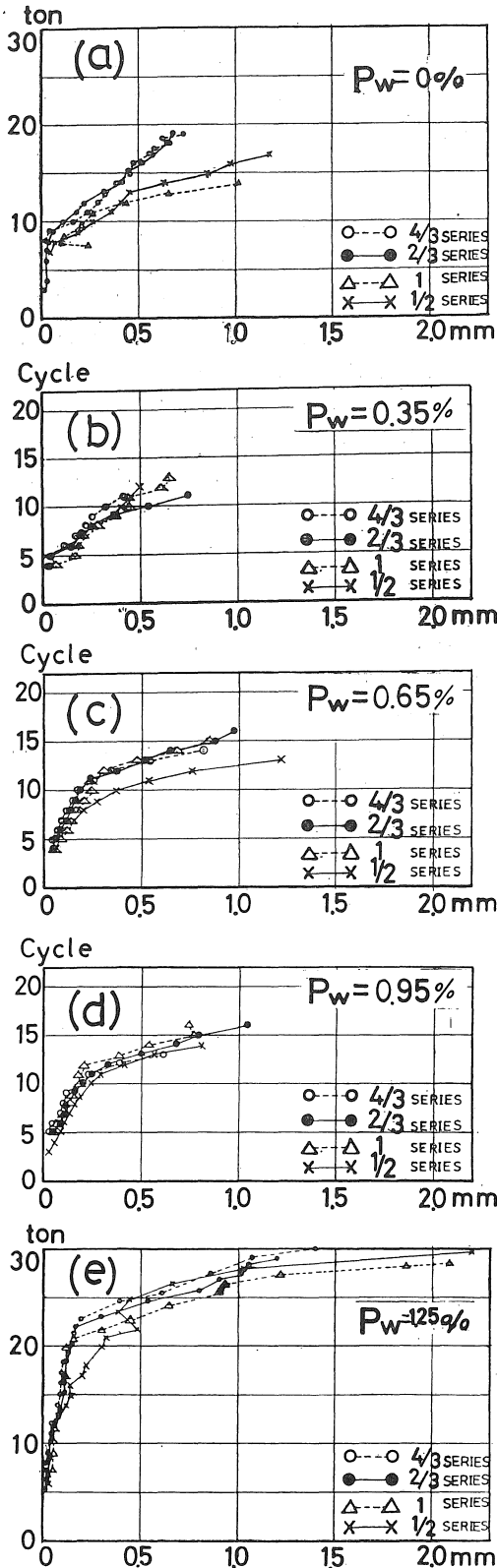


図-8 prototype のはりに換算した主要なせん断ひびわれ幅の平均値

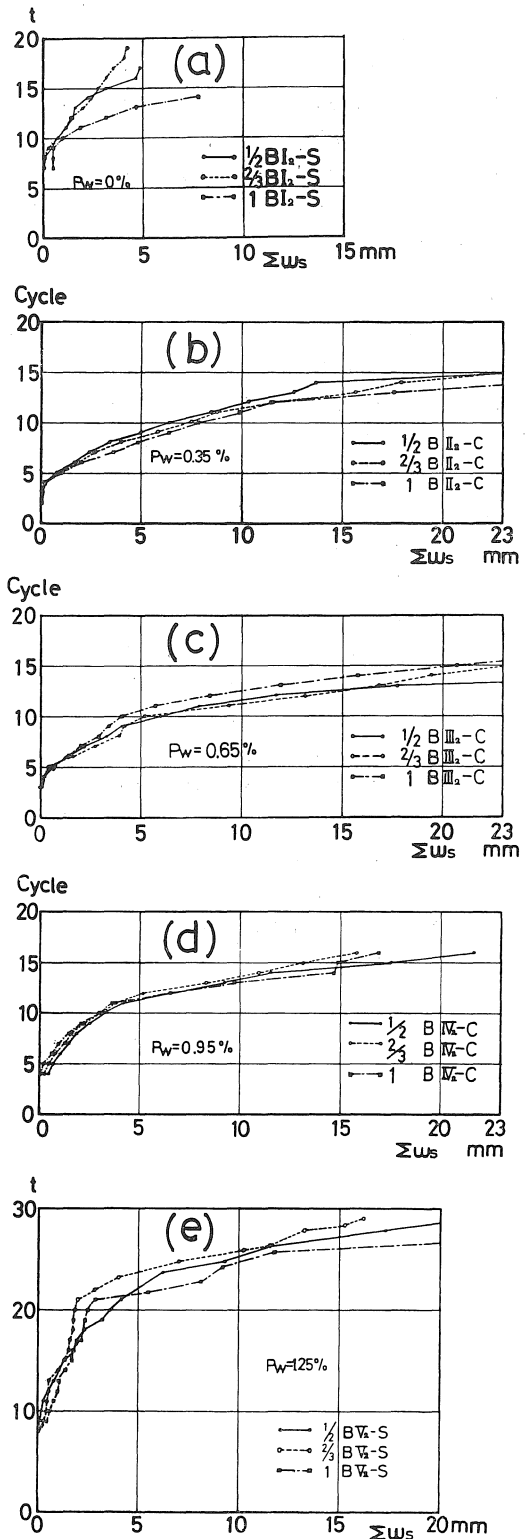


図-9 せん断ひびわれ幅の総和

を1.25%まで加えることによりひびわれ幅の総和を非常に減少させていることがよくわかる。図—9(b), (c) および (d) は繰返し載荷時のものであるが、相互に比較するとあばら筋比の高いはりの方がひびわれ幅の総和は小さくなっており、あばら筋の増加によりひびわれ幅が制御されていることがよくわかる。図—9によれば、供試体寸法の異なる4本の折線は各あばら筋比とも、かなり近接しており、今回の試験に関しては供試体寸法の影響はみられないようである。

4. む す び

20体の軽量鉄筋コンクリートばりの静載荷並びに正負繰返し曲げ・せん断試験を実施し、塑性域の正負繰返しにより脆性的にせん断破壊するはりのせん断耐力とせん断ひびわれ幅におよぼすあばら筋比と供試体寸法の影響について調べた結果、次のようなことがわかった

- (1) 今回の試験結果によれば、供試体寸法の相違なるはりにあっても、せん断ひびわれ幅の拡大の傾向にはあまり明白な相違は見られなかった。
- (2) 学会の長期許容せん断耐力式は、あばら筋の追加により大きな耐力を許容している。Prototypeのはりに換算したせん断ひびわれ幅に関する今回の試験結果によれば、長期荷重時において一部のはりでかなり大きなひびわれ幅を示しており、実大に近いもっと大きな供試体では大きなひびわれ幅が生じるものと推定される。
- (3) 今回の試験によれば、せん断ひびわれ幅と荷重との関係はほぼ放物線で表示できると考えられるが、供試体本数も少なく、実験式をつくらるところまでは至らなかった。

- (4) せん断耐力に関しても、供試体寸法の相違によると思われるような点は見られなかった。今後とも試験を継続して、供試体本数を増加させて荷重とせん断ひびわれ幅との関係についての信頼にたる推定式を求めるようにする予定である。

参 考 文 献

- 1) Leonhart F. und Walther R. : Beiträge zur Behandlung der Schubprobleme im Stahlbetonbau, Beton und Stahlbetonbau, Heft 8.9.1963, s.184—190, s.216—224.
- 2) Placas A. and Regan P.E. : shear Failure of Reinforced Concrete Beams, ACI Journal, Vol. 68, No.10, Oct.1971, pp. 763—773.
- 3) Joint ASCE-ACI Task Committee 426 : The Shear Strength of Reinforced Concrete Members, Proc. of ASCE, Vol.99, No.ST-6, Mar. 1973, pp. 1091—1187.
- 4) 小坂義夫, 小池幸男 「正負繰返し荷重を受ける軽量 RC ばりのせん断耐力とじん性について」セメント技術年報, Vol.26 (昭47) pp.422—429.
- 5) 小坂義夫, 小池狭千朗 (幸男) 「正負繰返し荷重を受ける軽量 RC ばりのせん断耐力とじん性におよぼす主筋比の影響について」セメント技術年報, Vol.27 (昭48) pp.438—443

(昭和51年1月10日受付)