

論文

[2028] 反曲点を有する鉄筋コンクリートはりのせん断耐力について

正会員 〇古内 仁 (北海道大学土木工学科)

正会員 角田与史雄 (北海道大学土木工学科)

正会員 林川 俊郎 (北海道大学土木工学科)

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物の設計において、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る。現在、土木学会コンクリート標準示方書[1]では、せん断力に対する安全性の検討に対して耐力評価式を採用している。この評価式は、二羽ら[2]によって行われた単純ばりの実験から導かれた実験式が元になっており、その算定値は実験値と良い対応を示すことが知られている。実際の土木構造物では、連続はりやラーメン構造、あるいは地中箱型構造等のようにその形状や作用する外力の位置によって複雑な応力が生ずる。

本研究は、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存在し反曲点を有する部材を対象として、そのせん断耐力を調べることを目的としている。実験においては、張出しばりを用い、反曲点から端部載荷点までに単純ばりと同じの曲げモーメント分布が作用するように載荷し、両者のせん断耐力および破壊形態の比較を行い、また、反曲点を支点と見なしたときに上記の単純ばりのせん断耐力式の適用についても検討を行ってみることにした。

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点載荷で左側のせん断スパン($l_1=a$)を試験区間とし、右側のせん断スパン(l_2)は破壊しないようスターラップ(D10-10cm間隔)により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載荷を行った。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

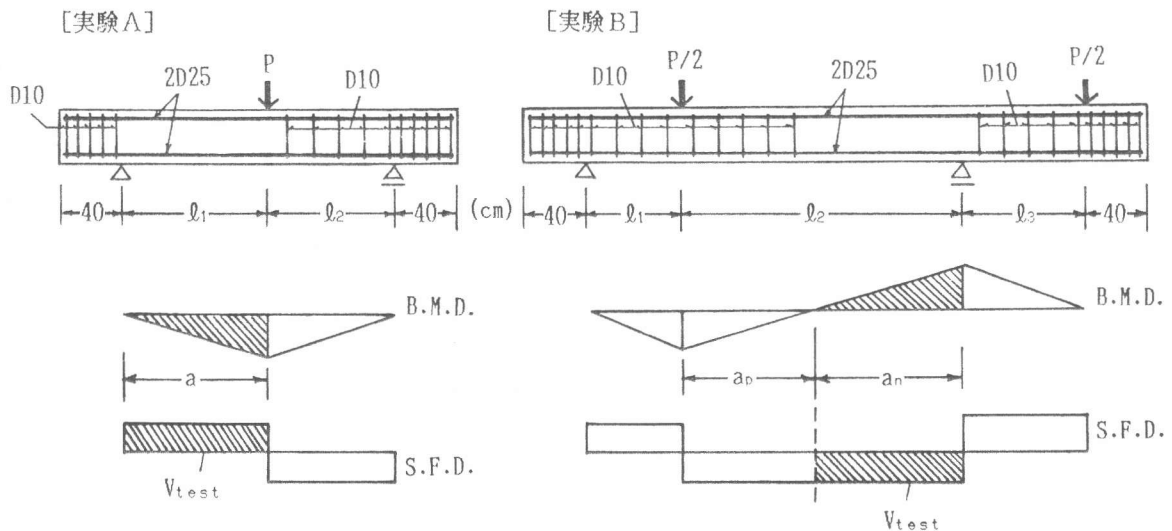
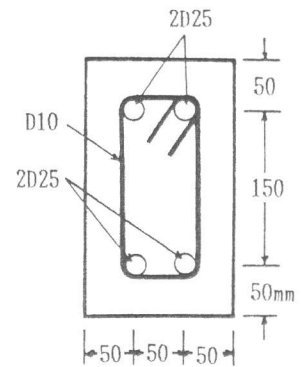


図-1 供試体の形状寸法

表-1 供試体寸法 (実験A) 表-2 供試体寸法 (実験B)

No.	l_1 (cm)	l_2 (cm)	a/d	No.	l_1 (cm)	l_2 (cm)	l_3 (cm)	a_n (cm)	a_n (cm)	a_n/d
03	40	20	2.0	03	30	70	20	30	40	2.0
02	50	30	2.5	02	30	70	30	20	50	2.5
04	60	30	3.0	04	30	90	30	30	60	3.0
05	70	35	3.5	05	30	100	35	30	70	3.5



間 (a_n) 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 図-2 供試体断面配置した。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、2.0~3.5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および2に示すとおりである。使用した鉄筋は異形棒鋼SD35であり、降伏強度はD25が3741kgf/cm²、D10が4013kgf/cm²である。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/cm²とし、試験前日まで湿布養生を行った。

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 $V_{t,est}$ (tonf)	破壊形式
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 $V_{t,est}$ (tonf)	破壊形式
03	230	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

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.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($a/d=3.5$)が斜引張破壊となった。

実験Bにおいては、図-3に示すように供試体はすべて斜引張せん断破壊であるが、No.05($a_n/d=3.5$)のはりを除いては破壊の原因となった斜ひびわれが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

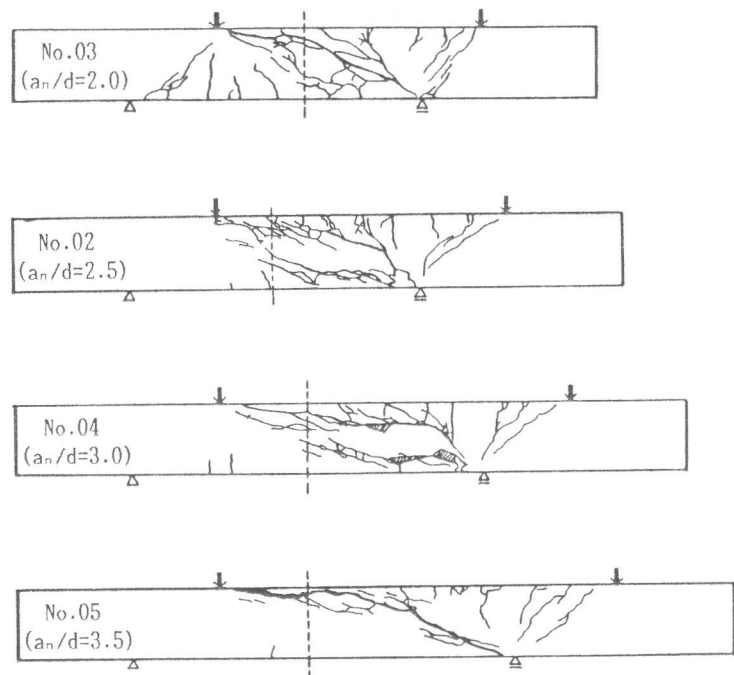


図-3 実験Bの破壊状況

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_n において斜ひびわれが発生し、上側の鉄筋附近で載荷点（正の曲げモーメントが存在する）に向かってひびわれが進展する。
 - ③上記の斜ひびわれの幅が大きくなる。
 - ④破壊直前にせん断スパン a_o に斜ひびわれが出現し、斜引張せん断破壊に至る。
- ただし、せん断スパン a_o における斜ひびわれについては、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。

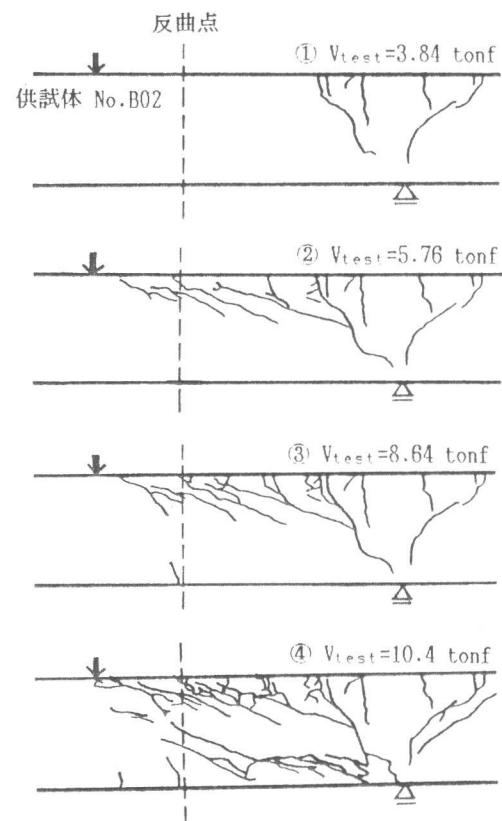


図-4 斜ひびわれの発達状況

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)および(2)を用いて評価することができる。以下の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評価式であり、はり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とされている。

はりのせん断耐力

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

ディープビームのせん断耐力

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

ここに

- | | | |
|-------------------------------------|------------------|---------------------------------------|
| f_c' : 圧縮強度(kgf/cm ²) | 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(cm ²) | r : 載荷板幅(cm) | $p_w = 100 \cdot A_s / (b_w \cdot d)$ |

この方法によって、算定した実験Aの結果を表-5に示す。供試体 No.02 および No.03 のせん断圧縮耐力算定値は、実験値に比べていずれも小さな値となっており、 V_{test}/V_w の比は平均で 1.49 となった。これは、本実験に用いた供試体が複鉄筋断面であり、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。

表-5 せん断耐力の計算結果 (実験A)

No.	V_w (tonf)	$\frac{V_{test}}{V_w}$	V_c (tonf)	$\frac{V_{test}}{V_c}$
03	7.31	1.30	6.10	-
02	5.16	1.67	5.57	(1.55)
04	3.93	-	5.31	1.07
05	2.98	-	5.03	1.17

表-6 せん断耐力の計算結果 (実験B)

No.	V_w (tonf)	$\frac{V_{test}}{V_w}$	V_c (tonf)	$\frac{V_{test}}{V_c}$
03	7.74	(1.55)	6.28	1.92
02	5.50	-	5.76	1.81
04	3.89	-	5.28	1.60
05	2.73	-	4.81	1.06

一方、斜引張せん断破壊をした供試体 No. 04、No.05 では、実験値と算定値との比が各々 1.07 と 1.17 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複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[4]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_p と a_n) 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。

この方法により算出した結果は、表-6に示すとおりであるが、No.03の破壊形態が異なること、また、No.05を除いては算定値が実験値を大きく下回っているようである。これは、破壊がせん断スパン a_n の斜ひびわれ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_p 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、前述の破壊形式を参考にせん断破壊パターン of 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、斜ひびわれはせん断スパンの a_p と a_n の範囲で各々独立して発生するものとした。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

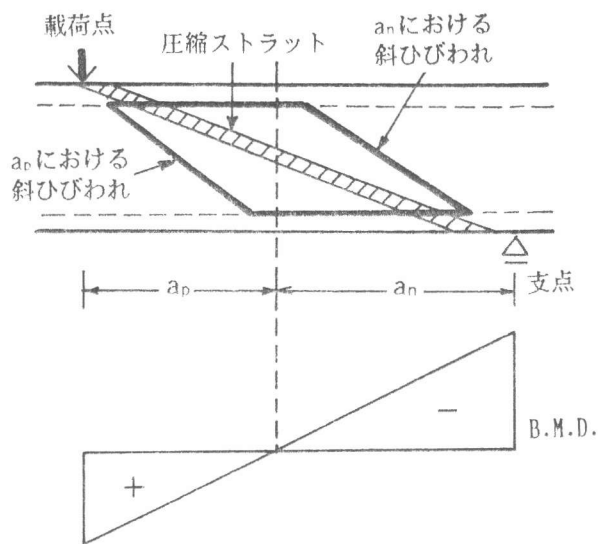


図-5 破壊ひびわれの概念

表-7 実験結果 (既往の研究データ)

SPECIMEN No.	せん断スパン		γ	圧縮強度 kgf/cm^2	せん断耐力 V_{test} (tonf)
	a_p (cm)	a_n (cm)			
8503	64.3	63.7	0.99	304	5.31
8505	2.8	93.2	0.03	375	5.36
8506	55.4	40.6	0.74	300	7.49
8507	32.2	31.8	0.99	294	8.24
8508	22.3	105.7	0.21	336	4.58
8510	71.6	56.4	0.79	331	5.96
8511	18.9	77.1	0.25	300	5.96
8512	4.6	91.4	0.05	299	4.72
8513	15.5	48.5	0.32	319	9.53
8514	29.8	34.2	0.88	266	8.32
504A	40.0	40.0	1.00	284	6.13
504B	26.6	53.4	0.50	284	7.37
504D	48.0	48.0	1.00	252	4.91
504E	32.0	64.0	0.50	252	5.74
504F	32.0	32.0	1.00	259	9.05
504G	21.4	42.6	0.50	259	9.40
504H	38.4	57.6	0.67	269	6.34
504I	25.6	38.4	0.67	269	7.95

平均値 $\{V_{c,p}(a=a_p)+V_{c,n}(a=a_n)\} / 2$ とした。
 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[4]（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_p 、 a_n 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

表-8 計算結果 (既往の研究データ)

SPECIMEN No.	$V_{c,p}$ (tonf)	$V_{c,n}$ (tonf)	$V_c = \frac{V_{c,p}+V_{c,n}}{2}$	$\frac{V_{test}}{V_c}$
8503	5.04	5.04	5.04	1.05
8505	49.1	4.79	26.9	0.20
8506	5.32	6.10	5.71	1.31
8507	6.82	6.86	6.84	1.20
8508	8.82	4.47	6.65	0.69
8510	5.00	5.46	5.23	1.14
8511	4.72	9.45	7.09	0.84
8512	28.9	4.47	16.7	0.28
8513	11.1	5.74	8.40	1.13
8514	6.88	6.38	6.63	1.25
504A	6.03	6.03	6.03	1.02
504B	5.30	7.50	6.40	1.15
504D	5.33	5.33	5.33	0.92
504E	6.50	4.75	5.63	1.02
504F	6.56	6.56	6.56	1.38
504G	8.30	5.68	6.99	1.34
504H	6.04	5.05	5.55	1.14
504I	7.53	6.04	6.79	1.17

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てみた。その
 結果は次のとおりであり、実験値と良く一致した。

No.8505	$V_c = V_{c,n} = 4.79$ tonf	$V_{test}/V_c = 1.12$
No.8508	$V_c = V_{c,n} = 4.47$ tonf	$V_{test}/V_c = 1.02$
No.8511	$V_c = V_{c,p} = 4.72$ tonf	$V_{test}/V_c = 1.26$
No.8512	$V_c = V_{c,n} = 4.47$ tonf	$V_{test}/V_c = 1.06$

以上の結果から、 γ の値が大きいもの
 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。

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 $V_{c,n}$ 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_p 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

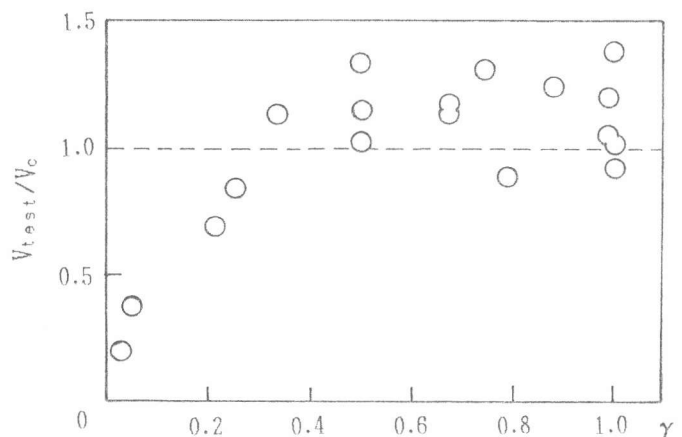


図-7 γ と計算値の関係

表-9 実験Bの計算結果

No.	$V_{c,p}$	$V_{c,n}$	γ	$\frac{V_{c,p}+V_{c,n}}{2}$	$\frac{(V_{c,p}+V_s)+V_{c,n}}{2}$
03	7.29	6.28	0.75	6.80 (1.76)	11.8 (1.02)
02	9.45	5.76	0.40	7.61 (1.36)	12.6 (0.83)
04	7.31	5.28	0.50	6.30 (1.34)	11.3 (0.75)
05	7.04	4.81	0.43	5.93 (0.86)	10.9 (0.47)

()内は、実験値/計算値

の効果については、トラス理論を用いて算定すると、 $V_s = 9.95 \text{ tonf}$ となり、せん断スパン a_0 の耐力として $(V_{c,p} + V_s)$ をとった。さらにはりの耐力については、 a_n の耐力との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。

4. まとめ

- (1) せん断圧縮破壊においては、圧縮鉄筋により耐力が増加する傾向がある。
- (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算定値の平均値とみなすことができる。
- (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することができる。

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) 土木学会コンクリート標準示方書「設計編」、1986
- 2) 二羽淳一郎ほか：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集、Vol.372、V-5、pp.167-176、1986.8
- 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.119-126、1983.10
- 4) 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