

# [127] 大変位の繰返しによる鉄筋コンクリート部材のせん断破壊

正会員 ○ 檜 貝 勇 (山梨大学工学部)  
 S. Rizkalla (マニトバ大学工学部)  
 H. Ben-Omran (マニトバ大学大学院)  
 F. Saadat (マニトバ大学大学院)

## 1. まえがき

地震時における様な大変位の繰返しによる鉄筋コンクリート柱のせん断破壊に関しては、主として建築の分野で活発な研究が行なわれている。しかし、建築構造物における柱と、例えば橋脚の様な土木構造物における柱部材とでは、せん断スパン比・鉄筋比などの諸元ならびに作用する軸圧縮力のレベルがかなり異なっているなどの相違があり、<sup>1)</sup>上記の研究成果をそのまま応用する事はできない。また、土木構造物のこの種の破壊に関する系統的な研究も多くない現状である。

本研究は、主として鉄筋コンクリート橋脚を念頭に置き、比較的せん断スパン比が大きく、軸方向鉄筋量が少ない試験体の静的繰返し載荷試験を行なって、軸方向鉄筋降伏後におけるせん断破壊のメカニズム、変形能力、せん断耐力等を検討したものである。

## 2. 実験方法

### 2. 1 試験体

試験体の諸元を表1に、配筋状況の例を図1に示す。せん断スパン比 ( $a/d$ ) は 3.29~6.05、軸方向鉄筋比 ( $p$ ) は 0.51%~1.89% と広い範囲で変化させた。また、 $a/d$  と  $p$  の組合せは、軸方向鉄筋の降伏以前にせん断破壊が起こらないように定めた。なお、通常の鉄筋コンクリート橋脚においては、帯鉄筋比および軸圧縮力は小さい事を考慮し、また実験条件を単純化するために、試験体には帯鉄筋は用いず、軸力も作用させていない。

### 2. 2 載荷試験方法

載荷の方法は、日本建築センター鉄筋コンクリート短柱委員会の方法を参考にしたもので、降伏荷重時の載荷点変位の実測値 ( $\delta_y$ ) を基準にして、 $\pm \delta_y$ 、 $\pm 2 \delta_y$ 、 $\dots$ 、 $\pm n \delta_y$  を各3サイクル毎載荷し、耐力が著しく低下するまで順次変位を増加させる方法をとった。なお、降伏荷重 ( $P_y$ ) としては、 $n=15$  とした常用の弾性計算によって求めた値を用いた。

載荷は、電気油圧サーボ式試験機を用いて変位制御により行なった。また、載荷試験にあたっては、載荷点変位、荷重、軸方向鉄筋の歪を計測するとともに、ひびわれの発生・発達状況を観察した。

## 3. 実験結果および考察

### 3. 1 斜ひびわれのパターンおよび破壊モード

鉄筋比  $p$  がきわめて小さい場合を除き、固定端から有効高さ  $d$  だけ離れた断面 ( $d$ -断面) 付近に発生した曲げひびわれが、変位の増加に伴って斜

表1 試験体の諸元

No.	$b \times d$ ( $\text{cm}^2$ )	$a/d$	$p$ (%)	$f_c'$ (*)	$f_y$ (*)	$v_c$ (*)	$v_y$ (*)	$v_c/v_y$
1-7	50x35	3.29	0.40	389	3504	7.52	3.85	1.95
1-8			0.46	385	3498	7.86	4.38	1.79
1-1			0.51	374	3499	8.10	4.89	1.66
1-9			0.86	418	3498	10.14	7.29	1.28
1-10	50x28	4.11	0.64	419	3498	9.01	4.83	1.87
1	13x25	4.00	0.78	324	3552	9.29	5.99	1.55
5	15x25		1.06	334	3666	10.15	8.28	1.23
1-2	50x23	5.00	0.96	355	3531	9.75	5.83	1.67
1-5	50x19	6.05	0.95	428	3474	10.35	4.70	2.20
1-3			1.26	372	2499	10.86	6.19	1.75
1-6			1.58	339	3485	11.40	7.59	1.50
1-4			1.90	408	3474	12.94	8.98	1.44

(\*)  $\text{kg/cm}^2$

ひびわれに成長してX字状のひびわれを形成した。X字状斜ひびわれが断面高さの中央を横切った位置は、固定端から  $0.4d \sim 1.0d$  (平均  $0.7d$ ) であった。 $a/d$  が  $4.11$  以下で比較的  $P$  の大きな試験体では、このX字状の斜ひびわれが徐々に拡大し、 $d$ -断面で軸方向鉄筋が降伏するとひびわれ巾は急増し、耐力も急激に低下した (Mode-1)。

$a/d$  が  $5.0$  の No. 1-2 及び  $a/d$  が  $6.05$  の試験体では、X字状斜ひびわれが発生した後に  $d$ -断面で軸方向鉄筋が降伏しても耐力は低下せず、さらに大変位の繰返しに耐えており、最終的破壊 (耐力低下) は、固定端から  $1.6d \sim 2.0d$  離れた断面に発生していた曲げひびわれ (Initiating crack) が第二の斜ひびわれに発達することによって引き起こされた。耐力の低下は、 $2d$ -断面における軸方向鉄筋の降伏とほぼ対応している。この破壊は、X字状斜ひびわれの存在を別とすれば、静的単調増加荷重によるせん断破壊 (斜引張破壊) と良く似たものであった (Mode-2)。

No. 1-6 には第二の斜ひびわれは発生しなかったのであるが、これはたまたまX字状斜ひびわれが載荷点寄りの位置に発生したため、X字状ひびわれと第二の斜ひびわれが合体してしまったものであり、基本的な破壊モードの相違ではないと思われる。なお、鉄筋比が最小の No. 1-5 では、第二の斜ひびわれも発生せず、X字状ひびわれ区間でのかぶりコンクリートの剥落に伴う圧縮鉄筋の座屈が耐力低下を招いており、破壊モードはやや異っている。

No. 1-7、1-8 ( $a/d=3.29$ ) 及び 1-10 ( $a/d=4.11$ ) では、鉄筋比が小さく、作用せん断耐力も小さいため、X字状の斜ひびわれは完全には発達せず、固定端断面の曲げひびわれのみ拡大した。固定端におけるひびわれ巾の増大と、くり返し載荷に伴うひびわれ面でのせん断伝達の劣化が、軸直角方向の変位の増加をもたらし、耐力低下の原因になったものと思われる (Mode-3)。上記 No. 1-5 の破壊は、Mode-2 と 3 の中間的なものとも考えられる。

### 3. 2 破壊モードに関する考察

破壊モードについて論ずる前に、ここで関連する基本的な事柄を列挙しておく。1) 集中荷重及び (又は) 支承に近い部分のせん断強度は他の部分に較べて大きい。これは、荷重及び反力によって発生する鉛直方向の圧縮応力 ( $\sigma_y$ ) の有利な影響である。2) 曲げせん断ひびわれの発生には、十分な大きさのせん断応力が作用している事、そして、十分に発達した Initiating flexural crack の存在が不可欠である。3) 腹鉄筋が無く、せん断スパン比の大きい部材のせん断耐力の多くは、ひびわれ面におけるせん断伝達に負う。

$a/d$  が約  $4$  以下の試験体では、ひびわれのパターンに基づいて部材を大略3つの領域に分ける事ができる。第一は、固定端から  $d$ -断面までのX字状の斜ひびわれを含む区間 (領域A) であり、第二は、 $d$ -断面から  $2d$ -断面までの数本の曲げひびわれを含む区間 (領域B) であり、第三は、それ以後載荷点までのひびわれの無い区間 (領域C) である。領域Bには  $1 \sim 2$  本の曲げひびわれが発生しているが、鉄筋の応力は降伏点よりかなり小さい。従って、曲げひびわれ巾は小さく、ひびわれ面でのせん断伝達は極めて有効であり、繰返し載荷によるせん断伝達の劣化もわずかであると考えられる。すなわち、この領域では、繰返し載荷によるせん断強度の低下はほとんど無いものと思われる。一方、領域Aでは、鉄筋の歪は降伏歪を越えており、ひびわれ巾拡大に対する鉄筋の拘束はあまり有効ではなくなっている。斜ひびわれ巾が増大するため、ひびわれ面でのせん断伝達は領域Bにおけるよりも小さく、また繰返し載荷による劣化の進行も領域Bより著しいと考えられる。以上の事から、 $\sigma_y$  の有利な影響により当初は大きかった領域Aのせん断強度が、斜ひびわれとの交差部におい

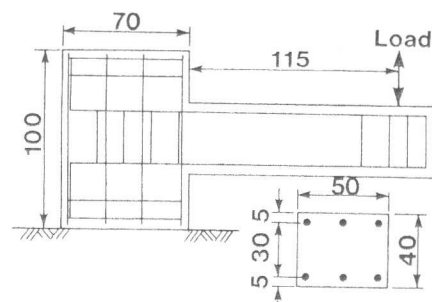


図1 試験体の形状・配筋の例

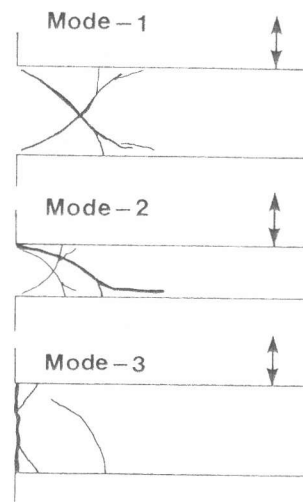


図2 ひびわれパターン

て軸方向鉄筋が降伏し、斜ひびわれ巾が増大した時点においては、領域Bのせん断強度以下に低下してしまう事も十分考えられるのであって、 $a/d$ の小さな試験体が、 $d$ -断面で鉄筋が降伏した後にX字状斜ひびわれの拡大によって破壊に至った(Mode-1)のは合理的であると思われる。また、このモードの破壊基準はX字状斜ひびわれとの交差部付近における軸方向鉄筋の降伏であると思われる。

$a/d$ が約5以上の試験体においても、せん断スパンを3つの領域に分ける事ができる。領域Aは、固定端から $d$ -断面までのX字状斜ひびわれを含む区間、領域Bは $d$ -断面から $3.5d$ ないし $4d$ -断面までの、曲げひびわれが発生している区間、そして領域Cは、そこから載荷点までのひびわれの発生していない区間である。この場合、領域Bは、 $d$ -断面から $2d$ -断面までの領域B1とそれ以外の領域B2に分割して考えるのが適当であろう。それは、領域B1では軸方向鉄筋の歪が大きく、破壊時にはほぼ降伏歪に達するからである。

領域B2とCにおいては、せん断破壊の原因となる様な斜ひびわれの発達は期待できない。領域B1では軸方向鉄筋の歪が大きく、破壊時には領域の終点である $2d$ -断面でも鉄筋はほぼ降伏している。従って、この領域におけるせん断強度は繰返し載荷によって低下していると考えられる。領域Aの状況は、 $a/d$ が小さい場合の領域Aと同様であろう。領域A、B1ともに、せん断強度は繰返し載荷によって低下するのではあるが、領域Aは支点に近く $\sigma_y$ の有利な影響を受けている事を考慮すれば、領域B1のせん断強度がスパン内で最少となる(あるいは、A、B1の強度はほぼ等しい)事も十分可能である。

以上の事から、 $a/d$ の大きい試験体の典型的な破壊モード(X字状斜ひびわれの発達によっては破壊せず、これとは独立な第二の斜ひびわれの発生によって破壊、Mode-2)も合理的であると思われる。さらに、このモードの破壊基準は、 $2d$ -断面付近における軸方向鉄筋の降伏であると推察される。

### 3.3 変形能力(ジン性率)

強制変位の振巾を増加させて行くと、ピーク変位時の耐力は降伏荷重よりも増加するが、さらに振巾を増加させるとやがて低下する。耐力が最大値( $P_{max}$ )に達した後に降伏荷重以下に低下する直前の変位レベルにおけるピーク変位を終局変位( $\delta_u$ )として、ジン性率 $\mu = \delta_u / \delta_y$ によって変形能力を表わす。

著者は、降伏荷重作用時におけるせん断耐力の余裕を表わす係数、すなわち、単調増加荷重に対するせん断強度 $v_c$ <sup>2)</sup>(2式)と軸方向鉄筋降伏時のせん断応力 $v_y$ との比 $v_c/v_y$ はジン性率の良い指標となる事を既に示した。<sup>3)</sup>しかし、図3から明らかなように、 $\mu$ と $v_c/v_y$ は強い相関を有してはいるが、 $a/d$ の値が異なればその関係も異なっているのである。

$v_c/v_y$ は、単に「降伏荷重時における斜ひびわれの発生し易さ」を表わすものであって、3.2で議論した $\sigma_y$ の影響、そして、鉄筋コンクリート部材のジン性に関する一般的な傾向、すなわち、ある程度以上の鉄筋が配置されているならば、鉄筋比が小さいほどジン性は大きい事、などは考慮されていないのである。そこで、 $\sigma_y$ の影響を表わす変数として $a/d$ を、また、基本的なジン性を表わす変数として $p$

表2 載荷試験結果

NO.	$P_y$ (t)	$\delta_y$ (mm)	$P_{max}$ (t)	$\mu_{exp}$	$\mu_{cal}$	$\mu_{cal}/\mu_{exp}$
1-7	6.74	2.66	7.51	7	7.9	1.13
1-8	7.63	2.77	8.88	8	6.2	0.77
1-1	8.56	3.77	10.02	4	5.0	1.26
1-9	14.35	4.68	15.40	2	2.2	1.10
1-10	6.93	4.21	7.56	6	5.2	0.87
1	1.95	3.51	2.40	4	3.4	0.84
5	3.11	4.84	3.51	2	1.9	0.94
1-2	6.71	3.77	7.07	3	3.4	1.12
1-5	4.47	6.90	5.01	5	5.0	1.00
1-3	5.89	8.56	7.31	3	3.1	1.02
1-6	7.22	8.50	8.03	2	2.2	1.09
1-4	8.53	8.40	9.39	2	1.9	0.94

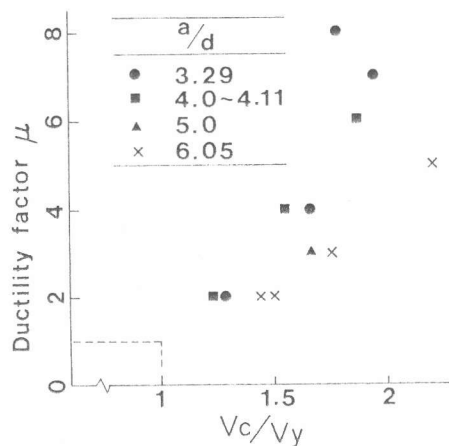


図3 と  $v_c/v_y$  の関係

を含む関数の形を1式の様に仮定して、重回帰分析により未定係数を決定した。

$$\mu = 1 + \alpha (100p)^\beta (a/d)^r (v_c/v_y - 1)^\delta \dots \dots (1)$$

$$v_c = 0.94 f_c'^{1/3} (0.75 + 1.4 d/a) (\sqrt{100p} + \sqrt{100/d} - 1) \dots \dots (2)$$

$\alpha = 1.86$ ,  $\beta = 1.07$ ,  $r = -0.317$ ,  $\delta = 0.772$ を用いて1式によって求めたジニ性率 $\mu_{cal}$ と実験値 $\mu_{exp}$ の比の変動係数は12個の試験体について13.4%であり、推定の精度は比較的良好と言えるであろう(図4参照)。ただし、本実験においては、コンクリート強度 $f_c'$ は324~428 kg/cm<sup>2</sup>と狭い範囲内にあるので、 $f_c'$ の影響に関する検討は十分とは言えない。

### 3. 4 せん断強度

最大荷重(Pmax)時の平均せん断応力度 $v_{max}$ によってせん断強度を表わす。最大荷重は固定端における軸方向鉄筋の降伏によって制限されること、また3.2で述べた様に、特定の断面における軸方向鉄筋の降伏が破壊のひきがねになっている事から、 $v_{max}$ と $v_y$ の間には密接な関係がある事が推測される。図5はこの関係を示したもので、破壊モードの相違にかかわらず、 $v_{max} = 1.14 v_y$ と考えて良いようである。

### 4. 結 論

本研究で得られた結果を要約すれば以下のようなものである。

- 1) 大変位の繰返しによる、軸方向鉄筋降伏後におけるせん断破壊には、少なくとも3つの破壊モードがある。
- 2) Mode-1及びMode-2の破壊は、主斜ひびわれとの交差部付近における軸方向鉄筋の降伏によって、Mode-3の破壊は、固定端断面付近における軸方向鉄筋の過大な歪の集中によって誘起されたものと考えられる。
- 3) この種のせん断破壊を起こす場合のジニ性は1式によって推定する事が可能である。ただし、1式を一般的に用いるためには、変位履歴がジニ性に及ぼす影響に関する研究が必要であると思われる。

本研究の一部は、科学研究費補助金(課題番号58025017)により行われた。また、研究の実施にあたってマニトバ大学(カナダ)の援助を得た事に謝意を表します。

### < 参考文献 >

- 1) 太田 実、"繰返し荷重下における鉄筋コンクリート橋脚の挙動に関する研究"、土木学会論文報告集第292号、1972年12月
- 2) H. Okamura, T. Higai, "Proposed design equation for shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement", Proc. of JSCE, No 300, Aug, 1980.
- 3) 岡村 甫、他、"鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計法"、昭和56年度科学研究費補助金報告書、1982年

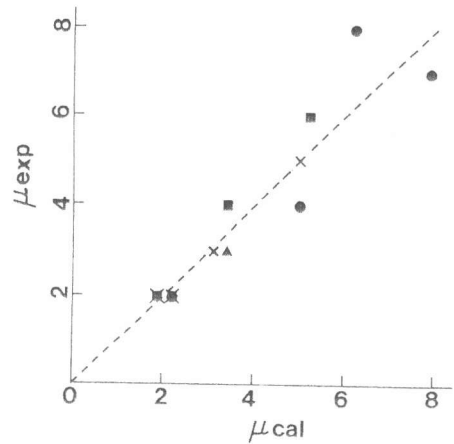


図4 ジニ性率の推定結果

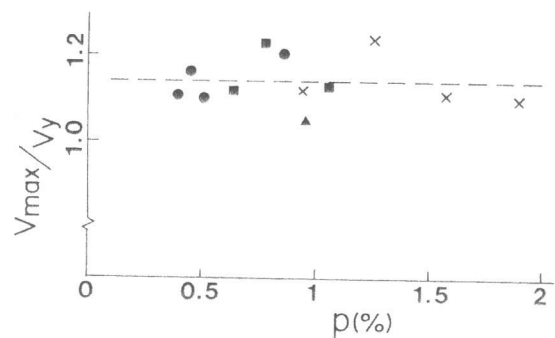


図5 せん断強度(v\_max)