

# 繰り返し曲げを受けるRC梁の消費エネルギーによる破壊特性評価

魚本健人\*・矢島哲司\*\*・本郷和徳\*\*\*

本研究は、せん断スパン比 ( $a/d$ ) および腹鉄筋比を変化させた曲げ破壊する RC 単純梁を対象に、変位制御による各種変位の正負繰り返し載荷を行い、破壊時までの消費エネルギー量を求めてそれを加算した累積消費エネルギー量を算定した。その結果、破壊形態は主に鉄筋の破断であり、載荷変位および載荷履歴の相違にもかかわらず、ほぼ同一の累積消費エネルギー量で破壊した。この破壊形態においては累積消費エネルギー量によって破壊時までの載荷回数の推定が出来る可能性が示された。

**Keywords :** reinforced concrete beams, reversal cyclic loads, load-deflection curves, dissipated energy, accumulative dissipated energy, accumulative damage

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下 RC とする）部材に地震等の過大な外力が作用した場合の損傷の程度を正確に知ることは、その部材の余力を判断したり、耐震性能予測の上で重要なことと考えられる。

しかし、コンクリートと鉄筋の複合体である RC 構造物は、構造物の種類、断面特性、外力条件の違い等の多くの要因が影響をおよぼし、破壊モードが複雑になるため、塑性域における挙動を的確に把握することは難いと考えられる<sup>1)~5)</sup>。

例えば、終局の定義に関していえば、一般に、復元力が最大荷重の 80% 以下に低下した時点か、あるいは最大値に達した後に低下しはじめて荷重が降伏変位における荷重と等しくなった時点を破壊としているが、配筋等の断面諸条件の相違によっては終局とみなしがたい場合がある。更に、実験する場合の各変位段階の繰り返し回数に関しても、通常、定変位繰り返し回数を 10 回として試験を行う場合が多いが、これは大地震において大変位はせいぜい 10 回程度生ずるものとの仮定に基づいていると推定されるが確たる根拠はないと考えられる<sup>6)</sup>。また、じん性に関しても、材料や構造物が破壊する時の「エネルギー吸収能」と考えられるが、変形性能評価のためにも、部材の耐荷力が完全になくなるまで部材が吸収し得るエネルギー量を見きわめる必要があると考えられる。「破壊の定義」は、上記の問題点をも考慮した上で部材のひびわれ状況、残留変形等の供用性能、耐用期間等の被災の程度を考慮して定義する必要があると考えられる。

そこで本研究は、曲げ破壊する RC 単純梁を対象とし、変位制御による各種正負繰り返し載荷を行い、前述のように、通常の破壊の定義にはこだわらず、耐荷力が 0 付近まで低下するかまたは、鉄筋が切断するまで載荷を行い、破壊時までの諸特性の変化およびそれ等と破壊との関係について実験的に検討したものである。また、本研究は、繰り返し載荷される梁の諸特性の中で、材料学の視点から消費エネルギー量に着目し、材料が外力を受けて同じモードで破壊する場合には、材料の破壊は、材料が消費する総エネルギー量と密接な関係があるという想定から、RC 梁は複合材ではあるが、繰り返し曲げを受ける梁の消費エネルギー量およびそれを破壊時まで加算した累積消費エネルギー量に着目し、それと破壊の関係について明確しようとするものである。

## 2. 実験概要

### (1) 試験体

繰り返し載荷された RC 部材の破壊および消費エネルギー量に影響を及ぼすと考えられる各種要因は以下のように大別されると考えられる。

①外力条件（外力の大きさ、せん断スパン比、軸力の大きさおよび載荷履歴等）。

②構造物固有の因子（部材断面の大きさ、引張鉄筋比、圧縮鉄筋比、腹鉄筋比および各材料の強度等）。そこで本研究においては、主に外力条件を各種変化させてその影響について検討した。構造物固有の因子に関しては、断面耐力に影響を及ぼす断面寸法および主鉄筋比を一定にし、腹鉄筋比を変化させた。

実験に使用した試験体は図-1 および表-1 に示すように 15 cm × 20 cm × 250 cm の形状寸法が同一で引張鉄筋比 ( $p_t$ ) および圧縮鉄筋比 ( $p_c$ ) が 1.05%，腹鉄筋比が異なる 2 種類 ( $T_1$ ,  $S_1$  シリーズ :  $p_w=0.97\%$ ,  $T_2$  シリーズ :  $p_w=0.48\%$ ) の単純梁である。配筋は主鉄

\*正会員 工博 東京大学生産技術研究所、教授  
(〒106 東京都港区六本木 7-22-1)

\*\*正会員 芝浦工業大学工学部土木工学科、講師  
\*\*\*学生会員芝浦工業大学工学部大学院、学生

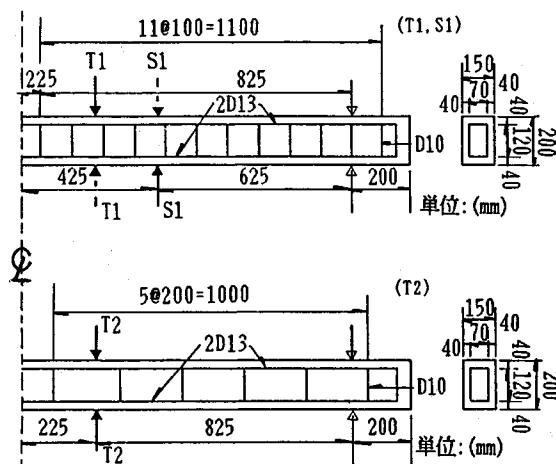


図-1 試験体諸元

筋にD 13 ( $SD 345$ ; 降伏点  $368 N/mm^2$ , 引張強さ  $561 N/mm^2$ ) を使用し, スターラップはD 10 ( $SD 295 A$ ; 降伏点  $370 N/mm^2$ , 引張強さ  $498 N/mm^2$ ) を使用した。

使用したコンクリートの配合を表-2に示す。また、各試験体の載荷時におけるコンクリートの強度は  $450 \sim 493 kgf/cm^2$  である。

### (2) 載荷方法

本実験はサーボバルサーを用いて図-1に示すように2点対称載荷であり、破壊形式に影響及ぼすせん断スパン比を変えた2種類( $T_1, T_2$ シリーズ;  $a/d=5.16, S_1$ シリーズ;  $a/d=3.91$ )についていずれの載荷も載荷装置のストローク変位による変位制御で行った。動的載荷は静的一方向載荷(図-5)における鉄筋が降伏して部材の剛性が急変した降伏変位 $\delta_y$ (各シリーズとも約8 mm)をもとに、表-3に示すような6種類の同一変位による正負交番繰り返し載荷と2種類の混合組み合わせ載荷(合計8種類)をいずれも破壊まで行った。なお、組み合わせ載荷は表-3に示すように混合変位組み合わせ波形(以下混合波と略す: 図-2参照)と模擬波形(EL CENTRO 1940 E-W成分の一部を3角波形とした模擬波形: 図-3参照)である。

### (3) 測定方法

各種計測に関しては、載荷装置のストローク変位および変位計2個(部材中央)によるたわみ測定と鉄筋およびコンクリートの表面の所定の位置に添付したひずみゲージにより、それぞれひずみ測定を行った。

載荷中の荷重、載荷装置のストロークおよび2個の変位計のデータは、コンピュータを用いてリアルタイムに荷重、変位-時間等の関係を破壊時までモニターで目視できるようにした。また、計測された荷重-変位曲線は20次関数で近似させ、式(1)に示すように各ループに囲まれた面積(図-4)を計算させ、載荷終了後直ち

表-1 載荷試験体

実験シリーズ	p t (%)	p w (%)	a/d
T1シリーズ	1.05	0.97	5.16
T2シリーズ	1.05	0.48	5.16
S1シリーズ	1.05	0.97	3.91

表-2 コンクリートの配合

粗骨材 最大寸法 の範囲 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメ ント W/C (%) S/A (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				細骨 材率 W	水 C	セメント S	細骨材 G.
20	8±2	2±1	58	52.2	174	300	969
						925	3.0

表-3 載荷変位の種類

載荷振幅	波形・載荷速度	実験シリーズ
$\pm 1\delta_y$	sin波, 0.4Hz	T1, S1
$\pm 1.5\delta_y$	sin波, 0.2Hz	S1
$\pm 2\delta_y$	sin波, 0.2Hz	T1, T2, S1
$\pm 3\delta_y$	sin波, 0.2Hz	T1, S1
$\pm 4\delta_y$	sin波, 0.1Hz	T1, T2, S1
$\pm 5\delta_y$	sin波, 0.1Hz	T1
混合波	sin波(図-2)	T1
模擬波	三角波(図-3)	T1, T2, S1

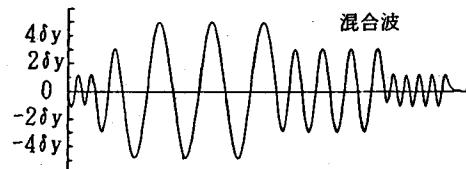


図-2 混合波形

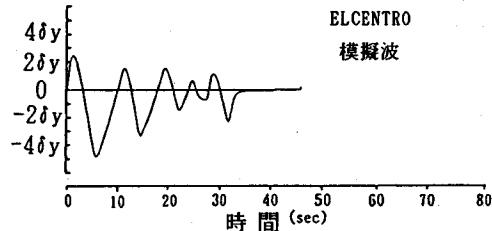


図-3 模擬波形

に各サイクルの消費エネルギー量( $\Delta W$ )および破壊時までそれを加算した累積消費エネルギー量( $\Sigma \Delta W$ )を出力させた。なお、消費エネルギー量算定には、S1シリーズは、中央点の変位計によって求められた値をS1、載荷ストロークによって求められた値をS2とした。また、T1, T2シリーズにおける載荷装置のストロークと中央点に設置した変位計の変位は、いずれの載荷においてもほぼ同一の値を示したので消費エネルギー量の算定には変位計によるたわみを用いた。

$$W = \int dW = \sum \Delta W \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここで、

$W$ : 破壊時までの累積消費エネルギー量

$\Delta W$ : 1サイクル当たりの消費エネルギー量

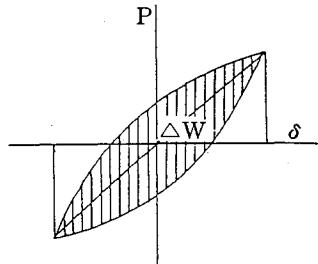


図-4 1サイクルあたりの消費エネルギー量

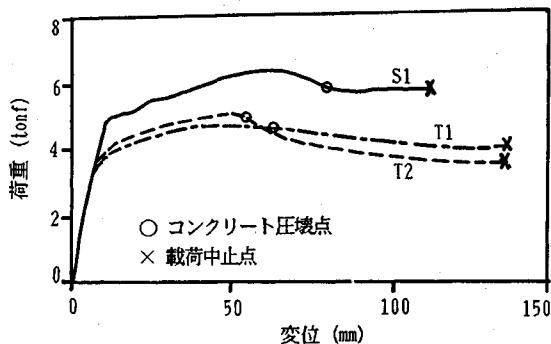


図-5 静的一方向載荷

表-4 静的一方向載荷結果

載荷シリーズ	T 1		T 2		S 1	
	変位	荷重	変位	荷重	変位	荷重
降伏変位	8mm	3.51ton	8mm	3.70ton	8mm	4.78ton
最大荷重	47mm	4.38ton	46mm	4.72ton	60mm	6.20ton
圧縮部コンクリート	56mm	4.14ton	52mm	4.20ton	72mm	5.20ton
圧壊点						
載荷中止点	11cm(13.8δ_y)		11cm(13.8δ_y)		14cm(17.5δ_y)	

### 3. 結果および考察

#### (1) 静的一方向載荷における荷重 ( $P$ )—たわみ ( $\delta$ ) の関係

図-5は各シリーズの静的一方向載荷における荷重 ( $P$ )—たわみ ( $\delta$ ) 曲線である。また、表-4はそれぞれの試験体の降伏変位、最大荷重、上縁コンクリートの圧壊変位を示したものである。いずれの試験体においても部材の降伏変位 ( $\delta_y$ ) は約 8 mm であった。降伏以後の各種試験体の挙動は、変形の増加とともに荷重が徐々に増加して最大荷重に達した後に、上縁コンクリートが圧壊した。なお、T2 および S1 は圧壊後僅かに荷重が低下するが、いずれの場合も圧壊後塑性変形量が大きく増加したにもかかわらず荷重の低下は小さく、急激に耐力低下を生ずる点は認められなかった。いずれの場合も、載荷継続中に載荷点支承がはずれて載荷不能となり (S1 は 11 cm = 13.8  $\delta_y$ , T1, T2 は 14 cm = 17.5  $\delta_y$ ) 載荷を中止した。このように今回実験に使用した試験体

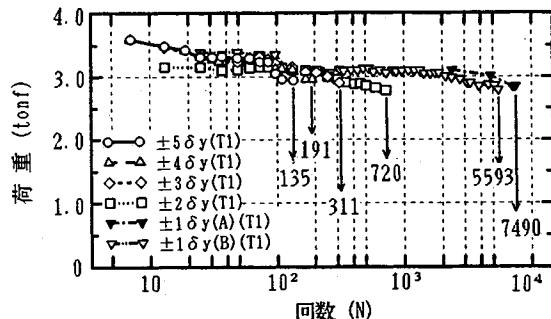


図-6 荷重—繰り返し回数

は荷重が急激に低下する点が存在しないが、その理由としては他の報告でも確認されているが、引張鉄筋が破断しなかったこと、そして破壊形式がせん断破壊でないこと。また、圧縮鉄筋（鉄筋比；1.05%， $p_t'/p_t=1.0$ ）はそれ自体塑性変形することによる効果は小さいが、引張鉄筋の塑性変形能を増大させる効果があること<sup>7), 8)</sup>。そして、かぶりコンクリートの剥落後には圧壊が内部に一部進行して中立軸は下降するが、腹鉄筋比(0.97%, 0.48%)が比較的大きいためコアーコンクリートおよび圧縮鉄筋を拘束した<sup>2), 3), 9), 10)</sup>等によるものと考えられる。

また、各試験体を比較すると、T1 に比べて腹鉄筋比が 1/2 で、コンクリートの拘束が小さい T2 は、コンクリート剥落の際に T1 に比べてコアーコンクリートの損傷が大きいため、コンクリートの圧壊以後における荷重低下の割合が T1 より大きくなっている。

#### (2) 繰り返し載荷回数 ( $N$ ) と荷重 ( $P$ )

変位制御の下で、同一変位による動的繰り返し載荷を行った T1 シリーズの試験体の繰り返し回数の増加と荷重との関係を示したのが図-6 である。回数の増加とともに各試験体の荷重の低下率は破壊近傍になんでも変わらず、変位が  $\pm 1\delta_y$  ~  $\pm 5\delta_y$  と大きく異なっているにもかかわらず、その差は小さい。また、変位の大きいものほど低下率は大きい。T2, S1 シリーズも同様な傾向を示した。これ等は、既に著者らの報告<sup>11), 12)</sup>でも確認しているが、部材が降伏変位以上の繰り返し載荷を受けた場合、1サイクル目はコンクリートが抵抗し、荷重は最も大きい値を示す（図-9 の  $\pm 4\delta_y$  および  $\pm 5\delta_y$  参照）。しかし、繰り返し回数の増加とともにコンクリートが損傷し、主筋が部材の曲げ耐力を支配するために、本試験の載荷変位の差異程度では各変位における鉄筋の耐力にはほとんど差が生じないため、このような傾向を示したと考えられる。また、図中の数字は各変位での繰り返し回数を示しているが、いずれの変位で載荷した場合でも破壊直前に大きな荷重変動等の前兆がなく突然破壊に至る。破壊の主な原因是、T1 シリーズの  $\pm 5\delta_y$  の試験体では、大変形の繰り返しにより載荷

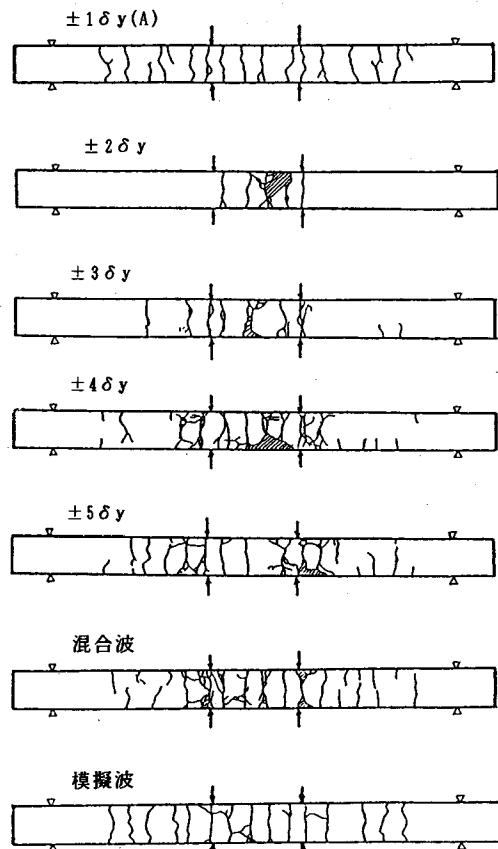


図-7 試験体の破壊状況

位置のかぶりコンクリートが大きく圧壊し、剛性低下している鉄筋がバックリングを起こし、その後、数サイクル後に座屈部分で鉄筋が切断して荷重が低下したが、それ以外の試験体は主鉄筋の疲労破断によるものである。このようにほとんど全てが主鉄筋の破断により破壊した理由は、前記の(1)で示したように本研究の  $a/d$  オよび腹鉄筋比の範囲内では、曲げ応力状態が卓越したこと。そして腹鉄筋の拘束によって鉄筋の早期座屈が防止されたこと等によると考えられる。また、図-7はT1シリーズの破壊時における混合波および模擬波の試験体をも含めたひび割れ等の破壊状況を示したものである。 $\pm 1\delta_y$  の試験体のひびわれ分布は塑性変位が小さいので鉄筋の抜け出し等を伴うひび割れの集中がなく、ひび割れが試験体全体に分散し、かぶりコンクリートの圧壊も見られない。 $\pm 2\delta_y$ ～ $\pm 4\delta_y$  の試験体は、繰り返し回数の増加にともない鉄筋とコンクリートの付着破壊が生じた結果による鉄筋の抜け出し等による塑性ヒンジができ、ひび割れが部材中央付近に集中した。そして破壊時にはその部分のかぶりコンクリートが徐々に圧壊した後、その位置の鉄筋が切断して破壊に至っている。また、載荷変位が大きくなるにしたがいコンクリートの圧壊に

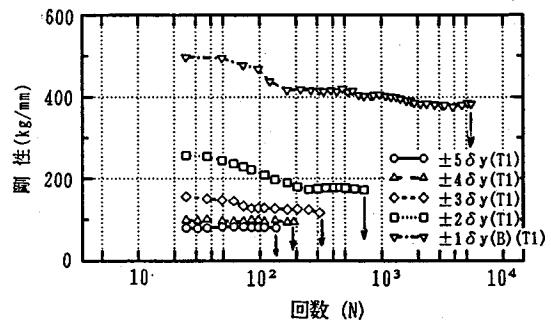


図-8 剛性—繰り返し載荷

よる損傷部分が大きくなる傾向を示し、ひび割れ本数も多くなっている。 $\pm 5\delta_y$ においては、繰り返し載荷の初期では斜めひび割れの発生がみられたが、そのひび割れ幅の増大は見られなかった。しかし、載荷回数を増す毎に載荷点付近に生じたひび割れ幅が増大し、鉄筋の抜け出し等による塑性ヒンジができる、徐々にかぶりコンクリートが圧壊した。そして破壊時にはコアーコンクリートの内部までコンクリートが圧壊し、鉄筋の座屈が生じた後数サイクルで鉄筋が切断して破壊に至った。

大変形波形を数多く組み合わせた“混合波(図-2)”は、鉄筋の切断位置が $\pm 5\delta_y$ と同様に載荷点下であり、ひび割れ等の破壊状況も同様な傾向を示したが、“模擬波(図-3)”は、組み合わせ波形中での大変形波形の数が少ないため、コンクリートの圧壊は小さく、切断位置は部材中央付近であった。

### (3) 繰り返し載荷( $N$ )による剛性( $K$ )の変化

図-8はT1シリーズの破壊時までの動的繰り返し載荷を行った剛性の変化を示した図である。剛性( $K$ )は図-4に示す各サイクルの履歴ループの正負最大変位( $\pm \delta_i$ )を求め、その点の荷重( $\pm P_i$ )を最大変位で除した正負の剛性の平均値である。 $\pm 3\delta_y$ ～ $\pm 5\delta_y$ の大きな変位の繰り返しでは、数サイクルでコンクリートが損傷し、以後の圧縮力は圧縮鉄筋が主に負担することになり、回数の増加にかかわらず低下率は小さい。しかし、塑性変形が小さい $\pm 1\delta_y$ の場合は、コンクリートの損傷が少なく、圧縮力の一部をコンクリートも分担し、繰り返し回数の増加にともないコンクリートが徐々に損傷することにより剛性の低下率が大きくなつたと考えられる。なお、図には示していない他のシリーズにおいても同様な傾向を示した。

### (4) 1サイクル当たりの消費エネルギー量( $\Delta W$ )と繰り返し回数( $N$ )

図-9はT1シリーズの試験体における代表的な履歴曲線を示したものである。また、図-10、図-11は各シリーズの同一変位による正負交番繰り返し載荷の1サイクル当たりの消費エネルギー量と繰り返し回数との関

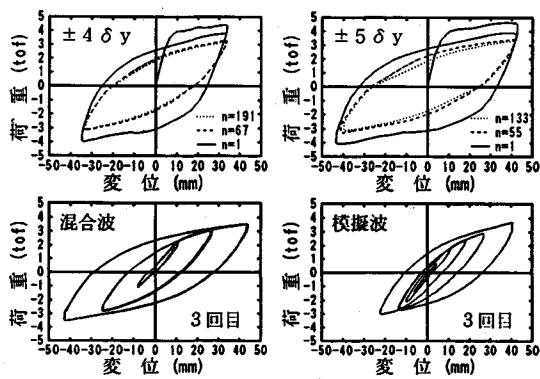


図-9 履歴曲線

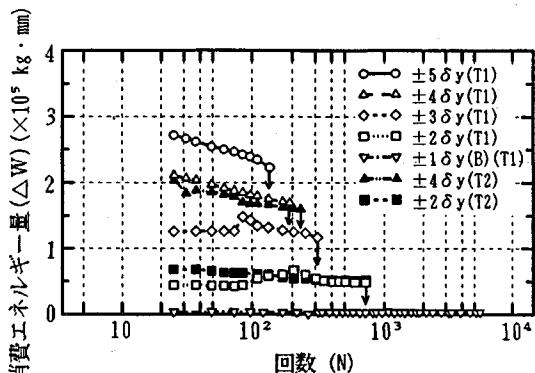


図-10 消費エネルギー ( $T_1$ ,  $T_2$ )—回数

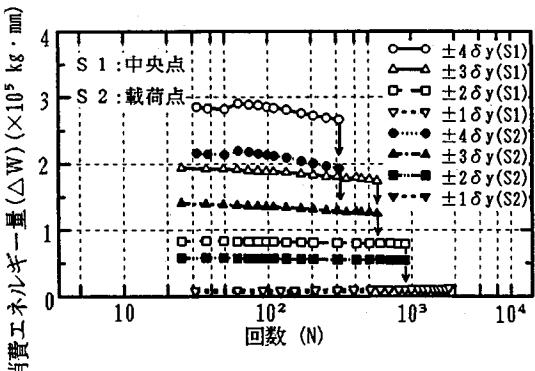


図-11 消費エネルギー (S1) — 回数

係を示したものである。消費エネルギー量の算定は、正確には荷重とその荷重作用点の荷重方向の変位の積として求められるべきであるが、本試験においては正負繰り返し載荷試験のため載荷位置における変位計の取付が困難であり、変位計を部材中央にセットした。しかし、前記のように、同時にサーボパルサーのストローク変位の値も計測してそれと荷重との消費エネルギー量も算定した。**T1, T2** シリーズにおいては載荷位置における変位と中央点の変位に差が認められず、消費エネルギー量

もほぼ同一であるため変位計の消費エネルギー量で検討した。S1シリーズにおいては、 $a/d$ が3.91（純曲げスパン 850 mm）であり、繰り返し回数の増加による曲げひび割れの発生以降のスパン中央の変位は載荷点位置の変位に比べ大きな値を示した。しかし、前述のように、破壊点はほぼスパン中央の鉄筋の破断であるため、中央点の変位計で求めた値をS1、載荷装置のストローク変位によるものをS2として両者の消費エネルギー量について検討した。

図-10に見られるように、荷重と繰り返し回数との関係とは異なり、1サイクル当たりの消費エネルギー量は変位の違いによりかなりの差を生じている。また、 $T$ 1シリーズの繰り返し回数との関係では、 $\pm 1 \delta_y$ ～ $\pm 3 \delta_y$ の変位は破壊時までほぼ一定の値であるが、 $\pm 5 \delta_y$ 、 $\pm 4 \delta_y$ の場合は、大変位の繰り返しを受けるため、消費エネルギー量はコンクリートの損傷、ひび割れの集中による鉄筋の抜け出しにともなうひびわれ幅の増大等により減少して剛性と反対の挙動を示した。しかし、純曲げスパンが大きいS1シリーズは、ひび割れが分散することにより、応力集中によるひびわれ幅の増大および圧縮力によるコンクリートの損傷がT1、T2シリーズに比べて小さいため $\pm 4 \delta_y$ の回数にともなう低下の割合は小さい。また図-11のS1シリーズは表-5にも示すようにスパン中央部の消費エネルギー量(図中のS1)は多くのひび割れ発生により、たわみが大きくなつたため、載荷装置のストローク変位で求めた載荷点下の値(図中のS2)よりも大きい値を示した。

また、せん断スパン比の異なる S1 シリーズ ( $a/d = 3.91$ ) と T1, T2 シリーズ ( $a/d = 5.61$ ) の消費エネルギー量を同一条件で比較するためには、モーメント ( $M$ ) ~ 曲率 ( $\phi$ ) の関係から単位長さ当たりの消費エネルギー量として求められるが、本研究においては曲率の測定はしておらず、それに換えて式 (2) で示すように、同一変位における与えられた仕事量 (モーメント) は本実験においては一定と考え、S1 シリーズの荷重値を  $L_s/L_{s'}$  の比 1.32 で除して荷重値の修正を行い同一条件における消費エネルギー量の比較検討を行った。なお、表-5 の ( ) 内の数字は修正後の消費エネルギー量である。

ただし、

$M$ ; モーメント

$P$ ; 修正荷重

### $P'$ ; S1 シリーズの荷重

$L_s'$ ,  $L_s$ ;  $S_1$ , および  $T_1, T_2$  のせん断スパン長さ 図-12 は各シリーズの同一変位における各変位レベルの平均消費エネルギー量を示したもので、各シリーズともほぼ直線的に増加していることがわかる。また、各

表-5 消費エネルギー測定結果

T 1 シリーズ			
振幅	繰り返し回数(N)	$\Sigma \Delta W$ ( $\times 10^7 \text{kg} \cdot \text{mm}$ )	平均 $\Delta W$ ( $\times 10^5 \text{kg} \cdot \text{mm}$ )
$\pm 1\delta y$ (A)	7490	3.89	0.05
(B)	5593	1.67	0.03
$\pm 2\delta y$	720	3.62	0.50
$\pm 3\delta y$	311	3.82	1.23
$\pm 4\delta y$	191	3.54	1.85
$\pm 5\delta y$	135	3.39	2.51
混合波	244イクル	3.27	13.63
模擬波	113イクル	3.36	2.97
T 2 シリーズ			
$\pm 2\delta y$	733	3.99	0.54
$\pm 4\delta y$	230	3.98	1.73
模擬波	123イクル	3.50	2.85
S 1 シリーズ (中央点変位)			
$\pm 1\delta y$	1800	1.92(1.45)	0.11(0.08)
$\pm 1.5\delta y$	1124	5.26(3.98)	0.47(0.35)
$\pm 2\delta y$	899	7.18(5.44)	0.80(0.61)
$\pm 3\delta y$	574	10.47(7.93)	1.82(1.38)
$\pm 4\delta y$	310	8.38(6.35)	2.70(2.05)
模擬波	152イクル	6.48(4.91)	4.26(3.23)
S 2 (載荷点変位)			
$\pm 1\delta y$	1800	1.23(1.07)	0.07(0.06)
$\pm 1.5\delta y$	1124	3.34(2.53)	0.30(0.23)
$\pm 2\delta y$	899	4.94(3.74)	0.55(0.42)
$\pm 3\delta y$	574	7.50(5.68)	1.31(0.99)
$\pm 4\delta y$	310	6.26(4.74)	2.02(1.53)
模擬波	152イクル	4.83(3.32)	3.18(2.18)

( )は修正後の消費エネルギーを示す。

シリーズの比較においては腹鉄筋比が異なっているがT<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>シリーズは同一の値を示したがS<sub>1</sub>シリーズは前記のように中央点(S1)および載荷点下(S2)の計測点による違いが表れ、載荷変位が大きくなるにしたがい両者の差は大きくなっている。

#### (5) 破壊時までの累積消費エネルギー量 ( $\Sigma \Delta W$ )

載荷変位および載荷履歴の異なる各試験体の消費エネルギー量を破壊時まで加算した結果を表-5に、また、同一条件で比較した結果を図-13に示す。

これらの結果から注目されることは、S<sub>1</sub>シリーズが多少のばらつきがあるものの、載荷変位、載荷履歴等の相違にもかかわらず破壊時まで加算された総エネルギー量はほぼ同一の値を示していることである。

T<sub>2</sub>シリーズはT<sub>1</sub>シリーズに比べて腹鉄筋比が1/2ではあるが、本研究の腹鉄筋比の範囲内ではいずれの載荷においてもせん断破壊を生ずることなくT<sub>1</sub>シリーズとほぼ同じ値で破壊に至っている。a/dを小さくしたS

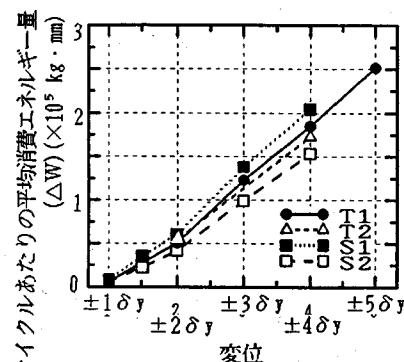


図-12 平均消費エネルギー量

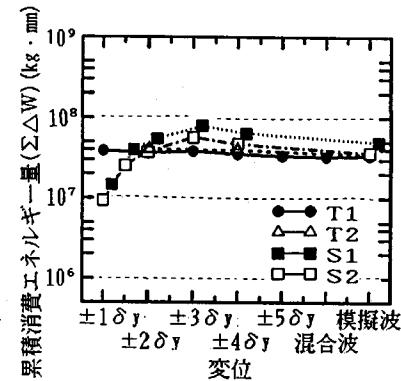


図-13 累積消費エネルギー量

1シリーズにおいても本研究の範囲内では破壊形式は曲げ破壊であった。しかし、鉄筋が破断した位置のスパン中央部の値は載荷点下の累積消費エネルギー量に比べて約1.3~1.6倍の値を示した。

しかし、形状寸法、主鉄筋比および載荷スパンが同一である本実験で用いたRC梁において、腹鉄筋比、載荷位置、載荷変位および載荷履歴を変化させた場合においても同じ破壊形態で破壊し、累積消費エネルギー量もほぼ同一の値を示していることからこの値が本実験で用いた試験体の最大消費エネルギー量を示していると考えられる。また、このことは、降伏変位以上の正負の繰り返し載荷を受ける部材の耐力はコンクリートのひび割れ発生以後においては主に主鉄筋が支配するため、本研究におけるRC梁の破壊は主鉄筋の高応力繰り返しによる疲労破壊であると考えられる。このことを考慮すると本研究のような破壊モードの場合には、複合材であるRC梁の破壊が破壊エネルギーの概念を用いて推定できる可能性が示されたと考えられる。

#### 4. 結論

限られた条件ではあるが、本研究において得られた主要結論は以下の通りである。

- 1) 各種同一変位によって繰り返し載荷を行った各試験体の荷重および繰り返しによる荷重の低下率は変位が大きく異なるにもかかわらずほぼ同一の傾向を示した。
- 2) 部材の剛性と繰り返し回数との関係においては、 $\pm 1 \delta_y \sim \pm 3 \delta_y$  の変位は繰り返しにともない剛性の低下が大きく $\pm 4 \delta_y, \pm 5 \delta_y$ においてはほぼ一定の値を示した。
- 3) 繰り返し載荷によって得られた 1 サイクル当たりの消費エネルギー量は変位の相違によりかなりの差を生じた。また、変位の大きい $\pm 5 \delta_y, \pm 4 \delta_y$  の場合は、載荷回数の増加にともない消費エネルギー量は減少するが、 $\pm 1 \delta_y \sim \pm 3 \delta_y$ においては、破壊時までほぼ一定の値を示した。
- 4) 腹鉄筋比が異なる 2 種類の試験体の 1 サイクル当たりの消費エネルギー量はほぼ同一の値を示したが、載荷点が異なる場合には載荷変位が大きくなるに従いその差は大きくなつた。また、 $a/d$  が 3.91 の場合は、 $a/d$  が 5.16 の場合とは異なり、載荷点とスパン中央点の変位が異つたことにより、消費エネルギー量も異なつた値を示した。
- 5) 破壊形態が同一である本試験体においては、腹鉄筋比、載荷位置、載荷変位および載荷履歴を変化させた場合における累積消費エネルギー量はほぼ同一の値を示していることからこの値が本実験で用いた試験体の最大消費エネルギー量を示していると考えられる。ただし、 $a/d$  が小さくなるにしたがい鉄筋の切断位置の値と載荷点位置の値が異なる結果を示した。

**謝辞：**本研究を行うにあたり多大な御協力を頂いた広島大学工学部 河合研至助手ならびに帝都高速度交通営団

に感謝いたします。

### 参考文献

- 1) 岡田清編：最新コンクリート，国民科学社，1986. 3.
- 2) 町田・睦好・豊田：鉄筋コンクリート部材の塑性変形能定量化に関する研究，土木学会論文集，第 378/V-6, 1987. 2.
- 3) 石橋・吉野：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形能力に関する研究，土木学会論文集第 390 号/V-8, 1988. 2.
- 4) 中村・鈴木・尾坂：交番繰り返し荷重を受ける RC 部材の履歴復元力特性及び韌性評価，コンクリート工学年次論文報告集 11-2, 1989. 6.
- 5) 上田・J. Q. K. M. : 鉄筋コンクリート棒部材の韌性に与える載荷履歴の影響，コンクリート構造物の韌性と配筋方法に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，1990. 5.
- 6) 町田篤彦：鉄筋コンクリート構造物の耐震設計法に関する研究の現状，土木学会論文集，第 366 号，V-4, 1986. 2.
- 7) 小柳・六郷・内田・岩瀬：複鉄筋コンクリートはりの韌性評価，コンクリート工学年次論文報告集第 5 卷，1983. 6.
- 8) 小柳・六郷・岩瀬：RC はりの曲げ破壊過程と曲げじん性に及ぼす材料特性の影響，土木学会論文集，第 348 号/V-1, 1984. 8.
- 9) 藤井・阿河・本郷・宮花：過多鉄筋コンクリートばりの横拘束筋によるじんせい改善，土木学会論文集，第 348 号/V-1, 1984. 8.
- 10) 服部篤史他：横拘束コンクリートのはり部材への適用に関する検討，土木学会第 44 回年次学術講演会，1989. 10.
- 11) 魚本・矢島・田村：繰り返し大変形を受ける鉄筋コンクリート部材の特性，生産研究，第 42 卷第 12 号，1990. 12.
- 12) 魚本・矢島：大変形正負交番繰り返し荷重を受ける RC 部材の曲げ耐力特性，コンクリート工学年次論文報告集，第 13 卷，1991. 6.

(1992.4.14 受付)

## DAMAGE EVALUATION OF REINFORCED CONCRETE BEAMS SUBJECTED TO CYCLIC BENDING MOMENT USING DISSIPATED ENERGY

Taketo UOMOTO, Tetsuji YAJIMA and Kazunori HONGO

Displacement-controlled cyclic bending test is performed for reinforced concrete beams with different shearing span and stirrup ratio. Accumulative damage evaluation using the total dissipated energy, up to rupture, is investigated for the reinforced concrete beams.

These reinforced concrete beams are destroyed under cyclic loading due to the rupture of reinforcement in the beams. The accumulative dissipated energy up to rupture shows almost constant independent of loading displacement and deformation histories. The time for the beams to be destroyed due to cyclic bending moment can be evaluated by the accumulative dissipated energy.