

劣化型履歴構造物の地震時損傷度指標  
に関する二、三の考察

A FEW REMARKS ON DAMAGE INDEX FOR STRUCTURES WITH DETERIORATED RESTORING CHARACTERISTICS UNDER SEVERE EARTHQUAKES

成行 義文<sup>\*</sup> · 平尾 潔<sup>\*\*</sup> · 四方 康仁<sup>\*\*\*</sup> · 沢田 勉<sup>\*\*\*\*</sup>

By Yoshifumi NARIYUKI, Kiyoshi HIRAO, Yasuhito SHIKATA, Tsutomu SAWADA

This paper deals with the damage index for structures with deteriorated restoring characteristics under strong earthquake motions. The collapse of structures under severe earthquakes is defined as when the strength of these structures drops to 80% of the maximum strength.

From the numerical results based on the response analysis for structures under severe earthquakes, we derived the damage index, expressed as the linear combination of the displacement and energy ductilities. The two regression coefficients contained in this damage index can be approximately obtained by using the results of the static analysis under the repeated load with the constant displacement amplitude.

1. はじめに

強震下における構造物の損傷度を表す指標として、構造物の最大応答変位をその降伏変位で除した変位じん性率が、従来より、よく用いられている。これは簡便さゆえに非常に有効な指標ではあるが、一般に応答継続時間中のある瞬間的な損傷を表しているに過ぎず、地震動の繰返し荷重効果により構造物にもたらされる累積的な損傷を表すことはできない。このような累積的損傷を表すパラメータの一つとして履歴吸収エネルギーが注目されており、その定量的評価法に関する解析的ならびに実験的研究が盛んに行われている<sup>1)~7)</sup>。

構造物が極めて衝撃的な地震動をうける場合には、構造物の損傷において瞬間的損傷が卓越し、逆に、比較的周期的な地震動を長時間うける場合には、累積的損傷が支配的になると考えられる。また、その中間的な地震動により構造物にもたらされる損傷は、瞬間的および累積的損傷の複合であると考えるのが妥当であろう。したがって、構造物の地震時損傷度を合理的に評価するためには、これらの両損傷を考慮し得る損傷度指標を導く必要があるものと思われる。構造物の地震時損傷度評価法に関する研究として、Y. J. Parkら<sup>8)</sup>は、RC部材を対象とした多くの繰返し載荷実験結果より、その地震時損傷度指標を部材の最大変形と履歴吸収エネルギーの線形結合として定義している。平尾ら<sup>9)</sup>は、概略設計された実在に近い寸法をもつ2・3の鋼箱型断面橋脚を対象として、変位漸増載荷時の荷重-変形曲線の囲む面積を許容吸収エネルギーとみな

---

* 工博 徳島大学講師	工学部建設工学科	(〒770 徳島市南常三島町2-1)
** 工博 徳島大学教授	工学部建設工学科	(〒770 徳島市南常三島町2-1)
*** 徳島大学大学院博士前期課程	建設工学専攻	(〒770 徳島市南常三島町2-1)
**** 工博 徳島大学助教授	工学部建設工学科	(〒770 徳島市南常三島町2-1)

し、これに対する履歴吸収エネルギーの比を損傷度指標と定義し、座屈後耐力等がその指標に及ぼす影響について検討している。また、S.L.McCabeら<sup>10)</sup>は、低サイクル疲労の考え方を導入して、繰返し荷重を受ける鋼構造物に対する損傷度指標を履歴吸収エネルギーのみで表している。

これらの指標のうち、Parkらの提唱した指標は、前述のような瞬間的ならびに累積的損傷の両者が考慮されている上、取り扱いが比較的簡単なため、種々の構造物(部材)の地震時損傷度指標として近年よく用いられている<sup>11)・13)</sup>。しかし、Parkらの損傷度指標は、次のような3つの問題点を有していると考えられる。すなわち、

- 1) 指標の式中に含まれる係数 $\beta$ の値が理論的根拠に乏しい。
- 2) 構造物の限界状態(破壊)が明確に定義されていない。
- 3) 指標値と構造物の損傷度との対応関係が曖昧である。

構造物の限界状態を明確に規定することは難しいが、 $P-\Delta$ 効果が問題にならないような構造物においては、その強度が初期最大強度の所定の割合まで、あるいは初期降伏強度まで低下した場合を破壊とみなす定義方法がよく用いられている<sup>4)・14)・15)</sup>。

本研究では、構造物の破壊の定義として前者を採用し、破壊時における初期最大強度に対する構造物の強度の比を80%に設定した。そして、復元力履歴特性が劣化域を有する3-parameterモデル<sup>16)</sup>で表されるようなRC橋脚等の比較的簡単な劣化型履歴構造物を想定して、広範な地震応答解析を実施し、それらの結果をもとに、より合理的な構造物の地震時損傷度指標の誘導を試みた。また、地震応答解析を行うことなく、静的一定振幅繰返し载荷に対する解析結果より、それらの構造物の損傷度指標を近似的に推定する手法についても若干の検討を行った。

## 2. 塑性率ならびにエネルギーじん性率

本研究では、劣化型履歴構造物をせん断型1質点系にモデル化した。地震動入力を受ける1質点系の運動方程式は、周知のように式(1)で表される。

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + Q(x) = -m \ddot{x}_0 \quad (1)$$

ここに、 $m$ 、 $c$ および $\ddot{x}_0$ は、それぞれ質量、粘性減衰係数および地動加速度を、また、 $\ddot{x}$ 、 $\dot{x}$ および $Q(x)$ は、それぞれ構造物の応答加速度、応答速度および非線形復元力を表している。

式(1)の両辺に $\dot{x}$ を乗じ、時刻 $t$ で積分すると、式(2)のようなエネルギー釣合式が得られる。

$$\frac{1}{2} m \dot{x}^2 + \int_0^t c \dot{x}^2 dt + \int_0^t Q(x) \dot{x} dt = \int_0^t -m \ddot{x}_0 \dot{x} dt \quad (2)$$

ここに、左辺第1項は時刻 $t$ における運動エネルギー( $W_k$ )、第2項は時刻 $t$ までに累積された粘性減衰エネルギー( $W_D$ )、第3項は時刻 $t$ までに吸収された塑性ひずみエネルギー(以下、履歴吸収エネルギーと呼ぶ)と時刻 $t$ における弾性ひずみエネルギーの和( $W_H$ )、また右辺は時刻 $t$ までに地震動により系にもたらされた入力エネルギー( $E$ )をそれぞれ表している。構造物の応答終了時には、運動エネルギーと弾性ひずみエネルギーはともに零となり、エネルギー釣合式は式(3)のようになる。

$$W_D + W_H = E \quad (3)$$

本研究では、構造物の瞬間的ならびに累積的損傷を表す応答量として、最大変位 $x_{max}$ ならびに履歴吸収エネルギー $W_H$ に着目し、それらを式(4)のように正規化して得られる $\mu_D$ ならびに $\mu_H$ を、それぞれ変位じん性率ならびにエネルギーじん性率と呼ぶことにする。

$$\mu_D = |x_{max}| / x_y, \quad \mu_H = W_H / Q_y x_y \quad (4)$$

ここに、 $Q_y$  および  $x_y$  は構造物の降伏復元力および降伏変位を表している。また、式 (5) で表される  $\mu_{DP}$  を、ここでは塑性率と呼ぶことにする。

$$\mu_{DP} = (|x_{max}| - x_y) / x_y \quad (5)$$

### 3. 劣化型履歴構造物の復元力履歴モデルと破壊規範

本研究では、劣化型履歴構造物の復元力履歴モデルとして、Parkらの提唱した3-parameterモデル<sup>16)</sup>に劣化域を付加した修正モデルを用いた。

図-1は、そのモデルの復元力履歴特性を示したものであり、縦軸ならびに横軸はそれぞれ降伏復元力 $Q_y$ ならびに降伏変位 $x_y$ で正規化されている。この劣化型3-parameterモデルでは、荷重の繰返しに伴う剛性劣化、強度低下、ピンチング効果をそれぞれ図中に示すような3つの正のパラメータ $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ で表すことができ、これらのパラメータの組み合わせにより、比較的簡単にRC構造物等の復元力履歴特性を表現することができる。

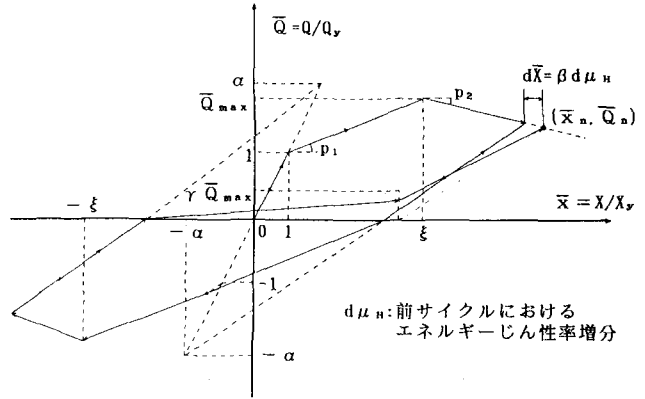


図-1 3-parameterモデル

図-1よりわかるように、今、正側の弾塑性領域で変位が反転し弾性復活が生じた場合、 $\bar{Q}-x$ 関係は、点 $(-\alpha, -\alpha)$ を指向する。すなわち、 $\alpha$ が小さいほど弾性復活時の剛性劣化は大きく、また $\alpha=\infty$ の場合には剛性非劣化型のモデルとなる。また、同図に示されているように、 $\gamma$ はピンチング効果を表すパラメータであり、変位反転後に復元力の符号が逆になる領域では、 $\gamma$ が小さいほど、所定の変位区間における構造物の剛性は小さく評価されることになる。また、 $\beta$ が大きいほど、1サイクル後の変位増分 $d\bar{x} (= \beta d\mu_n)$ は大きくなり、劣化域では、より大きな強度低下をもたらすことになる。したがって、このモデルにおいては、エネルギーじん性率が強度低下の要因の一つとして明確に位置づけられている。図中の $p_1$ は骨格曲線の第1次弾塑性剛性比、 $p_2$ は第2次弾塑性剛性比(劣化勾配)、 $\xi$ は劣化開始じん性率である。

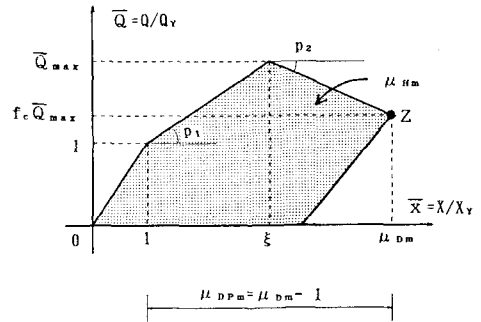


図-2 塑性率ならびにエネルギーじん性率の基準値

また、本研究では、構造物の破壊を表すパラメータとして、初期最大強度に対する低下強度の比 $f$ (以下、低下強度比と呼ぶ)を用い、 $f \leq f_c$  ( $=0.8$ ) の場合に構造物は破壊すると定義した。ここで、 $f_c$ は図-2に示すような構造物の破壊時の低下強度比である。

#### 4. 基準化された塑性率とエネルギーじん性率との関係

1. で述べたように、本研究では、構造物の地震時損傷を瞬間的損傷と累積的損傷の複合と考え、前者を表すパラメータとして塑性率 $\mu_{DP}$ に、また後者を表すパラメータとしてエネルギーじん性率 $\mu_H$ に、それぞれ注目した。しかし、これらのパラメータ $\mu_{DP}$ ならびに $\mu_H$ は、復元力のスケルトンカーブの形状の影響を強く受けるため、これらの値だけからでは、種々の構造物に対する統一的な損傷度評価が難しいと考えられる。したがって、本研究では、 $\mu_{DP}$ ならびに $\mu_H$ を基準化するための諸量として、図-2に示すような2つのパラメータ $\mu_{DPM}$ ならびに $\mu_{HM}$ を導入した。図-2において、 $\mu_{Dm}$ は静的変位漸増載荷のもとで、構造物がちょうど破壊する場合( $f=f_c$ : Z点)の変位じん性率を表しており、 $\mu_{DPM}$ は同図中に示されているように $\mu_{Dm}$ から初期弾性限界変位に相当する1.0を除いたものである。また、 $\mu_{HM}$ は、同様に静的変位漸増載荷のもとでの構造物の破壊時における塑性ひずみエネルギーに相当するエネルギーじん性率(図-2の網掛けの部分)を表している。

本研究では、復元力特性から決定されるこれらの量を用いて、地震応答量である塑性率 $\mu_{DP}$ ならびにエネルギーじん性率 $\mu_H$ を基準化することにより、瞬間的ならびに累積的損傷を表すパラメータをそれぞれ $\mu_{DP}/\mu_{DPM}$ ならびに $\mu_H/\mu_{HM}$ と設定した。

また、本研究では、入力地震動として、次の3つの実地震動記録の最初から30秒間をそれぞれ用いた。

- (a) El Centro S00E, 1940, Imperial Valley Earthquake,  $T_P=0.68$  sec.
- (b) 八戸 S-252, N-S, 1968年, 十勝沖地震,  $T_P=2.73$  sec.
- (c) 室蘭 S-241, N-S, 1968年, 十勝沖地震,  $T_P=0.42$  sec.

ここで、 $T_P$ は各波の卓越周期を表している。

図-3(a)~(c)は、それぞれ、前述の3つの実地震動記録の最大加速度を適当に変化させてエネルギー応答解析<sup>9)</sup>を行い、その解析結果をもとに、弾性限界(無損傷)から破壊に至るまでの前述の2つの損傷パラメータ( $\mu_{DP}/\mu_{DPM}$ ,  $\mu_H/\mu_{HM}$ )の関係を示したものである。各記号は、図中に示すように構造物の固有周期 $T$ の相違を表しており、また、×印は、構造物の強度が初期最大強度のちょうど80%まで低下し、構造物が崩壊( $f=f_c$ )したことを示している。この点(×印)を破壊点と呼ぶことにする。また、原点は弾性限界状態を表している。構造ならびに復元力履歴特性を表す各パラメータの値は、それぞれ図中に示す通りである。また、本研究では、構造物の減衰定数 $h$ はすべて0.05として応答解析を行った。

図-3(a)~(c)より、 $\mu_{DP}/\mu_{DPM} - \mu_H/\mu_{HM}$ 関係は、巨視的には、入力地震動および構造物の周期によらず、いずれも原点を通る直線と見なすことができるものと思われる。また、卓越周期が比較的短い

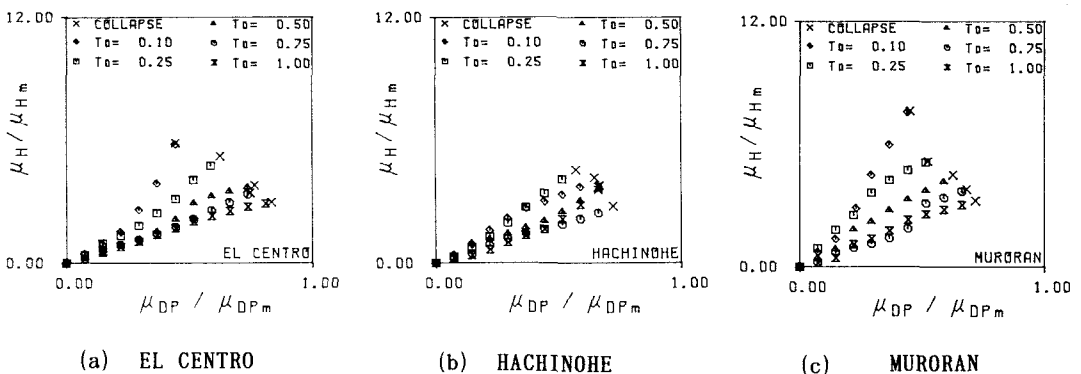
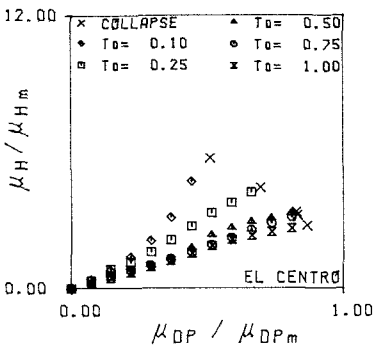


図-3  $\mu_{DP}/\mu_{DPM} - \mu_H/\mu_{HM}$ 関係 ( $p_1=0.1, p_2=-0.1, \xi=5.0, \alpha=2.0, \beta=0.1, \gamma=\infty$ )

El Centro ならびに室蘭記録に対する破壊点は、構造物の固有周期が長いほど  $\mu_H$  が小さくかつ  $\mu_D$  が大きい領域 (図の右下方) に位置しているが、卓越周期が長い八戸記録では明確な傾向は見られない。さらに、同図より、これらの破壊点は一つの直線上にほぼ分布していることがわかる。このことは、本研究のように低下強度比  $f=0.8$  を破壊規範とした場合、強震下における構造物の破壊時の塑性率  $\mu_{DP}$  とエネルギーじん性率  $\mu_H$  との間には、一次の相関関係が存在することを示唆している。ここでは、この直線を破壊線と呼ぶことにする。

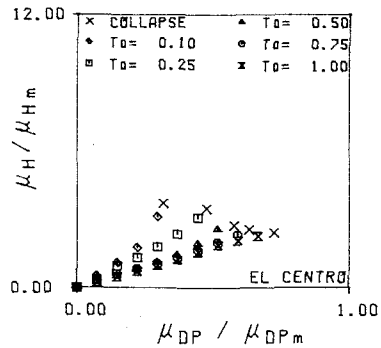
図-4~7は、El Centro 記録に対する図-3 (a) の場合を基準として、それぞれ  $\alpha$  のみを変化させた場合 ( $\alpha=1.0$ )、 $\beta$  のみを変化させた場合 ( $\beta=0.2$ )、 $\gamma$  のみを変化させた場合 ( $\gamma=0.5$ ) および  $\xi$  のみを変化させた場合 ( $\xi=1.0$ ) の各  $\mu_{DP}/\mu_{DPM} - \mu_H/\mu_{HM}$  関係を、構造物の固有周期  $T_0$  をパラメータとして同様に示したものである。これらの図より、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  および  $\xi$  等の値によらず、図-3と同様に比較的明確な破壊線が存在し、さらに  $\mu_{DP}/\mu_{DPM}$  と  $\mu_H/\mu_{HM}$  がほぼ比例関係にあることがわかる。



$$p_1=0.1, \quad p_2=-0.1, \quad \xi=5.0$$

$$\alpha=1.0, \quad \beta=0.1, \quad \gamma=\infty$$

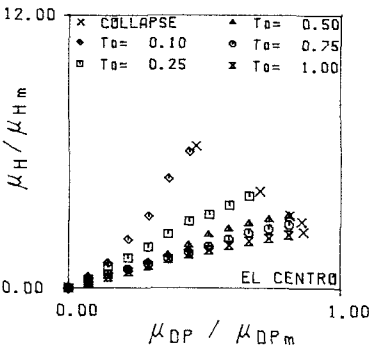
図-4  $\mu_{DP}/\mu_{DPM} - \mu_H/\mu_{HM}$  関係 ( $\alpha=1.0$ )



$$p_1=0.1, \quad p_2=-0.1, \quad \xi=5.0$$

$$\alpha=2.0, \quad \beta=0.2, \quad \gamma=\infty$$

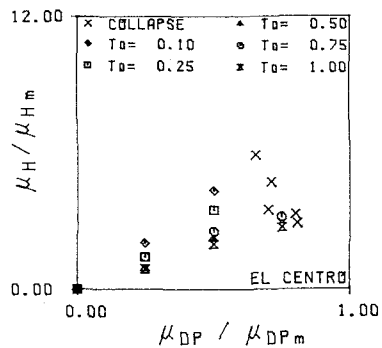
図-5  $\mu_{DP}/\mu_{DPM} - \mu_H/\mu_{HM}$  関係 ( $\beta=0.2$ )



$$p_1=0.1, \quad p_2=-0.1, \quad \xi=5.0$$

$$\alpha=2.0, \quad \beta=0.1, \quad \gamma=0.5$$

図-6  $\mu_{DP}/\mu_{DPM} - \mu_H/\mu_{HM}$  関係 ( $\gamma=0.5$ )



$$p_1=0.1, \quad p_2=-0.1, \quad \xi=1.0$$

$$\alpha=2.0, \quad \beta=0.1, \quad \gamma=0.5$$

図-7  $\mu_{DP}/\mu_{DPM} - \mu_H/\mu_{HM}$  関係 ( $\xi=1.0$ )

また、図-8は、入力地震動の相違が破壊線に及ぼす影響について比較するために、前述の3つの実地震動記録に対する破壊線を同時に示したものである。各パラメータの値は、図中に示す通りである。この図では、破壊線に及ぼす入力地震動の影響は、比較的小さくなっているのがわかる。

### 5. 損傷度指標 $D_I$ の定義

破壊時の塑性率およびエネルギーじん性率をそれぞれ  $\mu_{DPC}$  および  $\mu_{HC}$  とすると、図-3~7における破壊線は、これらの線形結合として、式(6) のように表される。

$$A \frac{\mu_{DPC}}{\mu_{DPM}} + B \frac{\mu_{HC}}{\mu_{HM}} = 1.0 \quad (= D_{IC}) \quad (6)$$

ここに、A、Bは回帰係数、また  $D_{IC}$  は破壊時の損傷度指標である。なお、破壊線の定義より明らかなように、式(6) は構造物の固有周期  $T$  には無関係な関数である。本研究では、損傷度指標の値と構造物の損傷度との関係をできるだけ明確にするため、式(6) に示したように、破壊時の損傷度指標  $D_{IC}$  を1.0と規定した。

さらに、弾塑性応答を経験した未破壊構造物の損傷度  $D_I$  は、その構造物の応答を  $(\mu_{DP}, \mu_H)$  とすると、 $\mu_{DP}/\mu_{DPM} - \mu_H/\mu_{HM}$  平面において、原点を通り破壊線に平行な直線と対応する座標点  $(\mu_{DP}/\mu_{DPM}, \mu_H/\mu_{HM})$  との距離に比例すると仮定した。ここで、原点と破壊線との距離  $l_c$ 、ならびに、原点を通り破壊線に平行な直線と構造物の応答を示す座標点  $(\mu_{DP}/\mu_{DPM}, \mu_H/\mu_{HM})$  との距離  $l_r$  は、それぞれ式(7)および式(8) のようになる。

$$l_c = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (7)$$

$$l_r = \frac{\{A (\mu_{DP}/\mu_{DPM}) + B (\mu_H/\mu_{HM})\}}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (8)$$

したがって、破壊時の損傷度指標の値が1.0であることを考慮すると、式(7) および式(8) より、構造物の損傷度指標  $D_I$  は式(9) のように表される。

$$D_I = A \frac{\mu_{DP}}{\mu_{DPM}} + B \frac{\mu_H}{\mu_{HM}} \quad (9)$$

図-9は、式(6) および式(9) を  $\mu_{DP}/\mu_{DPM} - \mu_H/\mu_{HM}$  平面上に模式的に示したものであり、当然、

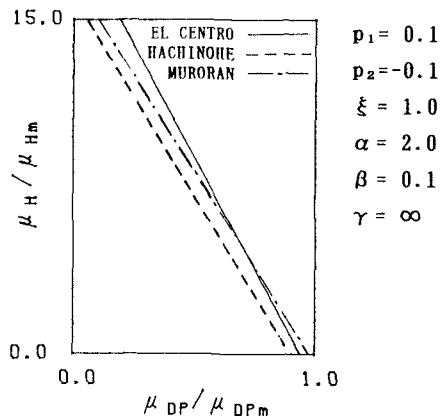


図-8 異なる入力地震動による破壊線の一例

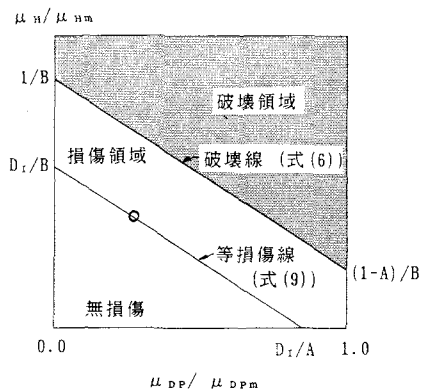


図-9 破壊線と等損傷線

これらの直線は互いに平行である。また、ここでは、式(7)の表す直線を等損傷線と呼ぶことにする。

以上のことより、構造物の地震時損傷度を、 $\mu_{DP}$ および $\mu_H$ をパラメータとした式(9)の指標 $D_I$ により、合理的に定量評価することができるものと思われる。すなわち、 $D_I$ の値により、構造物の損傷は次のような3つの状態に大別される。

- ①  $D_I \leq 0.0$  : 損傷無 ( $D_I=0.0$  : 弾性限界,  $D_I < 0.0$  : 弾性)
- ②  $0.0 < D_I < 1.0$  : 損傷有 ( $D_I$ の値が大きいほど損傷大)
- ③  $D_I \geq 1.0$  : 破壊 ( $D_I=1.0$  :  $f=f_c$ ,  $D_I > 1.0$  :  $f < f_c$ )

ただし、式(9)中に含まれる係数A、Bは、式(6)を満たすように回帰分析等により予め定めておく必要がある。

## 6. 破壊線の簡易推定法とその精度に関する比較検討

5.で述べたように、式(9)を用いて構造物の損傷度評価を行うためには、予め式(9)に含まれる未定係数A、Bを決定しておく必要がある。しかし、前述のように動的応答解析によりいくつかの異なる固有周期に対する破壊点を求め、それらを用いて回帰分析により、係数A、Bを決定する方法はあまり実用的ではないと思われる。したがって、本研究では、破壊線が入力地震動特性の影響をあまり受けないという前提のもとに、静的変位漸増载荷ならびに静的一定振幅繰返し载荷に対する破壊点を用いて、破壊線を比較的簡単に推定する方法について検討した。

図-10の×印は、図-11に示すような静的一定振幅繰返し载荷における振幅の大きさ(変位じん性率 $\mu_D$ )を、弾性限界をわずかに越えた $\mu_D=1.2$ から、劣化開始じん性率 $\xi$ (図-1参照)まで、基準増分を0.2として変化させた場合のそれぞれの破壊点を数値解析により求めプロットしたものである。また、同図中の○印は、静的変位漸増载荷( $\mu_D=\mu_{Dm}$ )に対する破壊点(1.0, 1.0)を示している。構造ならびに復元力履歴特性を表す各パラメータの値は、図中に示す通りである。

図-10より、静的一定振幅繰返し载荷に対する破壊点は、ほぼ一つの直線上に分布しており、地震動入力を受けた場合(図-3~7)と同様な右下がりの線形な破壊線が存在することがわかる。したがって、ここでは、この破壊線を2つの破壊点を結ぶ直線で近似することにし、2つの破壊点としては、 $\mu_D=1.2$ の場合の一定振幅繰返し载荷および変位漸増载荷( $\mu_D=\mu_{Dm}$ )にそれぞれ対応する破壊点を選んだ。

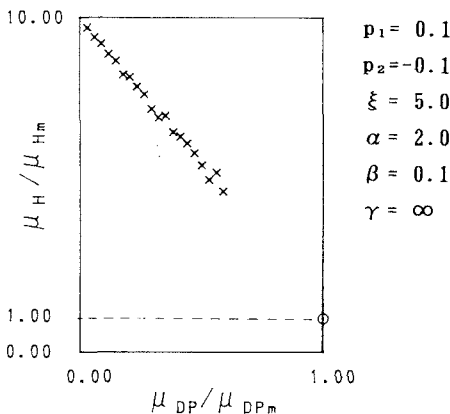


図-10 静的一定振幅繰返し载荷の場合の破壊点

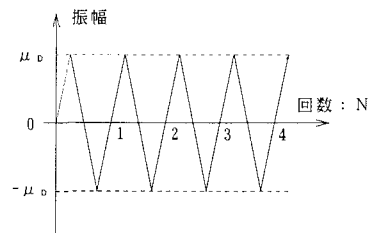


図-11 静的一定振幅繰返し载荷

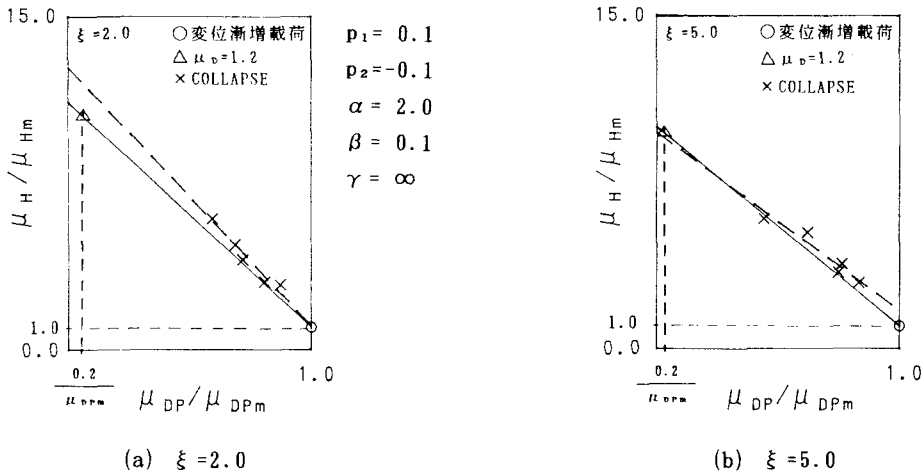


図-12 破壊線の簡易推定例

図-12(a), (b) は、El Centro 記録に対する動的応答解析より求めた破壊点 (×印) と、それらを用いて回帰分析より求めた破壊線 (破線)、ならびに静的一定振幅繰返し载荷に対する破壊点 (△印: 振幅  $\mu_D = 1.2$ ) と静的変位漸増载荷に対する破壊点 (○印) とを結んだ近似破壊線 (実線) を示したものである。同図(a) が劣化開始じん性率  $\xi = 2.0$  の場合、また (b) が  $\xi = 5.0$  の場合である。これらの図より、静的一定振幅繰返し载荷に対する近似破壊線 (実線) と地震動入力に対する破壊線 (破線) とは比較的良好一致していることがわかる。このことは、繰返し荷重をうける構造物の破壊線が、変位振幅特性の影響をあまり受けないことを示唆している。

以上のようなことより、一定振幅  $\mu_D = 1.2$  の場合の静的繰返し载荷に対する破壊時の塑性率ならびにエネルギーじん性率をそれぞれ  $\mu_{DPC} (= 0.2)$  ならびに  $\mu_{HC}$  とすると、破壊線を表す式(6)中の係数 A, B は、それぞれ式(10)の A', B' により近似的に算定することができる。

$$A' = \frac{1 - \mu_{HC} / \mu_{Hm}}{\mu_{DPC} / \mu_{DPM} - \mu_{HC} / \mu_{Hm}}, \quad B' = \frac{\mu_{DPC} / \mu_{DPM} - 1}{\mu_{DPC} / \mu_{DPM} - \mu_{HC} / \mu_{Hm}} \quad \left. \right\} (10)$$

表-1~5 は、式(10)の精度を検討するために、El Centro 記録に対する破壊点の回帰分析より求めた係数 A, B と、静的载荷に対する破壊点を用いて式(10)より求めた係数 A', B' とを、構造ならびに復元力履歴特性パラメータを 2・3 変化させて比較したものである。また表-6 は、同様に、各入力地震動記録に対する式(10)の精度を比較したものである。これらの表中の B/B' は推定破壊線の切片 (1/B') と回帰分析により求めた破壊線の切片 (1/B) との比、また A'/AB' は、それらの破壊線の傾きの比を示している。

表-1 A/A' および B/B' に  $\alpha$  が及ぼす影響

EL CENTRO, $f_c=0.8, T_0=0.1 \sim 1.0, \xi=5.0, p_1=0.1, p_2=-0.1, \beta=0.1, \gamma=\infty$							
$\alpha$	A	A'	A/A'	B	B'	B/B'	A'/AB'
1.0	0.817	0.909	0.898	0.101	0.091	1.110	1.235
2.0	0.825	0.900	0.917	0.102	0.100	1.021	1.113
5.0	0.802	0.890	0.901	0.118	0.110	1.073	1.190
$\infty$	0.704	0.880	0.800	0.132	0.120	1.100	1.375

これらの表より、El Centro 記録に対しては、各パラメータの値によらず A/A' および B/B' はほぼ 1.0 前後であり、式(10)の精度は良好とみなせるが、八戸ならびに室蘭記録の場合には、その精度



は若干悪くなっているのがわかる。これは、本推定法において構造物の応答に及ぼす入力地震動の周期特性の影響が考慮されていないためと考えられるが、これに関する検討は今後の課題としたい。また、これらの表からわかるように、各パラメータの値あるいは入力地震動等によらず、 $B/B' > 1.0$  の場合には  $A'B/AB' > 1.0$ 、また、 $B/B' < 1.0$  の場合には  $A'B/AB' < 1.0$  となっており、結果的に、回帰式より求めた破壊線と式(10)より求まる推定破壊線とは  $0.0 \leq \mu_{DP}/\mu_{DPM} \leq 1.0$  の範囲で必ず交わっている。このことは、式(10)より得られる係数  $A'$ 、 $B'$  を用いた場合の損傷度指標  $D_I$  は、それらの係数の精度にかかわらず、構造物の損傷度を安全側だけでなく、危険側にも評価する必要があることを意味している。したがって、実際に式(10)を用いる場合には、安全側の評価ができるように、係数  $A'$  あるいは  $B'$  の値の割増し等を行なう必要がある。

表-2 A/A'およびB/B'にβが及ぼす影響

EL CENTRO, $f_c=0.8, T_0=0.1\sim 1.0, \xi=5.0, p_1=0.1, p_2=-0.1, \alpha=2.0, \gamma=\infty$							
$\beta$	A	A'	A/A'	B	B'	B/B'	A'B/AB'
0.05	0.869	0.950	0.915	0.059	0.050	1.181	1.290
0.10	0.825	0.900	0.917	0.103	0.100	1.031	1.124
0.20	0.721	0.800	0.901	0.204	0.200	1.020	1.132
0.3	0.654	0.703	0.930	0.298	0.297	1.003	1.079

表-3 A/A'およびB/B'にγが及ぼす影響

EL CENTRO, $f_c=0.8, T_0=0.1\sim 1.0, \xi=5.0, p_1=0.1, p_2=-0.1, \alpha=2.0, \beta=0.1$							
$\gamma$	A	A'	A/A'	B	B'	B/B'	A'B/AB'
0.50	0.860	0.900	0.955	0.100	0.095	1.053	1.102
$\infty$	0.825	0.900	0.917	0.103	0.100	1.031	1.124

表-4 A/A'およびB/B'にξが及ぼす影響

EL CENTRO, $f_c=0.8, T_0=0.1\sim 1.0, p_1=0.1, p_2=-0.1, \alpha=2.0, \beta=0.1, \gamma=\infty$							
$\xi$	A	A'	A/A'	B	B'	B/B'	A'B/AB'
1.0	1.065	0.916	1.163	0.053	0.084	0.631	0.543
2.0	0.917	0.910	1.008	0.079	0.090	0.878	0.871
5.0	0.825	0.900	0.917	0.103	0.100	1.030	1.124

表-5 A/A'およびB/B'にp<sub>2</sub>が及ぼす影響

EL CENTRO, $f_c=0.8, T_0=0.1\sim 1.0, \xi=5.0, p_1=0.1, \alpha=2.0, \beta=0.1, \gamma=\infty$							
$p_2$	A	A'	A/A'	B	B'	B/B'	A'B/AB'
-0.05	0.789	0.898	0.879	0.111	0.102	1.088	1.239
-0.10	0.825	0.900	0.917	0.103	0.100	1.031	1.124

表-6 A/A'およびB/B'に入力地震動が及ぼす影響

$f_c=0.8, T_0=0.1\sim 1.0, \xi=5.0, p_1=0.1, p_2=-0.1, \alpha=2.0, \beta=0.1, \gamma=\infty$							
入力波	A	A'	A/A'	B	B'	B/B'	A'B/AB'
EL CENTRO	0.825	0.900	0.917	0.103	0.100	1.030	1.124
HACHINOHE	1.095	0.900	1.217	0.070	0.100	0.700	0.575
MURORAN	1.044	0.900	1.160	0.084	0.100	0.840	0.724

## 7. おわりに

本研究では、RC橋脚等の比較的簡単な劣化型履歴構造物を対象とし、それらの破壊を「構造物の強度が初期最大強度の80%まで低下した場合」と定義して、2・3の入力地震動に対するパラメトリックなエネルギー応答解析結果をもとに、それらの構造物の合理的な地震時損傷度指標に関する比較検討を行った。その結果、復元力履歴特性が 3-parameterモデルで表されるような構造物の地震時損傷度指標  $D_1$  を次式のような塑性率 ( $\mu_{DP}$ ) とエネルギーじん性率 ( $\mu_H$ ) の線形結合として表し得ることがわかった。

$$D_1 = A \frac{\mu_{DP}}{\mu_{DPM}} + B \frac{\mu_H}{\mu_{HM}}$$

ここに、 $\mu_{DPM}$  および  $\mu_{HM}$  は、復元力履歴特性より定まる基準化パラメータである。また、式中の係数 A, B は構造物の破壊時に  $D_1=1.0$  を満足するように決定される回帰係数であり、構造物の固有周期には依存しない。これらの基準化パラメータおよび係数は、構造物の復元力履歴特性が異なれば当然違った値となる。この指標  $D_1$  を用いれば、次のように比較的合理的に劣化型履歴構造物の地震時損傷度を評価することができるものと思われる。

①  $D_1 \geq 1$  : 破壊 ,    ②  $0 < D_1 < 1$  : 損傷有 ,    ③  $D_1 \leq 0$  : 損傷無 ( $D_1=0$  : 弾性限界)

また、損傷度指標中の係数 A, B は、煩雑なエネルギー応答解析を行うことなく、静的な一定振幅繰返し載荷 ( $\mu_D=1.2$ ) に対する破壊時の塑性率およびエネルギーじん性率より、比較的容易に推定することができる。

ここでは、構造特性パラメータ等を組織的に変化させた広範なパラメトリック解析結果をもとに、劣化型履歴構造物の地震時損傷度指標の誘導等を行ったが、今後は実在のものに近い構造物を対象として、この損傷度指標の妥当性ならびに実用性に関する検討を行なう必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 加藤・秋山：強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷，日本建築学会論文報告集，No.235, pp.9～18, 1975年 9月。
- 2) 大野・西岡・藤野：構造物が地震時に受ける塑性ひずみエネルギー量の定量的評価，土木学会論文報告集，No.333, pp.91～99, 1983年 9月。
- 3) 山田・家村・西村：履歴吸収エネルギーによるRC橋脚模型の耐震性評価，第17回地震工学研究発表会講演概要集，pp.231～234, 1983年 4月。
- 4) T. Ohno and T. Nishioka : An Experimental Study on Energy Absorption Capacity of Columns in Reinforced Concrete Structures, Proc. of JSCE, No.350, pp.23-33, 1984.
- 5) 平尾・沢田・成行；笹田：強震下における一自由度系の履歴吸収エネルギーと弾性応答値との関係について，土木学会論文集，第368号/I-5，pp.401～410，1986年 4月。
- 6) 成行・平尾・大岸：地震動入力を受ける一自由度系の変位じん性率及び履歴吸収エネルギーの一推定法，構造工学論文集，Vol.36A, pp779～790, 1990年。
- 7) 成行・平尾・榊原：強震下における劣化型履歴1自由度系の変位ならびにエネルギーじん性率の一推定法，Vol.39A, pp.615-628, 1993年。
- 8) Y. J. Park A. H. S. Ang, Mechanistic Seismic Damage model for Reinforced Concrete, Proc. of ASCE, Vol.111, No. ST4, pp772-789, 1985.
- 9) 平尾・沢田・成行・笹田：履歴吸収エネルギーに注目した鋼箱型断面橋脚の損傷度評価に関する基礎的研究，土木学会論文集，第380号/I-7，pp.429～437，1987年 4月。
- 10) S. L. McCabe and W. J. Hall : Assessment of Seismic Structural Damage, Proc. of ASCE, Vol.115, No. ST9, pp.2166-2183, 1989.

- 11) 安藤・山崎・片山：構造物損傷と地震動強さ指標の関係、土木学会第45回年次学術講演概要集, I-630, pp.1290-1291, 1990年.
- 12) K.Izuno,H.Iemura,Y.Yamada and T.Ohkawa : Inelastic Earthquake Response Analysis and Damage Assessment of Retrofitted RC Structures using Extended Fiber Model,Structural Eng./ Earthquake Eng.,Vol.10,No.1. pp.13s-22s,1993.
- 13) 寺田・宇佐美・鈴木：強震時の鋼製橋脚の損傷度評価法に関する研究, 土木学会第45回年次学術講演概要集, I-89, pp.326-327, 1993年.
- 14) 樋口・高尾・杉浦・大志万・渡邊：一定軸圧縮力と繰り返し曲げを受ける鋼薄肉中空断面部材の曲げ強度と靱性に関する実験的研究, 平成2年度土木学会関西支部年次学術講演概要集, I-47, 1990年.
- 15) 板野・是津・宇佐美・青木：鋼製橋脚モデルの繰り返し弾塑性挙動におよぼす荷重履歴の影響, 土木学会第47回年次学術講演会, I-42, pp.260-261, 1992年.
- 16) Y.J.Park, A.M.Reinhorn and S.K.Kunnath : Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings, Proc. of the 9th World Conference on Earthquake Engineering ,Vol.VII, pp.211-216, 1988.

(1993年 9月16日受付)