

論文

[2075] 反曲点を有する RC はりのせん断破壊に対する斜ひびわれの影響

古内 仁\*1・高橋義裕\*2・上田多門\*3・角田与史雄\*4

1. まえがき

鉄筋コンクリート部材の連続桁やラーメン構造等のはりでは、スパン内で曲げモーメントが反曲しせん断破壊機構が複雑となる。土木工学の分野では、せん断耐力について過去に多くの研究が行われているが、それは1点あるいは2点载荷の単純ばりが主で、上記のような反曲点のある部材についての研究は数少ない。

本研究は、現在までに実験を主体とした研究[1][2]を進め、せん断耐力の評価法を検討してきた。その結果、反曲点のあるはりの支間内では正の曲げモーメント側と負の曲げモーメント側にそれぞれ斜ひびわれが生じ、両者の斜ひびわれが破壊に深く関わっていることが明らかになった。例えば、同一支間内において反曲点から载荷点位置あるいは支点位置までを分割してせん断スパンと考えたとき、斜ひびわれの発生はこの2つのせん断スパン（あるいはせん断スパン比）の大きさが主たる要因となっているようである。通常、単純ばりの斜引張破壊におけるせん断耐力は、せん断スパン比が大きくなれば小さくなる傾向にあるが、反曲点のあるはりについても同様で、2つのせん断スパンのうち大きい領域に最初に斜ひびわれが生ずる。このとき、この最初のひびわれの発生と同時にあるいは若干の耐力増加の後にそのひびわれの開口によって破壊に至るケースと、大幅な耐力増加の後、新たな斜ひびわれが発生して破壊に至るケースがある。

そこで、本研究は破壊に影響を及ぼす斜ひびわれの発生の方を検討し、反曲点を有するはりについてせん断耐力の算定法を探求した。

2. 実験概要

実験は、既往の研究における供試体[1][2]と同様に張出しを有する供試体を用いて行った（図-1参照）。はりの断面は、25cm×15cmの矩形断面で、上下面からそれぞれ中心かぶり5cmの位

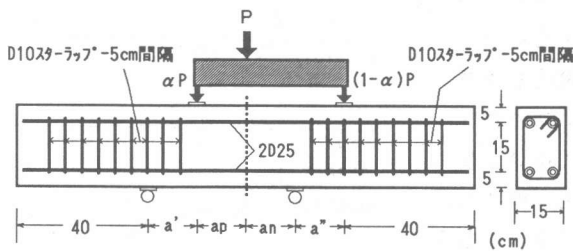


図-1 供試体

表-1 供試体の諸元

供試体	a' (cm)	a <sub>p</sub> (cm)	a <sub>n</sub> (cm)	a'' (cm)	α
9201	15.0	15.0	15.0	15.0	0.667
9202	10.0	10.0	30.0	10.0	0.400
9203	10.0	10.0	40.0	20.0	0.500
9204	20.0	20.0	60.0	20.0	0.400
9205	30.0	40.0	65.0	30.0	0.518
9206	30.0	50.0	60.0	30.0	0.517
9207	10.0	10.0	60.0	30.0	0.500

- \*1 北海道大学助手 工学部土木工学科、(正会員)
- \*2 北海学園大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)
- \*3 北海道大学助教授 工学部土木工学科、工博(正会員)
- \*4 北海道大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

置に2本ずつの軸方向鉄筋を配した。正および負の曲げモーメントが作用している領域で、いずれの断面においても有効高さが20cmで、引張鉄筋比は3.38%である。供試体の諸元は表-1に示すとおりである。荷重方法は、図-2に示すように支間と張出し部に各々荷重し、荷重点ロから支点ハまでを試験区間とし、その他の領域はスターラップによりせん断補強を行った。なお、支圧板には厚さ1cm、幅5cmの鋼板を用いた。せん断スパンは、荷重点ロから反曲点までを $a_1$ 、反曲点から支点ハまでを $a_2$ と定義した。また、各供試体は試験区間において数カ所の位置でコンクリート腹部の主ひずみ及び上下鉄筋の軸方向ひずみを測定した。

使用した鉄筋はすべて異形棒鋼SD345で、軸方向鉄筋は上下ともD25、スターラップにはD10を用いた。コンクリートは、早強ポルトランドセメントおよび天然骨材を使用し、試験材令7日で目標強度 $300\text{kgf/cm}^2$  (29.4MPa) として試験前日まで湿布養生を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 実験結果

コンクリートの圧縮強度および各供試体のせん断耐力は、表-2に示すとおりである。供試体N09202は、試験中反力フレームおよび荷重フレームの変形により荷重を中止したため破壊させることはできなかった。その他の供試体についてはすべて試験区間内でせん断破壊した。

#### 3.2 破壊形式の分類

今回の実験データに過去の実験データ[1][2]で試験区間にせん断補強を行っていない供試体を加えて、破壊形式の検討を行った。図-3は、これまでに観察されたいくつかの破壊パターンの代表的な例を示したものである。タイプAは、一方のせん断スパンが比較的大きいはりに多くみられるもので、最初の斜ひびわれが発生した後、そのひびわれだけで破壊に至るものである。タイプBとCは、両者のせん断スパンがそれほど大きくないはりに多く、最初の斜ひびわれが発生してから耐力が増加し、新たな斜ひびわれの発生によって破壊に至るものである。そのうち、Bは荷重点と支点を結ぶような斜ひびわれの発生によって、Cは、もう一方のせん断スパンにおける斜ひびわれの発生によって破壊が生じている。タイプDは、両方のせん断スパンが極端に小

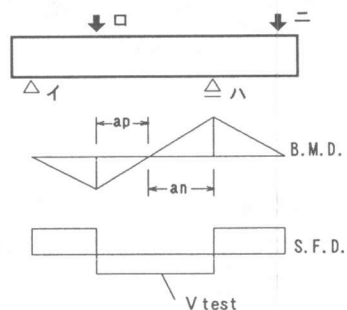


図-2 荷重方法

表-2 実験結果

供試体	圧縮強度(MPa)	せん断耐力(kN)
9201	36	159.8
9202	27	-
9203	32	125.5
9204	40	83.2
9205	36	49.2
9206	30	62.7
9207	31	61.8

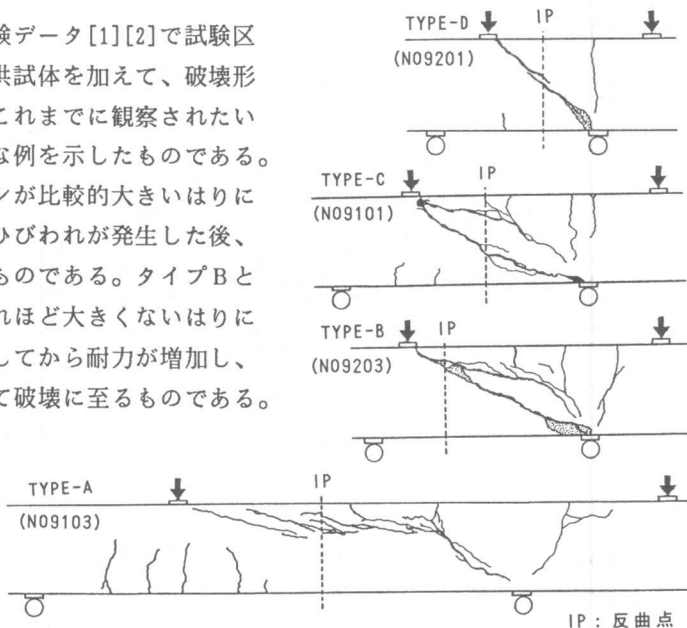


図-3 破壊形式の分類

表-3 供試体のせん断スパンおよび実験結果

供試体	$a_{short}/d$	$a_{long}/d$	$fc'$ (MPa)	$V_{test}$ (kN)	TYPE
9201	0.75(3.38)	0.75(3.38)	36	159.8	D
9202	0.50( )	1.50( )	27	-	-
9203	0.50( )	2.00( )	32	125.5	B
9204	1.00( )	3.00( )	40	83.2	B
9205	2.00( )	3.25( )	36	49.2	BC
9206	2.50( )	3.00( )	30	62.7	C
9207	0.50( )	3.00( )	31	61.8	B
9106	0.50(3.38)	0.70(1.91)	31	194.2	D
9101	1.00( )	1.40( )	28	82.5	C
9105	1.25( )	1.75( )	33	85.1	BC
9102	1.50( )	2.10( )	33	46.2	C
9103	2.00( )	2.80( )	34	51.9	A
9104	2.50( )	3.50( )	32	40.3	A
8605	1.49(2.58)	1.51(2.58)	27	69.0	C
8611	0.78( )	2.42( )	23	71.7	BC
8612	1.50( )	1.70( )	16	48.4	C
8614	0.75( )	1.50( )	26	114.7	C
8615	1.00( )	2.00( )	22	52.3	B
8617	0.76( )	2.49( )	22	51.8	A
8618	1.51( )	2.49( )	22	59.4	C
8620	0.65( )	3.60( )	27	33.8	A
8621	1.50( )	3.50( )	27	32.8	A
8623	0.75( )	4.50( )	24	31.7	A
8507	1.59(3.38)	1.61(3.38)	29	80.8	C
8514	1.49( )	1.71( )	26	81.6	C
8505	0.14( )	4.66( )	37	52.6	A
8511	0.95( )	3.85( )	29	58.4	A
8512	0.23( )	4.57( )	29	46.3	A
8508	1.11( )	5.29( )	33	44.9	A
504F	1.60(3.38)	1.60(3.38)	25	88.8	C
504G	1.07( )	2.13( )	25	92.2	C
504I	1.28( )	1.92( )	26	78.0	C
504A	2.00( )	2.00( )	28	60.1	C
504B	1.33( )	2.67( )	28	72.3	B
504D	2.40( )	2.40( )	25	48.2	C
504E	1.60( )	3.20( )	25	56.3	B
504H	1.92( )	2.88( )	26	62.2	C

注)  $a_{short}/d, a_{long}/d$  における( )内の数値は鉄筋比(%)を示す。  
 $fc'$ : コンクリート圧縮強度 TYPE: 破壊形式

表-4 せん断耐力の計算結果

供試体	$V_{c,short}$ (kN)	$V_{c,long}$ (kN)	$V_{w,add}$ (kN)
9201	116.1 (0.73)	116.1 (0.73)	127.5 (0.80)
9202	143.8 ( - )	88.2 ( - )	69.1 ( - )
9203	152.1 (1.21)	62.1 (0.49)	53.3 (0.42)
9204	98.7 (1.19)	55.9 (0.67)	26.1 (0.31)
9205	64.5 (1.31)	52.6 (1.07)	14.6 (0.30)
9206	54.5 (0.87)	50.6 (0.80)	11.7 (0.19)
9207	150.7 (2.44)	51.7 (0.84)	28.6 (0.46)
9106	150.2 (0.77)	96.2 (0.50)	154.5 (0.80)
9101	87.8 (1.06)	59.1 (0.72)	52.0 (0.63)
9105	81.1 (0.95)	55.6 (0.85)	39.6 (0.47)
9102	72.6 (1.57)	50.5 (1.09)	28.1 (0.61)
9103	63.4 (1.22)	45.2 (0.87)	16.8 (0.32)
9104	56.0 (1.39)	40.7 (1.01)	10.4 (0.26)
8605	62.1 (0.90)	61.6 (0.89)	31.3 (0.45)
8611	88.9 (1.24)	46.4 (0.65)	25.2 (0.35)
8612	51.9 (1.07)	48.4 (1.00)	19.5 (0.40)
8614	94.8 (0.83)	61.0 (0.53)	50.2 (0.44)
8615	74.4 (1.42)	50.2 (0.96)	27.7 (0.53)
8617	89.3 (1.72)	45.4 (0.88)	24.0 (0.46)
8618	57.9 (0.97)	45.5 (0.77)	16.3 (0.27)
8620	106.6 (3.15)	42.1 (1.24)	16.6 (0.49)
8621	62.5 (1.91)	42.7 (1.30)	12.3 (0.37)
8623	92.7 (2.93)	37.6 (1.19)	10.2 (0.32)
8507	67.3 (0.83)	66.8 (0.83)	31.9 (0.39)
8514	67.4 (0.83)	62.6 (0.77)	29.8 (0.37)
8505	481.1 (9.15)	47.0 (0.89)	17.5 (0.33)
8511	92.7 (1.59)	46.3 (0.79)	15.1 (0.26)
8512	283.7 (6.13)	43.8 (0.95)	15.1 (0.33)
8508	86.5 (1.93)	43.8 (0.97)	9.3 (0.21)
504F	64.3 (0.72)	64.3 (0.72)	29.3 (0.33)
504G	81.4 (0.88)	55.7 (0.60)	29.3 (0.32)
504I	73.9 (0.95)	59.3 (0.76)	30.1 (0.39)
504A	59.2 (0.98)	59.2 (0.98)	20.6 (0.34)
504B	73.5 (1.02)	52.0 (0.72)	20.6 (0.29)
504D	52.3 (1.09)	52.3 (1.09)	13.5 (0.28)
504E	63.7 (1.13)	46.6 (0.83)	13.5 (0.24)
504H	59.3 (0.95)	49.5 (0.80)	14.1 (0.23)

注) ( )内の数値は計算値を $V_{test}$ で除したものと。

さいときに、載荷点と支点を結ぶ斜ひびわれだけで破壊に至るものである。

ここで、すべての供試体について2つのせん断スパン比の大きさと斜ひびわれの関係について調べてみた。なお、供試体の諸元および実験結果は表-3に示すとおりであるが、便宜のため反曲点を挟む2つのせん断スパンのうち大きい方を $a_{long}$ 、小さい方を $a_{short}$ に置きかえた。

図-4は、縦軸および横軸に2つのせん断スパン比をとり破壊状況との関連を記号で示したものである。図より、 $a_{long}/d$ が概ね3.5以上のはりは、斜ひびわれが1本だけで破壊に至ることがわかる(破壊タイプA)。すなわち、最初の斜ひびわれで破壊に至るケースは $a_{long}/d$ の大きさによって決定されることになるのかもしれない。一方、最初の斜ひびわれが生じてから破壊しないはりでは、 $a_{long}/d$ が3.5以下で、Cタイプの破壊は比較的 $a_{long}/d$ が $a_{short}/d$ に近く、Bタイプの破壊は両者の差が大きいものに多い。また、Dタイプの破壊は両者のせん断スパン比がともになりに小さいものに限られるようである。

### 3. せん断耐力の評価

上記の破壊形式を参考にせん断耐力の算定を試みた。耐力算定式には、以下に示す式を用いることにした。(1)式は二羽らによる棒部材の斜引張耐力式[3]、(2)式はディープビームのせん断耐力式[4]である。

$$V_c(\text{kN}) = 0.020(P_w \cdot f_c')^{1/3} (d/100)^{-1/4} \cdot [0.75 + 1.4/(a/d)] \cdot b_w \cdot d \quad (1)$$

$$V_w(\text{kN}) = 0.024(f_c')^{2/3} (1 + \sqrt{p_w})(1 + 3.33r/d) \cdot b_w \cdot d / [1 + (a/d)^2] \quad (2)$$

ここに  $a$  : せん断スパン(cm)  $d$  : 有効高さ(cm)  $b_w$  : ウェブ幅(cm)  
 $f_c'$  : コンクリート圧縮強度(Mpa)  $P_w$  : 引張鉄筋比(%)  $r$  : 支圧板幅(cm)

まず、計算の「STEP1」として最初に発生した斜ひびわれは、せん断スパン  $a_{1.0.0.0}$  において伸展したものと仮定し、せん断スパン比に  $a_{1.0.0.0} / d$  をおき、斜引張耐力式(1)によって算出( $V_{c, \text{long}}$ : 表-4 参照)した。図-5は、その関係を示したもので縦軸には計算値/実験値をとっている。Aタイプで破壊したばかりにおける計算値は、ばらつきがあるものの計算値/実験値はほぼ1付近にあり、妥当な評価を与えているものと思われる。BタイプおよびCタイプで破壊したばかりでは、その算定値は実験値を下回っているものが多く、最初の斜ひびわれが生じてから耐力が増加することがうかがえる。

ここで、耐力の増加するはりについて、実測されたひずみを基にその破壊について考えてみた。図-6は、Bタイプで破壊した供試体「9203」のコンクリートの主ひずみと鉄筋の軸方向ひずみを示したものである。斜ひびわれ発生前におけるコンクリートの主圧縮ひずみは、各々のせん断スパンで反曲点から荷点、反曲点から支点に向かって生じている。

しかし、斜ひびわれ発生後では、主圧縮ひずみは荷点から支点の方向へと変化し、その値も著しく大きくなっている。また、主鉄筋の軸方向ひずみは、上側鉄筋に着目すれば、斜ひびわれの

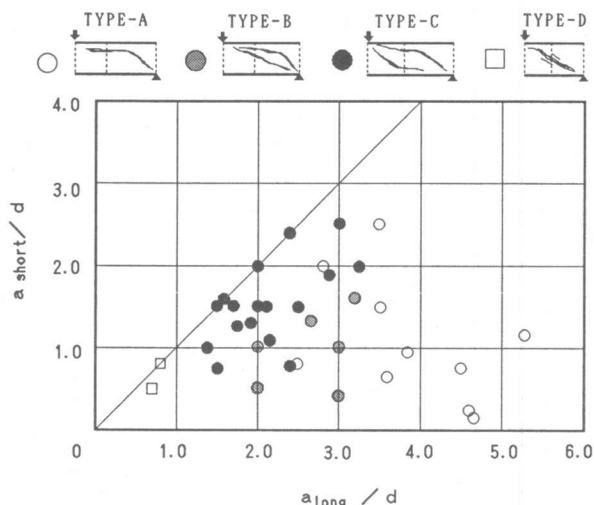


図-4 せん断スパン比と破壊形式の関係

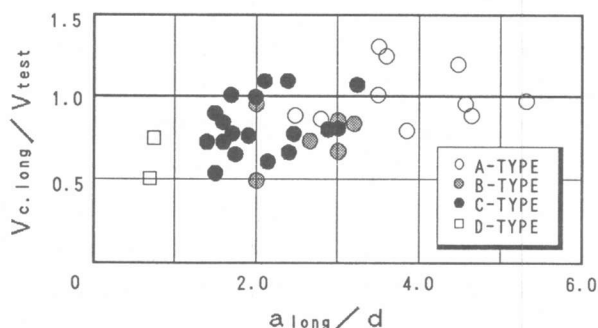


図-5 せん断スパン  $a_{\text{long}}$  の斜引張耐力

進行によって荷点付近にまで大きな引張ひずみが発生している。この結果から、BおよびCタイプの破壊について、終局に至るまでの過程を次のように考えてみた。図-7は、その概念を描いたものであるが、せん断スパン  $a_{long}$  に最初の斜ひびわれが生じてからは、耐荷機構が変化し、いわゆるタイドアーチ機構に移行するものと思われる。斜ひびわれによって分割されたはりには、ひびわれを跨ぐ鉄筋がタイの役割をし、ひびわれに沿って圧縮斜材が形成される。Bタイプの破壊は、最初の斜ひびわれによる破壊に対して圧縮斜材が補佐的な役割をしており、最終的には圧縮斜材の崩壊とともに部材としての耐力が失われる。Cタイプの破壊は、圧縮斜材の形成によって力の釣合が保たれている状態において、新たに  $a_{short}/d$  における斜ひびわれの発生によって部材の均衡が崩れてしまう。これらの仮定に基づき、Bタイプ、Cタイプの破壊に対するせん断耐力については、「STEP 2」として次の試算を行った。

① 圧縮斜材の耐力は、せん断スパン比に  $(a_{long} + a_{short})/d$  をとり、ディープビームのせん断耐荷力算定式(2)を用いて算定する ( $V_{w.add}$ : 表-4 参照)。

② せん断スパン  $a_{short}$  における斜ひびわれの発生に対しては、せん断スパン比に  $a_{short}/d$  をとり、斜引張耐力式(1)によって算定する ( $V_{c.short}$ : 表-4 参照)。最終的に、部材としてのせん断耐力は、 $(V_{c.long} + V_{w.add})$  と  $(V_{c.short})$  のうち小さい方を適用する。2つの算定値は、前者が破壊タイプB、後者が破壊タイプCに対応することになる。

以上の試算の結果を図-8に示す。図は実験値との比較を示したもので、少数の供試体を除いてほとんどの供試体が、実際の破壊形式と計算上の破壊形式が一致しており、また耐力算定値と実験値の対応も良好である。一致していない供試体のうち、「9103」と「8617」は実験上Aタイプで破壊しているが、最初の斜ひびわれ発生後タイドア

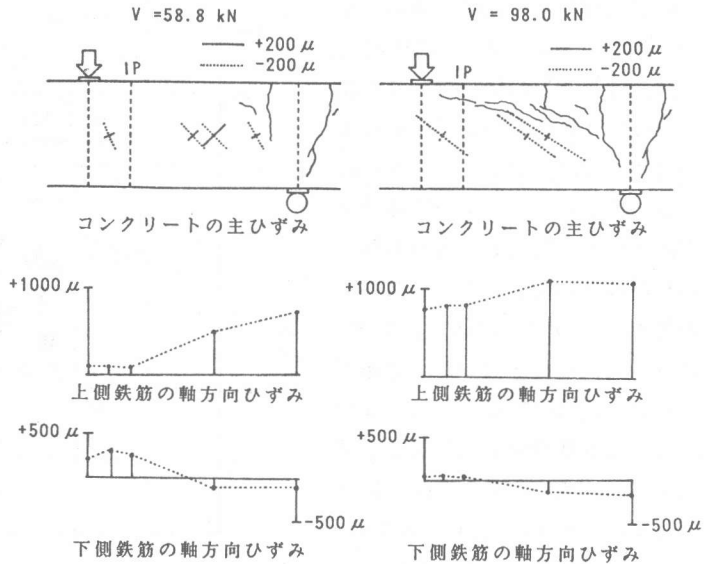


図-6 コンクリートの主ひずみ及び鉄筋軸方向ひずみ

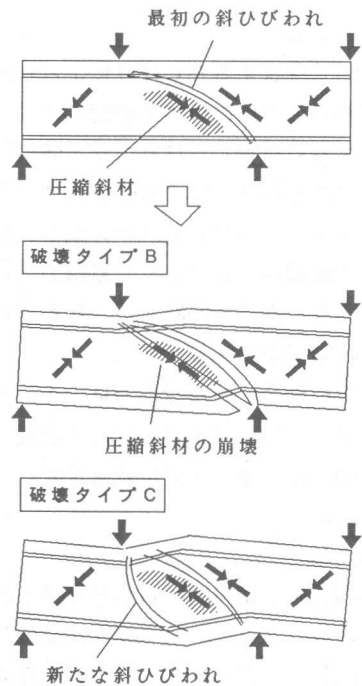


図-7 破壊形式

ーチ機構に移行する途中で破壊した  
ものと思われる。また、「9102」と  
「8615」は2本目の斜ひびわれが現  
れているが、最初の斜ひびわれによ  
る斜引張耐力から増加していない。  
これは、前述のタイドアーチ機構が  
不安定となり、偶発的に最初の斜ひ  
びわれが破壊したのかもしれない。

破壊タイプDの供試体は、2体  
(9201、9106)しかないが、破壊形  
式ABCの破壊性状とはかなり異な  
る。このような破壊を引き起こす基  
準は  $a_{long}/d$  によるものか、ある  
いは  $(a_{long} + a_{short})/d$  の大  
きさによるものかは明かでないが、  
2体とも計算値  $V_{w, add}$  が耐力の80  
%程度の値を示している。

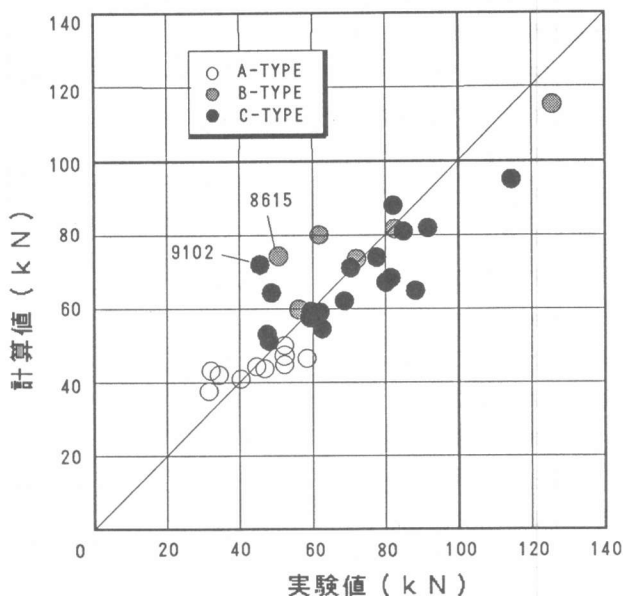


図-8 せん断耐力

#### 4. まとめ

張出しを有するRCはりによるせん断実験から、反曲点をもつはりのせん断耐力と発生した斜ひびわれの関係について検討し、次の結果を得た。

- 1) 反曲点を有するはりのせん断破壊形式は、反曲点を挟む2つのせん断スパンの大きさによってある程度予想することができる。
- 2) 大きい方のせん断スパン比が、3.5以上であるときにはそのせん断スパンに生じた斜ひびわれで破壊が起こり、せん断耐力は斜引張耐力式による算定値に近い値を示す。
- 3) 大きい方のせん断スパン比が、3.5以下であるときは新たな斜ひびわれが発生するまでせん断耐力が増加する。
- 4) その場合、せん断耐力は小さい方のせん断スパンにおける斜引張耐力か、大きい方のせん断スパンにおける斜引張耐力と載荷点と支点をを結んで形成される圧縮斜材のせん断耐力の和の小さいほうが近い値を示す。

#### 参考文献

- 1) 古内仁、上田多門、角田与史雄：反曲点を有する鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷機構について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 14、No. 2、pp. 233-238、1992. 6
- 2) 古内仁、角田与史雄：張出しを有するRCはりのせん断強度に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 9、No. 2、pp. 341-346、1987. 6
- 3) 二羽淳一郎、山田一字、横沢和夫、岡村甫：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の評価、土木学会論文集、Vol. 372、pp. 167-176、1986. 8
- 4) 二羽淳一郎：FEM解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式、第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、pp. 119-128、1983. 10