

論文

[2066] 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

本郷和徳*1・矢島哲司*2・魚本健人*3

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下RCと略す）構造物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であり、その際の損傷は消費エネルギー量と密接な関係があると考えられる。特に、構造物の損傷の程度を地震等によって構造物に与えられるエネルギー量と構造物固有の吸収可能なエネルギー量との比較により検討する際には、まず構造物の吸収可能なエネルギー量の大きさを定量化することが必要であると考えられる[1]。筆者等は既報[2]において、変位制御による各種の同一振幅による動的正負交番繰返し載荷を破壊時までに行った結果、RCはりの累積された損傷・劣化の程度は累積消費エネルギー量と密接な関係があることを実験によって明らかにした。

そこで本研究は、繰返し荷重による累積損傷を考慮した損傷度評価を定量化するための基礎的研究として、RCはりの破壊までの累積消費エネルギー量（吸収可能なエネルギー量）に着目して、有限要素法解析および鋼材の低サイクル疲労の概念を用いて破壊までの累積消費エネルギー量算定方法について検討したものである。なお、本研究および既報の実験において破壊時の定義は通常とは異なり、載荷中に荷重が0付近までに大きく低下するか、または鉄筋が切断した時点とした。

2. 有限要素法解析

2.1 試験体および載荷方法

解析対象とした試験体は、既報[2]の実験で用いたRC単純はりとし図-1に示すように、幅×高さ×全長=15×20×250cm、載荷区間は210cmとして、表-1に示すように主鉄筋比（ $P_t = P_t'$ ）、腹鉄筋比、 a/d （せん断スパン比）、を変化させた3種類（T試験体、S試験体、UT試験体）である。そして、1サイクル当りの消費エネルギー量、はり全体のエネルギー分布性状、構成材料のエネルギー分担率および試験体中の鉄筋のひずみを知るために、三島[3][4]の開発した「正負交番載荷に適用可能なRC離散ひび割れモデル」を用いた有限要素法解析プログラムを用いて解析を行った。解析に用いた材料特性を表-2に、要素分割を一方向載荷実験で得られたひび割れ図とともに図-2に示す。要素分割においては、実験で得られたひび割れ図を参照

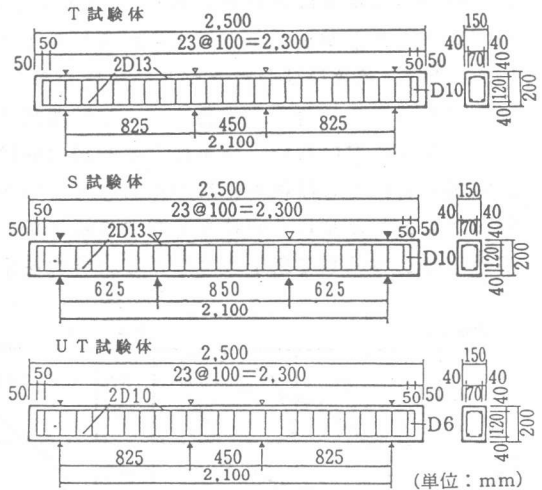


図-1 試験体諸元

表-1 試験体諸元

試験体	主鉄筋比 $P_t = P_t'$ (%)	腹鉄筋比 P_w (%)	せん断スパン比 a/d
T	1.05 (2D13)	0.97	5.16
S	1.05 (2D13)	0.97	3.91
UT	0.59 (2D10)	0.42	5.16

*1 芝浦工業大学大学院 工学研究科建設工学専攻（正会員）

*2 芝浦工業大学講師 工学部土木工学科（正会員）

*3 東京大学生産技術研究所第5部教授、工博（正会員）

して平均ひび割れ間隔（載荷区間／（ひび割れ本数＋1））にRC接合要素を平行に配置し、その他の要素はひび割れが発生していないことから弾性要素とした。載荷方法は、静的一方向載荷により得られた部材の降伏変位(δy) (T: $\delta y=7\text{mm}$ $P_y=3346\text{kgf}$, S: $\delta y=7\text{mm}$ $P_y=4332\text{kgf}$, UT: $\delta y=5\text{mm}$ $P_y=1813\text{kgf}$)を基に、変位制御による各種の同一振幅による正負交番繰り返し載荷 ($\pm 1.2 \delta y \sim \pm 5 \delta y$) を3サイクル行った。

2. 2 荷重変位履歴曲線

図-3に荷重-変位履歴曲線に関する解析結果と実験結果を比較した一例を示す。ここで、変位は載荷点位置での変位である。図に示したのは、T試験体、S試験体、UT試験体の荷重-変位履歴曲線の一例を示したものであり、それぞれ解析による荷重-変位履歴曲線は実験値とよく一致している。また、3サイクル目以降は曲線が定常化していることがわかる。曲線が定常化するのは、1サイクル目で引張高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は落ち着くため3サイクル目以降の荷重の低下が小さいと考えられるからである[5]。なお、離散ひびわれモデルの構成モデルは、繰り返しによる材料劣化挙動、および時間効果はモデル化されていない。解析による履歴曲線は他の振幅においても同様の結果が得られたことから、解析対象としたRCはりには本有限要素法解析の適用が可能と判断して以下のエネルギー特性を求めた。

表-2 材料特性

試験体	鉄筋		コンクリート強度 (kgf/cm^2)
	降伏点(N/mm^2)	引張強さ(N/mm^2)	
T	368	561	400
S	368	561	400
UT	330	470	400

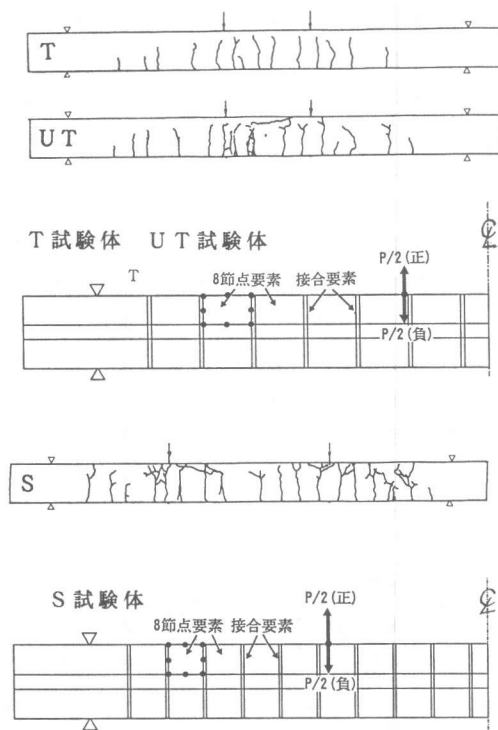


図-2 要素分割

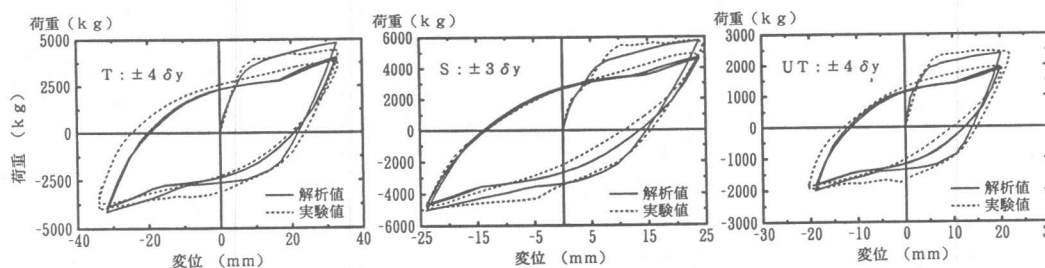


図-3 荷重-変位履歴曲線

3. 消費エネルギー量の鉄筋の分担割合および分布性状

鉄筋コンクリート構造物はコンクリートと鉄筋という異なる力学特性をもつ構成要素から成る複合体であり、これらの構成要素の消費エネルギー量は、その種類や位置により異なると考えられる。また、その割合も構成要素の力学特性や履歴特性、載荷履歴等のさまざまな要因による影

響を受ける。構造物が消費するエネルギー量は、はり全体でどのような分布性状になっているか、また各構成要素がどのような割合でエネルギーを消費しているかを知ることは、はり全体の損傷状況を定量的にとらえるうえで必要と考えられる[1]。

そこで本研究では、有限要素法によって得られた接合要素の消費エネルギーの各構成要素の分担割合、その中でも特に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明らかにした。鉄筋の消費エネルギー量に注目したのは、既報[2]の実験において破壊が全て曲げによる鉄筋の破断

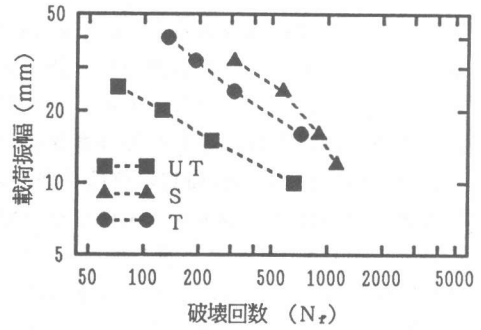


図-4 実験で得られたWöhler曲線

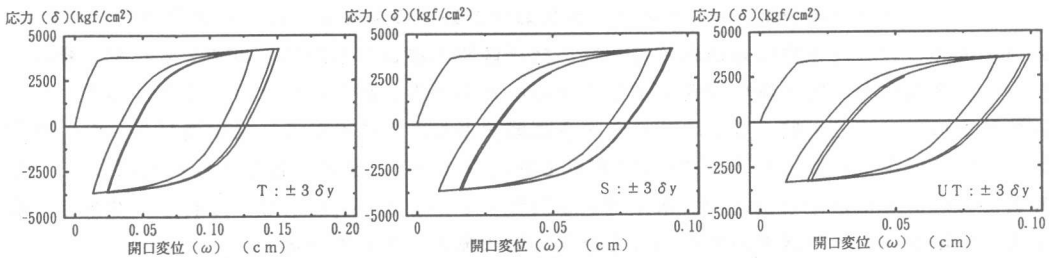


図-5 鉄筋の応力-開口変位曲線

によったこと、また、図-4に示すように実験において得られた得られたWöhler曲線（載荷振幅-破壊回数曲線）が金属材料の疲労において適用されているManson-Coffin型の式、 $\Delta \epsilon_p \cdot (N_f)^{1/a} = C(a, c; \text{材料定数})$ として表現できるからである。鉄筋の消費エネルギー量を求めるにあたり、接合要素以外の有限要素については弾性の要素を配置したため消費エネルギー量が生じないことから、はり全体に配置したRC接合要素の消費エネルギー量のみ注目した。また、鉄筋の消費エネルギー量を求める際に、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、本解析では鉄筋の消費エネルギー量を算出する場合に付着応力-すべり関係を考慮した鉄筋の応力-開口変位関係の履歴曲線の面積から求めたため、付着応力-すべり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。ここで、開口変位(ω)は断面の平均ひび割れ幅と解析上定義されており[4]、図-5に鉄筋の応力-開口変位関係の履歴曲線の一例を示す。

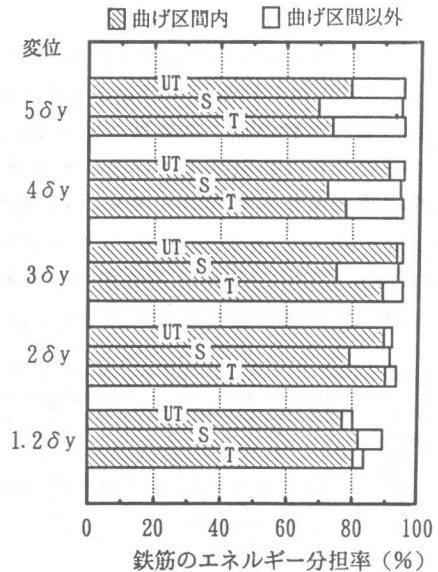


図-6 3サイクル目の消費エネルギー量における鉄筋の分担割合

次に、図-6は各試験体の3サイクル目における消費エネルギー量の鉄筋が受け持つ分担割合(分担率)を示したものである。分担率ははり全体に配置した各RC接合要素の3サイクル目の鉄筋の応力-開口変位関係から求めた鉄筋の消費エネルギー量をはり全体で加算して、それが3サイクル目における荷重-変位履歴曲線から求められた消費エネルギー量の何割を占めているかを求めたものである。図より、各試験体とも消費エネルギー量は8割以上を鉄筋が消費していることがわかる。

図-7は、はり全体における鉄筋の消費エネルギー量の分布性状の一例を示したものである。この分布性状からわかることは、曲げ区間内における鉄筋の消費エネルギー量の割合が、曲げ区間において全体の消費エネルギーのほとんどを占めているということである。そして、他の試験体についても図-6からわかるように載荷振幅が大きくなるに従い漸減するものの曲げ区間において全体の消費エネルギーの7割以上を占めている。また、曲げ区間内では各RC接合要素においてもほぼ同じ割合でエネルギーを消費していることもわかり、これらの結果は実験で鉄筋の破断が全て曲げ区間で生じたという破壊状況と一致している。

このように、本試験体の消費エネルギー量はそのほとんどが曲げ区間内の鉄筋が分担していると考えられること、そして破壊が全て鉄筋の低サイクル疲労破壊であったこと等の理由から、図-4に示された実験によるWöhler曲線(載荷振幅-破壊回数曲線)が金属材料の疲労に適用されているManson-Coffin型の式で表現できる理由と考えられる。

4. Manson-Coffin式を用いた破壊回数の推定

3章で得られた結果および破壊が全て鉄筋の疲労破壊であったことという結果から、本研究では鉄筋の破壊回数の推定を鋼材の低サイクル疲労の概念を用いて求めた。鋼材の疲労の分野において、低サイクルの領域のみに限らず高サイクルの領域においても適用可能であると考えられている疲労寿命曲線がManson-Coffin曲線であり、塑性ひずみ振幅 $\Delta \epsilon_p$ と破壊回数 N_f によって、 $\Delta \epsilon_p \cdot (N_f)^{1/c} = C$ (a, c ; 材料定数)の形で表される。そして、今回の解析ではManson-Coffin式にひずみサイクルの最小ひずみと最大ひずみとの相加平均値である平均ひずみの影響を考慮して破壊回数の推定を行った。図-8は有限要素法解析で得られたRCはり中の鉄筋の

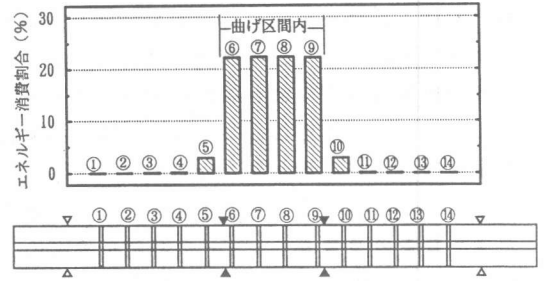


図-7 消費エネルギー量の分布性状
($T : \pm 3 \delta_y$)

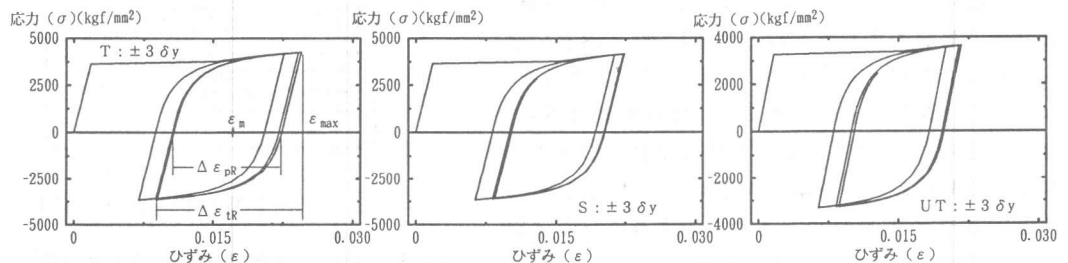


図-8 鉄筋の応力-ひずみ曲線

応力-ひずみ関係の一例を示したものであり、RCはり中の主鉄筋は1サイクル目から引張りによる高塑性を受けるため平均ひずみが存在しているのがわかる。平均ひずみの影響を考慮する方法には、Sachs-Sessler-Weiss研究グループの説、大路らの説、Yao-Munse説があり[6]、これらの説はどれも最初の平均ひずみを与えるサイクルによる延性の損失量、あるいは線型被害則などの概念に基いた損失量をあらかじめManson-Coffin式あるいはその変形式の右辺から減じた式から出発するものである[6]。今回は、その中でもSachs-Sessler-Weiss研究グループの説、大路らの説を用いて破壊回数の推定を行った。それらの式は、次のように示される。

$$(\Delta \varepsilon_{tR})^{1/\alpha} \cdot N_f = (2 \varepsilon_f)^{1/\alpha} / 4 - (2 \varepsilon_m)^{1/\alpha} / 4 \quad (\text{大路ら}) \quad - (1)$$

$$N_f = [(\varepsilon_f - \varepsilon_m) / \Delta \varepsilon_{tR}]^{1/\alpha} \quad (\text{Sachs-Sessler-Weiss}) \quad - (2)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_{tR}$: 全ひずみ範囲 ε_f : 静破壊延性 α : 材料定数
 ε_m : 平均ひずみ N_f : 破壊回数

図-9は式(1)および式(2)によって計算した破壊回数の推定値と実験による破壊回数の比較を行ったものである。材料定数 α は材料によって一定と考えられるが、本研究では実験で得た各試験体ごとの各振幅における破壊回数から求めた。(1)式に対してT試験体が $\alpha = 0.46$ 、S試験体が $\alpha = 0.44$ 、UT試験体が $\alpha = 0.51$ 、(2)式に対してT試験体が $\alpha = 0.44$ 、S試験体が $\alpha = 0.42$ 、UT試験体が $\alpha = 0.50$ である。図より、推定値と実験値はUT試験体に若干の相違が見られるが各試験体ともほぼ全体的に一致していると考えられ、上式による破壊回数の推定が可能であると考えられる。また、(1)式と(2)式はほぼ同じ推定値を与えた。

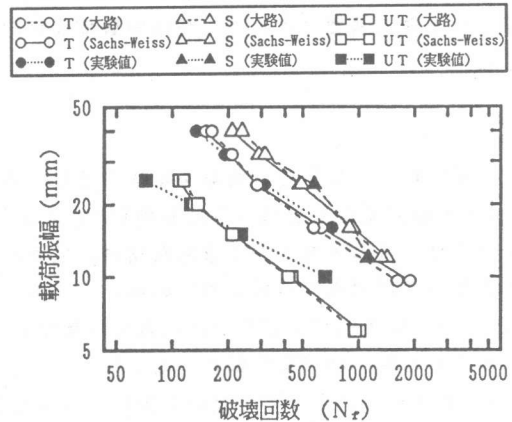


図-9 載荷振幅-破壊回数関係

5. 最大消費エネルギー量の算定の方法

3章および4章の結果から次式により無次元化最大消費エネルギー量 (W_{max}) を算定した。

$$W_{max} = (\beta \cdot \Delta W_3) \cdot N_f \quad - (3)$$

ここで、 N_f は(1)式または(2)式から計算される破壊回数、そして β は消費エネルギー量の繰り返しによる構成材料の劣化の影響つまり累積損傷による影響を考慮した低減係数である。 ΔW_3 は解析による3サイクル目の消費エネルギー量を解析値の降伏変位 δ_y と降伏荷重 P_y の積($P_y \cdot \delta_y$)で除した無次元化消費エネルギー量であり、図-10に各試験体の各振幅における解析の3サイクル目の無次元化消費エネルギー量を示した。各試験体とも無次元化消費エネルギー量は載荷振幅の増加とともに二次曲線的に大きくなっていることが分かる。また β に関して、本研究においては最大消費エネルギー量の算定を目的としているので、 β は単に実験における破壊までの平均した1サイクル当たりの消費エネルギー量 (ΔW_{exp}) を解析における3サイクル目の消費エネルギー量 (ΔW_3) で除してそれらを各試験体ごとに最小自乗法によりその値を求めた。

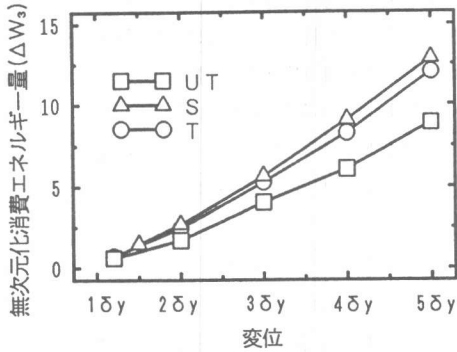


図-10 3サイクル目の無次元化した消費エネルギー量

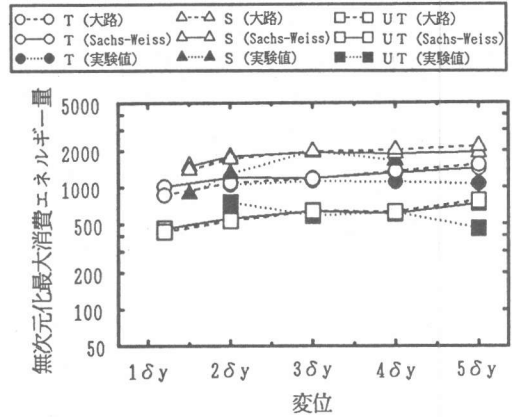


図-11 無次元化した最大消費エネルギー量

その結果T試験体が $\beta = 0.780$ 、S試験体が $\beta = 0.713$ 、UT試験体が $\beta = 0.753$ であった。そして、(3)式によって無次元化した最大消費エネルギー量を算定した結果が図-11であり、算定した最大消費エネルギー量は実験値とほぼ一致しており、各試験体ごとにほぼ一定の値を示した。

6. まとめ

本研究によって得られた結果は次の通りである。

- (1) 有限要素法解析によりはりの1サイクル当たりの消費エネルギー量における主鉄筋の消費エネルギー量の分担割合を求めた結果、主鉄筋の消費エネルギー量は8割以上であり、そのほとんどが曲げ区間で消費されている。
- (2) はりの主鉄筋の破断回数の推定を鋼材のひずみ制御における低サイクル疲労の概念を用いて求めた結果、ほぼ実験値と一致した。
- (3) 最大消費エネルギー量の算定の一方法を示し、その方法によりはりの最大消費エネルギー量を算定した結果、各試験体ごとにほぼ一定の値を示し、実験値とほぼ一致した。

<謝辞> 本研究を進めるにあたり前田建設工業(株)技術研究所 三島徹也氏にご指導頂きました。深く感謝致します。

参考文献

- [1] Ohno, T. and Nishioka, T. : An Experimental Study on Energy Absorption Capacity of Columns in Reinforced Concrete Structures, Proc. of JSCE, No.350, pp.23~33, 1984.10.
- [2] 魚本健人・矢島哲司・本郷和徳：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, 土木学会論文集, No.460/V-18, 1993.2.
- [3] 三島徹也・Bujadham, B・前川宏一・岡村 甫：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, No.442/V-16, pp.171~180, 1992.2.
- [4] 三島徹也・Bujadham, B・前川宏一：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, No.442/V-16, pp.181~190, 1992.2.
- [5] 三島徹也・原 夏生・前川宏一：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, No.442/V-16, pp.191~200, 1992.2.
- [6] 飯田国広：歪制御低サイクル疲労, 溶接学会誌, Vol137, No.6, 1968.