

RC構造の損傷度評価に関する基礎的研究

鈴木基行*・赤倉康寛**・足立英明***・
尾坂芳夫****

本研究では、曲げ降伏後曲げ破壊するRC部材を対象に、部材で累積消費されたエネルギー量と部材固有の値であると考えられる最大消費エネルギー量とを比較することによって、損傷度を評価する手法を提案した。この損傷度を、既往の研究での実験結果で検証を行い、良い精度を有していることが確認された。さらに、提案された損傷度をRC構造の信頼性の尺度とし、耐震設計へ適用を試みた。

Key Words : reinforced concrete structure, damage index, accumulative consumed energy, maximum consumed energy, seismic design, probabilistic approach

1. はじめに

現在、わが国における鉄筋コンクリート構造物の耐震設計は、次の2点を目標として行われている。即ち、

1) 構造物が耐用年限中に数回は遭遇する程度の地震に対して、ひびわれの発生等軽微な損傷は許しても、部材降伏は生じさせないようにすること。

2) 構造物が耐用年限中に一回遭遇するかもしれない大地震に対して、部材降伏は許しても、構造物の崩壊には至らないようにすること。

1)の目標については、許容応力度設計法の理念に通じているものであり、現行の構造設計あるいは耐震規定において、すでにある程度達成されていると考えられる。一方、目標2)は、現行の耐震設計指針においては、大地震によって生じる変形よりも大きな塑性変形能を部材や構造物に保有させること、とされている。そのため、これまで部材靱性率に関する実験的研究^{1)~5)}あるいは解析的研究^{6)~7)}が数多く行われてきた。しかし、精度の良い部材靱性率評価式は得られておらず、未だ部材や構造物の靱性率を用いた合理的な耐震設計法は確立されていない。

今後、構造物の耐震安全性を考える場合、1つあるいは2つの特定の地震荷重に対する安全性のみならず、耐用年数にわたる安全性(ライフタイムリスク)を評価することが必要となろう。そのためには、累積損傷に対する安全性の照査、即ち、部材や構造物に許容される損傷の程度、地震によって受ける損傷の程度、さらにそれに及ぼす地盤などの諸条件の影響の合理的な評価が必要であると考えられる。それが達成されれば、構造物の安全

率を現行の耐震設計のように、設計耐力と期待荷重を比較し、そこに一律に設けるのではなく、構造物の累積損傷に対する安全性、地盤の振動特性、地盤と構造物の相互作用および構造物の重要性などを考慮し、合理的に与えることができると思われる。

RC構造物や部材の靱性率は、荷重履歴によって大きく変化することが知られている⁸⁾。RC部材の正負交番繰り返し載荷実験では、一定変位における載荷でも、繰り返し回数が増加とともに剛性や強度が低下していくのが観測されている。そこで、エネルギーの観点から構造物の耐震安全性を評価しようとする試み^{9),10)}が最近盛んに行われている。これらは、構造物が崩壊するまでに描く履歴ループの面積の総和が一定であるとし、この履歴エネルギー容量と地震により入力されたエネルギー量との比較によって構造物の損傷度を評価しようとするものである。しかし、履歴ループの面積は、構造物で累積消費されたエネルギー量と同一であるとは考えられない。ひびわれなどで消散されていくエネルギーもあるはずである。したがって、構造物の損傷度を評価しようとする場合、構造物で累積消費されたエネルギー量と構造物が消費できる限界のエネルギー量とを比較すべきであると考えられる。

以上の考えに基づき、本研究では、曲げ降伏後曲げ破壊するRC部材を対象に、部材で累積消費されるエネルギー量を指標として損傷度を評価する手法を提案する。さらに、提案された損傷度をRC構造の信頼性の尺度とし、これを確率論的に評価するとともに、耐震設計への適用を試み、RC構造のライフタイムリスク評価手法の確立に寄与しようとするものである。

2. 既往の研究とその問題点

Banonら¹¹⁾はRC構造の損傷を予測するための様々なパラメータの有効性について吟味した。その結果、損

*正会員 工博 建設省土木研究所 地震防災部耐震研究室
(〒305 つくば市大字旭一番地)

**学生会員 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻

***正会員 工修 大成建設

****正会員 工博 東北学院大学教授 工学部土木工学科

傷度の予測には、塑性変形による損傷を示すパラメータと繰り返し載荷による累積損傷を表すパラメータのそれぞれの中から1個づつを選択して評価すべきであるとしている。

この考えに基づき、Parkら¹²⁾は、RC 構造物の損傷を荷重履歴に依存する最大応答変形量と履歴エネルギーの関数として示した。また、その算定式を用いて、単調載荷と繰り返し載荷による実験結果を評価し、損傷度指標 D が対数正規分布を示すことを明らかにしている。さらに、Park らは実地震による構造物全体の損傷度評価を行い、補修および崩壊に関する実際的な目安を示した¹³⁾。しかし、実験結果による損傷度の分散が各因子の分散に起因するものなのか、もしくは、評価式に起因するものなのかの分類がなく混同しているため、損傷度評価の妥当性についての検討ができない。

わが国では、藤井ら¹⁰⁾や魚本ら¹⁴⁾が RC 部材の実験結果に基づき、損傷度の提案を行っているが、定式化には至っていない。

本研究は、以上の既往の研究を踏まえ、曲げ降伏後曲げ破壊する RC 柱部材（引張鉄筋比と圧縮鉄筋比は相等的）を対象に累積消費されたエネルギー量を指標として損傷度を評価する手法を提案しようとするものである。

3. RC 構造の損傷度の定義

本研究においては、RC 構造の損傷の度合いを示す損傷度 D を次式で定義する。

$$D = \frac{W_{acc}}{W_{max}} \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 W_{acc} ：累積消費エネルギー量、 W_{max} ：最大消費エネルギー量である。これらについては後に述べる。

D は地震動などによって被害を受けた RC 構造の建設時からの累積損傷の程度を表す指標であり、確定論的には、 $D=1.0$ が RC 構造の終局状態を示す。

1. で述べたように、式(1)は、消費されたエネルギー量を用いて評価している点が既往の研究^{10), 14)}と異なっている。

4. 最大消費エネルギー量の評価

(1) 断面の最大消費エネルギー量 $W_{c,max}$

まず、危険断面の最大消費エネルギー量を算定する。

a) エネルギー消費性状

曲げ破壊する RC はり断面で消費されるエネルギーの 70% 以上は引張鉄筋で消費されることが小柳ら¹⁵⁾により報告されている(6.(1) b) 参照)。その解析結果によると、引張鉄筋比と圧縮鉄筋比に近いほど、また、作用軸圧縮力が小さいほど、引張鉄筋によって消費されるエネルギーの割合は高くなっている。したがって、柱や

橋脚など、引張鉄筋比と圧縮鉄筋比が等しく、かつ、コンクリート圧縮強度に対する軸応力度の比が小さい RC 部材を対象とする場合、上記の研究結果は適用できると考えられる。ただし、本研究では、繰り返し載荷を受ける RC 部材を対象とするので、断面で消費されるエネルギーのほとんどは軸方向鉄筋で消費されるということになり、断面での最大消費エネルギー量 $W_{c,max}$ は次のように示される。

$$W_{c,max} = S_s(\epsilon_{su}) \cdot (A_s + A'_s) \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 ϵ_{su} ：鉄筋の終局ひずみ、 $S_s(\epsilon_{su})$ ：鉄筋の応力～ひずみ曲線 ($\sigma-\epsilon$ 曲線) での終局までの面積、 A_s 、 A'_s ：引張、圧縮鉄筋の断面積である。なお、鉄筋の終局は、部材が終局状態に達した時点とする(部材の終局点については、4.(1) c) 参照)。

b) 材料特性のモデル化

鉄筋の $\sigma-\epsilon$ 曲線は Bi-linear で仮定した。

せん断補強筋やフーチングによって拘束を受けるコンクリートは圧縮靱性が大幅に改善されることが知られており、プレーンコンクリートの $\sigma-\epsilon$ 曲線を用いることは過小評価につながるため、コンクリートの $\sigma-\epsilon$ 曲線は六車ら¹⁶⁾が提案しているコンファインドコンクリートに対する $\sigma-\epsilon$ 特性を用いた。

c) 終局限界点の定義

曲げ終局限界点として、ここでは、鈴木ら¹⁷⁾の提案による断面における力の釣り合い状態に対する終局限界点を用いる。この限界点とは、圧縮縁ひずみの増加に対して、圧縮部コンクリートの合力のひずみ軟化による減少のために、引張鉄筋のひずみが増加から減少に転ずる点のことで、曲げモーメント-曲率 ($M-\phi$) 関係において曲げモーメントが急激に低下する点として定義される。この終局限界点には、明瞭な物理的意味があり、 $M-\phi$ 関係の下降域の性状の評価に適していると思われる。なお、先に述べた、小柳ら¹⁵⁾の研究は、この終局限界点をエネルギー的な観点から説明したものである。

d) 軸方向鉄筋の終局ひずみ ϵ_{su} の算定

曲げ終局時の引張側鉄筋(軸方向鉄筋のうち、ある載荷状態において、引張を受けている鉄筋のこと、圧縮側鉄筋についても同様)の終局ひずみ ϵ_{su} の算定には c) で述べた終局限界点を用いる。

断面における力の釣り合いから(図-1 参照)、

$$T = C' + T' \dots \dots \dots (3)$$

$$T = A_s \sigma_s = p b d \sigma_s \dots \dots \dots (4)$$

$$C' = \frac{S_c(\epsilon'_c)}{\epsilon'_c} b x \dots \dots \dots (5)$$

$$T' = A'_s \sigma'_s = p' b d \sigma'_s \dots \dots \dots (6)$$

ここに、 T 、 T' ：引張側、圧縮側鉄筋に作用する合力、 C' ：圧縮部コンクリートの合力、 σ_s 、 σ'_s ：引張側、圧縮側鉄筋の応力、 b ：断面の幅、 d ：有効高さ、 ϵ'_c ：コンク

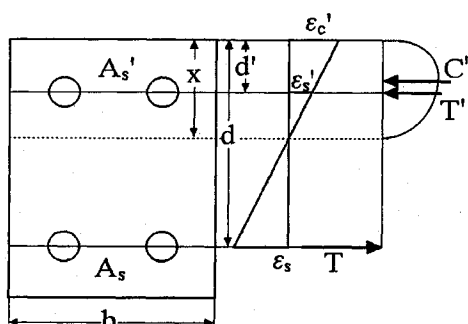


図-1 曲げを受ける部材断面

リートのひずみ, $S_c(\epsilon'_c)$: コンクリートの $\sigma\sim\epsilon$ 曲線での終局までの面積, x : 中立軸の圧縮縁からの距離, p , p' : 引張側, 圧縮側鉄筋比である。

したがって,

$$p d \sigma_s = \frac{S_c(\epsilon'_c)}{\epsilon'_c} x + p' d \sigma'_s \dots\dots\dots (7)$$

となる。ここで、断面の平面保持を仮定すれば,

$$x = \frac{\epsilon'_c}{\epsilon_s + \epsilon'_c} d \dots\dots\dots (8)$$

ここに, ϵ_s : 引張側鉄筋のひずみ。

これを, 式 (7) に代入し, 整理すると,

$$S_c(\epsilon'_c) = (p \sigma_s - p' \sigma'_s) (\epsilon_s + \epsilon'_c) \dots\dots\dots (9)$$

となる。両辺を ϵ'_c について微分して,

$$\frac{dS_c(\epsilon'_c)}{d\epsilon'_c} = \sigma'_c = \left(p \frac{d\sigma_s}{d\epsilon'_c} - p' \frac{d\sigma'_s}{d\epsilon'_c} \right) (\epsilon_s + \epsilon'_c) + (p \sigma_s - p' \sigma'_s) \left(\frac{d\epsilon_s}{d\epsilon'_c} + 1 \right) \dots\dots\dots (10)$$

ここで,

$$p \frac{d\sigma_s}{d\epsilon'_c} - p' \frac{d\sigma'_s}{d\epsilon'_c} = p \frac{d\sigma_s}{d\epsilon_s} \frac{d\epsilon_s}{d\epsilon'_c} - p' \frac{d\sigma'_s}{d\epsilon'_c} \frac{d\epsilon'_s}{d\epsilon'_c} \dots\dots\dots (11)$$

$$\epsilon'_s = \left(1 - \frac{d'}{d} \right) \epsilon'_c - \frac{d'}{d} \epsilon_s \dots\dots\dots (12)$$

$$\frac{d\epsilon'_s}{d\epsilon'_c} = \left(1 - \frac{d'}{d} \right) - \frac{d'}{d} \frac{d\epsilon_s}{d\epsilon'_c} \dots\dots\dots (13)$$

ここに, ϵ'_s : 圧縮側鉄筋のひずみ, d' : 圧縮側鉄筋の図心からコンクリートの圧縮縁までの距離。したがって, 式 (10) は,

$$\sigma'_c = \left\{ p \frac{d\sigma_s}{d\epsilon_s} \frac{d\epsilon_s}{d\epsilon'_c} - p' \frac{d\sigma'_s}{d\epsilon'_c} \left(1 - \frac{d'}{d} - \frac{d'}{d} \frac{d\epsilon_s}{d\epsilon'_c} \right) \right\} (\epsilon_s + \epsilon'_c) + (p \sigma_s - p' \sigma'_s) \left(\frac{d\epsilon_s}{d\epsilon'_c} + 1 \right) \dots\dots\dots (14)$$

となる。したがって,

$$\frac{d\epsilon_s}{d\epsilon'_c} = \frac{\sigma'_c - p \sigma_s + p' \sigma'_s + (\epsilon_s + \epsilon'_c) p' \left(1 - \frac{d'}{d} \right) \frac{d\sigma'_s}{d\epsilon'_c}}{p \sigma_s - p' \sigma'_s + (\epsilon_s + \epsilon'_c) \left(p \frac{d\sigma_s}{d\epsilon_s} + p' \frac{d\sigma'_s}{d\epsilon'_c} \right)} \dots\dots\dots (15)$$

となり, さらに終局限界点の条件 $d\epsilon_s/d\epsilon'_c=0$ (これは, 既に述べたように, ϵ'_c の増加に対して ϵ_s が増加から減少に転ずる点を終局限界と定義したことに対応する) より, 次式が導かれる。

$$\sigma'_{cu} = p \sigma_{su} - p' \sigma'_{su} - (\epsilon_{su} + \epsilon'_{cu}) p' \left(1 - \frac{d'}{d} \right) \frac{d\sigma'_s}{d\epsilon'_c} \dots\dots\dots (16)$$

ここに, σ_{su} , σ'_{su} : 引張側, 圧縮側鉄筋の終局時応力 (鉄筋の $\sigma\sim\epsilon$ 曲線は Bi-linear で仮定しているの, 引張側, 圧縮側鉄筋の降伏強度 f_{sv} , f'_{sv} に等しくなる)。

式 (16) とコンクリートの $\sigma\sim\epsilon$ 曲線を連立させることにより, コンクリートの終局ひずみ ϵ'_{cu} が求まる。

特に正負交番繰り返し载荷の場合には, 圧縮側鉄筋の座屈によって終局がもたらされるので (文献 18) などを参照), 圧縮側鉄筋は圧縮力を分担できないと考えることができる。したがって, コンクリートの終局応力 σ'_{cu} は次のように表される。

$$\sigma'_{cu} = p f'_{sv} \dots\dots\dots (17)$$

以上により, コンクリートの終局ひずみ ϵ'_{cu} および終局までにコンクリートの $\sigma\sim\epsilon$ 曲線によって囲まれる面積である $S_c(\epsilon'_{cu})$ が求まるので, 式 (9) から, 引張側鉄筋の終局ひずみ ϵ_{su} を次のように求めることができる。

$$\epsilon_{su} = \frac{S_c(\epsilon'_{cu})}{p f_{sv}} - \epsilon'_{cu} \dots\dots\dots (18)$$

繰り返し载荷を受けた柱部材では終局時の軸方向鉄筋のひずみは引張側, 圧縮側のどちらでもほぼ等しいと考えられるので, ϵ_{su} を軸方向鉄筋の終局ひずみであるとする。

e) 断面の最大消費エネルギー量 $W_{c,max}$ の算定

軸方向鉄筋の終局ひずみ ϵ_{su} より, 鉄筋の $\sigma\sim\epsilon$ 曲線での終局までの面積 $S_s(\epsilon_{su})$ が以下のように求まる。

$$S_s(\epsilon_{su}) = \frac{1}{2} f_{sv} \epsilon_{sv} + f_{sv} (\epsilon_{su} - \epsilon_{sv}) \dots\dots\dots (19)$$

したがって, 断面の最大消費エネルギー量 $W_{c,max}$ は, 式 (2) より,

$$W_{c,max} = (A_s + A'_s) \left\{ \frac{1}{2} f_{sv} \epsilon_{sv} + f_{sv} (\epsilon_{su} - \epsilon_{sv}) \right\} \dots\dots\dots (20)$$

となる。上式から明らかなように $W_{c,max}$ は断面諸元および材料特性のみから求められる。

ところで, 繰り返し载荷を受ける材料の特性は, 繰り返し载荷の種々の条件により変化することが知られている。本来は, このような特性を考慮すべきであるが, 本研究は RC 部材の損傷度の算出手順を提案することを主眼としていること, および繰り返し载荷を受ける材料の特性については現状では未だ研究段階であること, 等の理由から考慮していない。ただし, 鉄筋のスケルトンカーブの変化についてのみ解析において考慮した (5. (3) 参照)。

(2) RC 部材の最大消費エネルギー量 W_{max}

a) 部材でのエネルギー消費性状

一般に、曲げ挙動が卓越するはりや柱などの RC 部材の正負交番繰り返し載荷実験を行うと、端部に塑性ヒンジができて破壊することが知られている。大野ら⁹⁾は、せん断スパン 160 cm、有効高さ 35 cm の柱部材において実験的にエネルギー消費性状を検討した結果、塑性域と考えられる端部から 30 cm 以内においてエネルギーの約 90% が消費されていることを明らかにしている。したがって、曲げ挙動が卓越する部材の最大消費エネルギー量を求める場合、部材塑性域についてだけ考慮しても実用上問題は無いと考えられる。

b) 部材の最大消費エネルギー量の算定

柱や片持ばりでの終局限界時の曲率 ϕ の分布は図-2の実線のようになる。軸方向鉄筋のひずみ ϵ_s の分布は、曲率 ϕ の分布とほぼ同一であり、このひずみを与えるのに消費されたエネルギー量を評価すれば、それが部材の最大消費エネルギー量となる。そこで、計算の単純化のため軸方向鉄筋のひずみ ϵ_s の分布を図-2の点線のように仮定すると、部材の最大消費エネルギー量 W_{max} は、断面の最大消費エネルギー量 $W_{c,max}$ から次式のように表される。

$$W_{max} \approx l_p W_{c,max} \dots \dots \dots (21)$$

ここに、 l_p : 塑性域の長さ (図-2 参照)

塑性域長さについては、これを精度良く求める解析的手法は未だ確立されていない。しかし、せん断スパン比が大きい場合、文献4)を参照すると、 l_p は断面の有効高さ (d) にほぼ等しいとおくことができる。そこで、実用的に $l_p = d$ とおくと部材の最大消費エネルギー量 W_{max} は次のようになる。

$$W_{max} = d(A_s + A_c) \left\{ \frac{1}{2} f_{sy} \epsilon_{sy} + f_{sy} (\epsilon_{su} - \epsilon_{sy}) \right\} \dots \dots \dots (22)$$

5. 累積消費エネルギー量 W_{acc} の評価

RC 部材の損傷度評価に関する既往の研究では、部材終局までの履歴エネルギー量 (ヒステリシスループで囲まれる面積) の総和は一定であるとし、損傷の累積評価には直線補完則 (マイナー則) が用いられてきた。しかし、RC 部材や構造物の損傷には、荷重履歴が大きく影響することが指摘されて^{4), 8), 19)}おり、たとえ同じヒステリシスループを描いたとしても構造物が受ける損傷はそれまでの荷重履歴によって異なると言える。この点を考慮し、累積消費エネルギー量の算定においては、変位がこれまで経験していた変位、即ち過去の最大変位を越えたかどうかで分けて考えることにした。

(1) 初載荷部分

現在変位が過去の最大変位を越えた場合、現在変位のヒステリシスループが過去の最大変位時のヒステリシス

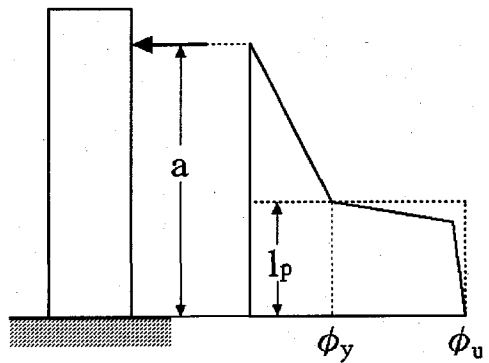


図-2 終局限界時の曲率 ϕ の分布

ループを越えた部分について (図-3, 斜線部) 初載荷部分とし、その面積を部材が受けた損傷であると考え。図中、 δ_1 : 過去の最大変位、 δ_2 : 現在変位、 P_y : 降伏荷重、 δ_y : 降伏変位を表す。

(2) 繰り返し載荷部分

現在変位が過去の最大変位を越えなかった場合、ヒステリシスループの面積がそのまま部材が受けた損傷であるとは考えられない。前述したように、ヒステリシスループの面積のうちどれだけの部分が、それまでの累積損傷に加えられたのかは荷重履歴によるはずである。そこで、ヒステリシスループの面積のうち部材の損傷を増加させる部分の面積 (エネルギー量) を塑性仕事量 W_p 、その塑性仕事のループ全体の面積 W_h に対する割合を塑性仕事率 R_w として以下のように定義し、これを定量化することを考える。

$$R_w = \frac{W_p}{W_h} \dots \dots \dots (23)$$

ここに、 W_p : 塑性仕事量、 W_h : 全仕事量 (ヒステリシスループ 1 サイクルの面積)。

魚本ら¹⁹⁾は、変位 $i\delta_y$ (δ_y : 降伏変位、 $i = (\delta_i/\delta_y)$: 変位段階、ただし、 $\delta_i > \delta_y$) に対する塑性仕事量 W_p はヒステリシスループのうち、変位が δ_y 以上、かつ、荷重が P_{iy} 以上 (P_{iy} : 変位が δ_y のときの荷重) の部分であるとして、図-4 のように定義している。

この定義によると、塑性仕事率 R_w は、

$$W_h = 2(i-1)P_y\delta_y \dots \dots \dots (24)$$

$$W_p = 2 \frac{(i-1)^3}{(2i-1)^2} P_y\delta_y \dots \dots \dots (25)$$

より、

$$R_w = \left(\frac{i-1}{2i-1} \right)^2 \dots \dots \dots (26)$$

となる。

本研究では、荷重履歴を初載荷部分と繰り返し載荷部分の 2 通りに分けて考えた。したがって、この分類に対応した塑性仕事率 R_w を求めるには、初載荷後 1 回の繰

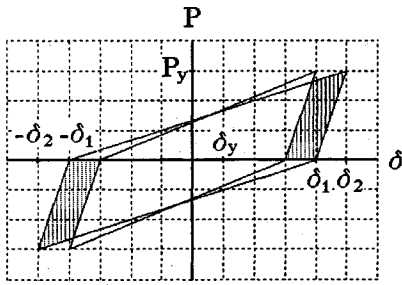


図-3 初載荷部分

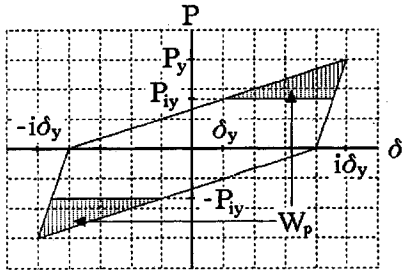


図-4 塑性仕事

り返し載荷で終局に至る場合(つまり2サイクルの載荷)を想定しなければならない。通常の配筋を施したRC柱部材を単調載荷すると、曲げ終局時の靱性率は10以上にもなることから、塑性仕事率 R_w の値に式(26)での収束値を用いても実用上問題ないと考えられる(図-5参照)。

この収束値を求めてみると、

$$\lim_{i \rightarrow \infty} R_w = \lim_{i \rightarrow \infty} \left(\frac{i-1}{2i-1} \right)^2 = \left(\frac{1}{2} \right)^2 = 0.25 \dots (27)$$

となる。本来、塑性仕事率 R_w には全ての荷重履歴を考慮する必要があるが、塑性仕事率 R_w は入力地震波の特性などによっても変化すると考えられることから、その精密な定量化は現段階では困難である。また、塑性仕事率を定数で置き換えることによって初めて、どのような入力地震波に対しても繰返し載荷部分の累積消費エネルギー量の算定が可能になる。

(3) Bauschinger 効果

一般に、鉄筋が繰返し載荷を受けると、その包絡線(スケルトンカーブ)は、単調載荷時の $\sigma \sim \epsilon$ 曲線に比べて、降伏以降の特性が変わってくるのが知られている。この効果を Bauschinger 効果と呼び、具体的には、降伏棚が減り、ひずみ効果の勾配が増加するのだが、その定量化はあまりなされていない。そこで、Bauschinger 効果の影響を同一 RC 供試体に対する単調載荷と繰返し載荷の実験から求める(鉄筋への影響を RC 部材の実験から求めるのは、部材で消費されるエネルギー量のほとんどが軸方向鉄筋で消費されているからであ

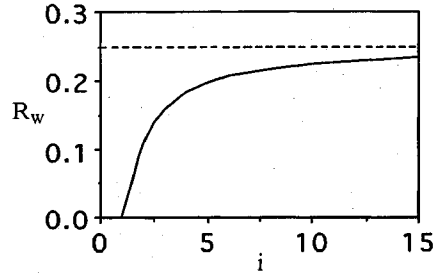


図-5 変位段階 i と塑性仕事率 R_w の関係

る, 4.(1) a) 参照). 繰返しによる崩壊までのエネルギー消費量の増加率を k とおくと、

$$W_s = \mu \cdot P_y \cdot \delta_y \dots (28)$$

$$W_c = k \left\{ \mu \cdot P_y \cdot \delta_y + 0.25 \sum_i (i-1)(n_i-1) \cdot P_y \cdot \delta_y \right\} \dots (29)$$

ここに、 W_s : 単調載荷による崩壊までの履歴エネルギー量、 W_c : 繰返し載荷による崩壊までの履歴エネルギー量、 k : 繰返し載荷による履歴エネルギー量の増加率、 μ : 靱性率、 n_i : 変位段階 i における繰返し回数。

したがって、 k は、

$$k = \frac{W_s}{W_c} \dots (30)$$

として求められる。これを文献5)の実験結果(表-1)に適用すると、供試体2Bの場合 $k=1.45$ 、供試体8Bの場合 $k=1.40$ であった。本来、 k の値は荷重履歴の影響を受けるはずであるが、定量化するほどの実験結果が存在しないことに加えて、供試体諸元が異なる2供試体に対して k の値がほとんど同一となったので、ここでは一律に $k=1.4$ とし、初載荷の場合のエネルギー量、構造物の崩壊までのエネルギー量の算定に用いることとする。

(4) 累積消費エネルギー量の算定

累積消費エネルギー量 W_{acc} は、初載荷部分によるエネルギー量 W_u と、繰返し載荷によるエネルギー量 W_i の和として、以下のように算定される。

$$W_{acc} = W_u + W_i \dots (31)$$

$$W_u = 2kP_y(\delta_u - \delta_y) \dots (32)$$

$$W_i = 2 \sum_i 0.25n_i P_y (\delta_i - \delta_y) \dots (33)$$

ここに、 δ_u : 終局変位。

6. 損傷度評価方法の検証と設計への適用

(1) 実験結果との比較

a) 躯体変位の算出方法

交番繰返し載荷を受ける柱部材の履歴特性を調べる既往の研究の実験では、躯体の変形による変位とフーチ

表一 文献5)の実験結果

供試体	荷重方法	靱性率
2B	単調荷重	7.0
2B	繰返し荷重	3.4
8B	単調荷重	7.4
8B	繰返し荷重	3.6

ングからの軸方向鉄筋の引き抜けによる変位とを統一して扱っているものが多いが、フーチングからの軸方向鉄筋の引き抜け量は、端部での定着長さや定着方法など、躯体の断面諸元に含まれない因子の影響も大きく、本来は分離して扱うべきであると考えられる。ここでは、フーチングからの軸方向鉄筋の引き抜けによる変位を軸方向鉄筋径と鉄筋間隔によって求めた石橋ら¹⁾の式を用いて評価し、躯体の変位を求めた。

b) 実験結果との比較

使用した実験データは、石橋ら¹⁾、太田ら²⁾、荒川ら³⁾および大野ら⁹⁾によるものうち、曲げ降伏後曲げ破壊したものである。それら25体の供試体諸元の範囲は、せん断スパン比 a/d : 2.5~4.0、軸方向引張鉄筋比 p : 0.36~1.45 (%)、せん断補強筋比 p_w : 0.08~0.69 (%)、軸圧縮応力 σ_0 : 0~50 (kgf/cm²) である。最大消費エネルギー量の計算値は供試体諸元から式 (22) より、式 (22) 中の ϵ_{su} は式 (18) から求まる。しかしその算定に際し、弾性域を無視していること、コンクリートによって消費されるエネルギーを無視していることなどにより、本来の値より少し小さめになる。そこで、大野ら⁹⁾の研究結果より、塑性域でのエネルギー消費率を95%、弾性域での消費率を5%、小柳ら¹⁵⁾の解析より、軸方向鉄筋のエネルギー消費率を90% ($p=0.5\%$ のとき93.2%、 $p=1.0\%$ のとき86.3%とされている)、コンクリートなど他の部分での消費率を10%として評価し直した。

一方、終局時の累積消費エネルギー量の実験値 W_{acc} は式 (31)~(33) から求まる。

図-6は、以上のようにして算出した最大消費エネルギー量 W_{max} と累積消費エネルギー量 W_{acc} の関係を示したものであるが、両者は良く一致していることが分かる。 W_{max} の W_{acc} に対する比は、平均0.94、変動係数20.0%、相関係数0.915であった。太田ら²⁾、荒川ら³⁾の動的荷重に対する計算値は、他の計算値と比べて幾分か小さめに出ているが、それほど大きな差はないこと、また、計算値が過小評価になることは安全性の面から見て問題のないこと、などから無視できる程度のものであると考えられる。

次に、 W_{acc}/W_{max} とせん断スパン比 a/d 、軸圧縮応力 σ_0 、せん断補強筋比 p_w との関係をそれぞれ図-7~9に示す。

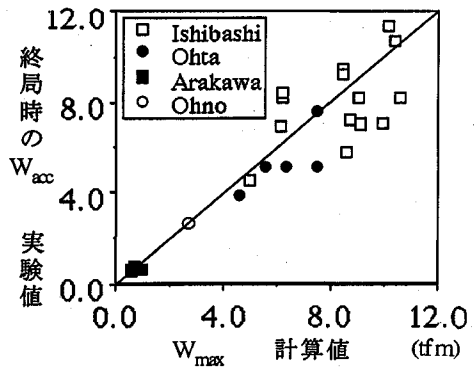


図-6 W_{max} と W_{acc} の比較

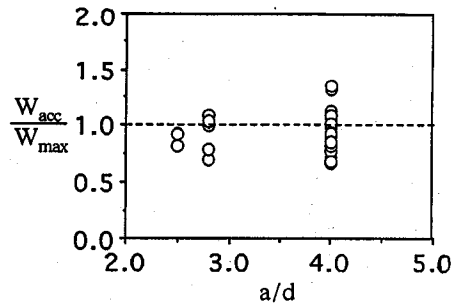


図-7 せん断スパン比の影響

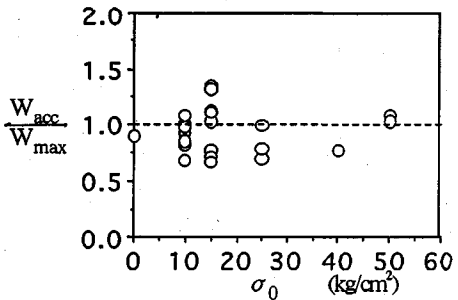


図-8 軸圧縮応力の影響

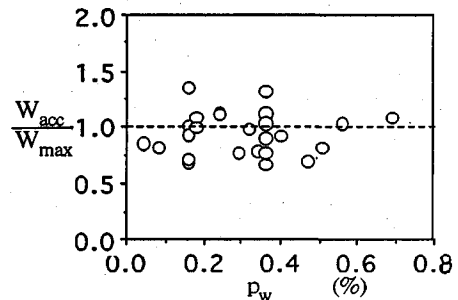


図-9 せん断補強筋比の影響

これらによると、上記の3つの因子に対して W_{acc}/W_{max} の値は片寄りがなく (各々の相関係数は、0.18, 0.03, 0.00)、とくに W_{max} の算定に含まれていない軸圧縮応力に対しても、提案した式が妥当であるこ

とを示している。

(2) 実地震波による解析例

a) 解析条件

解析したRC柱は、断面寸法1.0×1.0 (m)、高さ4.3 (m)、軸方向引張鉄筋比0.60 (%)、せん断補強筋比0.25 (%)である。入力地震波は、仙台国鉄管理局地階NS成分(宮城県沖地震・1978年)、および、ElCentro (Imperial Valley Earthquake・1940年)の2種類を使用した。継続時間は全て30秒とし、地震動の最大加速度は400~700 (gal)と記録地震波を拡大縮小して用いた。

b) 解析結果

断面諸元より、最大消費エネルギー量 W_{max} は、 2.05×10^6 (kgf·cm)と算定された。一方、累積消費エネルギー量は1自由度系弾塑性応答解析(解析条件は文献20)におけるものと同一)により求めた。その結果は表-2のようになった。

表-2によると、損傷度 D の値は最大加速度を700 (gal)に拡大しても1.0に到達しておらず、この柱は終局には至っていないが、塑性変形を生じた500 gal以上で損傷度 D の値は急増しており、この程度の大地震を数回経験すると崩壊する可能性のあることを示している。

(3) 損傷度の確率論的評価手法

a) 損傷度と破壊確率

以上の理論の展開は、全て確定論的なものであった。しかし、材料強度、断面寸法、荷重など損傷度を評価するのに必要な因子は全て確率論的な値であると考えられ、損傷度 $D=1.0$ というのも、実は、構造物が終局に至る平均値である。したがって、その分散を求めることが大変重要なこととなるが、確率変数となる因子が極めて多いこと、それぞれの因子の分散でさえ定量化が難しいことなどから、損傷度 D の分散を求めることは大変困難である。そこで、ここでは、地震によって入力された累積消費エネルギー量 W_{acc} は確定値とし、最大消費エネルギー量 W_{max} については、鉄筋の断面積 A_s 、断面の有効高さ d を確定値、 $S_s(\epsilon_{su})$ を変動係数10%の対数正規分布(非負であるから)の確率変数と仮定することによって、最大消費エネルギー量 W_{max} の確率分布を $S_s(\epsilon_{su})$ の確率分布と同一のものとなるよう(式(22)参照)に仮定することにする。このとき、破壊確率 P_f が一般的に重要構造物に許容される値と言われる $P_f=10^{-6}$ に相当する累積消費エネルギー量 W_{acc} を求めてみる。

破壊確率 P_f は、損傷度 D を用いて次のように表せる。

$$P_f = P(D \geq 1.0) \\ = P\left(\frac{W_{acc}}{W_{max}} \geq 1.0\right) \\ = P(W_{acc} \geq W_{max}) \dots\dots\dots (34)$$

表-2 実地震波による損傷度 D の算定

最大加速度 (gal)	宮城県沖		El-Centro	
	Wacc	D	Wacc	D
400	0.0107	0.005	0.0306	0.015
500	0.149	0.073	0.196	0.096
600	0.674	0.329	0.854	0.416
700	1.19	0.581	1.36	0.664

ここで、破壊確率 $P_f=10^{-6}$ に相当する累積消費エネルギー量 W_{acc} を W_f とおくと、

$$P(W_f \geq W_{max}) = 10^{-6} \dots\dots\dots (35)$$

W_{max} を標準正規分布に変換すると、

$$10^{-6} \approx \Phi(-4.75) \dots\dots\dots (36)$$

であるから、

$$\Phi\left(\frac{\ln W_f - (\ln E(W_{max}) - 0.00488)}{0.0988}\right) = \Phi(-4.75) \dots\dots\dots (37)$$

ここに、 $\Phi(x)$: 標準正規分布関数。したがって、

$$\ln W_f - \ln E(W_{max}) = -0.469 \dots\dots\dots (38)$$

$$\frac{W_f}{E(W_{max})} = e^{-0.469} \dots\dots\dots (39)$$

$$W_f = 0.63 \cdot E(W_{max}) \dots\dots\dots (40)$$

となる。最大消費エネルギー量 W_{max} の平均値 $E(W_{max})$ とは、断面諸元から求まる計算値そのものである。この時の損傷度 D は、

$$D = \frac{W_f}{W_{max}} = 0.63 \dots\dots\dots (41)$$

と算定される。

b) 信頼性の尺度としての損傷度

上記の仮定および手順により、種々の破壊確率に対応する損傷度 D の値を求め、表-3にまとめた。

表-3から、損傷度 D の値に対応する構造物の破壊確率 P_f が求まる。したがって、構造物に許容される損傷度 D の値が決定され、構造物の信頼性評価ができることになる。例えば、(2)で解析した柱の許容破壊確率 P_f が 10^{-6} であった場合、El-Centroの地震波の最大加速度700 (gal)で所定の信頼性を満たさなくなったことになる。

c) 耐震設計への適用

構造物の信頼性の尺度である損傷度 D による耐震設計のフローチャートを図-10に示す。

まず、最大消費エネルギー量 W_{max} と累積消費エネルギー量 W_{acc} の一般的な変動性を決定し、それによって、構造物の破壊確率 P_f から損傷度 D の値を求める。

次に、建設場所での累積消費エネルギー量 W_{acc} を算定する。このとき、地盤などの諸条件によって、この値を修正することもできる。 W_{acc} と D が求まれば、 W_{max} が求まり、設計変数の各値が決定される。

表-3 破壊確率 P_f と損傷度 D の関係

破壊確率 P_f	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
損傷度 D	0.74	0.69	0.66	0.63

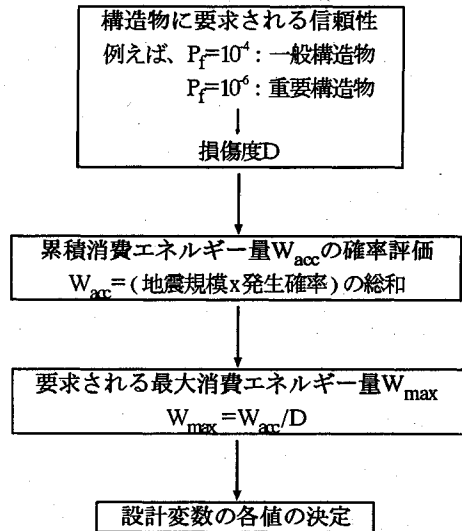


図-10 耐震設計フロー

以上の手順によって、損傷度 D を耐震設計に適用することができると思われる。従来の設計が、設計時の耐力と予想される荷重から破壊確率を求め、それに安全率を考慮する方法であるのに対し、ここで提案した方法では、構造物の損傷に対する強さや地震発生確率などが考慮されている。つまり、損傷がない状態 ($D=0$) での W_{max} と W_{acc} の関係は、従来の設計における設計時の耐力と予想される荷重の関係と同一のもので、安全率が構造物の累積損傷に対する安全性や地震発生確率などによって決定されるということである。

7. 結 論

本研究では、曲げ降伏後曲げ破壊する RC 部材の損傷度を算定する手法を提案し、その評価を試みた。本研究によって得られた結論を以下に示す。

(1) RC 構造の損傷度をエネルギー量を指標として定義し、その算定方法を示した。また、既往の研究で得られた実験データを用いて検証を行い、終局に対し良い精度を有していることを確認した。

(2) 実地震波による解析を行い、損傷度を算定し、損傷度が RC 構造の信頼性の尺度となることを示した。

(3) 損傷度の確率論的評価について述べ、損傷度を基準とした RC 構造の耐震設計の手順を示した。

本研究の今後の課題を列挙すると以下ようになる。

(1) 繰り返し載荷を受けた場合の鉄筋のスケルトンカーブの定式化 (Bauschinger 効果)。

(2) 柱部材の弾性域やコンクリートのエネルギー負担分の算定。

(3) 塑性域長さの断面諸元や材料特性に対する定式化。

(4) W_{max} や W_{acc} の算定に、軸圧縮応力を因子として考慮し、より厳密な評価をはかること (より高い軸圧縮応力を受ける柱部材では、軸圧縮応力が終局挙動に大きな影響を及ぼすと考えられるから^{6),7)})。

(5) 終局までの全荷重履歴に対する塑性仕事率の詳細な定量化。

(6) 繰り返し載荷時にせん断破壊する部材への適用のための、繰り返し載荷時のせん断破壊機構の解明。

今後の耐震設計を考える場合、構造物のライフタイムリスクの評価が不可欠であると考えられ、そのためには、構造物の損傷度の評価および地震荷重の (発生確率を考慮した) 評価が必要になる。本研究は、前者の確立のための基礎研究である。

参 考 文 献

- 石橋忠良・吉野伸一：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，No. 390/V-8，pp. 57~66，1988. 2.
- 太田実：単一柱形式鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計に関する研究，土木研究所報告，第 153 号，1980. 3.
- 荒川卓・荒川康幸・藤田豊・溝口光男：繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリート柱の変形性能の評価，第 3 回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp. 449~452，1981.
- コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム I 委員会報告：(社)日本コンクリート工学協会 コンクリート構造物の靱性評価研究委員会，1988. 3.
- 東洋一・大久保全陸・大塚宗嗣：鉄筋コンクリート短柱崩壊防止に関する総合研究その 23 LE シリーズ：荷重履歴を変えた実験 (I)-(A) 実験概要，日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東)，2388，pp. 1113~1114，1975. 10.
- 中村 光・二羽淳一郎・田辺忠顕：鉄筋コンクリート柱の終局変位に関する解析的研究，土木学会論文集，No. 420/V-13，pp. 115~124，1990. 8.
- 中村 光・二羽淳一郎・田辺忠顕：解析的研究に基づく RC 部材の塑性変形能定量化，土木学会論文集，No. 422/V-16，pp. 127~135，1992. 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，pp. 85~91，1993. 2.
- Ohno, T. and Nishioka, T.: An experimental study on energy absorption capacity of columns in reinforced concrete structures, Proc. of JSCE, Struct. Eng./Earthquake Eng., Vol.1, No.2, pp.23~33, Oct. 1984.
- 中田聖志・服部篤史・井上 晋・宮川豊章・藤井 学：RC はり部材の累積消散エネルギーの定式化と損傷評価，土木学会第 46 回年次学術講演会概要集，V-372，pp. 760~761，1991 年 9 月。
- Banon, H., Biggs, J.M. and Irvine, H.M.: Sismic damage

- in reinforced concrete frames, Journal of the Structural Engineering Division, ASCE, Vol.107, No.ST9, pp.1713~1729, Sep. 1982.
- 12) Park, Y.J. and Ang, A.H.S. : Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, Journal of the Structural Engineering Division, ASCE, Vol.111, No.4, pp.722~739, Apr. 1985.
- 13) Park, Y.J., Ang, A.H.-S. and Wen, Y.K. : Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings, Journal of the Structural Engineering Division, ASCE, Vol.111, No.4, pp.740~757, Apr. 1985.
- 14) 本郷和徳・魚本健人・矢島哲司：正負繰り返し載荷を受ける RC はりの累積消費エネルギーによる損傷度評価, 土木学会第 47 回年次学術講演会概要集, V-365, pp.760~761, 1992 年 9 月.
- 15) 小柳 治・六郷恵治・岩瀬裕之：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, No.348/V-1, pp.153~162, 1984.8.
- 16) 六車 熙・渡辺史夫・勝田庄二・田中仁史：横拘束コンクリートの応力ひずみ曲線のモデル化, セメント技術年報 34, pp.429~432, 1980.
- 17) 鈴木計夫・中塚 信・井上和政：プレストレスト鉄筋コンクリート梁部材の終局限界とその特性, コンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウムⅡ論文集, pp.193~204, 1988.3.
- 18) 島 弘・伊藤圭一・北西隆司・水口裕之：RC 橋脚における主鉄筋座屈と靱性に及ぼす帯鉄筋配置の影響, コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集, pp.33~40, 1990.5.
- 19) 魚本健人・矢島哲司・本郷和徳：繰り返し曲げを受ける 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, 14-2, pp.919~924, 1992.
- 20) 鈴木基行・綿貫正明・滝沢聡・尾坂芳夫：時刻歴応答解析に基づく RC 2 層ラーメンの耐震性能評価, コンクリート工学論文集, 第 4 巻第 1 号, pp.67~78, 1993.1.
(1993.7.26 受付)

EVALUATION OF DAMAGE INDEX OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURE

Motoyuki SUZUKI, Yasuhiro AKAKURA, Hideaki ADACHI and Yoshio OZAKA

In this study, new method of evaluation of damage index of reinforced concrete member of which ultimate limit state is reached by flexural-compression after yielding is proposed. Accumulative consumed energy of member is thought to be a total energy consumed during earthquake motion. While, maximum consumed energy is a specific value for each member and is determined by the dimension of section and material properties. Proposed damage index is examined by available test data.

Furthermore, we show the procedure for applying proposed damage index to seismic design of reinforced concrete structure in the light of reliability approach.