

繰返し載荷されたRC梁の累積損傷および破壊特性評価

矢島哲司*・本郷和徳**・魚本健人***

本研究は、降伏変位以上の各種の大変形正負繰返し載荷した梁の破壊までの繰返し回数と累積消費エネルギー量の算定を行った。解析の結果、載荷変位の相違にもかかわらず累積消費エネルギー量はほぼ一定の値を示した。また、破壊までの繰返し回数及び累積消費エネルギー量は実験結果とほぼ同一な値を示した。この解析結果を基にランダム波が作用した場合の累積損傷度評価を試みたが実験結果とよく整合した。

Key Words: reinforced concrete beams, reversal cyclic deformations, dissipated energy, total dissipated energy, index for accumulative damage

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下RCとする）部材に過大な外力が繰返し作用した場合、被災の程度を正確に知ることは、その部材の余力等を判断する上で重要なことと考えられる。過大な外力が繰返し載荷された場合の損傷程度は、各種塑性変形の繰返し回数および部材の塑性変形特性に左右されると考えられる。また、外力の載荷条件に関しても、地下構造物等の損傷は、載荷された変位によって影響され、地上の構造物の損傷とは異なった挙動を示すと考えられる。損傷度の評価方法に関しては、部材の塑性率による評価、部材の変形角による評価および部材の剛性低下率による評価等がよく知られている。しかし、これらの評価には部材に累積された損傷が直接考慮されておらず、より正確に損傷度評価を行うためには累積された損傷度の概念を導入する必要があると考えられる^{1),2)}。

そこで本研究は、材料学の視点から破壊エネルギーの概念を用いて、解析により、変位制御の下での繰返し載荷されたRC梁の累積損傷評価および破壊時の推定を試みたものである。

筆者らは既にRC梁の累積された損傷の程度は累積消費エネルギー量と密接な関係にあることを実験によって明らかにした³⁾⁻⁹⁾。実験結果によって明らかとなったことは、断面寸法、主鉄筋比およびスパンが同一で曲げ破壊するRC単純梁においては、変位制御の下での載荷変位および載荷履歴のいかんをとわず、破壊時までの累積消費エネルギー量はほぼ一定の値となることである。なお、実験においては、破壊の基準を明確にし、部材の終局（破壊）を見きわめるために、破壊の定義は通

常の定義にはこだわらず、耐力力が0付近まで低下するかまたは鉄筋が破断するまでとした。その結果、破壊形態はいずれも鉄筋の破断であった。破壊形態および累積消費エネルギー量がほぼ同一の値を示していることからこの値が実験で用いた試験体の最大消費エネルギー量 (W_{max}) を示していると考えられる。このことから、解析によって部材の破壊時までの最大消費エネルギー量が求まれば、過大な外力が繰返し作用した場合でも、その外力の繰返しによる部材の累積損傷程度を評価出来ると考えられる。

なお、解析の対象は、実験に用いた梁で、適用範囲は、曲げが卓越するRC単純梁が変位制御の下での降伏変位 (δ_y) を越える正負の各種大変位を受ける場合とし、破壊は鉄筋の破断によるものとする。そして、すでに実験によって求められた破壊までの繰返し回数および最大消費エネルギー量を解析により求めた値と比較した。さらに、その解析結果を応用して地震等による非対称ランダム外力が作用した場合の部材の累積された損傷程度を明らかにした。

2. 解 析

(1) 解析方法

エネルギー的概念を構造物の破壊の指標とする既往の主な研究は、部材が繰返しを受けて消費するエネルギーによって損傷を評価する考えと、エネルギー入力によって評価する考えに大別される。例えば、山田等¹⁰⁾は、耐震安全性の評価方法として、構造物が繰返し載荷された場合の履歴減衰能として消費エネルギーに着目した共振容量の概念について発表している。また、秋山等¹¹⁾は、構造物の損傷がエネルギー入力総量に影響され、その入力量を一定値と見なし、建築物の耐震安全性の評価を行っている。本研究は、山田等と同様に消費エネルギーに着目し、累積された消費エネルギー量を損傷の指標と

* 芝浦工業大学 助教授 工学部土木工学科

** 芝浦工業大学工学部大学院、学生

*** 東京大学生産技術研究所、教授

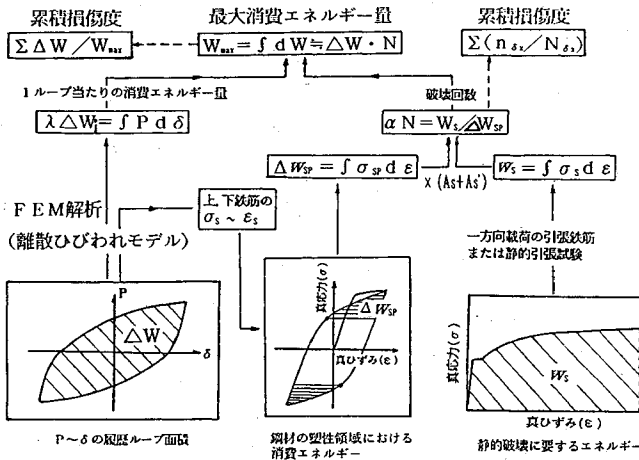


図-1 解析フローチャート

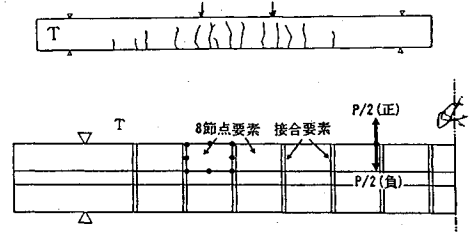


図-2 要素分割

したものである。しかし、山田等の研究は、破壊までの繰返し回数と部材の消費するエネルギーとを無関係に設定している。本研究は、材料学の視点より破壊エネルギーの概念に基づいており、各種の荷重振幅における破壊までの繰返し回数と消費エネルギー量とがリンクされている。

なお、本研究の解析の手順としては、部材が破壊までに消費する各種荷重変位の最大消費エネルギー量 (W_{max}) は、式 (1) に示すように破壊時までの繰返し回数 (N) と破壊時までの各荷重変位の 1 ループ当たり消費エネルギー量の平均値 (ΔW) との積に等しいと仮定して求める。そして、1 ループ当たりの消費エネルギー量の平均値 (ΔW) は、(2) 節に示す三島等の“離散ひびわれモデルに基づく FEM 解析プログラム”^{12)~15)} によって求められた荷重 (P) ~ 変位 (δ) の履歴ループを用いて求める。また、破壊時までの繰返し回数 (N) は、鉄筋の疲労破断によって部材が破壊するものと仮定し、(3) 節の鉄筋のエネルギーによる疲労理論から求める。

$$W_{max} = \int dW = \sum_{i=1}^N \Delta W_i \cong \Delta W \cdot N \dots \dots \dots (1)$$

ただし、

W_{max} : 最大消費エネルギー量

ΔW_i : 各変位の 1 ループ当たりの消費エネルギー量

ΔW : 各変位の 1 ループ当たりの消費エネルギー量の平均値

N : 各変位の破壊時までの繰返し回数

また、地震等によるランダム波が作用した場合の累積損傷の評価は、解析結果から得られた最大消費エネルギー量 (W_{max}) を用いた消費エネルギーによる評価方法、そして、破壊までの繰返し回数 (N) を用いた線形被害則からの 2 通りの方法 (5 節) によって検討を行った。なお、図-1 は解析のフローを示したものである。

(2) 1 ループ当たりの消費エネルギー量の平均値 (ΔW) の算定

RC の非線形挙動に関する解析モデルは、分散ひびわれモデルと離散ひびわれモデルに大別される。正負の大変位繰返し曲げを受けて局所変形が卓越する梁等は単数のひびわれに注目する離散ひびわれモデルが適していると考えられる。そこで本研究においては、三島等の“離散ひびわれモデルに基づく FEM 解析プログラム”を用いて図-1 に示すように各種の変位における荷重 (P) ~ 変位 (δ) の関係を求める。そして、その履歴ループから 1 ループ当たりの消費エネルギー量を求める。なお、この解析においては繰返し等による材料の劣化挙動ならびに時間効果は考慮していない。そこで本解析では実験結果を参考に、繰返しによる損傷を考慮して式 (2) によって求めた値を用いた。

$$\Delta W = \lambda \cdot \Delta W_{cat} \dots \dots \dots (2)$$

ただし、

ΔW_{cat} : 解析で求められた消費エネルギー量

λ : 繰返しによる損傷係数

また、離散ひびわれモデルに基づく FEM 解析の詳細は文献^{12)~15)} に詳しいのでここでは解析のための要素分割について記述するに止める。離散ひびわれモデルを RC 部材に適用する場合、ひび割れ発生位置を予測して要素分割を行う必要がある^{12), 13)}。ここでは、実験結果を参考にして平均ひびわれ間隔に接合要素を配置し、その他の要素は弾性要素とした。その要素分割の一例を図-2 に示す。

(3) 破壊までの繰返し回数 (N) の算定

大変形正負繰返し曲げを受ける梁の挙動は、初めの数サイクルでコンクリートにひびわれが生じた以後は、主鉄筋が部材の耐力を支配すると考え (後述)、部材の破壊が鉄筋の疲労破断によって破壊すると仮定して破壊までの繰返し回数の算定は鉄筋の疲労破断から求める。

一般に鋼材の低サイクル疲労破断回数の算定は、実験的手法においては、疲労試験による $S-N$ 曲線によって求めるか、あるいは繰り返される塑性ひずみ振幅と疲労寿命の関係を示す Manson-Coffin 式^{16),17)}によって求められる。しかし、金属のエネルギーによる疲労理論¹⁸⁾によれば、金属が繰り返し载荷によって破壊するまでの疲労過程に費やされる「比破壊エネルギー（単位容積当たりのエネルギー量）」は、各金属固有の不変の大きさであるとしている。また、荷重の形式と条件には依存せず、塑性変形を受けた場合に不可逆的に消費されるエネルギー量に関係するとされている。この「比破壊エネルギー」は、熱力学的手法によって求めることが出来ることが証明されている。また、静的引張試験の真応力～真ひずみのデータによって決定出来ることが計算および実験によって証明されている。そこで本研究は、破壊までの繰返し回数を金属のエネルギーによる疲労理論から以下の式(3)を用いて求める。RC 部材中の鉄筋が塑性変形をとまなう繰返し载荷により疲労破断する場合、鉄筋の真応力～真ひずみ履歴曲線に囲まれたヒステリシスループ中の塑性領域の仕事量 (Δw_{sp} : 図-1 の斜線部分) が鉄筋の疲労破断に影響を及ぼすと考える。即ち、繰返しによる鉄筋の塑性仕事 (Δw_{sp}) の累積量が静的引張破壊で消費するエネルギー量 (w_s) に到達した際に疲労破断が生ずると仮定した。静的引張破壊で消費するエネルギー量は鉄筋の静的引張試験の応力～ひずみの実験結果から求める。なお、鉄筋の応力およびひずみは真応力～真ひずみである。

$$\alpha N = W_s / \Delta W_{sp} \dots \dots \dots (3)$$

ただし、

N : 破壊までの繰返し回数

ΔW_{sp} : $\Delta w_{sp} (A_s + A'_s)$

W_s : $w_s (A_s + A'_s)$

Δw_{sp} : 鉄筋の 1 ループ中の塑性仕事量

w_s : 鉄筋の静的破壊に消費するエネルギー量

A'_s, A_s : 上, 下縁鉄筋の断面積

α : 材料特性および破壊確率等から決まる係数

(4) 最大消費エネルギー量の算定

最大消費エネルギー量は前述のように式(2), (3)より求めた (ΔW) と (N) との積として求められる。

$$W_{max} = \lambda \Delta W_{cal} \cdot N \dots \dots \dots (1)$$

(5) ランダム波が作用した場合の部材の累積損傷度の算定

地震等が RC 部材に作用した場合の部材の累積損傷度を上記で求められた最大消費エネルギー量および破壊までの繰返し回数を用いて求めようとするものである。

a) 累積消費エネルギー量 ($\sum \Delta W_{\delta_x}$) による累積損傷度評価方法

ランダム波が作用した場合、ランダム波中の各変位 (δ_x) における消費エネルギー量 (ΔW_{δ_x}) を解析によって累積し、式(4)に示すように、最大消費エネルギー量 (W_{max}) でその値を除して損傷度を求める。

$$D.I.E = k \cdot \frac{\sum \Delta W_{\delta_x}}{W_{max}} \dots \dots \dots (4)$$

ただし、

$D.I.E$: エネルギーによる損傷度指標⁶⁾ (DAMAGE INDEX BY ENERGY)

$\sum \Delta W_{\delta_x}$: 作用したランダム波中の各変位 (δ_x) における消費エネルギー量 (ΔW_{δ_x}) の累積

W_{max} : 最大消費エネルギー量

k : 供用性能等を考慮した損傷係数

なお、損傷度は 0~1.0 の範囲で 1.0 は破壊である。

b) 線形被害則 (マイナー則)¹⁹⁾ による累積損傷度評価方法

解析によって求められたランダム波中の各変位 (δ_x) の破壊までの繰返し回数 (N_{δ_x}) を Manson-Coffin 式から求め、さらに、式(5)に示すようにマイナー則によって損傷度を求める。

$$D.I.M = k \cdot \sum (n_{\delta_x} / N_{\delta_x}) \dots \dots \dots (5)$$

ただし、

$D.I.M$: マイナー則による損傷度指標 (DAMAGE INDEX BY MINER'S LAW)

n_{δ_x} : ランダム波形中の各変位 (δ_x) の回数

N_{δ_x} : ランダム波形中の各変位 (δ_x) の破壊時までの回数

k : 供用性能等を考慮した損傷係数

なお、損傷度は 0~1.0 の範囲で 1.0 は破壊である。

3. 試験体諸元

解析の対象とした試験体は実験で用いた試験体と同一のもので、図-3 および表-1 に示すように 15 cm × 20 cm × 250 cm の形状寸法で、载荷区間 (45 cm) が同一で、配筋の異なる 2 種類の試験体である。

試験体 T は主鉄筋が D13 (SD 345; 降伏点 368 N/mm², 引張強さ 561 N/mm²) であり、スターラップは D10 (SD 295 A; 降伏点 370 N/mm², 引張強さ 498 N/mm²) である。また、引張鉄筋比 (p_t) および圧縮鉄筋比 (p'_t) は 1.05%, 腹鉄筋比は $p_w = 0.97\%$ である。

また、試験体 UT は主鉄筋が D10 (SD 295 A; 降伏点 330 N/mm², 引張強さ 470 N/mm²) であり、スターラップは D6 (SD 295 A; 降伏点 387 N/mm², 引張強さ 563 N/mm²) である。また、引張鉄筋比 (p_t) および圧縮鉄筋比 (p'_t) は 0.59%, 腹鉄筋比は $p_w = 0.42\%$ である。また、試験体のコンクリートの強度は 39.2 N/mm² である。

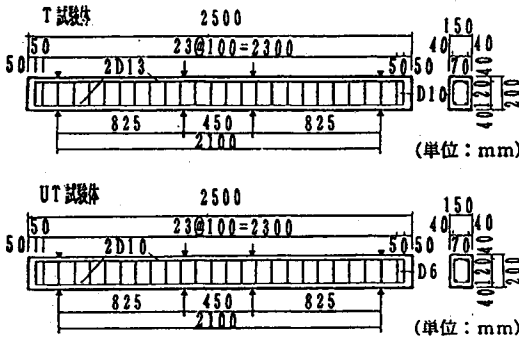


図-3 試験体諸元

表-1 試験体諸元

項目 試験体	断面 h × b (mm)	a/d	鉄筋			コンクリート 強度 (N/mm ²)
			鉄筋量 As=As' (cm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	
T	200×150	5.16	2D13 2.53(cm ²)	368	561	1.05
UT			2D10 1.43(cm ²)	330	470	0.59

4. 算定結果および考察

(1) 消費エネルギー量

a) 各種変位における消費エネルギー量 (ΔW_{δ_z}) の比較

図-4はTおよびUT試験体の荷重～変位に関する三島等の解析モデルによる解析結果の一例である。載荷変位は $\pm 4\delta_y$ で、初めから3ループ目までの載荷点の荷重～変位の関係を示したもので、点線が同変位の実験結果である⁹⁾。なお、実験における載荷方法は、図-3に示すように、2点対称載荷であり、いずれの載荷も変位制御による同一変位の正負交番繰返し載荷である。また、載荷速度は0.1 Hz～0.2 Hzである。両試験体の一方向載荷における引張鉄筋の降伏に対応する解析値は、T試験体は降伏変位 (δ_y) が7 mm、降伏荷重 (P_y) が3.35 t (実験値は δ_y : 8 mm, P_y : 3.51 t) である。また、UT試験体では5 mmと1.81 t (実験値は δ_y : 5 mm, P_y : 2.00 t) である。他のいずれの載荷変位においても1ループ目はコンクリートが抵抗し、消費エネルギー量は最も大きい値を示している。3ループ以降はこの解析においては繰返しによる材料の劣化・損傷は考慮していないため、曲線が定常化したので解析は3ループ目までとした。なお、曲線が定常化するのは、1サイクル目で大きな引張塑性を受けた鉄筋が、2サイクル目でほぼ応力の再配分を終え、3サイクル目で断面内の応力状態が落ちつくため、3サイクル目以降の荷重の低下が小さいと考えられる¹⁴⁾。また、履歴曲線の解析結果は他の載荷変位においても実験結果と比較的よく一致している。

図-5は載荷点位置における1ループ当たりの消費エ

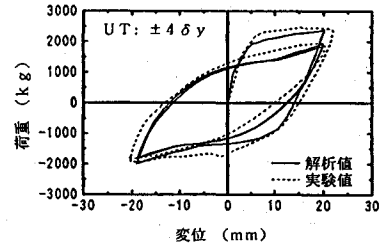
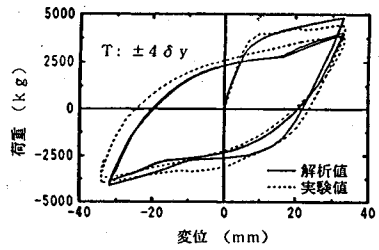


図-4 荷重-変位履歴曲線

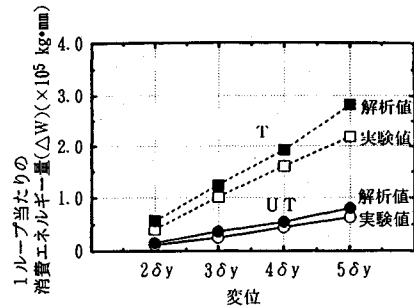


図-5 1ループ当たりの消費エネルギー量

ネルギー量の解析結果である。なお、解析には3ループ目の消費エネルギー量 (ΔW_{ca}) を用いた。変位が $\pm 2\delta_y$ ～ $\pm 5\delta_y$ の本解析の範囲においては、1ループ当たりの消費エネルギー量は、T試験体およびUT試験体ともに変位の増加とともにほぼ直線的に増加している。また、図-5および表-2には同時に実験結果も併記した。実験結果の1ループ当たりの消費エネルギー量は破壊時までの累積消費エネルギー量を破壊までの繰返し回数で除した平均値である。実験結果との比較においては、解析結果が大きな値を示した。同一変位との比較においては、T試験体は約1.21～1.38倍、UT試験体は1.24～1.48倍である。大きな値を示した理由は、実験結果は破壊時までの1ループ当たりの消費エネルギー量は一定ではなく、繰返しによる部材の損傷により減少した結果を平均したためにこのような結果になったと考えられる^{4), 6), 9)}。そこで本解析においては、式(2)の損傷係数 (λ) の値を、各変位における解析値の3ループ目の消費エネルギー量と実験値との比 ($\Delta W/\Delta W_{ca}$) の平均値より求め、T試験体は $\lambda=0.78$ 、UT試験体は $\lambda=0.73$ として1ループ当たりの消費エネルギー量を求め

表-2 1ループ当たりの消費エネルギー量

T試験体				
変位	解析値 ($\lambda: 0.78$)		実験値	
	ΔW_{cal} (3ループ目) (kg・mm)	$\lambda \cdot \Delta W_{cal}$ (kg・mm)	ΔW (平均値) (kg・mm)	$\Delta W_{cal} / \Delta W$
$\pm 2\delta_y$	5.69×10^4	4.44×10^4	4.11×10^4	1.38
$\pm 3\delta_y$	1.24×10^5	9.64×10^4	1.01×10^5	1.22
$\pm 4\delta_y$	1.93×10^5	1.51×10^4	1.61×10^5	1.21
$\pm 5\delta_y$	2.82×10^5	2.20×10^4	2.19×10^5	1.28
UT試験体				
変位	解析値 ($\lambda: 0.73$)		実験値	
	ΔW_{cal} (3ループ目) (kg・mm)	$\lambda \cdot \Delta W_{cal}$ (kg・mm)	ΔW (平均値) (kg・mm)	$\Delta W_{cal} / \Delta W$
$\pm 2\delta_y$	1.53×10^4	1.12×10^4	1.13×10^4	1.35
$\pm 3\delta_y$	3.65×10^4	2.67×10^4	2.47×10^4	1.48
$\pm 4\delta_y$	5.49×10^4	4.01×10^4	4.44×10^4	1.24
$\pm 5\delta_y$	8.03×10^4	5.87×10^4	6.32×10^4	1.27

表-3 消費エネルギー量の分担率

項目	鉄筋の消費エネルギー	純曲げスパン		鉄筋点から20cm以内		鉄筋点から20cm以外		$\Sigma \Delta W_s$	梁全体 ΔW (総荷点)	$\Sigma \Delta W_s / \Delta W$
		上縁鉄筋	下縁鉄筋	上縁鉄筋	下縁鉄筋	上縁鉄筋	下縁鉄筋			
$\pm 2\delta_y$	ΔW_s (kg-cm)	2512.6	2606.3	95.0	64.7	16.8	17.7	5313.2	5691.9	93.3(%)
	$\Delta W_s / \Delta W$	89.9(%)		2.8(%)		0.6(%)		93.3(%)		
$\pm 3\delta_y$	ΔW_s (kg-cm)	5541.6	5467.9	357.5	354.7	24.1	15.5	11761.1	12356.8	95.2(%)
	$\Delta W_s / \Delta W$	89.1(%)		5.8(%)		0.3(%)		95.2(%)		
$\pm 4\delta_y$	ΔW_s (kg-cm)	7768.5	7282.2	1693.8	1555.7	79.3	17.2	18396.5	19316.9	95.2(%)
	$\Delta W_s / \Delta W$	77.9(%)		16.8(%)		0.5(%)		95.2(%)		
$\pm 5\delta_y$	ΔW_s (kg-cm)	10383.2	10395.6	3103.3	2957.7	105.0	24.3	26969.1	28158.5	95.8(%)
	$\Delta W_s / \Delta W$	73.8(%)		21.5(%)		0.5(%)		95.8(%)		

た。なお、表-2にはその結果を示した。

b) 消費エネルギー量の分担率

一般に、RC 構造物に与えられたエネルギーの各部分における分布性状や構成材料のエネルギー分担率を知ることは構造物の損傷および破壊のメカニズムの解明に重要なことと考えられる。

そこで本研究は、解析によって得られた接合要素における各構成要素の消費エネルギーの分担割合、特にその中でも、既報の実験結果において、梁の破壊が曲げによる鉄筋の破断であることから、主鉄筋の消費エネルギー量に注目してエネルギー分担割合を検討した。なお、鉄筋の消費エネルギー量を求めるにあたり、前述のように、三島等の解析モデルは、接合要素(各ひび割れ部分)以外は、弾性要素を配置したため、消費エネルギー量は生じないことから、ひび割れ発生位置と仮定して配置した接合要素の消費エネルギー量のみ注目した。

表-3および図-6は解析によるT試験体の3ループ目における消費エネルギー量の鉄筋の分担率および梁内部での分担率の分布性状を示したものである。部材の消費した全エネルギー量は載荷点位置における荷重と変位との関係(図-4参照)から求められる。鉄筋の消費エネルギー量($\Sigma \Delta W_s$)は、正確には鉄筋自体の消費エネルギー量と付着応力~すべり関係による消費エネルギー量を分けて考えるべきであるが、本解析においては、付着応力~すべりの関係を考慮した鉄筋の応力~平均開口変位関係の履歴曲線から求めたため、付着応力~すべり

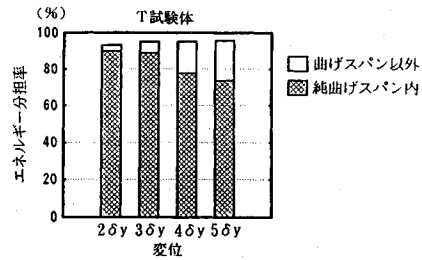


図-6 鉄筋が分担する消費エネルギー量

関係による消費エネルギー量は、鉄筋の消費エネルギー量に含まれるものとした。図-7に鉄筋の応力(σ)~開口変位(w)関係の履歴曲線を示す。また、梁の消費エネルギー量の分布性状は、梁を①純曲げスパン内(450mm)、②載荷点の外側の200mm以内区域、③支承までの②の外側区域、と3分割して検討した。各区間の鉄筋の消費エネルギー量はその区間のひびわれの本数分を加算($\Sigma \Delta W_s$)したものである。部材中の鉄筋の消費エネルギー量の分担率は、載荷変位によって異なるが、部材の全消費エネルギー量の93.3~95.8%がひびわれ部の上下の鉄筋で消費される。即ち、コンクリートのひびわれが発生した以後における部材の耐力を鉄筋が支配していることがわかる。なお、データには示さないがUT試験体も92.0~95.7%とほぼ同様な結果を示した。また、変位の増加にとまない鉄筋のエネルギーの分担率も増加する。梁内部での分担率の分布性状に関しては、消費エネルギー量のほとんどが曲げ区間内の鉄筋で消費されていることがわかる。また、載荷変位が大きくなるに従い②載荷点の外20cm以内区域、の分担率が増加している。なお、これ等の解析結果は、実験における破壊が全て曲げ区間内の鉄筋の破断であったこと⁹⁾と整合している。

(2) 破壊までの繰返し回数

a) 鉄筋の静的破壊に要するひずみエネルギー量

図-8に実験に用いた試験体の主鉄筋における静的引張り試験結果の一例を示す。静的破壊に消費するエネルギー量は、この試験結果によって求められた真応力~真ひずみ曲線によって囲まれた部分(w_s)である。本研究における w_s および $W_s (=w_s(A_s + A_s'))$ の実験結果(試験片各3本の平均値)は、D13は $w_s: 939.7 \text{ kg/cm}^2$, $W_s: 4764.3 \text{ kg}$, D10は $w_s: 956.7 \text{ kg/cm}^2$, $W_s: 2726.6 \text{ kg}$ である。

b) 鉄筋の繰返しによる塑性仕事量

図-9は三島等の解析モデルによる3ループ目まで繰返し載荷した部材中の曲げ区間内のひびわれ部の上、下縁の鉄筋の真応力~真ひずみ曲線の一例である(試験体; UT, 載荷変位; $\pm 3\delta_y$)。なお、三島等の解析における鉄筋モデルは、繰返し載荷の考慮可能な加藤モデル²⁰⁾

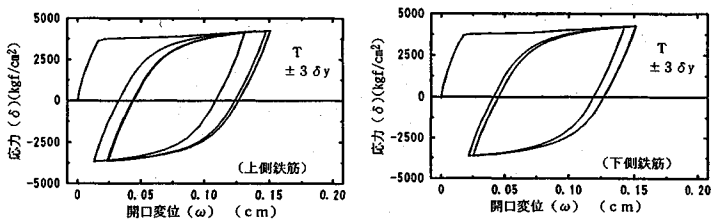


図-7 鉄筋の真応力-開口変位曲線

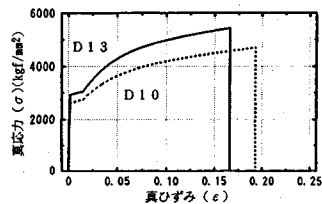


図-8 鉄筋の静的引張り試験

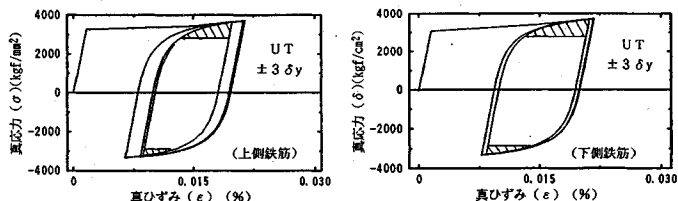


図-9 RC 部材中の鉄筋の真応力-真ひずみ曲線

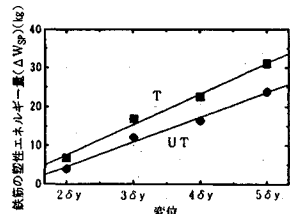


図-10 鉄筋の塑性仕事量

であり、また、その精度については、すでに実証されている¹²⁾ものとして構成則等の詳細は省略する。荷重～変位の履歴曲線と同様に3ループ目以後の応力～ひずみ関係は定常化したので以後の解析は省略した。また、図に示される斜線の部分は、梁の降伏変位 (δ_y) 以上の载荷による鉄筋の塑性仕事に要するひずみエネルギー量 (Δw_{sp}) の値である。解析値には、消費エネルギー量の場合と同様に3ループ目を用いた。

図-10はT試験体およびUT試験体の ΔW_{sp} ($=\Delta w_{sp}(A_s+A'_s)$) と各载荷変位との関係を示したものである。 ΔW_{sp} は変位の増加とともにほぼ直線的に増加している。また、表-4には各载荷変位におけるこれらの値 (ΔW_{sp}) を示した。なお、鉄筋の塑性仕事量の算定においては、1ループ当たりの消費エネルギー量の算定と同様に、繰返し硬化または繰返し軟化等の繰返しによる影響 (α の値) を考慮する必要がある。しかし、著者等は、他の報告²¹⁾において鋼材のひずみ制御による低サイクル疲労の概念を用いて、平均ひずみの影響を考慮した破壊時までの繰返し回数の算定を行った。その結果、本研究における算定値とほぼ同様な値を示したので、今回は、 $\alpha=1.0$ とした。なお、材質の違いによる繰返し挙動の違い等を含めて、今後さらに検討する必要がある。

c) 破壊までの繰返し回数

式(3)の鉄筋の静的破壊に要するエネルギー量 (W_s) と繰返しによる鉄筋の塑性仕事 (ΔW_{sp}) との関係から求められた各载荷変位における破壊までの繰返し回数 (N) の解析結果を図-11および表-4に示す。なお、同時に実験結果も併記した。同一変位における実験結果と比較すると、両試験体ともに解析結果は変位が小さい場合は実験結果より小さく、変位の大きい場合は実験結果より大きな値を示した。しかし、「RC部材中に配筋された鉄筋の繰返しによる挙動」は、単に「鋼材の低

サイクル疲労における挙動」とは異なり、前記の繰返し硬化等をも含めた各種の要因により複雑な挙動を示すと考えられるので今後更に検討する必要がある。なお、本研究においては鉄筋比および鉄筋の材質を変化させたが、解析結果は実験結果とよく一致している。

(3) 最大消費エネルギー量

式(2)の1ループ当たりの消費エネルギー量 ($2 \cdot \Delta W_{cal}$) と式(3)の破壊までの繰返し回数 (N) の積から求めた最大消費エネルギー量 (W_{max}) の算定結果を図-12および表-4に示す。同時に実験結果も併記した。

解析で求めた最大消費エネルギー量は実験結果と同様に鉄筋比の違いによって大きく異なった値を示し、最大消費エネルギー量が鉄筋量に支配されることが認められる。また、T試験体の最大消費エネルギー量の解析結果の平均値は $3.11 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{mm}$ 、平均値からの偏差が $-11.6 \sim 4.5\%$ 、UT試験体の場合は、平均値は $6.42 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{mm}$ 、平均値からの偏差が $-10.1 \sim 4.7\%$ である。多少のばらつきはあるものの、実験結果と同様に载荷変位の相違にもかかわらず、最大消費エネルギー量 (W_{max}) はほぼ一定の値となった。このことは、上記の2つの結果は、このような破壊形式の場合、繰返し载荷された部材の破壊が部材固有の累積消費エネルギー量に到達した時点で破壊することを意味している。

(4) ランダム波が作用した場合の部材の累積損傷度の算定

解析によって求められた最大消費エネルギー量および破壊までの繰返し回数から部材にランダム波が作用した場合の損傷度を求める。

図-13はEL CENTRO地震波 (E-W1940年成分) の一部を三角波形とした正負非対称の変位を有する模擬波形である。T試験体にこの1回の組み合わせランダム波

表-4 解析結果

T試験体 (W _s : 4764.3kg)							
変位	解析値				実験値		
	鉄筋の塑性仕事(ΔW _{sp})(kg)	破壊時までの繰返し回数(N)	1ループ当たりの消費エネルギー(λ・ΔW)(kg・mm)	最大消費エネルギー(W _{max} : N・λ・ΔW)(kg・mm)	破壊時までの繰返し回数(N)	1ループ当たりの消費エネルギー(ΔW)(kg・mm)	最大消費エネルギー(W _{max} : ΣΔW)(kg・mm)
±2δ _y	6.62	720	4.44×10 ⁴	3.20×10 ⁷	720	4.11×10 ⁴	2.91×10 ⁷
±3δ _y	16.67	286	9.64×10 ⁴	2.76×10 ⁷	311	1.01×10 ⁵	3.15×10 ⁷
±4δ _y	22.13	215	1.51×10 ⁵	3.25×10 ⁷	191	1.61×10 ⁵	3.07×10 ⁷
±5δ _y	32.39	147	2.20×10 ⁵	3.23×10 ⁷	135	2.19×10 ⁵	2.96×10 ⁷
				3.11×10 ⁷ (平均値)			3.04×10 ⁷ (平均値)
UT試験体 (W _s : 2726.6kg)							
±2δ _y	4.55	600	1.12×10 ⁴	6.72×10 ⁶	662	1.13×10 ⁴	7.50×10 ⁶
±3δ _y	12.63	216	2.67×10 ⁴	5.77×10 ⁶	235	2.47×10 ⁴	5.85×10 ⁶
±4δ _y	16.47	166	4.01×10 ⁴	6.62×10 ⁶	140	4.44×10 ⁴	6.22×10 ⁶
±5δ _y	24.30	112	5.87×10 ⁴	6.57×10 ⁶	72	6.32×10 ⁴	4.55×10 ⁶
				6.42×10 ⁶ (平均値)			6.03×10 ⁶ (平均値)

注) λ: 0.78 (T試験体), λ: 0.73 (UT試験体)

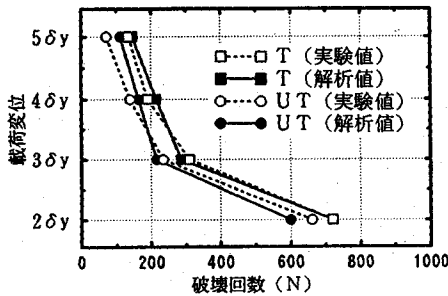


図-11 破壊回数算定結果

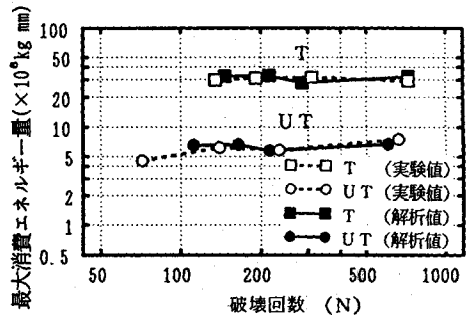


図-12 最大消費エネルギー量

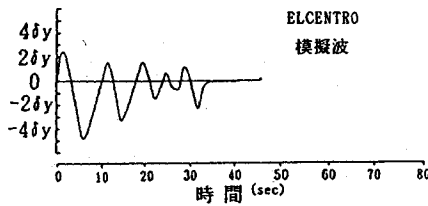


図-13 模擬波形

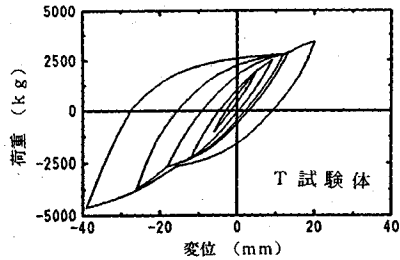


図-14 模擬波形の荷重-変位履歴曲線

が繰り返し作用した場合の損傷度を求める。

a) 累積消費エネルギー量による損傷度評価方法

図-14は、解析によるT試験体の模擬波形の3回目の荷重-変位履歴曲線である。この1回の組合わせランダム波の各変位ごとの消費エネルギー量を解析した結果は表-5のΔW_{δx}に示す通りである。解析によって得られた1回当たりの累積消費エネルギー量、3.49×10⁶kg・mmの値に式(2)のλ=0.78を考慮すると、T試験体の消費エネルギーによる1回当たりの損傷度D.I.Eおよび破壊までの繰返し回数(M)は、表-6に示す通りとなる。なお、損傷係数を考慮しない場合も(λ=1.0)損傷度および破壊までの繰返し回数は同じ値となる。

b) マイナー則による累積損傷度評価方法

T試験体のランダム波形中の各変位(δ_x)の破壊までの繰返し回数(N_{δx})を求め、マイナー則によって損傷

度を求めた。ランダム波形中の各変位における破壊までの繰返し回数の推定は、前述の塑性ひずみ振幅と疲労寿命との関係を示すManson-Coffin式^{(6), (17)}を応用して求めた。解析で求めた4種類の荷重変位における鉄筋の塑性ひずみ振幅(ε_p)が、ほぼ比例関係にあることから、鉄筋のひずみ振幅を梁の荷重振幅(δ_x)に置き換えて式(6)より算定した。

$$\delta_x \cdot (N_{\delta x})^{kp} = C \dots \dots \dots (6)$$

ただし、

δ_x: 荷重変位

kp, C: 定数 (通常, kp=0.6)

N_{δx}: 各変位(δ_x)における破壊までの繰返し回数
式(6)より求められたランダム波形の各変位(δ_x)における破壊までの繰返し回数(N_{δx})および損傷度等

表—5 模擬波形の解析結果

	振幅(mm)	変位	$\Delta W \delta x$	破壊回数(N δx)
			(kg・mm)	$\delta x \cdot (N \delta x)^{0.6} = 98.2$
1	+20	+2.5 δy	4.67×10^4	454
2	-40	-5.0 δy	1.07×10^5	143
3	+13	+1.6 δy	7.07×10^4	955
4	-26	-3.3 δy	4.40×10^4	293
5	+12	+1.5 δy	3.86×10^4	1064
6	-12	-1.5 δy	1.07×10^4	1064
7	+5	+0.6 δy	4.03×10^3	4864
8	-6	-0.8 δy	7.44×10^2	3376
9	+9	+1.1 δy	7.03×10^3	1783
10	-18	-2.3 δy	1.93×10^4	562
合計			3.49×10^5	

Wmax : 3.11×10^7 (kg・mm)

は表—5, 6 に示す通りである。

本解析の算定結果より、ランダム波が作用した場合の累積損傷度評価を行ったが、解析結果はいずれの方法によっても実験結果とほぼ同一な値を示した。このように、3 ループ目までの荷重～変位関係を基に、曲げが卓越した部材で、 $\pm 2\delta_y \sim \pm 5\delta_y$ の正負の大変位が繰返し載荷された部材において、破壊が鉄筋の破断である本解析の適用範囲においては、100 回以上のレベルの破壊回数の推定と累積損傷予測の可能性が示されたと考えられる。なお、本解析においては破壊の基準を明確にし、部材の終局を見きわめるために、 $k=1.0$ としたが、「破壊の定義は」累積の損傷を考慮した上でひびわれ状況、残留変形、被災後の供用性能、公共性および経済性等を考慮して再度定義する必要があると考えられる。

5. 結 論

本研究の範囲内で得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 解析によって求められた 1 ループ当たりの消費エネルギー量は、実験結果と同様にいずれの試験体においても繰返し載荷振幅の増加にともないほぼ直線的に増加する。
- 2) 正負繰返し載荷された部材内部の消費エネルギー量の分担率は上、下縁の主鉄筋が約 92～96% であり、載荷変位の増加とともに鉄筋の分担率は増加する。また、消費エネルギー量は、ほとんどが純曲げスパン内の鉄筋で消費され、載荷変位の増加にともない載荷点の外側付近の分担率が増加する。また、これらの結果は、実験における全ての破壊が曲げ区間内の鉄筋の破断であったことと整合する。
- 3) 破壊までの繰返し回数の算定を、繰返し載荷された RC 部材中の鉄筋の塑性領域における消費エネルギー量と静的引張り破壊に消費されるエネルギー量から求めたが、実験結果とよく一致した。

表—6 累積損傷度算定結果

	実験値	解析値	マイナー則
破壊時までの回数 (M)	113回	114回	111回
最大消費エネルギー量 (Wmax)	2.85×10^7 (kg・mm)	3.11×10^7 (kg・mm)	—
1回当たりの平均消費エネルギー量 (Wmax/M)	2.52×10^5 (kg・mm)	2.72×10^5 (kg・mm)	—
1回当たりの損傷度	0.0088 (D.I.E)	0.0087 (D.I.E)	0.0090 (D.I.M)

4) 消費エネルギー量と破壊までの繰返し回数を別々に算定して求めた破壊時までの部材の最大消費エネルギー量の解析結果は、鉄筋比が異なった場合、実験結果と同様に大きく異なった値を示した。また、解析により求めた最大消費エネルギー量 (W_{max}) は、載荷変位の相違にもかかわらずほぼ一定の値となった。

5) 地震等によるランダム波が部材に作用した場合の累積損傷度評価を試みたが、実験結果とよく一致し、本解析による累積損傷度評価の可能性が示された。

謝辞：本研究を遂行するに当たって前田建設工業（株）技術研究所 三島徹也氏、東京大学生産技術研究所 第 5 部 大賀宏行講師から終始有益なご助言を頂きました。ここに、深甚なる感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Banon, H., Biggs, J.M. and Irvine, H.M. : Seismic Damage in Reinforced Concrete Frames, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.107, No.ST9, pp.1713～1729, 1982.
- 2) Park, Y.-J. and Ang, A.H.-S. : Mechanistic Seismic Damage Model for Reinforced Concrete, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.4, pp.722～739, Apr. 1985.
- 3) 魚本・矢島・田村：繰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 巻第 12 号, pp.700～703, 1990.12.
- 4) 魚本・矢島：大変形正負交番繰返し荷重を受ける 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 巻, pp.265～268, 1991.6.
- 5) 魚本・本郷・矢島：大変形混合波の繰返し載荷を受ける RC はりの履歴減衰エネルギー特性、土木学会第 46 回 年次学術講演会, pp.762～763, 1991.9.
- 6) 魚本・矢島：各種の大変形繰返し載荷を受ける RC 梁の破壊時までの累積消費エネルギーによる損傷度指標、生産研究, 第 43 巻第 12 号, pp.598～601, 1991.12.
- 7) 魚本・矢島・本郷：繰返し曲げを受ける RC 単純梁の累積消費エネルギー量の算定、コンクリート工学年次論文報告集, 第 14 巻, pp.919～924, 1992.6.
- 8) 本郷・魚本・矢島：正負繰返し載荷を受ける RC 梁の累積消費エネルギー量による損傷度評価、土木学会第 47 回 年次学術講演会, pp.760～761, 1992.9.
- 9) 魚本・矢島・本郷：繰返し曲げを受ける RC 梁の消費エネルギーによる破壊特性評価、土木学会論文集, 第 460/V-18, pp.85～91, 1993.2.
- 10) 山田稔他：鉄筋コンクリート構造物の耐震安全性、技報堂, 1976.8.

- 11) 秋山宏：建築物の耐震極限設計，東京大学出版社，1980. 9.
- 12) 三島・Buja BUJADHAM・前川・岡村：鉄筋コンクリート離散ひびわれを構成する材料モデルの開発，土木学会論文集，第 442/V-16, pp. 171~179, 1992. 2.
- 13) 三島・Buja BUJADHAM・前川：正負交番載荷に適用可能な RC 離散ひびわれモデルの開発とその適用範囲，土木学会論文集，第 442/V-16, pp. 181~190, 1992. 2.
- 14) 三島・原・前川：交番載荷による RC ひびわれ面でのせん断剛性低下のメカニズム，土木学会論文集，第 442/V-16, pp. 191~200, 1992. 2.
- 15) 三島・山田・前川：交番載荷及び温度荷重を受ける RC 構造の離散ひびわれ有限要素解析，土木学会論文集，第 442/V-16, pp. 201~210, 1992. 2.
- 16) S.S. Manson : Fatigue ; A Complex Subject-Some Simple Approximations, *Experimental Mechanics*, 1965. 7.
- 17) S.S. Manson : *Thermal Stress and Low-Cycle Fatigue*, McGraw-Hill, 1966.
- 18) ヴィ・エス・イワノフ，ヴィ・エフ・テレンシエフ，横堀訳：金属疲労の基礎と破壊力学，現代工学社，pp. 1~65, 1979. 1.
- 19) M.A. Miner : *Cumulative Damage in Fatigue*, *Jour. of Appl. Mech.* Vol. 12, 1945.
- 20) Kato, B. : *Mechanical properties of steel under load cycles idealizing seismic action*, *Bulletin D'Information No. 131*, CEB, AICAP-CEB symposium, Rome, pp. 7~27, 1979.
- 21) 本郷・矢島・魚本：正負交番繰返し曲げを受ける RC はりの累積消費エネルギー量の算定，コンクリート工学年次論文報告集，第 15 巻，pp. 359~400, 1993. 6.
(1993. 1. 26 受付)

EVALUATION OF ACCUMULATIVE DAMAGE AND FATIGUE FAILURE OF REINFORCED CONCRETE BEAMS UNDER REVERSAL CYCLIC DEFORMATIONS

Tetsuji YAJIMA, Kazunori HONGO and Taketo UOMOTO

This paper is aimed to propose analytical method to predict time and accumulative dissipated energy of reinforced concrete beams till complete failure under cyclic large deformations. The calculated total dissipated energy, up to failure, shows almost same in spite of different amplitudes and is in accordance with experimental results. This method for calculating is shown to be reasonable.

Based on the analytical method, total dissipated energy is introduced as index for accumulative damage. Accumulative damage is evaluated by using the index for reinforced concrete beams subjected to random waves. The index is used for reinforced concrete beams and the accumulative damage is in accordance with experimental results.