

[133] RC部材の終局変位定量化に関する研究

正会員 ○豊田 和彦 (フジタ工業)  
 正会員 陸好 宏史 (埼玉大学工学部)  
 正会員 町田 篤彦 (埼玉大学工学部)

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材(以下RC部材という)の耐震性能を評価するうえで、耐力や復元力特性についての検討の他に、変形性能についての検討が極めて重要である。変形性能の推定方法に関しては、現在までにいくつかの提案がある。すなわち、建築の分野では、荒川ら<sup>6)</sup>や嶋津<sup>7)</sup>が建築構造物に用いられる鉄筋コンクリート柱の靱性率、あるいは変形角限界値という形での変形性能の定量化を試みているし、土木構造物を対象とした研究としては、松貝ら<sup>1)</sup>、石橋ら<sup>2)</sup>、筆者ら<sup>3,4)</sup>、島らなどが靱性率の推定を試みている。しかし、確たる算定方法は存在せず、応答変位と変形性能を直接比較するという設計法をとり得ないのが現状である。それで、上述のような研究結果を参考しつつ、以下に述べるような実験的研究を行い部材としての終局状態に最も強い影響を与える変形成分の限界値を定量化することによって、RC部材の変形性能を明確にしようとしたのである。

2. 実験概要

2.1 供試体

図-1に示すような片持ち梁型の供試体を、表-1に示すように軸圧縮応力 $\sigma_0$ を5種、せん断支間比 $a/d$ を3種、帯鉄筋比 $P_w$ を3種、コンクリート強度 $f_c'$ を3種、骨材の最大粒径 $G_{max}$ を3種、繰返し回数 $n$ を4種にそれぞれ変化させ、計17体作製した。供試体は全て曲げ降伏がせん断破壊に先行するように設計した。また、帯鉄筋を配する場合には、斜めひびわれが主鉄筋と45°をなして発生すると仮定し、固定端から断面の有効高さ $d$ に相当する位置までの範囲に少なくとも1本の帯鉄筋が入るように配慮した。引張鉄筋には異形鉄筋D13( $\sigma_y = 3800\text{kg/cm}^2$ )、帯鉄筋にはD3( $\sigma_y = 2400\text{kg/cm}^2$ ,  $A_s = 0.0728\text{ cm}^2$ )をそれぞれ用いた。

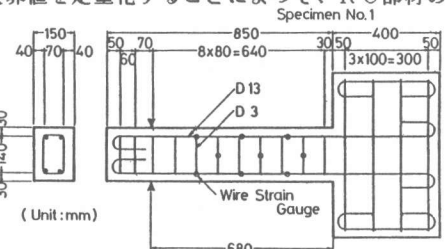


図-1 供試体の形状寸法の一例

2.2 荷重方法

荷重にあたっては、まず一方向に荷重制御で降伏荷重に達するまで荷重し、鉄筋とコンクリートの弾性係数の比を15とした弾性計算により得られる、主鉄筋が実降伏点に達する荷重に達した時の変位を降伏変位(+ $\delta_y$ )とした。ただし、降伏荷重に達する以前に、固定端断面の引張鉄筋に貼付した歪ゲージの値

表-1 供試体の詳細および実験結果

No.	Tensile Rein. Ratio P t (%)	Hoop Rein. Ratio P w (%)	Shear-Span Ratio a/d	Axial compres. Stress $\sigma_0(\text{kg/cm}^2)$	Concrete Strength $f_c'(\text{kg/cm}^2)$	Max. Size of Aggregate $G_{max}$ (mm)	Cyclic Number n (cycles)	Ductility Factor $\mu_{ut}$	Strength Ratio V·a/M	Failure Pattern (Fig.4)	
3	0.99	0.12	4.00	10	330	12.5	10	4.5	1.41	1	
1	0.99	0.12	4.00	0	308	12.5	10	5.6	1.55	1	
2				5	298					5.8	1.46
4				20	321					4.3	1.28
5				30	326					4.2	1.19
6	0.99	0.12	4.00	10	335	5.0	10	4.0	1.42	2	
7					254	25.0			1.36	2	
8	0.99	0.12	4.00	10	565	12.5	10	4.3	1.53	1	
12					140			5.1	1.22	2	
10	0.99	0.12	4.00	10	327	12.5	1	6.0	1.41	1	
11					323		3	4.9	1.41	1	
9					319		30	4.3	1.41	1	
13	0.99	0.12	2.50	10	337	12.5	10	4.3	1.02	3	
14			5.50		348			4.6	1.82	1	
15	0.99	0.24	4.00	10	128	12.5	10	5.4	1.53	1	
16		0.12			128			4.4	1.21	2	
17		0.06			128			3.5	1.05	2	

が降伏歪に達した場合には、その変位を $+\delta y$ とした。以後は変位制御で $\pm \delta y$ 、 $\pm 2\delta y$ 、……において、各々所定の回数だけ繰返し載荷した。載荷装置は図-2に示したようなものである。軸力は供試体先端に配したロードセルとフーチング下端に配した油圧ジャッキをPC鋼棒で緊結することによって作用させた。このとき、軸力を常に一定の方向に作用させるために、アクチュエータにより供試体先端の変位量と同じ量だけ油圧ジャッキを上下させた。なお、表-1に示した靱性率は、荷重-変位包絡線において、荷重が最大荷重の80%まで低下したときの変位を降伏変位で割ったものである。

### 2.3 計測方法

載荷実験中、図-3に示したように載荷点の荷重および変位他、フーチングからの主鉄筋の引抜けによる変形を4本の変位計によって計測した。また、脚柱部分の変形状況をPIゲージによって詳細に計測した。

### 3. ひびわれ状況

供試体は全て、曲げ降伏後斜め引張破壊あるいはせん断圧縮破壊の様相を呈して耐力を失った。破壊状況は図-4に示したように、3種類のパターンに大別できた。すなわち、斜めひびわれがX字状をなし、この部分に破壊が集中する場合(パターン1)、複数のX字状ひびわれが発生して、広い範囲にわたってかぶりコンクリートのはく落等が起こる場合(パターン2)、1つの斜めひびわれが開口することによって、斜め引張破壊の様相を呈する場合(パターン3)である。破壊状況は作用するせん断力とせん断耐力との大小関係によって変化し、相対的に作用せん断力が大きい(耐力比が小さい)部材ほどパターン1から3へと変化した。各々の供試体の破壊パターンは表-1に示したとおりである。

### 4. 脚柱部分の曲げ変形およびせん断変形

#### 4.1 変形の分解

図-3に示した方法で計測したデータをもとに、部材の変形を脚柱部分の曲げ変形 $\delta f$ 、せん断変形 $\delta s$ 、フーチングから主鉄筋の引抜けによる変形 $\delta a$ および固定端断面でのずれ変形 $\delta 4$ の4つに分解して検討した。脚柱部分に配したPIゲージによって、固定端から載荷点まで11~12cmごとに軸方向と軸直交方向の座標値を求めることが出来る。それで、この座標値から各断面の変位角を求め、これを軸方向に積分したものを曲げ変形とし、これ以外の脚柱部分の変形をせん断変形とした。従って、ここで言う曲げ変形とは「変形角を生じさせるような変形」であり、せん断変形とは「ひびわれ面でのずれ変形をも含んだ、変位角を生じさせない変形」という意味である。これらの変形成分の変化の例を図-5に示した。図からわかるように、 $\delta 4$ が全変形量に占める割合は小さく終局時に至っても急増することはない。また、 $\delta a$ は固定端の引張鉄筋が降伏した後に大きな割合を占めるようになるが、終局時には増加の割合が小さくなったり、減少に転じたりすることが多かった。 $\delta a$ はフーチング内の主鉄筋の挙動によって左右される量であるから、部材の終局状態とは無関係である。そこで、以後は $\delta f$ 、 $\delta s$ に着目した。

#### 4.2 曲げ変形およびせん断変形の挙動

曲げ変形およびせん断変形の挙動を示す例として、 $\sigma_0$ のみを変化させた場合の $\delta f$ および $\delta s$ と部材としての塑性率( $\delta/\delta y$ )との関係を図-6に示した。この図より、塑性率が2程度の段階までは、ひびわれがあまり発達していないので、 $\delta s$ が非常に小さな値となっており、この段階では脚柱部分の変形

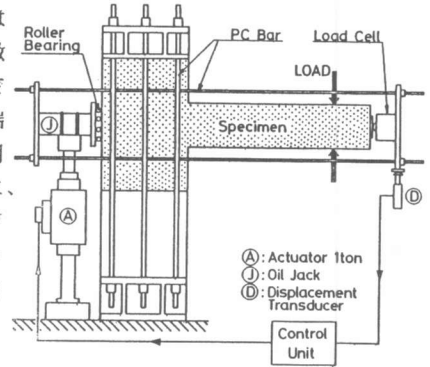


図-2 載荷装置

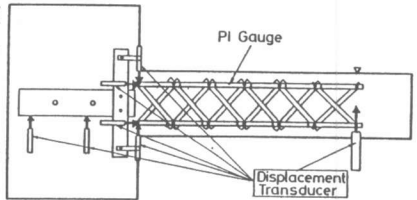


図-3 各変形の計測方法

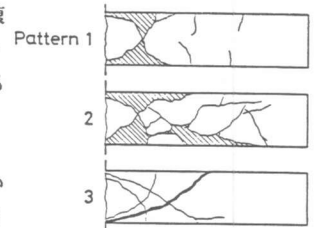


図-4 破壊形式

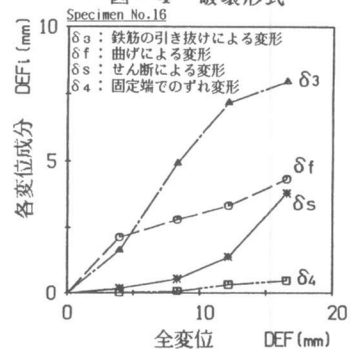
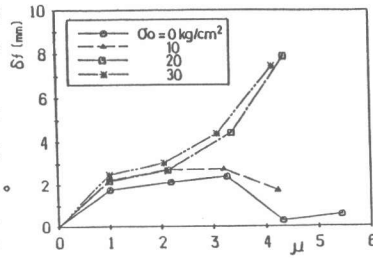


図-5 全変位と各変位成分

の大部分を  $\delta f$  が占めていることがわかる。さらに大きな変形のとときには、 $\sigma_0$  の大小によって  $\delta f$  の挙動が大きく異なり、 $\sigma_0$  が小さい供試体では  $\delta f$  が減少し、 $\sigma_0$  が大きい供試体では逆に急増した。 $\delta s$  については  $\sigma_0$  の大小に関わらず、終局時に近づくにつれて急増したが、今回実験を行った全ての供試体についてこのような傾向が認められた。

(a) 曲げ変形  $\delta f$



(b) せん断変形  $\delta s$

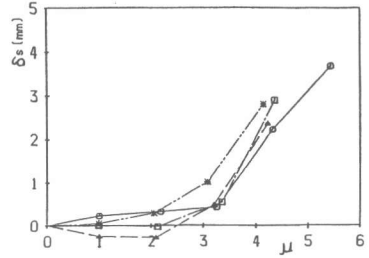


図-6 塑性率 ( $\mu = \delta / \delta y$ ) と曲げ変形およびせん断変形

破壊のパターン(図-4)と関連づけて考えればパターン1であった  $\sigma_0 = 0$  および  $10 \text{ kg/cm}^2$  の供試体では、 $\delta s$  のみが増加して終局に至っていることから、X字状ひびわれが発生した部分のせん断伝達剛性が低下して  $\delta s$  が急増し、これが限界値に達したことが耐力低下の原因と考えられる。従って、 $\delta s$  の限界値を定量化することによって、部材としての変形性能を推定できるものと考えられる。しかし、パターン1の破壊形態を示した供試体でも、終局時に  $\delta s$  のみが増加するとは限らず、 $\delta s$  とともに  $\delta f$  も増加して耐力を失うものも多かった。また、パターン2を示した供試体も全て終局時に  $\delta f$ 、 $\delta s$  双方が増加した。このような供試体においては、せん断伝達剛性の低下による  $\delta s$  の増加と同時に、X字状ひびわれが発生した部分が塑性ヒンジ的な挙動を示したために、 $\delta f$  が増加したものと考えられる。従って、このような場合には、 $\delta s$  が限界値に達したことが耐力低下の原因であるのか、塑性ヒンジの回転能が限界に達したことが原因であるのか、あるいはこれらの両方の効果によって部材としての終局状態に達したのか定かでない。従って、 $\delta f$  あるいは  $\delta s$  だけの限界値から部材の変形性能を評価することは困難であると考えられる。

$\sigma_0 = 30 \text{ kg/cm}^2$  および  $a/d = 2.5$  の供試体はパターン3の破壊形態を示し、 $\sigma_0 = 20 \text{ kg/cm}^2$  の場合にはパターン1と3との中間的な形態であった。これらの供試体では、X字状ひびわれ部分のせん断伝達剛性の劣化による  $\delta s$  の増加とともに、斜めひびわれの引張縁が開くことによる  $\delta f$  の増加が起こり、最終的には帯鉄筋が破断して耐力が低下した。このような場合には、むしろ  $\delta f$  が限界値に達したことが耐力低下の直接の原因であると考えることが妥当であるかもしれない。

### 5. 各種の変形成分と耐力比との関係

既往の研究によれば、RC部材のせん断耐力 ( $V$ ) と曲げ耐力 ( $M/a$ ) との比 ( $V \cdot a / M$ ) が変形性能と非常に密接に関係するものと考えられている。そこで、本実験で得られた各種の変形成分と耐力比との関係について検討した。この結果が図-7~図-11である。

本実験と参考文献4の実験結果もあわせて靱性率 ( $\mu_{ut}$ ) と耐力比との関係を図-7に示した。図からわかるように、靱性率と耐力比とは大局的に見れば、直線関係にあるが、この関係から部材の靱性率を推定しても、非常に大きな誤差を生ずることになり、実用的とは言えない。

図-8は石橋らが行ったのと同様に、全変形のうち脚柱部分の変形の靱性率 ( $\mu_0$ ) と耐力比との関係を示したものである。両者はほとんど相関しておらず、これから部材の変形能を推定することは不可能であると思われる。

図-9は荷重が最大荷重の80%以下に低下する直前の変位段階における  $\delta f$  を降伏時の曲げ変形  $\delta f_y$  で割った値と耐力比との関係を示したものである。図-10は同じ変位段階における  $\delta s$  を斜めひびわれが発生した範囲の長さ  $l_s$  で割った値と耐力比との関係である。両図より、 $\delta f$ 、 $\delta s$  とともに少なくとも耐力比によって定量化することは不可能であるものと考えられる。

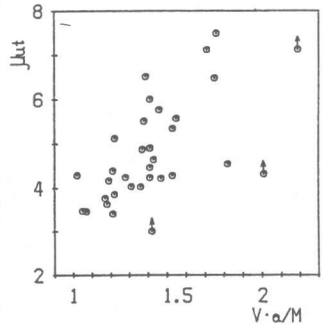


図-7 靱性率と耐力比の関係

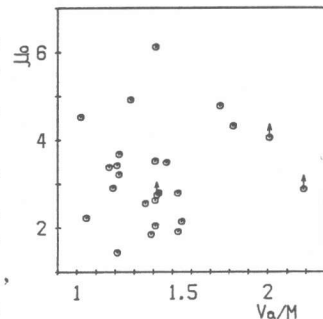


図-8 脚柱部の靱性率と耐力比

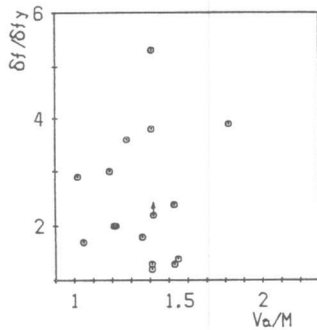


図-9 曲げ変形量と耐力比の関係

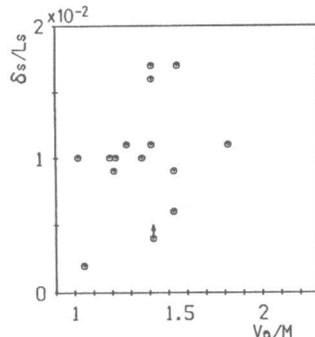


図-10 せん断変形量と耐力比の関係

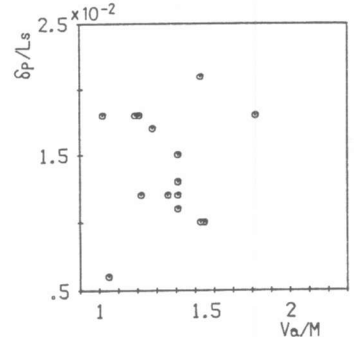


図-11 斜めひびわれ領域上端の変位と耐力比の関係

島らの研究を参考にして斜めひびわれが発生した領域と曲げひびわれのみが発生した領域との境界に最も近い断面における部材軸直交方向の変位 ( $\delta p$ ) に着目した。これを固定端からその断面までの長さ ( $L_s$ ) で割った値を縦軸に取り、横軸に耐力比を取って両者の関係を調べたのが図-11である。この場合にも両者の相関は全く認められなかった。

#### 6. 各種の要因と靱性率の関係

前述のように、RC部材の終局状態と関連の深いと思われるいくつかの変形成分を取り出しても、耐力比との相関は認められなかった。そこで、耐力比にとらわれずに各種の要因と部材の靱性率の関係を調べた。一例として、 $a/d$  と靱性率の関係を図-12に示した。縦軸は  $a/d=4.0$  のときの靱性率を1.0として、各供試体の靱性率を表したものである。この図より、 $\sigma_0 = 0$  の場合、両者は直線関係となり、 $\sigma_0 = 10 \text{ kg/cm}^2$  の場

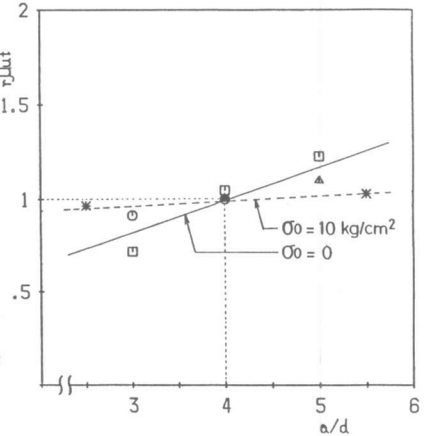


図-12 靱性率とせん断支間比の関係

合には別の直線関係となることが明かとなった。このような関係は耐力比によっては表現されないものである。従って、図-12のような靱性率に影響を及ぼす多くの要因と靱性率の関係を定式化することによって、RC部材の靱性率を定量化することが最善の方法であるものと考えられる。

#### 7. 結論

(1) 曲げ降伏後にせん断破壊を起こして終局に至るような部材の破壊パターンは3つに大別でき、耐力比の大小によってパターンが変化することが認められた。

(2) 脚柱部分のせん断変形量は終局状態に近づくときと急激に増加することが明かとなり、曲げ変形も多くの場合、終局時に増加する傾向が認められた。また、破壊パターンによってせん断変形の急増が耐力低下の原因となる場合や、曲げ変形の増加が原因となる場合などがあることが考えられた。

(3) 本研究で調べた各種の変形成分と耐力比との関係は、いずれもほとんど相関が認められず、部材の変形性能を評価するために都合の良い結果は得られなかった。従って、耐力比を用いずに、靱性率に影響を及ぼす多くの要因と靱性率の関係を定式化することにより、RC部材の靱性率を定量化することが最善の方法であると考えられる。

本研究の実施にあたって、埼玉大学の学生(昭和61年3月当時)であった岩片弘充、小林努の両氏には多大な協力を頂いた。また、本研究は科学研究費補助金(課題番号60550332)によって行ったものである。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 松貝 他「大変位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JCI年次講演, 1984
- 2) 石橋 他「鉄筋コンクリート部材のじん性率」構造物設計資料No79, 1984
- 3) 豊田 他「RC部材の終局変位定量化に関する研究」第39回土木学会年次講演, 1984
- 4) 豊田 他「RC部材の終局変位定量化に関する実験的研究」第7回JCI年次講演, 1985
- 5) 島 他「RC橋脚におけるく体下部の塑性域の回転性能およびせん断ずれ変形性能」第40回土木学会年次講演, 1985
- 6) 荒川 他「鉄筋コンクリート柱の繰返し挙動と塑性変形性能の評価」第5回JCI年次講演, 1983
- 7) Shimazu T. "On the Ultimate Values of Deformation Angle for Reinforced Concrete Columns", Trans. of A.I.J. No.312, 1982.