

[193] 大変位の繰返しによりせん断破壊する RC 部材の変形能力

正会員 楢貝 勇 (山梨大学工学部)

1. まえがき

鉄筋コンクリート橋脚のように、比較的スレンダーで軸方向鉄筋比の小さな部材においては、強震時に作用するような交番する大変位の繰返しによって、軸方向鉄筋が降伏した後にせん断破壊を起こす場合がある。この種の破壊は部材の変形能力を著しく制限し、構造物の耐震性を損なうおそれが大きい。著者は、RC橋脚を単純化した、腹鉄筋を用いない、軸力が作用しない張出しはり型供試体を用いた交番載荷実験を行って、曲げ降伏後におけるせん断破壊の性状を検討してきており、これまでに以下の知見を得ている[1]。

(1) せん断破壊のモードは、次の3つに大別される。

① 固定端から部材有効高さ(d)程度までの区間にX字状の斜ひびわれが発生し、固定端からdだけ離れた断面(d断面)付近で軸方向鉄筋が降伏すると、この斜めひびわれの幅が急激に拡大して耐力を失う (Mode 1)。

② Mode 1と同様にX字状の斜ひびわれは発生するが、d断面付近で軸方向鉄筋が降伏しても破壊には至らず、さらに変位を増加させた後に固定端から2d離れた断面(2d断面)付近で軸方向鉄筋が降伏すると、その近傍から斜ひびわれが発生・発達して急速に耐力を失う (Mode 2)。

③ 斜ひびわれは十分に発達しないが、鉄筋の降伏および引き抜けに伴って固定端断面の曲げひびわれ幅が拡大し、この断面でのせん断伝達能力が低下することにより耐力の低下に至る (Mode 3)。

(2) せん断破壊時のじん性率 (DF) はせん断スパン比 (a/d)、軸鉄筋比 (p) およびコンクリート圧縮強度 (fc') の関数として (1) 式によって推定することができる。

$$DF = 1 + 1.86(100p)^{-1.07}(a/d)^{0.317}(vc/vy - 1)^{0.772} \tag{1}$$

$$vc = 0.94fc'^{1/3}(0.75 + 1.4d/a)(\sqrt{100p} + 4\sqrt{100/d} - 1)$$

vy : 固定端断面で軸方向鉄筋が降伏する時のせん断応力度

これらの結論の基礎となった実験は、p および a/d については広い範囲をカバーしているが、fc' は300~400 kg/cm² の範囲にあり、fc' の影響に関する検討は十分ではない。本研究は、fc' を150~550kg/cm² に変化させた8体の供試体を用いた載荷試験によって上記結論の妥当性を検討する事を目的としたものである。

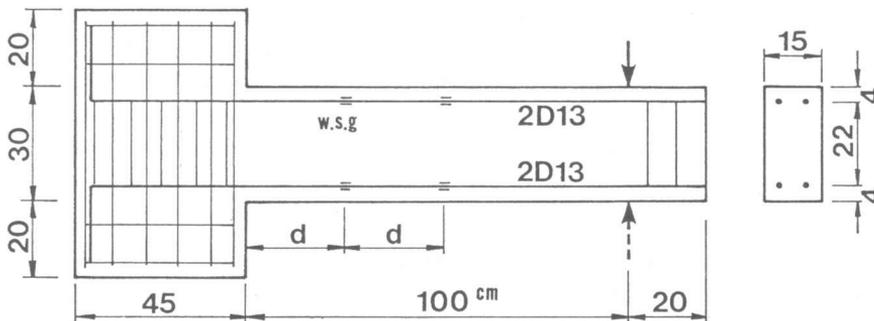


図1 供試体の形状・寸法

2. 実験の概要

用いた供試体の諸元は表1に示した。また、代表的な供試体の寸法・配筋状況を図1に示した。H2, H10 および H4 は、fc' をほぼ 350kg/cm²とした標準の供試体で、それぞれ Mode 1, 2 および 3 で破壊させ

るべく a/d , p の値を経験的に定めたものである〔1〕。

載荷試験においては、計算上の降伏荷重 (P_y) を載荷し、このときに実測した載荷点変位 (D_y) を基準にして $\pm D_y$, $\pm 2D_y$, \dots , $\pm nD_y$ を各3サイクルずつ、耐力が著しく低下するまで載荷した。変位の振幅を増加させて行くとピーク変位時の荷重(復元力)は降伏荷重よりも増加するが、やがて低下を始めてついに降伏荷重を下回るようになる。本実験では、ピーク変位時の復元力が降伏荷重以下に低下するに至る直前のピーク変位を終局変位 (D_u) として、じん性率 $DF = D_u/D_y$ によって変形能力を表わすこととした。なお、 P_y は、ヤング係数比 $n = 15$ とした常用の弾性理論によって求めた引張鉄筋の応力が、その降伏点(実測値)に達する時の荷重である。

載荷試験時には、 d 断面および $2d$ 断面において軸方向鉄筋の歪を、 d 断面および載荷点において変位をそれぞれ計測するとともに、ひびわれの発達状況を目視観察した。

表1 供試体諸元および載荷試験結果

No.	$b \times d$ (cm)	f_c' (kg/cm ²)	p (%)	a/d	P_y (t)	D_y (mm)	DF_e	Yielding Cycle at d	at $2d$	Mode
H 2	15*26	366	0.649	3.85	2.19	4.40	4	50y-2	-	1
H 7	15*26	183	0.649	3.85	2.21	5.30	3	*	*	1
H 8	15*26	552	0.649	3.85	2.26	3.46	5	50y-1	-	1
H 4	20*26	383	0.487	3.85	2.20	3.10	>10	60y-1	-	-
H 3	20*26	182	0.487	3.85	2.21	4.67	5	40y-2	-	1
H10	20*16	324	1.86	6.25	2.86	8.63	2	20y-1	30y-2	2
H 9	20*16	156	1.86	6.25	2.86	10.48	1	-	-	(0)
H11	20*16	541	1.86	6.25	2.86	7.26	3	30y-1	30y-3	2

DF_e : じん性率の実験値 - : 降伏せず * : 測定せず

Yielding cycle at $n d$: $n d$ 断面において軸鉄筋が降伏した時の載荷サイクル

3. せん断破壊モード

X字状斜ひびわれの拡大により Mode 1 で破壊すると予測した H2 供試体においては、ピーク変位 40y までに X 字状斜ひびわれが発生し、50y の 2 サイクル目 (50y-2) に d 断面において軸鉄筋が降伏し、50y-3 では耐力が降伏荷重以下に低下しており、典型的な Mode 1 の破壊挙動を示した。

$f_c' = 183 \text{ kg/cm}^2$ の H7 供試体では、30y までに X 字状の斜ひびわれが 2 組発生した。40y-2 で固定端側の斜ひびわれが拡大して耐力が低下した。このとき、 d 断面の軸方向鉄筋の平均歪は 1920μ に達したが完全に降伏するには至っていない ($\epsilon_y = 1990 \mu$)。 $f_c' = 552 \text{ kg/cm}^2$ の H8 では 50y までに X 字状斜ひびわれが形成され、50y-1 で d 断面の軸鉄筋が降伏し、70y-1 で耐力が低下した。このサイクルでの最大荷重は P_y に達していないので、実質的には 60y-4 が破壊サイクルである。 f_c' の小さい H7 では d 断面で軸鉄筋が完全に降伏しなかった点が他とやや異なるが、大きな差異は認められず、いずれも Mode 1 の破壊を起こしたと考えてよい。

第二の斜ひびわれにより Mode 2 の破壊を起こすと予測した H10 供試体 ($f_c' = 324 \text{ kg/cm}^2$) においては、20y までに X 字状斜ひびわれが発生し、20y-1 で d 断面の軸鉄筋が降伏したが耐力の低下には至らず、30y-2 において $2d$ 断面の軸鉄筋が降伏した時点で、X 字状斜ひびわれよりも載荷点側に第二の斜ひびわれが急激に発達して耐力が低下した。これは典型的な Mode 2 の破壊である。

$f_c' = 156 \text{ kg/cm}^2$ の H9 供試体では、固定端付近に X 字状の斜ひびわれが発達する以前の 20y-1 載荷の段階において $1.25d$ 断面付近に既に発生していた曲げひびわれが斜ひびわれに発達して耐力を失った。

この場合は、コンクリート強度が小さかったため、せん断耐力と降伏耐力がほぼ等しくなって、単調増加荷重下における通常のせん断破壊の場合ときわめて近い挙動を示したものと考えられる。 $f_c' = 541\text{kg}/\text{cm}^2$ の H11 供試体では、3Dy までに X 字状斜ひびわれが発生し、3Dy-1 で d 断面の軸鉄筋が降伏したが耐力は低下せず、3Dy-3 で 2d 断面の軸鉄筋が降伏した後 4Dy-1 で耐力低下を示した (Mode 2)。

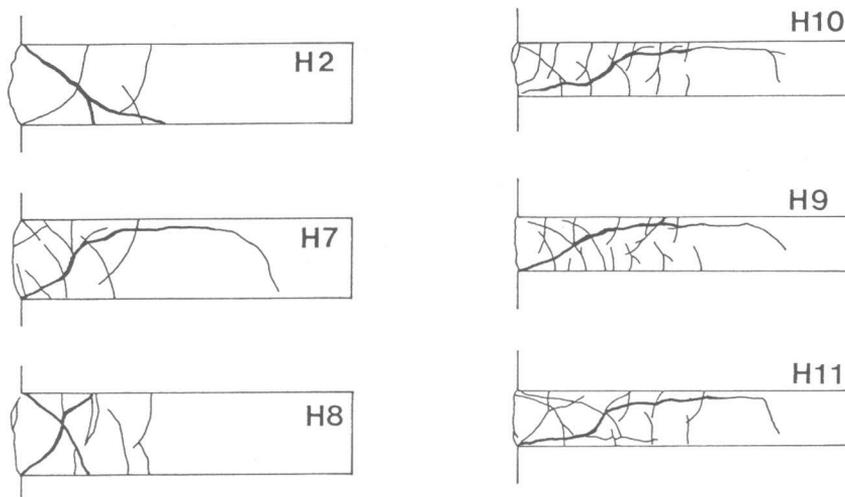


図2 ひびわれの発生状況

固定端における曲げひびわれ幅の拡大によって Mode 3 で破壊すると予測した H4 供試体では、10Dy に至るまで耐力の低下は認められなかったため、その時点で荷重試験を中止した。 $f_c' = 182\text{kg}/\text{cm}^2$ とした H3 供試体では、4Dy までに X 字状斜ひびわれが 2 組形成された。4Dy-2 で d 断面の軸鉄筋が降伏したが耐力は低下せず、6Dy-3 で耐力低下を起こした。この時点で 2d 断面の軸鉄筋は降伏していない。破壊は Mode 1 であると考えられるが、d 断面での鉄筋降伏から耐力低下までの余裕が大きかった点が通常の Mode 1 とはやや異なっている。

以上の試験結果と表 1 に示すじん性率の測定値 (DF_e) とを併せ考えると、コンクリート強度の相違が破壊モードに影響を及ぼすと考えるよりも、破壊モードはじん性率と密接な対応関係にあり、コンクリート強度は p , a/d などと同様にじん性率を決定する一つの要因として破壊モードにも間接的に影響を及ぼすと考えるのが妥当であろう。文献 [1] の実験結果と本実験の結果を総合すると、 $DF = 1 \sim 3$ では Mode 2、 $DF = 3 \sim 6$ では Mode 1、 $DF > 7$ の場合には Mode 3 の破壊を起こすものと考えられることができる。

4. 変形能力 (じん性率)

(1) 式によって推定したじん性率 (DF_{c1}) は表 2 に示した。10Dy までの繰返し荷重によって破壊に至らなかった H4 を除く 7 個の供試体について、じん性率の (1) 式による計算値と実験値の比 DF_{c1}/DF_e は、平均 0.94、変動係数 14.2% であった。じん性率の計算値と実験値との差はいずれも 1.0 未満であり、実験における変位の増加ステップが Dy であることを考えれば、計算値と実験値は良く一致していると言えることができる。

しかし、詳細に見れば、コンクリート強度が低い H3, H7 および H9 においては DF_{c1}/DF_e の平均値が 1.00 であるのに対し、 $f_c' = 350\text{kg}/\text{cm}^2$ の H2, H10 では 0.95、 $f_c' = 550\text{kg}/\text{cm}^2$ の H8, H11 では 0.84 となっており、(1) 式は f_c' の増加によるじん性率の増加をやや過小評価する傾向があるように思われる。また、Mode 3 の破壊が予測された H10 供試体のじん性率は 10 以上であって、推定値 7 を大幅に上回っており、(1) 式の Mode 3 の破壊に対する推定精度は十分ではないようである。この場合、固定端のひびわれ面におけるせん断伝達の劣化機構は Push-off 試験におけるそれと近いものと思われ、従って、軸方向鉄筋比の増加はじん性率を増加させる効果を持つことも考えられるのであるが、Mode 3 での実験結果が

少ないため十分な検討は行なえなかった。

文献〔1〕および本実験の18個の実験データを用いて、重回帰分析によって(1)式の係数を再検討した結果、次式が得られた。

$$DF = 1 + 1.43(100p)^{-1.05} (a/d)^{0.515} (vc/vy - 1)^{0.712} \quad (2)$$

なお、(2)式によるじん性率の計算値(DFc2)と実験値の比は平均 0.98, 変動係数 13.5% である。

表2 じん性率 実験値と計算値の比較

No.	vc (kg/cm ²)	vy	vc/vy	DFe	DFc1	DFc1/DFe	DFc2	DFc2/DFe
H 2	9.02	5.61	1.61	4	4.09	1.02	3.95	0.99
H 7	7.16	5.67	1.26	3	2.62	0.87	2.78	0.93
H 8	10.34	5.76	1.80	5	4.81	0.96	4.84	0.97
H 4	8.34	4.24	1.97	>10	7.00	<0.70	6.95	<0.69
H 3	6.51	4.25	1.53	5	4.77	0.95	4.87	0.97
H10	12.21	9.06	1.35	2	1.76	0.88	1.90	0.95
H 9	9.57	9.06	1.06	1	1.19	1.19	1.25	1.25
H11	14.48	9.06	1.60	3	2.15	0.72	2.32	0.77
平均値						0.94		0.98
変動係数						14.2%		13.5%

DFc1 : (1)式によるじん性率の計算値 DFc2 : (2)式によるじん性率の計算値
DFe : じん性率の実験値

5. 結 論

大変位の繰返しによって軸方向鉄筋が降伏した後にせん断破壊を起こすような、腹鉄筋のない張出しはりの破壊挙動を実験的に検討した結果、以下の結論が得られた。

- (1) コンクリートの強度が変化するとせん断破壊のモードも変化する場合があるが、破壊モードはじん性率と密接な対応関係にあるので、じん性率を推定することができれば、せん断破壊のモードも推定できる。
- (2) せん断破壊時のじん性は、軸方向鉄筋比(p)、せん断スパン比(a/d)および、曲げ降伏耐力に対するせん断耐力の余裕を示す vc/vy の値によって、(2)式のように表すことができる。

参考文献

- [1] 楢貝 勇, R.Rizkalla, H.Ben-Omran, F.Saadat, "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", 第6回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1984
- [2] H.Okamura, T.Higai, "Proposed design equation for shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement", Proc. of J.S.C.E., No.300, Aug. 1980