

[121] 鉄筋コンクリート単純梁のせん断ひびわれ性状

正会員 ○沢村秀治 (三井建設株式会社)
 正会員 丸山久一 (長岡技術科学大学工学部)
 正会員 前川宏一 (長岡技術科学大学工学部)

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物および構造部材を耐久性という観点から設計する場合、保有耐力の算定のみならず、ひびわれ性状を充分把握しておく必要がある。構造的ひびわれとしての曲げひびわれに関しては従来から数多くの研究がなされ、ひびわれ幅を定量的に算定することも可能になってきている¹⁾。一方、せん断ひびわれについては、メカニズムの複雑さということもあって研究も充分でなく、ひびわれ幅を定量的に制御するまでに致っていないのが現状である。

本研究は、せん断ひびわれ幅の制御に関する基礎資料を得ることを目的とし、矩形断面を有する単純梁について、せん断スパン比 (a/d)、せん断補強鉄筋、圧縮鉄筋および断面寸法がせん断ひびわれ幅に及ぼす影響を検討したものである。

2. 実験概要

供試体の代表的な形状・寸法を図1に、諸元を表1に示す。断面は15cm、有効高さ25cmの矩形とし、断面寸法の影響を調べる為の供試体(TB17)だけは、有効高さだけを50cmに変えた。スパン長は $a/d=2$ の場合は1.00m、 $a/d=3$ の場合は1.50mである。

鉄筋のひずみはワイヤーストレインゲージで測定した。ゲージ貼布位置は図1の鉄筋上の○印で示された点である。ひびわれ幅は、供試体側面に貼布した標点(縦・横とも10cm間隔)間をコンタクトストレインメータで測定し、その結果に基づいて算出した。

図2に載荷装置を示す。載荷は1点集中荷重とし、油圧サーボジャッキで単調に載荷し、破壊に至らしめた。荷重は、最大荷重点近くまでは荷重制御で負荷し、それ以降は変位制御とした。尚、支点は両端ともヒンジ支承に近く、支承部および載荷部には15×15×2.5cmの鋼板を用いている。

用いた材料としては、コンクリートは最大粗骨材寸法25mmのレディーミックスコンクリートで、圧縮強度は表1に示した。鉄筋はSD35で、降伏強度は39kg/cm²程度であった。

3. 実験結果および考察

表2に耐力に関する実験結果および計算結果を示す。曲げひびわれ荷重は弾性計算に依り、せん断ひびわれ荷重は岡村・檜貝式²⁾に依って求めた。せん断耐力の計算は、スターラップの効果^{45°}トラスモデルに置き換え、それにせん断ひびわれ荷重を加えたものとした。

せん断ひびわれ幅の算定は、図3に示すように予めひびわれ角度(θ)を測定しておき、縦・横両方向の標点間の変化量($\Delta\ell$)から

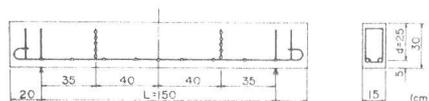


図1 供試体 (TB14)

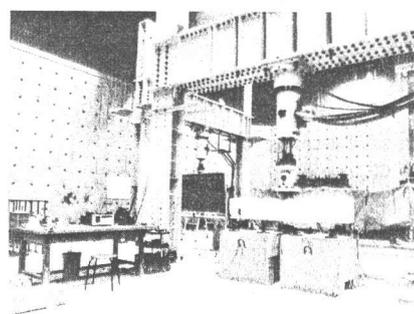


図2 載荷装置

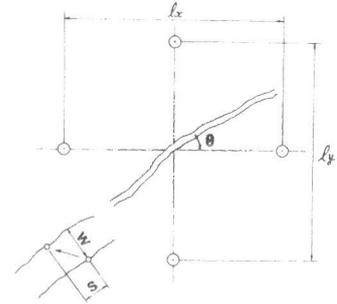
表1 供試体諸元

試体名	a/d	ρ (%)	ρ_w (%)	圧縮鉄筋	引張鉄筋	f_c kg/cm ²
TB 1	2	1.06	—	—	2D16	170
TB 2	"	"	—	—	2D16	211
TB 3	"	"	0.21	—	"	221
TB 4	"	"	0.42	—	"	221
TB 5	"	1.53	—	—	2D10	239
TB 6	"	"	—	—	2D16	239
TB 7	"	"	0.21	—	"	255
TB 8	"	"	0.42	—	"	255
TB 9	3	"	—	—	"	258
TB10	"	"	—	—	2D16	261
TB11	"	"	0.21	—	"	264
TB12	"	"	0.42	—	"	264
TB13	2	"	0.17	—	"	267
TB14	3	"	0.11	—	"	300
TB15	2	"	0.17	2D16	"	267
TB16	3	"	0.11	"	"	300
TB17	"	1.35	"	—	2D25	321
TB20	"	1.53	0.22	—	2D10	302
TB21	"	"	"	—	"	302
TB22	"	"	"	—	"	302

ひびわれ面に鉛直な変位 (W) および平行な変位 (S) を求めた。以後、本論文では (W) をひびわれ幅として用いることとする。

3.1 曲げひびわれ幅とせん断ひびわれ幅

図4に荷重の増加に伴う曲げひびわれ幅およびせん断ひびわれ幅の拡大の様子を示す。供試体は TB13 で、 $a/d = 2$ 。スターラップはせん断スパン間に1本、圧縮鉄筋は無い状態である。この供試体については、最大せん断ひびわれ幅はせん断ひびわれと主鉄筋との交差部の近傍で測定された。せん断ひびわれは、荷重があるレベルに達するまでは発生しないが、一旦発生するとひびわれ幅の拡大は急激で、この供試体では終局耐力の5割程度の荷重で曲げひびわれ幅よりも大きくなり始めている。ただし、後で述べるように、最大せん断ひびわれ幅が生じている位置は一定ではなく、 a/d の大きさ、スターラップの有無および圧縮鉄筋の有無等によって異なってくるので、それによってせん断ひびわれ幅の拡大の様子も違ってくる。



$$w = l_x \sin \theta + l_y \cos \theta$$

$$s = l_x \cos \theta - l_y \sin \theta$$

図3 せん断ひびわれ幅算定方法

3.2 せん断ひびわれ幅とスターラップひずみ

図5のように、最大せん断ひびわれ幅がスターラップ上で生じている場合には、ひびわれ幅とスターラップひずみには線形関係が認められる。しかし、多くの場合、最大せん断ひびわれ幅は、スターラップのひずみ測定点とは異なる位置に発生している為、両者を定量的に結びつけるのは難しい。

3.3 せん断スパン有効高さ比 (a/d) の影響

スターラップおよび圧縮鉄筋の無い場合について、 $a/d = 2$ および 3 の荷重-最大せん断ひびわれ幅関係を図6に示す。

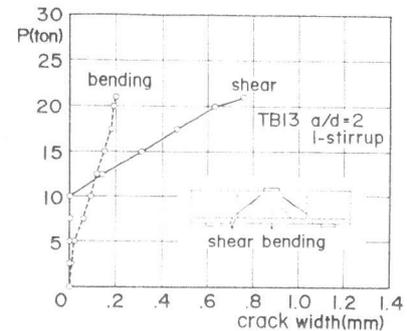


図4 曲げおよびせん断ひびわれ幅

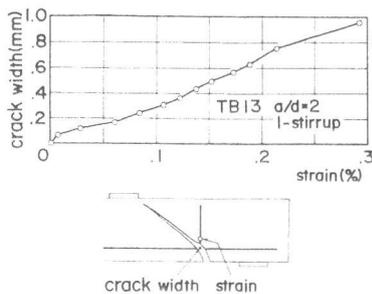


図5 せん断ひびわれ幅とスターラップひずみ

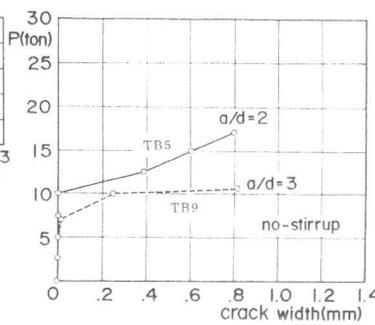


図6 a/d の影響

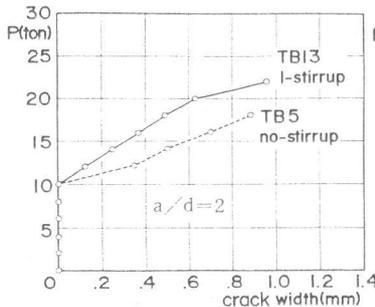


図7 せん断補強鉄筋の効果

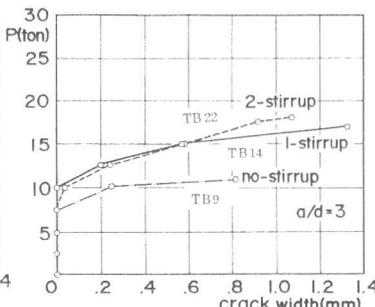


図8 せん断補強鉄筋の効果

表2 実験結果および計算値 (単位 ton)

試験体	曲げひびわれ荷重		せん断ひびわれ荷重		終局耐力		
	計算値	実験値	計算値	実験値	曲げ	せん断	実験値
TB 1	3.47	3	8.3	7	13.7	8.3	18.8
TB 2	4.09	4	8.8	8	14.0	8.8	17.8
TB 3	3.85	4	8.9	8	14.1	14.3	18.9
TB 4	3.85	4	8.9	9	14.1	19.8	20.7
TB 5	4.19	5	10.5	9	20.0	10.5	22.5
TB 6	4.56	5	10.5	10	20.1	10.5	25.0
TB 7	4.33	5	10.7	10	20.1	16.1	23.0
TB 8	4.33	5	10.7	10	20.1	21.6	26.1
TB 9	2.91	3	9.0	9	13.4	3.2	11.8
TB10	3.18	3	9.0	9	13.5	9.4	9.5
TB11	2.94	3	9.1	9	13.5	14.5	14.4
TB12	2.94	3	9.1	9	13.5	19.9	16.7
TB13	4.43	6	10.9	10	19.4	15.2	22.0
TB14	3.13	3	9.5	9	13.1	12.4	16.6
TB15	4.82	5	10.9	10	19.4	15.1	28.9
TB16	3.41	3	9.5	10	13.1	12.4	13.9
TB17	6.35	5	15.9	16	23.7	21.7	22.8
TB20	3.14	3	9.5	10	13.1	16.7	16.8
TB21	3.14	4	9.5	10	13.1	16.7	17.0
TB22	3.14	4	9.5	10	13.1	16.7	18.3

$a/d=2$ の場合は、斜めひびわれ発生後アーチ的耐荷力機構によって力が伝達され得るので、せん断ひびわれ幅の拡大も徐々に為されてゆく。一方、 $a/d=3$ では、斜めひびわれは発生と同時に急激に発達し、載荷板の近傍を突き抜けて破壊に至っている。従って、せん断ひびわれ幅も、ひびわれ発生後急激に拡大している。尚、両ケースとも最大せん断ひびわれ幅は、せん断ひびわれと主鉄筋との交差部近傍に発生し、 $a/d=3$ では主筋に沿ってひびわれが発達していった。

3.4 せん断補強鉄筋の効果

せん断補強鉄筋としてU型スターラップ(D6)を用い、スターラップの無い場合、せん断スパン内に1本配置した場合、2本配置した場合および等間隔で数本配置した場合について比較検討を行なった。図7, 8に $a/d=2$ および3の場合についてスターラップの効果を示している。 $a/d=2$ と3ではスターラップがせん断耐力に及ぼす影響が異なり、その為、せん断ひびわれ幅の制御に資する効果も異なってくるが、斜めひびわれによる耐力低下が著しい $a/d=3$ の方が、当然ながら、せん断ひびわれ幅を抑制するスターラップの効果も著しいことが認められる。1本目のスターラップは、スターラップが無い場合に最大せん断ひびわれ幅が生じている位置に配したが、更にもう1本スターラップを配置する際の位置の影響を検討したのが図9である。2本目を1本目と同じ位置に配したのがケースBで、載荷板寄りに配したのがケースA、支点側に配したのがケースCである。2本目のスターラップを配しても、せん断ひびわれ幅の抑制にはそれ程効果が期待できず、特に、ケースB, Cは中程度の荷重レベルではスターラップ1本の場合よりも良くない結果となっている。この現象を考察する為に、ひびわれ発生・発達のパターンを示したのが図10である。スターラップの無い場合の最大せん断ひびわれ幅の発生位置にスターラップを1本配置すると、力の伝達機構が変化し、載荷点側に最大せん断ひびわれ幅が生ずるようになる。この為、ケースB, Cのようなスターラップの配置は、ひびわれ幅の制御に益しない。しかし、載荷点側に2本目のスターラップを配したケースAでも、中程度の荷重レベルではあまりひびわれ抑制効果が認められていない。

尚、 $a/d=2$ の場合では、スターラップの配置によるひびわれ発生パターンの違いはあまり認められず、最大せん断ひびわれ幅発生位置はスターラップの無い場合とほぼ同じであった。

3.5 圧縮鉄筋の影響

圧縮鉄筋がせん断耐力およびせん断ひびわれ幅に及ぼす影響は、 a/d によって正反対の結果となるようである。図11は $a/d=2$ の場合であるが、この時は圧縮鉄筋により耐力は上昇し、かつ、せん断ひびわれ幅も抑制されている。一方、 $a/d=3$ の場合の図12では、圧縮鉄筋があることによって耐力も低下し、せん断ひびわれ幅も急激に拡大している。

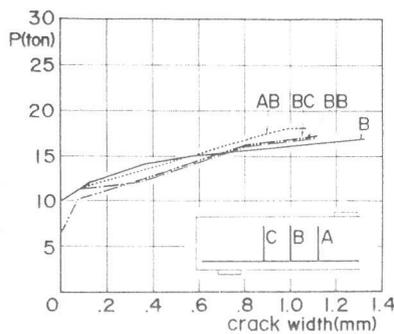


図9 せん断補強鉄筋の配置位置の影響

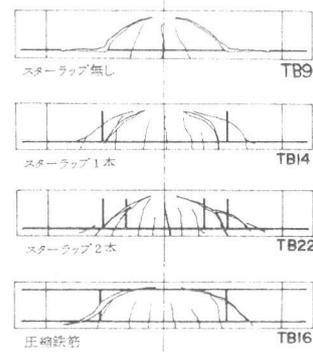


図10 ひびわれパターン ($a/d=3$)

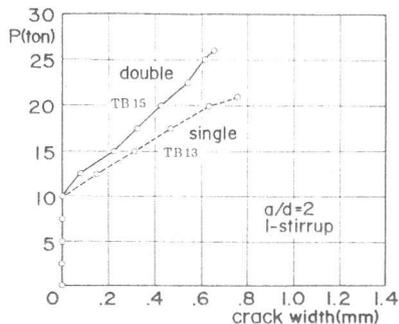


図11 圧縮鉄筋の影響 ($a/d=2$)

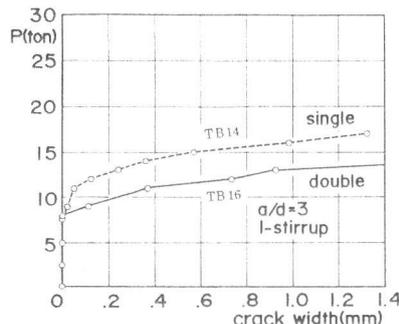


図12 圧縮鉄筋の影響 ($a/d=3$)

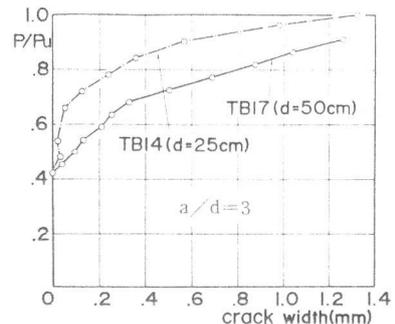


図13 有効高さの寸法効果

この原因の1つとして考えられることは、圧縮鉄筋がある場合のひびわれパターンの違いである。図10に示してあるように、圧縮鉄筋があると、スターラップが1本配置されていてもひびわれパターンはスターラップが無い場合と殆ど同じで、しかも、圧縮鉄筋に沿って発達し、載荷板近傍で抜けるようにして破壊に至っている。

3.6 有効高さの寸法効果

$a/d = 3$ 、スターラップ比および圧縮鉄筋無しという条件を一定にし、主鉄筋比をあまり変化させない (TB14 - 1.53%, TB17 - 1.35%) 状態で有効高さ (d) を25cmと50cmにした場合の比較を図13に示す。ひびわれパターンは両者ともほぼ同じで、最大せん断ひびわれ幅は図10のTB14に示されているように、スターラップより載荷点側で、しかも弾性体の時の中立軸近傍で発生している。終局せん断耐力を1とした場合の荷重レベルで比較すると、有効高さの大きい方が低荷重レベルで大きなせん断ひびわれ幅になっているのが認められる。

4. 既往のせん断ひびわれ幅算定式の検討

既往の算定式としてCEBのモデルコード^{1), 3)}、ソ連の規準 (SNIP - II)^{1), 4)} および Regan^{1), 5)} の提案式を取りあげ、本実験に適用した結果を図14~16に示す。尚、各式の詳細は文献1に一覧表としてまとめているので、ここでは割愛することとした。

a/d が小さく、アーチ的耐荷機構が卓越する場合、各算定式とも大きめの値を与える傾向にある (図14)。 a/d が大きく、トラス的耐荷機構が卓越する場合 (図15)、各算定式は比較的良く実験値と合い、特に CEB の算定式は、せん断ひびわれ発生荷重と実験値を等しくさせるならば、その後のひびわれ性状を良く表現できるようである。スターラップ量が増加すると、各算定式はスターラップの効果を過大評価する傾向にある (図16)。

5. 結論

1) せん断力がアーチ的機構で伝達される場合 (a/d 小) とトラス的機構で伝達される場合 ($a/d \geq 3$) では、せん断ひびわれ幅の拡大する様子が異なり、更に、ひびわれ幅抑制の為のスターラップ配置によるひびわれパターンも異なってくる。

2) 圧縮鉄筋は、アーチ的耐荷機構の下ではプラスに働くが、トラス的機構の下ではマイナスに作用する。

3) 有効高さの寸法効果は認められ、けた高の大きいもの程せん断ひびわれ幅も早期に拡大してゆく。

4) 既往のせん断ひびわれ幅算定式は、トラス的耐荷機構を基本にしている為か、アーチ的機構の場合はひびわれ幅を過大評価している。更に、せん断補強筋の効果も過大に評価する傾向にある。

本研究は、昭和58年度文部省科学研究費補助金 (課題番号 58750383) を受けて行なったものである。

(参考文献)

- 1) コンクリート構造の限界状態設計法指針 (案); ひびわれに関する資料, コンクリートライブラリー第52号, pp. 263~284, 土木学会, 1983. 11
- 2) コンクリート構造の限界状態設計法指針 (案); せん断に関する資料, コンクリートライブラリー第52号, pp. 240~253, 土木学会, 1983. 11
- 3) CEB-FIP, Model Code for Concrete Structures, CEB-FIP International Recommendations, Third Edition, Comité Euro-International du Béton, Paris, 1978
- 4) 青柳征夫; ソ連における鉄筋コンクリート部材のせん断・ねじり並びにひびわれ幅に関する設計法 (その2・終) ねじり並びにひびわれ幅に関する設計法, コンクリート工学, 1980. 10
- 5) Placas, A. and P. E. Regan; Shear Failure of Reinforced Concrete Beams, ACI Journal, Vol 67, No. 10, pp. 763~773, Oct., 1971

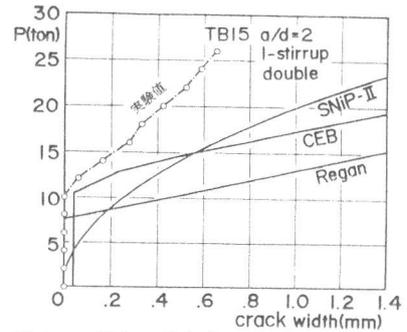


図14 既往の算定式との比較 ($a/d=2$)

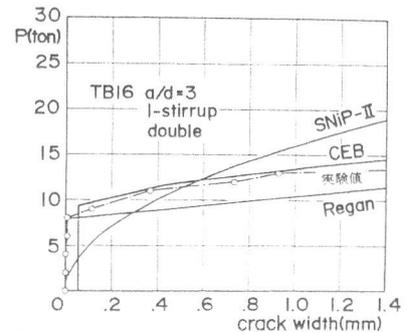


図15 既往の算定式との比較 ($a/d=3$)

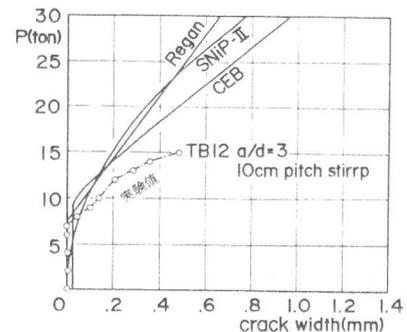


図16 既往の算定式との比較 ($a/d=3$)