

V-10

鉄筋コンクリート部材のせん断耐力に及ぼす反曲点の影響について

北海道大学 正員 古内 仁
北海道大学 正員 林川 俊郎
北海道大学 正員 角田与史雄

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物の設計では、構造物に作用する外力によって生ずる様々な破壊モードに対して、その安全に対して検討しなければならない。なかでも防止されなければならない破壊形式の1つとしてせん断破壊があげられる。実際には曲げモーメントとせん断力との組合せ応力による破壊であり、構造物の形状や作用する外力の位置などによって複雑な応力が生ずる。

本研究は、その中の単純な例としてせん断力が一定の区間でありながら正負の曲げモーメントが混在する部材を対象として、その反曲点がせん断耐力に及ぼす影響を調べることを目的としている。既往の研究¹⁾では、反曲点を支点とみなすことによって単純ばりと同様に算定できるとされている。そこで本研究の実験においては、張出しばりを用い、反曲点から端部荷重点までに単純ばりと同一の曲げモーメント分布が作用するようにし、両者のせん断耐力の比較検討を行うものである。

2. 実験概要

本研究では、図-1に示す2種類の実験を行った。実験Aは、単純ばり1点荷重で左側のせん断スパン ($l_1=a$) を試験区間とし、右側 (l_2) は破壊しないようせん断補強を行った。実験Bは、張出しを有したはりを用いて行い、負の曲げモーメント分布が実験A (供試体ナンバーに対応) の曲げモーメント分布と同一となるよう荷重を行った。このとき、実験Aの左側支点が実験Bの反曲点と対応している。また、Aと同様試験区間 (a_2) 以外は破壊しないようせん断補強を行った。供試体の断面は、高さ25cm、幅15cmの矩形断面とし、上下対称となるように鉄筋 (2D25) を配置した。有効高 d は20cmで、引張鉄筋比は3.38%である (図-2参照)。変数はせん断スパン比 a/d とし、1.5~3.5の範囲とした。なお、各実験の供試体寸法およびスパン長は、表-1、2のとおりである。

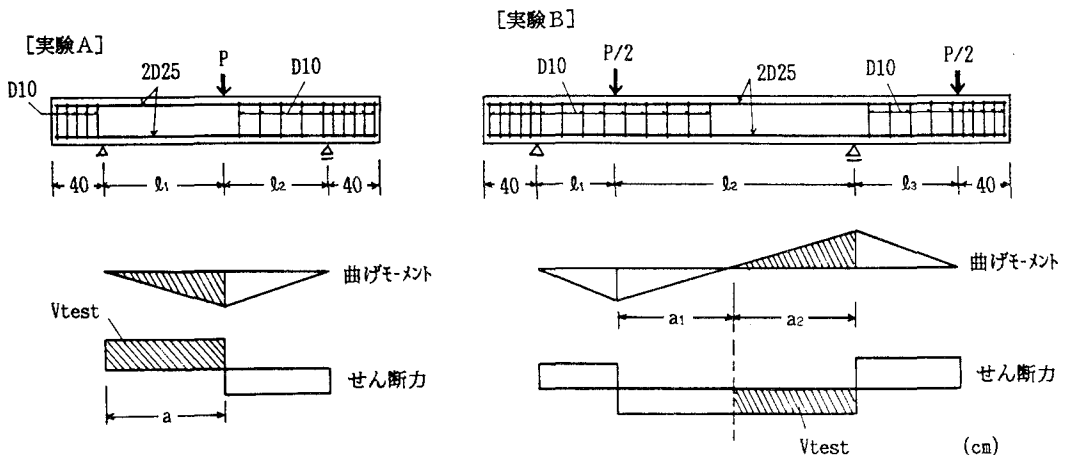


図-1 供試体 (実験A, B)

EFFECT OF CONTRAFLEXURE POINT ON SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE BEAMS

by Hitoshi FURUUCHI, Toshiro HAYASHIKAWA and Yasuhiko SATOH

表-1 供試体寸法 (実験A)

No.	l_1 (cm)	l_2 (cm)	a/d
09	30	30	1.5
03	40	20	2.0
02	50	30	2.5
04	60	30	3.0
05	70	35	3.5

表-2 供試体寸法 (実験B)

No.	l_1 (cm)	l_2 (cm)	l_3 (cm)	a_1 (cm)	a_2 (cm)	a_2/d
09	30	40	30	10	30	1.5
03	30	70	20	30	40	2.0
02	30	70	30	20	50	2.5
04	30	90	30	30	60	3.0
05	30	100	35	30	70	3.5

使用した鉄筋は異形棒鋼SD35であり、また、せん断補強にはD10スターラップを使用した。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 300kgf/cm^2 とし、試験前日まで湿布養生を行った。

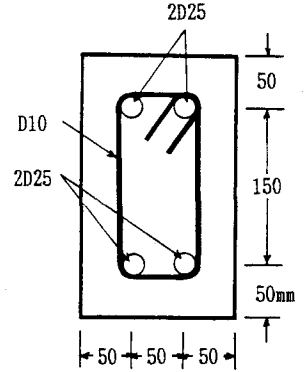


図-2 供試体断面

3. 実験結果および考察

3.1 破壊形式

コンクリート圧縮強度およびせん断耐力は表-3、4に示すとおりである。実験Aにおいては、No.09($a/d=1.5$)、No.03($a/d=2.0$)、No.02($a/d=2.5$)がせん断圧縮破壊となり、No.04($a/d=3.0$)、No.05($a/d=3.5$)が斜引張せん断破壊となった。

実験Bにおいては、図-3に示すように No.09($a_2/d=1.5$)のみがせん断圧縮破壊となった。この場合のせん断圧縮破壊は、載荷点から支点に向かって直線的に圧縮ストラットが形成されており反曲点の存在は無関係と見ることができる。一方、他の供試体はすべて斜引張せん断破壊であるが、No.05($a_2/d=3.5$)のはりを除いては斜ひびわれが2本出現して破壊に至った。この2本の斜ひびわれの成長過程を供試体 No.02を例にして図-4に示す。

- ①支点上(負の曲げモーメントが存在する)に、曲げひびわれが発生する。
- ②せん断スパン a_2 において斜ひびわれが発生し、載荷点(正の曲げモーメントが存在する)に向かってダウ

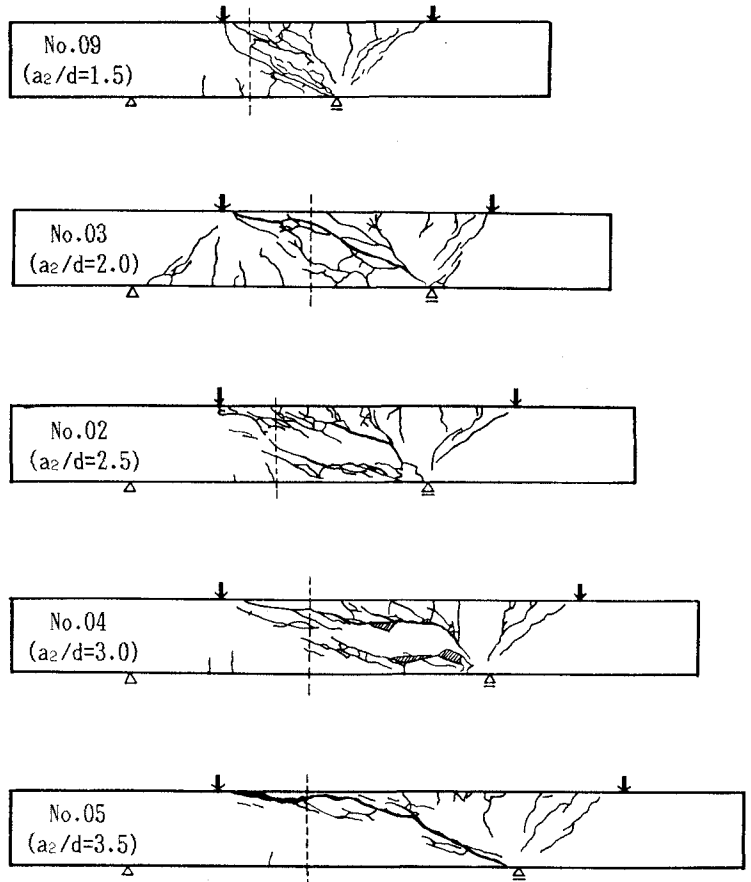


図-3 実験Bの破壊状況

エルびびわれが進展する。

③上記の斜びびわれの幅が大きくなる。

④破壊直前にせん断スパン a_1 に斜びびわれが出現し、斜引張せん断破壊に至る。

ただし、せん断スパン a_1 における斜びびわれについては、スターラップを配置していたため完全な破壊には至っていない。

3.2 せん断耐力の評価
実験Aのような単純ばりに対しては、通常二羽ら²⁾³⁾のせん断耐力式(1)(2)を用いて評価することができる。

供試体 No.B02

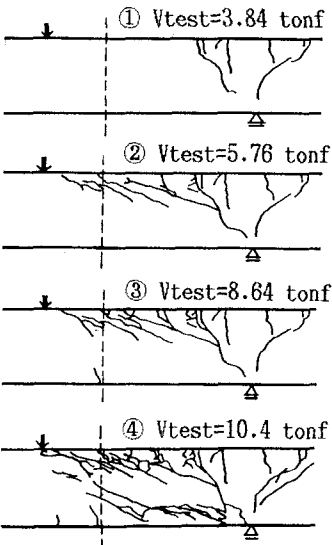


図-4 斜びびわれの発達状況

表-3 実験結果(実験A)

No.	圧縮強度 (kgf/cm ²)	破壊荷重 P_b (tonf)	せん断耐力 V_{test} (tonf)	破壊形式
09	303	33.6	16.8	せん断圧縮
03	294	28.6	9.53	せん断圧縮
02	304	23.0	8.63	せん断圧縮
04	328	17.1	5.70	斜引張
05	330	17.6	5.87	斜引張

表-4 実験結果(実験B)

No.	圧縮強度 (kgf/cm ²)	破壊荷重 P_b (tonf)	せん断耐力 V_{test} (tonf)	破壊形式
09	311	36.0	15.4	せん断圧縮
03	320	48.0	12.0	斜引張
02	335	34.7	10.4	斜引張
04	323	33.8	8.45	斜引張
05	289	20.4	5.10	斜引張

はりのせん断耐力

$$V_c = 0.94(p_w \cdot f_c')^{1/3} (d/100)^{-1/4} [0.75 + 1.4/(a/d)] b_w \cdot d \quad \dots (1)$$

ディーブビームのせん断耐力

$$V_w = 0.53(f_c')^{2/3} (1 + \sqrt{p_w}) (1 + 3.33r/d) b_w \cdot d [1 + (a/d)^2] \quad \dots (2)$$

ここに

- f_c' : 圧縮強度(kgf/cm²) a : せん断スパン(cm)
 b_w : ウェブ幅(cm) d : 有効高(cm)
 A_s : 引張鉄筋断面積(cm²) r : 載荷板幅(cm)
 $p_w = 100 \cdot A_s / (b_w \cdot d)$

表-5 せん断耐力の計算結果(実験A)

No.	V_w (tonf)	$\frac{V_w}{V_{test}}$	V_c (tonf)	$\frac{V_c}{V_{test}}$
09	11.5	0.68	7.16	—
03	7.31	0.77	6.10	—
02	5.16	0.60	5.57	0.65
04	3.93	—	5.31	0.93
05	2.98	—	5.03	0.86

上記の2つの式は、それぞれ斜引張せん断破壊、せん断圧縮破壊に対する実験式である。供試体のせん断耐力の算定のあたっては、2つの算定値の大きい方を採用することによって破壊形式および耐力値が求まる。

この方法によって、算定した結果を表-5に示す。供試体No.02は、 V_c 値、 V_w 値が近い値となっており計算上の破壊は、混合型の形式と推定することができる。この No.02を含めたせん断スパン比 a/d の小さな供試体 (No.09, No.03) の算定値は、実験値に比べていずれも小さな値となっており、その比は平均で0.68となった。これは、本実験に用いた供試体が復鉄筋断面であり、3.38%の高鉄筋比であることから、断面圧縮部における

表-6 せん断耐力の計算結果(実験B)

No.	V_w (tonf)	$\frac{V_w}{V_{test}}$	V_c (tonf)	$\frac{V_c}{V_{test}}$
09	7.59	0.49	7.22	—
03	2.92	—	6.28	0.52
02	3.01	—	5.76	0.55
04	1.83	—	5.28	0.62
05	1.39	—	4.81	0.94

強度が非常に大きくなったためと考えられる。すなわち、本実験の供試体におけるせん断圧縮耐力は単鉄筋断面の耐力に対して約1.5倍程度の増加がある。一方、斜引張せん断破壊をした供試体No.04、No.05では、算定値と実験値の比が各々0.93と0.86であり、圧縮鉄筋の影響は見られない。この結果、斜引張せん断耐力は復鉄筋断面のほりも単鉄筋断面と同様に評価できることがわかった。

実験Bのせん断耐力については、既往の研究¹⁾において次の仮定を行っている。

- ①破壊は、反曲点を境に形成される2つのせん断スパン（ a_1 と a_2 ）のいずれか大きい方に生ずる斜ひびわれに支配されると仮定し、そのせん断スパンを用いて耐力を算定する。
- ②耐力の算定は、 V_c による計算値と V_w による計算値の大きい方を採用する。

しかしながら、ここでは前述の破壊形式を参考に、せん断圧縮破壊した供試体に対してはせん断スパンを (a_1+a_2) とした V_w 値、斜引張せん断破壊した供試体に対してはせん断スパンを a_1 （ $>a_2$ ）とした V_c 値を算定した。その結果を表-6に示す。唯一圧縮破壊した供試体No.09の V_w/V_{test} は、0.49であり、前述の圧縮鉄筋の効果による強度増加を考えれば、的はずれてはいないものと思われる。また、斜引張破壊した供試体についてはNo.05を除いて算定値は非常に小さく実験値の5～6割程度でしかない。これは、破壊がせん断スパン a_2 の斜ひびわれにだけによって破壊するのではなく、もう一方のせん断スパン a_1 の斜ひびわれとの関連を示唆するものであると考えられる。そこで、反曲点を有するはりにおいては、これらのことを踏まえてせん断破壊パターンの仮定を行ってみることにした。図-5は、その仮定を模式的に表したもので、

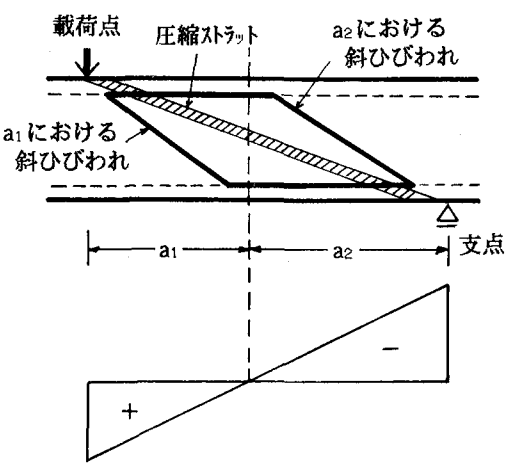


図-5 破壊ひびわれの概念

表-7 せん断スパンおよび実験結果（既往の研究データ）

No.	圧縮強度 kgf/cm ²	せん断スパン a_1 (cm)	a_2 (cm)	γ	せん断耐力 V_{test} (tonf)
01	304	64.3	63.7	1.00	5.314
03	375	2.8	93.2	0.03	5.358
04	300	55.4	40.6	0.74	7.493
05	294	32.2	31.8	1.00	8.241
06	336	22.3	105.7	0.21	4.580
07	331	71.6	56.4	0.79	5.955
08	300	18.9	77.1	0.25	5.958
09	299	4.6	91.4	0.05	4.722
10	319	15.5	48.5	0.32	9.533
11	266	29.8	34.2	0.88	8.315
12	284	40.0	40.0	1.00	6.133
13	284	26.6	53.4	0.50	7.372
15	252	48.0	48.0	1.00	4.906
16	252	32.0	64.0	0.50	5.741
17	259	32.0	32.0	1.00	9.052
18	259	21.4	42.6	0.50	9.396
19	269	38.4	57.6	0.67	6.344
20	269	25.6	38.4	0.67	7.953

表-8 計算結果（既往の研究データ）

No.	V_{c1} (tonf)	V_{c2} (tonf)	$V_c = \frac{V_{c1}+V_{c2}}{2}$	V_c/V_{test}
01	5.04	5.04	5.04	0.95
03	49.1	4.79	26.9	5.02
04	5.32	6.10	5.71	0.76
05	6.82	6.86	6.84	0.83
06	8.82	4.47	6.65	1.45
07	5.00	5.46	5.23	0.88
08	4.72	9.45	7.09	1.19
09	28.9	4.47	16.7	3.54
10	11.1	5.74	8.40	0.88
11	6.88	6.38	6.63	0.80
12	6.03	6.03	6.03	0.98
13	5.30	7.50	6.40	0.87
15	5.33	5.33	5.33	1.09
16	6.50	4.75	5.63	0.98
17	6.56	6.56	6.56	0.72
18	8.30	5.68	6.99	0.74
19	6.04	5.05	5.55	0.88
20	7.53	6.04	6.79	0.85

①斜ひびわれは、せん断スパン a_1 および a_2 の範囲で各々独立して発生する。

②せん断圧縮破壊を起そうとする圧縮ストラットは載荷点から支点に向かって形成される。

この仮定により、耐力の算定にあたっては、斜引張破壊に対して両スパンの斜引張耐力の平均値 $\{V_c(a=a_1) + V_c(a=a_2)\} / 2$ とし、せん断圧縮破壊に対して $V_w(a=a_1+a_2)$ とする。ここでは、本実験の供試体数が少ないので、既往の研究データ(表-7参照)を用いて、計算を行ってみることにした。ただし、これらの供試体では、せん断スパン a_1 、 a_2 のいずれもせん断補強を行っていない。計算結果は、表-8に示すとおりであるが、若干の供試体を除いては比較的良好な値を得

ている。不適切な値となっている供試体は、2つのせん断スパンのうち一方が他方に比べて非常に小さな場合に限られるようである。そこでこの傾向を明らかにするため、供試体のせん断スパンの長さの比 $\gamma = (\text{小さいせん断スパン} / \text{大きいせん断スパン})$ をとり、計算結果との相関を調べてみた。図-6に見られるように、 γ の値がおおよそ0.3を境に大きい供試体では良く一致し、小さくなっていくに従って計算値がはずれていく傾向がみられる。この4つの供試体においては、大きい方のせん断スパンに生ずる斜ひびわれが卓越し、破壊に対して支配的にな

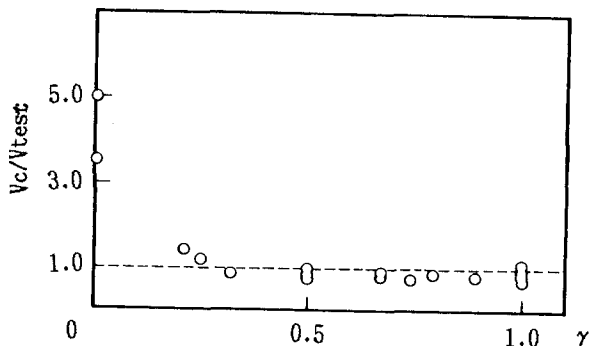


図-6 γ と計算値の関係

ると考えて、耐力はそのせん断スパンのみを用いて算定することにした。その結果は次のとおりである。

No.03	$V_c = V_{c2} = 4.79 \text{ tonf}$	$V_c/V_{test} = 0.89$
No.04	$V_c = V_{c2} = 4.47 \text{ tonf}$	$V_c/V_{test} = 0.98$
No.08	$V_c = V_{c1} = 4.72 \text{ tonf}$	$V_c/V_{test} = 0.79$
No.09	$V_c = V_{c2} = 4.47 \text{ tonf}$	$V_c/V_{test} = 0.93$

以上の結果から、 γ の値が大きいものに対しては2つのせん断スパンにおける耐力の平均値、小さいものに対しては大きい方のせん断スパンにおける耐力とすることができる。また、 γ の境界値については、鉄筋比、コンクリート強度、構造物の寸法効果等の影響が考えられるが、0.3付近という数値は妥当なものと考えられる。

今回行った実験Bについて、この方法を適用した結果を表-9に示す。その結果を考察すると、No.05については若干大きめとなり V_{c2} のみの算定値による方が一致している。他の供試体についてはいずれも算定値が小さく出ており、せん断スパン a_1 におけるせん断補強の効果を考慮しなければならないと思われる。その効果については、トラス理論を用いて算定すると、 $V_s = 9.95 \text{ tonf}$ となった。せん断スパン a_1 の耐力として($V_{c1} + V_s$)をとり、さらに a_2 の耐力と平均をとってみることにした(表-9参照)。その結果、No.03は、実

表-9 実験Bの計算結果

No.	V_{c1}	V_{c2}	γ	$\frac{V_{c1}+V_{c2}}{2}$	$\frac{(V_{c1}+V_s)+V_{c2}}{2}$
03	7.29	6.28	0.75	6.80 (0.57)	11.8 (0.98)
02	9.45	5.76	0.40	7.61 (0.73)	12.6 (1.21)
04	7.31	5.28	0.50	6.30 (0.75)	11.3 (1.33)
05	7.04	4.81	0.43	5.93 (1.18)	10.9 (2.14)

()内は、実験値との比

験値と一致し、No.02、No.04については補強効果を過大に見積ることになった。このように一部分だけを補強した場合についてはその効果の割合が一定ではなく、複雑な挙動となるようである。これらを定量的に評価することは現時点では困難であるが、上記の算定方法による妥当性を示すことができたと思われる。

4. まとめ

- (1) 復鉄筋断面のはりにおけるせん断圧縮破壊においては、断面圧縮部の強度増加により耐力が割増される。
- (2) 反曲点を有するはりにおいては、反曲点を境に二分されるせん断スパンの長さの比（小さいせん断スパン / 大きいせん断スパン）によって破壊形式が異なる。また、その境界値は、0.3付近である。
- (3) 上記の比が大きい場合には、2つのせん断スパンに独立して斜ひびわれが発生し、せん断耐力は両者における耐力の平均値となる。
- (4) 上記の比が小さい場合には、大きい方のせん断スパンに生じた斜ひびわれに支配され、せん断耐力はそのせん断スパンにおける耐力となる。
- (5) 反曲点を有するはりがせん断圧縮破壊するときは、載荷点から支点に向かって圧縮ストラットが形成され、せん断耐力はその距離をせん断スパンに用いて算定できる。

謝辞：本実験を行なうにあたり、北海道大学の木村 勉技官、近藤千晴氏ならびに構造工学講座学生諸君の多大な助力を得た。ここに記して深甚なる謝意を表します。また、本研究の一部は、平成2年・3年度文部省科学研究費・一般研究(C)によるものであることを付記する。

参考文献

- (1) 古内仁、角田与史雄：張出しを有するRCば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第9巻2号、P.341-346、1987
- (2) 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ばりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集 第372号/V-5、P.167-176、1986
- (3) 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回せん断コロキウム論文集、P.119-126、1983