

論文

[2039] 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

正会員 〇古内 仁 (北海道大学土木工学科)

正会員 上田 多門 (北海道大学土木工学科)

正会員 角田 史雄 (北海道大学土木工学科)

1. まえがき

RC構造物において、連続ばりの支点付近やラーメン構造物の隅角部付近では、反曲点を持つような曲げモーメント分布となり、それらの部材のせん断耐力に影響を与えている。このような場合のせん断破壊性状は複雑であり、反曲点が存在するせん断スパン内には斜めひびわれが複数本発生するケースが多くみられる。

現在、土木学会コンクリート標準示方書[1]における棒部材のせん断耐力に対しては、二羽ら[2]によって行われた単純ばりの実験から得られた耐力式が元になって評価が行われている。この耐力式は、単純ばりのせん断耐力に対しては優れた評価を示すことが知られているが、上記のように反曲点が存在する場合には、耐力を過小に見積ってしまうことが、過去の実験[3]から明らかにされている。このとき、計算に用いるせん断スパンは反曲点を無視したものであるが、本研究では、支点から反曲点までの距離あるいは最大曲げモーメント位置から反曲点までの距離をせん断スパンと考慮して検討を行うことにしている。

既往の研究[4]では、破壊性状から図-1に示すように反曲点を境に形成される2つのせん断スパンにおいて、それぞれの位置に斜めひびわれが発生するものと仮定している。これらの斜めひびわれによる破壊に対しては、各々のせん断スパンを用いて前述の単純ばりの耐力式で算定することとしている。また、部材が斜め引張破壊をするとき、その破壊形式は2つのせん断スパンにおける耐力の大きさの違いによって異なるようである。この破壊形式は、2つのせん断スパンのうち一方だけに斜めひびわれが発生して破壊する場合と、両方のせん断スパンに斜めひびわれが発生して破壊する場合に分かれるようである。既往の研究では、前者の場合には、耐力が小さい方のせん断スパンのみによって算定することができ、後者の場合には、2つのせん断スパンにおける耐力の平均値としている。

そこで、本研究はこれらの破壊形態に着目し、実験では、それぞれのせん断スパンにおけるせん断耐力の差が大きくなるように供試体を作製して行った。この供試体は、前回と同様に複鉄筋断面の張出しばりを用い、正負の曲げモーメントが作用するようにしたが、負の曲げモーメントが作用する断面の鉄筋比は、正の曲げモーメントが作用する断面の鉄筋比よりも小さくして実験を行った。また、2つのせん断スパンにおける斜めひびわれによるせん断耐力が部材のせん断耐力にどのように影響するかを調べるため、ひびわれの発達状況と主ひびきを測定し、破壊状況を調べるとともに、上記の単純ばりのせん断

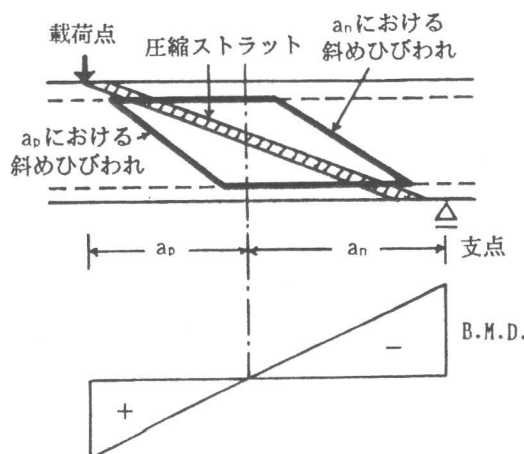


図-1 破壊ひびわれの仮定

耐力式による評価についても検討を行った。

## 2. 実験概要

本研究では、図-2に示す供試体を用いて実験を行った。供試体は、せん断スパン $a_p$ と $a_n$ を試験区間とし、 $a_n$ （負の曲げモーメントが作用するせん断スパン）におけるせん断耐力を $a_p$ （正の曲げモーメントが作用するせん断スパン）におけるせん断耐力に比べて小さくするために $a_n/a_p=1.4$ となるように载荷を行った。また、同様の主旨から、負鉄筋は2D19とし、正鉄筋は2D25とした。供試体の断面は、図-3に示すように、高さ25cm、幅15cmの矩形断面とし、有効高さ $d$ は、20cmで、正の鉄筋比は3.38%、負の鉄筋比は1.91%である。供試

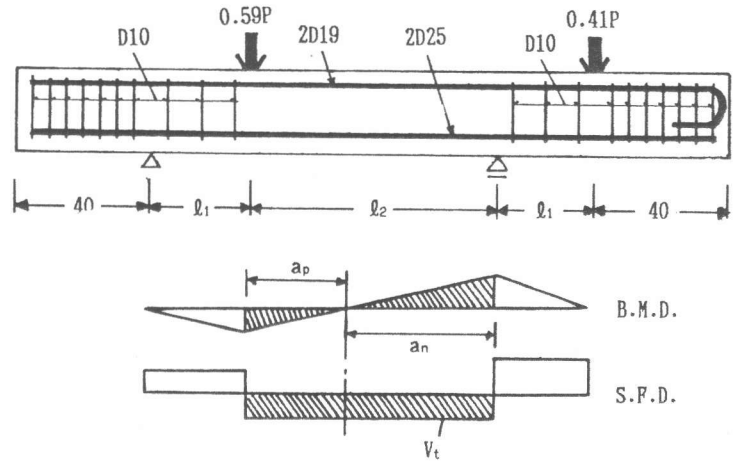


図-2 供試体の形状寸法

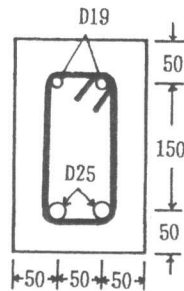


図-3 供試体断面

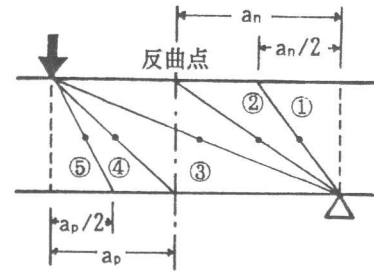


図-4 コンクリート腹部のひずみゲージ貼付け位置

体は、すべてせん断スパン $a_p$ および $a_n$ の範囲でせん断破壊を起させるようにするために他の区間ではスターラップによりせん断補強を行った。また、コンクリートの主ひずみを調べるために、図-4に示すように高さの中央の5ヶ所の位置でワイヤーストレインゲージを用いてひずみの測定を行った。ただし、No.9106は、せん断スパンが小さいため3ヶ所だけの測定を行った。実験変数はせん断スパン比とし、 $a_p/d$ が0.5~2.5の範囲とした。なお、各供試体のスパン長は、表-1に示すとおりである。

使用した鉄筋は異形棒鋼SD35であり、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 $300\text{ kgf/cm}^2$ とし、試験前日まで湿布養生を行った。

表-1 供試体寸法

No.	$l_1$ (cm)	$l_2$ (cm)	$a_p$ (cm)	$a_n$ (cm)	$a_p/d$	$a_n/d$
9106	10	24	10	14	0.50	0.70
9101	20	48	20	28	1.00	1.40
9105	25	60	25	35	1.25	1.75
9102	30	72	30	42	1.50	2.10
9103	40	96	40	56	2.00	2.80
9104	50	120	50	70	2.50	3.50

表-2 実験結果

No.	圧縮強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	破壊荷重 $P_B$ (tonf)	せん断耐力 $V_t$ (tonf)	破壊形態
9106	317	67.2	19.8	斜め圧縮
9101	285	28.6	8.41	斜め引張
9105	341	29.5	8.68	斜め引張
9102	336	18.0	4.76	斜め引張
9103	350	18.0	5.30	斜め引張
9104	327	14.0	4.12	斜め引張

### 3. 実験結果および考察

#### 3. 1 破壊形式

コンクリートの圧縮強度および部材のせん断耐力は、表-2に示すとおりである。また、破壊状況は、図-5に示すようであるが、その破壊形式は、No.9101~No.9105の供試体が斜め引張破壊となった。なお、No.9101とNo.9105は、斜めひびわれが2本出現し、No.9102、No.9103、No.9104は、斜めひびわれが $a_n$ 側の一本だけで破壊に至った。ただし、No.9102の供試体に関しては、最大せん断力 $V_t=4.7\text{tonf}$ においてせん断スパン $a_n$ に斜めひびわれが発生した後、 $a_p$ 側にもひびわれが発生したがせん断力が増加せず終局に至ったため、破壊は $a_n$ 側の斜めひびわれに支配されたものと考えられる。また、No.9106の供試体は、載荷点と支点を結ぶ方向でせん断圧縮破壊した。

#### 3. 2 コンクリートの主ひずみ

コンクリート腹部の主ひずみについて、せん断力の大きさによる変化を図-6に示す。図は、それぞれせん断スパンが極端に短い供試体 (No.9106)、比較的長い供試体 (No.9103) および比較的短い供試体 (No.9101) の3種類を示しており、斜めひびわれが発生する前から破壊直前までを段階的に示している。なお、

実線は引張ひずみ、点線は圧縮ひずみをあらわし、ひずみの大きさは線の長さであらわしている。

No.9106は、せん断圧縮破壊した供試体であるが、斜めひびわれが発生するまでに③の位置で、載荷点と支点を結ぶ方向に大きな圧縮ひずみが見られ、圧縮ストラットが形成されていることがわかる。このような極端にせん断スパンの短い供試体では、単純ばりと同様引張による斜めひびわれの発生する十分な領域が得られず、ストラットの圧壊によって破壊するのではないかとと思われる。

No.9101は、2本の斜めひびわれによって引張破壊した供試体であるが、No.9106と同様載荷点と支点を結ぶ方向 (位置③) に圧縮ひずみが増加しており、圧縮ストラットが形成されているようである。また、載荷点と反曲点を結ぶ方向 (位置④) および反曲点と支点を結ぶ方向 (位置②) にも圧縮ひずみが増加しており、そこで斜めひびわれが誘発される可能性があることが伺える。

No.9103は、せん断スパン $a_n$ における斜めひびわれで引張破壊した供試体であるが、ひびわれ発生直前 ( $V_t=2.35\text{tonf}$ ) で、①の位置で大きな引張ひずみが生じている。ひびわれ発生後には、ひずみが緩和されているが、他の位置でのひずみはほとんど変化することがなくせん断スパン $a_n$ において破壊に至るようである。

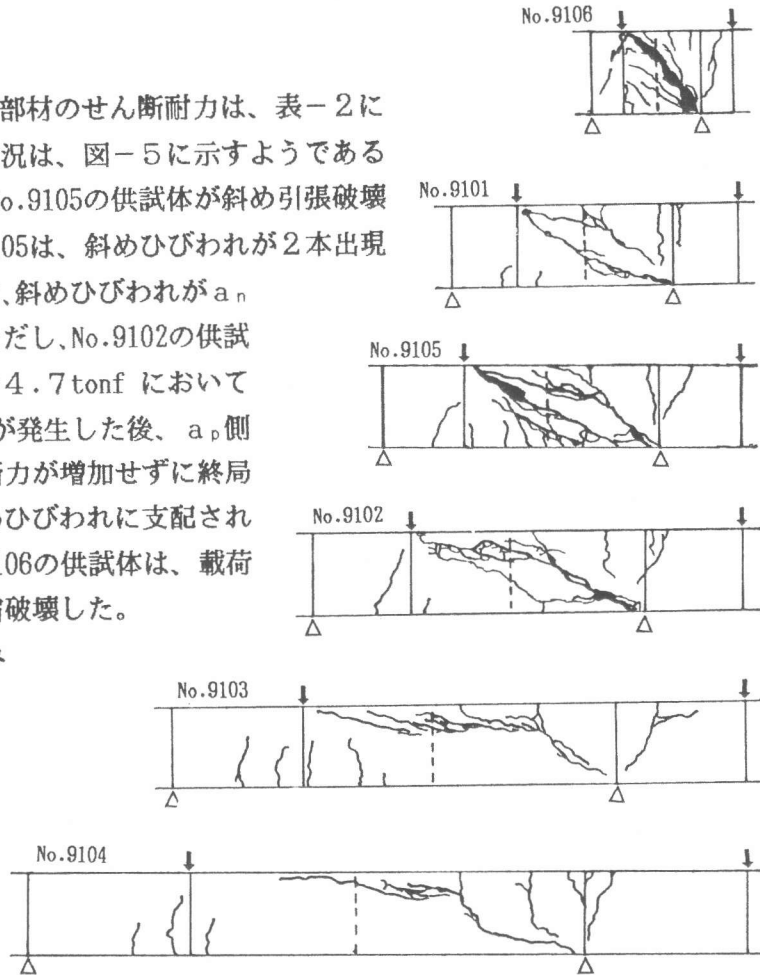
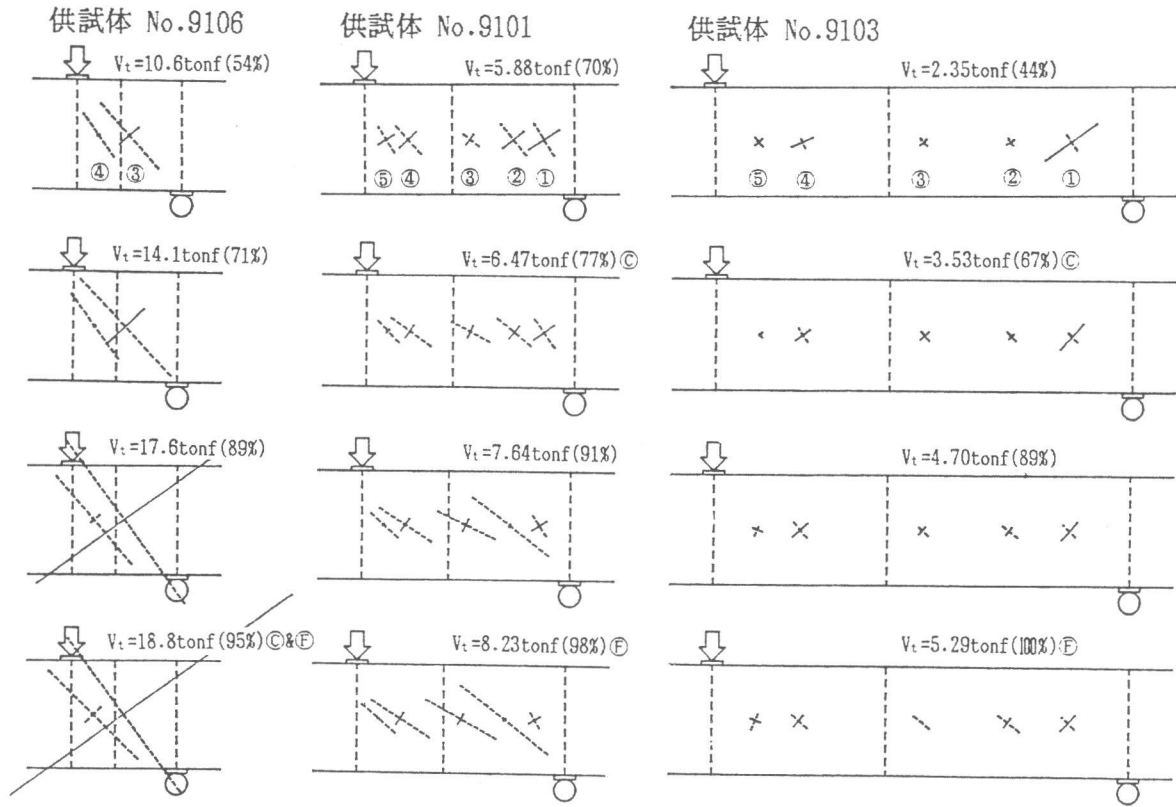


図-5 供試体の破壊状況



◎ 斜びひわれ発生      引張 — + 200 μ  
 ⊕ 破壊直前              圧縮 - - - - 200 μ

図-6 主ひずみの変化

### 3. せん断耐力の評価

各供試体におけるせん断耐力について、二羽ら[2]によって導かれた単純ばりのせん断耐力式(1)を用いて評価を行うこととする。

$$\text{はりのせん断耐力 } V_c = 0.94(p_w \cdot f_c')^{1/3} (d/100)^{-1/4} \{0.75 + 1.4/(a/d)\} b_w \cdot d \quad (1)$$

ここに  $f_c'$  : 圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)       $a$  : せん断スパン (cm)       $A_s$  : 引張鉄筋断面積 (cm<sup>2</sup>)  
 $b_w$  : ウェブ幅 (cm)                       $d$  : 有効高 (cm)                       $p_w = 100 \cdot A_s / (b_w \cdot d)$

表-3は、せん断スパンに  $a_p$  および  $a_n$  を用いて計算した結果を各々  $V_{cp}$ 、 $V_{cn}$  として示した。これらの計算値で実験値を除いたものと各々のせん断スパン比との関係を図-7に示したが、No.9102、No.9103、No.9104については、 $a_n$  の方の斜めひびわれだけによって破壊に至っているため、 $a_n$  の方で計算したせん断耐力  $V_{cn}$  とよく一致する。それに対して、2本の斜めひびわれで破壊したNo.9101、No.9105については、 $a_p$  の方で計算した値  $V_{cp}$  と良く一致する結果となった。このように比較的長いせん断スパン

表-3 せん断耐力の計算結果

No.	$V_{cp}$ (tonf)	$V_t$ $V_{cp}$	$V_{cn}$ (tonf)	$V_t$ $V_{cn}$
9106	—	—	—	—
9101	8.91	0.94	7.46	1.40
9105	8.27	1.05	5.67	1.53
9102	7.34	0.64	5.11	0.92
9103	6.47	0.82	4.61	1.15
9104	5.81	0.72	4.22	0.98

の供試体は、 $a_n$ 側の斜めひびわれの発生によって破壊に至り、比較的短いせん断スパンの供試体は、 $a_n$ 側の斜めひびわれの発生だけでは破壊せず、 $a_p$ 側の斜めひびわれ発生まで耐力が増加するのではないかと考えられる。

ここで、再度既往の研究データ[3]を用いて同様の比較を行ってみることにした。なお、これらの供試体は、正と負の鉄筋比が共に3.38%であり、2つのせん断スパンにおける耐力差はせん断スパン

の長さのみによって決まる。まず、長い方のせん断スパンだけに斜めひびわれが発生して破壊したと思われる供試体(表-4参照)の計算結果は、そのせん断スパンを用いて計算したものと一致することがわかる(表-5参照)。また、その他の供試体(表-6参照)は、いずれも2本の斜めひびわれで破壊したと思われるが、短い方のせん断スパンを用いて計算したものに一致しているようである(表-7参照)。

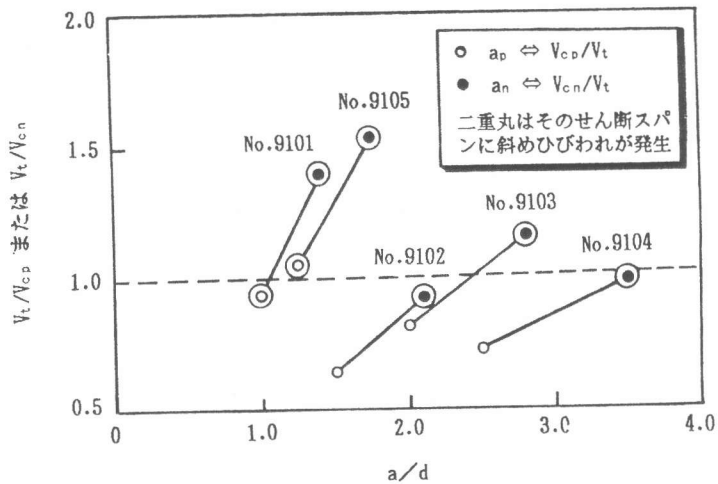


図-7 斜め引張耐力とせん断スパン比の関係

表-4 既往の研究データ<sup>3)</sup>(その1)

No.	せん断スパン		圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	せん断耐力 V <sub>t</sub> (tonf)
	a <sub>p</sub> (cm)	a <sub>n</sub> (cm)		
8505	2.8(0.14)	93.2(4.66)	375	5.36
8508	22.3(1.12)	105.7(5.27)	336	4.58
8511	18.9(0.95)	77.1(3.86)	300	5.96
8512	4.6(0.23)	91.4(4.57)	299	4.72

( )内の数値はせん断スパン比

表-5 計算結果(その1)

No.	V <sub>op</sub> (tonf)	V <sub>cn</sub> (tonf)	$\frac{V_t}{V_{op}}$	$\frac{V_t}{V_{on}}$
8505	49.1	4.79	0.11	1.12
8508	8.82	4.47	0.52	1.02
8511	9.45	4.72	0.63	1.26
8512	28.9	4.47	0.16	1.06

表-6 既往の研究データ<sup>3)</sup>(その2)

No.	せん断スパン		圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	せん断耐力 V <sub>t</sub> (tonf)
	a <sub>p</sub> (cm)	a <sub>n</sub> (cm)		
8506	55.4(2.77)	40.6(2.03)	300	7.49
8507	32.2(1.61)	31.8(1.59)	294	8.24
8514	29.8(1.49)	34.2(1.71)	266	8.32
504A	40.0(2.00)	40.0(2.00)	284	6.13
504B	26.6(1.33)	53.4(2.67)	284	7.37
504D	48.0(2.40)	48.0(2.40)	252	4.91
504E	32.0(1.60)	64.0(3.20)	252	5.74
504F	32.0(1.60)	32.0(1.60)	259	9.05
504G	21.4(1.07)	42.8(2.13)	259	9.40
504H	38.4(1.92)	57.6(2.88)	269	6.34
504I	25.6(1.28)	38.4(1.92)	269	7.95

( )内の数値はせん断スパン比

表-7 計算結果(その2)

No.	V <sub>op</sub> (tonf)	V <sub>on</sub> (tonf)	$\frac{V_t}{V_{op}}$	$\frac{V_t}{V_{on}}$
8506	5.32	6.10	1.41	1.23
8507	6.82	6.86	1.21	1.20
8514	6.88	6.38	1.21	1.30
504A	6.03	6.03	1.02	1.02
504B	7.50	5.30	0.98	1.39
504D	5.33	5.33	0.92	0.92
504E	6.50	4.75	0.88	1.21
504F	6.56	6.56	1.38	1.38
504G	8.30	5.68	1.34	1.65
504H	6.04	5.05	1.05	1.26
504I	7.53	6.04	1.06	1.32

以上のことから、今回の実験データおよび既往の実験データで斜め引張破壊した供試体においては、1本の斜めひびわれの発生だけで破壊するものに対しては、2つのせん断スパンにおけるせん断耐力の小さい方の計算値に一致し、2本の斜めひびわれの発生で破壊するものに対しては、大きい方の計算値に一致することがわかった。なお、これらの破壊に及ぼす斜めひびわれの発生本数がどのような因子によるかはまだ明らかではないが、本実験における範囲では、載荷点から支点までの距離および2つのせん断スパンにおけるせん断耐力の相対的な大きさに関係があると思われる。今後、これらの破壊形態を分類できる基準について、測定されたコンクリートのひずみ分布をさらに調査し、同時にFEM解析によって内部の応力状態と照らし合わせて検討を行っていきたい。

また、せん断圧縮破壊をしたNo.9106に関しては、コンクリート標準示方書[1]の斜め圧縮破壊耐力を示す式(2)を用いて計算をした。

$$\text{斜め圧縮破壊耐力} \quad V_{wcd} = 4 \sqrt{f_c'} \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

この結果、計算値は21.37tonfとなり、実験値(19.76tonf)にほぼ近い値を示す。

#### 4. まとめ

- (1) 今回の実験において、反曲点を有するRCはりの破壊形式は3種類あり、反曲点を挟む2つのせん断スパンにおいて、1本の斜めひびわれだけによる斜め引張破壊、2本の斜めひびわれによる斜め引張破壊、また載荷点と支点を結ぶ方向におけるせん断圧縮破壊に分けられた。
- (2) 片側のせん断スパンにおける斜めひびわれの発生だけで破壊に至った場合は、そのせん断スパンにおける斜め引張耐力の計算値でせん断耐力が推定できる。
- (3) 両方のせん断スパンに斜めひびわれが発生して破壊に至った場合、2つのせん断スパンにおける斜め引張耐力の算定値の大きい方でせん断耐力が推定できる。
- (4) せん断圧縮破壊をした供試体では、反曲点の影響が見られず、斜め圧縮破壊耐力式を用いて計算した算定値によるせん断耐力に近い値を示す。

#### 謝辞

本実験を行うにあたり、北海道大学の木村勉技官、山崎聡介氏並びに構造工学講座の学生諸君の多大の助力を得た。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) 土木学会標準示方書「設計編」、1991
- 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、1986.8、pp.167-176
- 3) 古内仁・角田与史雄：張り出しを有する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、1987.6、pp.341-346
- 4) 古内仁・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力について、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、1911.6、pp.185-190