

各種復元力履歴モデルに対するPark型損傷指標の適用性 に関する一考察

成行 義文¹・平尾 潔²・門 峰康³・高田 鉄也⁴

¹正会員 博（工） 徳島大学助教授 工学部建設工学科（〒770-8506 徳島市南常三島町2-1）

²フェロー会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科（〒770-8506 徳島市南常三島町2-1）

³学生会員 徳島大学大学院工学研究科建設工学専攻（〒770-8506 徳島市南常三島町2-1）

⁴学生会員 徳島大学工学部建設工学科（〒770-8506 徳島市南常三島町2-1）

1. はじめに

強震下における構造物の損傷は、最大変形に代表される瞬間的損傷と弾塑性復元力-変位履歴応答に起因する累積的損傷の複合と考えられる。Parkらは、RC部材の地震時損傷指標を最大変形と累積的な損傷を表す履歴吸収エネルギーの線形結合として定義するとともに、多くの実験結果をもとにRC部材の復元力-変位履歴モデル（3-parameter モデル）を提案している¹⁾³⁾。Parkらの損傷指標は、終局変形と履歴吸収エネルギーに掛かる正の係数 β さえ定まれば、最大変形ならびに履歴吸収エネルギーから構造物の地震時損傷を定量評価し得る簡便な指標であるが、構造物の応答が弾性限度内に留まっている場合にも指標が正値を示すという不都合がある。このため、構造物の最大応答が弾性限度の時に指標値が丁度0.0となるように、最大変形から弾性限界変形を除去した修正指標（以下、「修正Parkらの損傷指標」と呼ぶ）が提案され、橋梁の安全性照査あるいは性能規定型耐震設計法の開発等に広く用いられつつある⁴⁾⁸⁾。

前述の3-parameter モデルでは、弾塑性復元力-変位履歴に伴う耐力低下を表現するパラメータとして、Parkらの損傷指標に含まれる係数 β がそのまま用いられている。この履歴モデルにおける β の物理的意味は明確であるが、損傷指標におけるその役割は必ずしも履歴モデルでの物理的意味合いと整合しておらず、そのため終局状態に対応する損傷指標値も明確には設定することは難しい。また、系の復元力履歴モデルとして3-parameter モデルではなく、例えばBilinear モデルのようなその履歴則に β を含まない

復元力履歴モデルを用いた場合に、それらの復元力履歴特性の相違がPark型損傷指標の値に及ぼす影響に関する検討も必要である。

以上のようなことより、本研究では3-parameterモデルを対象とした場合の厳密な損傷評価指標について考察するとともに、3-parameterモデル以外に、Q-hystモデル⁹⁾ならびにBilinearモデルを用いた地震応答解析を行い、系の復元力履歴特性が修正Parkらの損傷指標値に及ぼす影響について若干の比較検討を行った。

2. Parkらの損傷指標と3-parameter モデル

(1) Parkらの損傷指標 D

Parkらは、地震による構造物の損傷度を定量的に表すために、式(1)のような損傷指標 D を提案している¹⁾³⁾。この指標は、瞬間的な損傷を表す最大変形 $(|x|_{\max})$ と累積的な損傷を表す履歴吸収エネルギー (W_h) の線形結合として定義されており、比較的簡便な指標であると言える。

$$D = \frac{|x|_{\max}}{x_u} + \frac{\beta W_h}{x_u Q_y} \quad (1)$$

ここに、 x_u ：単調載荷時の終局変位、 Q_y ：降伏耐力、 β ：非負の係数である。また、式(1)は各項の分母および分子をそれぞれ降伏変位 x_y で基準化することにより、次のように書き直すことができる。

$$D = \frac{\mu_d + \beta \mu_h}{\mu_u} \quad (2)$$

ここに、 μ_d ：最大塑性率 $(=|x|_{\max}/x_y)$ 、 μ_h ：履歴吸収

エネルギー率($=W_h/(Q_y x_y)$), μ_u : 終局塑性率 (じん性率) である. この式より, 係数 β は履歴吸収エネルギー率 μ_h を最大塑性率 μ_d に換算する場合の換算係数と捉えることができる.

(2) 3-parameter モデル

Parkらは, RC構造物の地震時挙動を解析的に把握するために, trilinear型骨格曲線を有し, 3つのパラメータ (α, β, γ) の組合せにより様々な履歴特性を表現する復元力-変位履歴モデル (3-parameter モデル) を提案している¹⁾³⁾. 図-1は3-parameter モデルの概要を示したものである. 座標軸はそれぞれ Q_y あるいは x_y で正規化されている. 3つのパラメータはそれぞれ復元力-変位履歴に伴う次のような特性を表している.

α : 変位反転後の弾性剛性の低下

β : 変位の繰返しによる耐力低下

γ : ピンチング現象 (図-1では無視: $\gamma = \infty$)

同図において, 例えば第1象限のスケルトンカーブ上 (①) で反転 (弾性復活) した場合, 横軸に達する (②) までは点 $(-\alpha, -\alpha)$ を指向し, それ以降はスケルトンカーブ上の目標点 (③) を目指す. なお, $\alpha = \infty$ の場合は, 弾性剛性の低下は生じない. また, 再び変位が反転し (④), 横軸に達した (⑤) 後は, 過去目標点 (①) より変位が $\beta\Delta\mu_{hs1}$ だけ大きい点 (⑥) を目指す. ここに $\Delta\mu_{hs1}$ は直前の1サイクルにおける履歴吸収エネルギー率である. 例えば, 点⑧から目指すスケルトンカーブ上の点 (⑨) は, 直前の1サイクルにおける履歴吸収エネルギー率 $\Delta\mu_{hs2}$ (図中の網掛け部分) と定数 β の積として算定される目標点の移動量 ($\beta\Delta\mu_{hs2}$) により決定される. このように弾塑性履歴応答により目標点の変位が1サイクル前に比較して大きくなるが, このことは同一変位で繰返し反転した場合の耐力が次第に減少することを意味している. 図-1中, μ_e はスケルトンカーブ上の最大耐力到達塑性率, μ_{d0} はスケルトンカーブ上での最大塑性率, μ_d は最大塑性率, μ_{vd} は最終的な指向点に対応する塑性率 (式(3)), ならびに μ_u は終局塑性率である. なお図中の β は, 前出の式(2)における係数 β と同一のものである.

$$\mu_{vd} = \sum_{i=1}^m \Delta\mu_{dsi} + \beta \sum_{j=1}^n \Delta\mu_{hsj} = \mu_{ds} + \beta\mu_h \quad (3)$$

ここに, m : スケルトンカーブ上を進行した回数, n : 弾塑性交番繰返し回数である.

図-1よりわかるように, $\mu_{vd} \geq \mu_d$ であり, μ_{vd} は実際の応答値ではないが, 地震による繰返し弾塑性応答を経験した系の損傷を的確に反映した一種の損

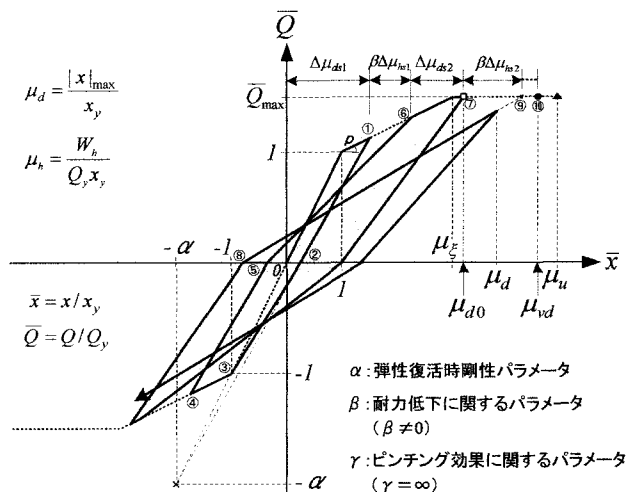


図-1 3-parameter モデル ($\beta \neq 0.0$)

傷パラメータと言える. スケルトンカーブは各変位に対する最大復元力を表したものであるが, $\mu_{vd} = \mu_u$ の場合には, 仮に新たな入力があった場合, 一度もスケルトンカーブ上を移動することなく容易に終局点 (⑩) に達する可能性がある. このことより $\mu_{vd} = \mu_u$ となった場合が, 実質的な終局状態とも考えられる. 式(4)は, μ_{vd} を応答パラメータとした場合の損傷指標の一例を示したものである.

$$D_0 = \frac{\mu_{vd}}{\mu_u} = \frac{\mu_{ds} + \beta\mu_h}{\mu_u} \quad (4)$$

$D_0 = 1.0$ の時, 系は終局状態 ($\mu_{vd} = \mu_u$) であることを表している.

式(2)および式(4)に共通する欠点としては, 系の応答が弾性範囲内である場合にも, 損傷指標 (D, D_0) の値が正值となることである. 一般に, 応答が弾性限界を超した場合に初めて系は損傷を受けると考えられる. したがって, 応答がちょうど弾性限界 ($\mu_d = 1.0$) の場合には, すくなくとも損傷指標の値が 0.0 になるのが望ましい.

(3) 修正Parkらの損傷指標 D_m

このような観点から, 式(2)は次のように修正され, 「修正Parkらの損傷指標」として用いられている⁴⁾⁸⁾.

$$D_m = \frac{(\mu_d - 1) + \beta\mu_h}{\mu_u - 1} \quad (5)$$

式(5)も同様に修正すると次式のようにになる.

$$D_{m0} = \frac{(\mu_{ds} - 1) + \beta\mu_h}{\mu_u - 1} \quad (6)$$

系の最大応答がちょうど弾性限界の場合, $\mu_d = \mu_{ds} = 1.0$ および $\mu_h = 0.0$ となるため, $D_m = D_{m0} = 0.0$ となる. また $D_{m0} = 1.0$ の場合は, 系が前述のような終局状態にあることを意味しているため, これを是とすると系の損傷が $0.0 \sim 1.0$ の範囲の評価値により表される. したがって, 指標値と系の損傷との対応が比

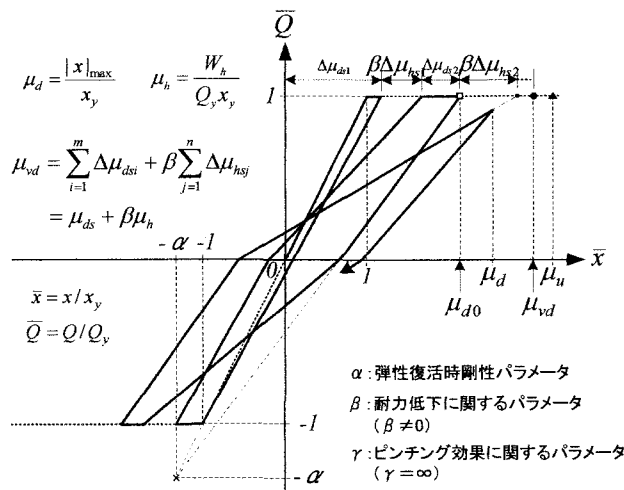


図-2 3-parameter モデル(完全弾塑性型骨格曲線)

較的明確であるが、応答値 μ_{ds} の算定に若干の工夫を要する。一方、 $D_m = 1.0$ の場合には該当する終局状態が物理的に明確でないため、損傷指標 D_m を用いる際には終局状態の具体的な定義が必要である。しかしながら、損傷評価のための応答パラメータとして用いている最大塑性率 μ_d は前出の μ_{ds} に比べ、分かり易く実績のあるパラメータである。

3. 損傷指標 D_m と D_{m0} の比較

以下に、簡単のためにスケルトンカーブをbilinear型(図-1中の $p=0.0$)とした図-2のような3-parameterモデルを用いて、前出の2つの修正された損傷指標 (D_m, D_{m0}) の比較を行う。

(1) 解析方法^{10)・11)}

地震動入力に対する非線形1自由度系の運動方程式は、周知のように式(1)で表される。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + Q(x) = -m\ddot{x}_G \quad (7)$$

ここに、 m : 質量、 c : 粘性減衰係数、 x : 相対変位、 $\dot{x}$: 相対速度、 $\ddot{x}$: 相対加速度、 $Q(x)$: 非線形復元力、 $\ddot{x}_G$: 地動加速度である。式(7)の両辺を降伏復元力 Q_y (初期剛性 k_0 と降伏変位 x_y の積) で除して正規化すると、式(8)のようになる。

$$\frac{1}{\omega_0^2} \ddot{\bar{x}} + \frac{2h}{\omega_0} \dot{\bar{x}} + \bar{Q}(\bar{x}) = -R_I \ddot{\bar{x}}_G \quad (8)$$

ここに、 $\ddot{\bar{x}} = \ddot{x}/x_y$, $\dot{\bar{x}} = \dot{x}/x_y$, $\bar{x} = x/x_y$, ω_0 : 固有円振動数、 $\bar{Q}(\bar{x}) = Q(x)/Q_y$, $\ddot{\bar{x}}_G = \ddot{x}_G/\ddot{x}_{G\max}$, $\ddot{x}_{G\max}$: 絶対最大地動加速度、また R_I は式(9)のように定義された入力強度比である。

$$R_I = \frac{m\ddot{x}_{G\max}}{Q_y} \quad (9)$$

式(8)より、入力地震動 $\ddot{x}_G$ に対する構造物の応答は、構造物の固有周期 $T_0 (= 2\pi/\omega_0)$ 、粘性減衰定数 h 、復元力-変位履歴特性ならびに入力強度比 R_I に支配されることがわかる。

以下の解析では、比較を容易にするために、まず修正 Park らの損傷指標 D_m (式(5)) が所定の値(本研究では 0.6)になる場合の入力強度比 R_I を算定し、その R_I を用いて D_{m0} を求めた。なお、減衰定数 $h=0.05$ 、損傷指標に含まれる定数 $\beta=0.15$ 、終局塑性率 $\mu_u=6.0$ とした^{5)・8)}。

(2) D_m と D_{m0} の比較

修正 Park らの損傷指標 D_m (式(2)) と、 μ_d の代わりに μ_{ds} を用いた損傷指標 D_{m0} (式(4)) との比較を行う。以下、前者 (D_m) を D_{m1} 、また最大塑性率および履歴吸収エネルギー率をそれぞれ μ_{d1} および μ_{h1} と表す。これらを用いて式(2)ならびに式(4)を書き直すと次のようである。

$$D_{m1} = \frac{(\mu_{d1} - 1) + \beta\mu_{h1}}{\mu_u - 1} \quad (10)$$

$$D_{m0} = \frac{(\mu_{ds} - 1) + \beta\mu_{h1}}{\mu_u - 1} \quad (11)$$

図-3(a)は、El Centro NS 加速度記録(1940年)を入力地震動とした場合の D_{m1} と D_{m0} を、横軸に固有周期 T_0 ($0.05 \sim 2.0(\text{sec})$, $\Delta T_0 = 0.05(\text{sec})$) をとって比較したものである。前述のように、 $D_{m1} = 0.6$ となるように入力強度比 R_I を調整しており、この場合の R_I は図-3(b)に示す通りである。また、 D_{m1} と D_{m0} の算定に用いられた μ_{d1} , μ_{ds} ならびに μ_{h1} は、それぞれ同図(c)ならびに(d)に示している。図-4(a)~(d)は、同様に、JMA Kobe NS 加速度記録(1995年)を入力地震動とした場合の結果を示したものである。

図-3(a)および図-4(a)より、常に $D_{m1} \geq D_{m0}$ であり、その差も概ね 0.1 以下であることがわかる。ここで $D_{m1} \geq D_{m0}$ となるのは、2章で示した μ_{d1} と μ_{ds} の定義から明らかのように、これらの間には常に $\mu_{d1} \geq \mu_{ds}$ なる関係があるためである。また図-3(a)の $T_0 = 0.5(\text{sec})$ 付近ならびに図-4(a)の $T_0 = 0.9(\text{sec})$ 付近において $D_{m1} = D_{m0}$ となっているが、これは復元力-変位履歴ループが、例えば図-5のように $\mu_{d1} = \mu_{ds}$ となったためである。

これらの図から、仮に D_{m0} が真の損傷度を表しているとする、 D_{m1} は若干安全側の損傷度評価を与える指標であると言える。

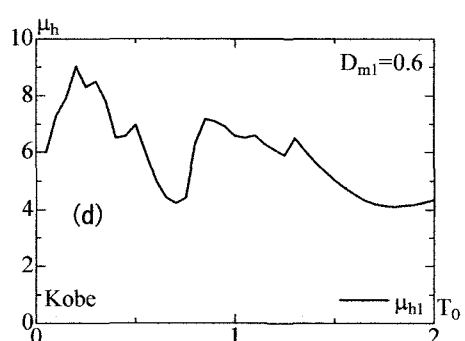
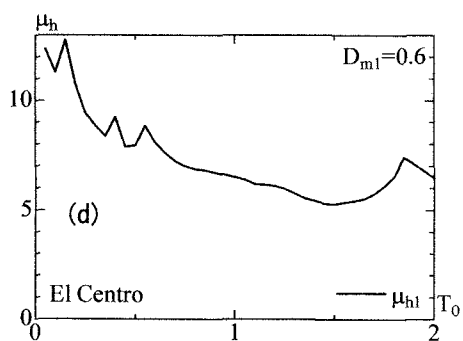
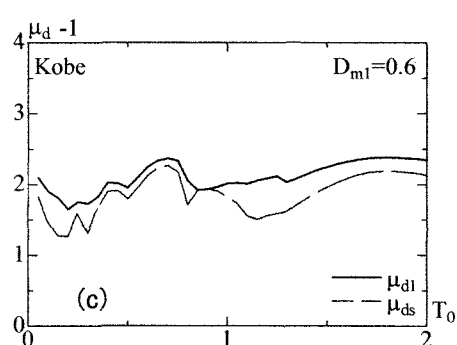
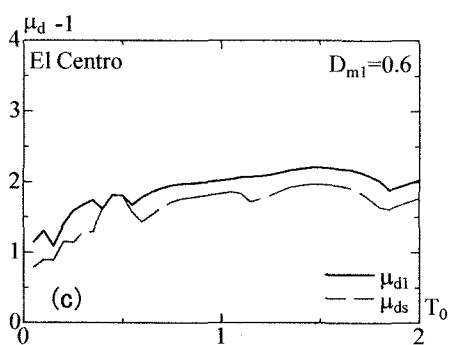
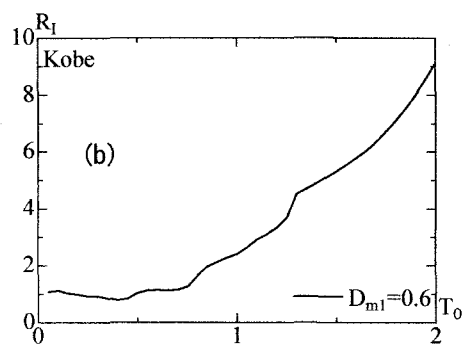
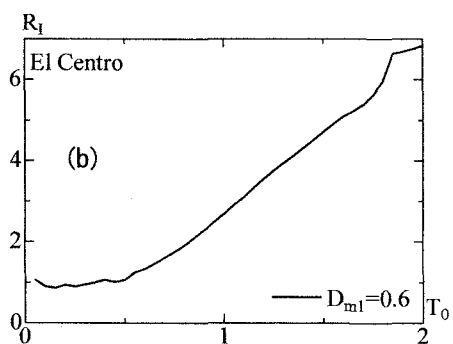
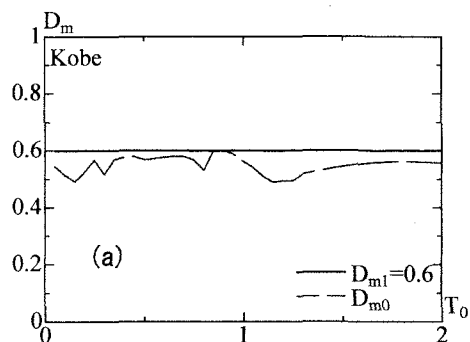
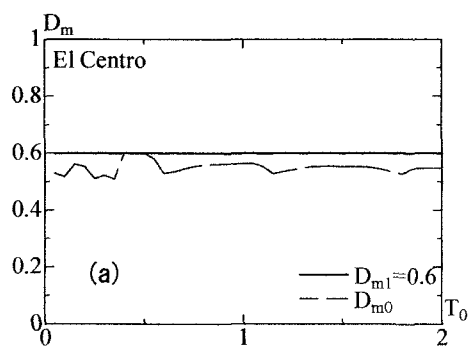


図-3 損傷度スペクトルの比較
(3-parameter モデル,
El Centro NS)

図-4 損傷度スペクトルの比較
(3-parameter モデル,
JMA Kobe NS)

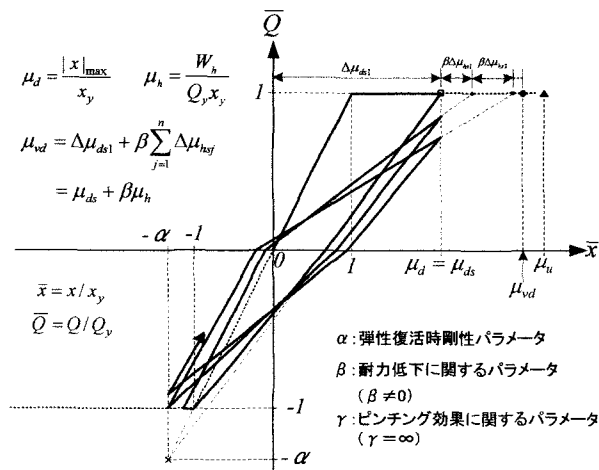
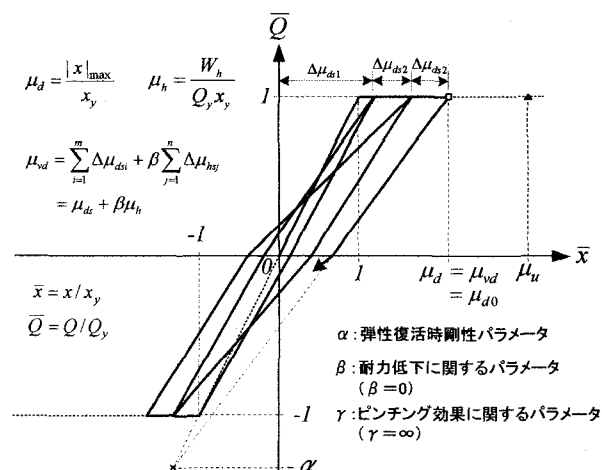


図-5 3-parameter モデル
(等変位振幅: $\mu_d = \mu_{d0}$)



(a) 3-parameter モデル ($\beta = 0.0$)

4. 修正Parkらの損傷指標値に及ぼす復元力履歴特性の影響

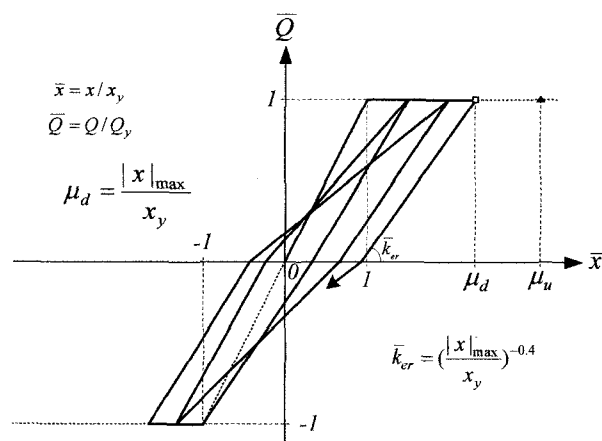
(1) 各種復元力履歴モデル

図-6(a)～(c)は、それぞれ完全弾塑性型のスケルトンカーブを有する3-parameterモデル ($\beta = 0.0$)、Q-hystモデル⁹⁾およびBilinearモデルの復元力履歴特性を示したものである。図-6(a)の3-parameterモデルは、基本的には前出の図-2の場合と同じであるが、損傷指標中の β と履歴モデル中の β が異なる場合の検討を行うために敢えてモデル中のパラメータ β を0.0としたものである。図-6(b)のQ-hystモデルは、RC部材の復元力履歴特性を巨視的に表す絶対最大点指向型モデルであり、図中に示すように変位反転後の劣化剛性はその時点での絶対最大変位 $|x|_{\max}$ より算定される。

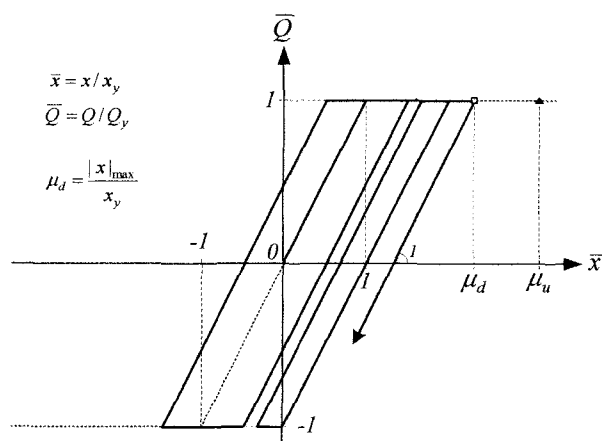
表-1は、ここで比較の対象とした各復元力履歴モデルの損傷指標とモデル中のパラメータ β の値を示したものである。損傷指標に含まれる β は、ここでは形式的に β_1 と表している。また、各復元力履歴モデルを用いた場合のそれぞれの最大塑性率ならびに履歴吸収エネルギー率は表中に示すように、適宜下添え字(1, 2, Q, ならびにB)により区別した。

表-1 復元力履歴モデルと損傷指標等との対応

履歴モデル	図番号	損傷指標($\mu_u = 6, \beta_1 = 0.15$)	モデル中の β
3-parameter	図-2	$D_{m1} = \frac{(\mu_{d1} - 1) + \beta_1 \mu_{h1}}{\mu_u - 1}$	$\beta = 0.15$
3-parameter	図-6(a)	$D_{m2} = \frac{(\mu_{d2} - 1) + \beta_1 \mu_{h2}}{\mu_u - 1}$	$\beta = 0.0$
Q-hyst	図-6(b)	$D_{mQ} = \frac{(\mu_{dQ} - 1) + \beta_1 \mu_{hQ}}{\mu_u - 1}$	
Bilinear	図-6(c)	$D_{mB} = \frac{(\mu_{dB} - 1) + \beta_1 \mu_{hB}}{\mu_u - 1}$	



(b) Q-hyst モデル



(c) Bilinear モデル

図-6 各種復元力履歴モデル

(2) 各種復元力履歴モデルを用いた場合の損傷度 D_m の比較

図-7(a)～(c)は、各種復元力履歴モデル(表-1)を用いた場合のEl Centro記録に対する損傷度 D_m 、最大塑性率 μ_d ならびに履歴吸収エネルギー率 μ_h をそれぞれ示したものである。各固有周期に対する入力強度比 R_I は、比較を容易にするために、すべての履歴モデルに対して前出の図-3(b)に示した $D_{m1}=0.6$ の場合の R_I スペクトル値を用いている。また図-8(a)～(c)は、同様にKobe記録に対する結果(図-4(b)の R_I スペクトル値使用)を示したものである。

図-7(a)および図-8(a)における D_{m1} 曲線と D_{m2} 曲線の比較よりわかるように、 $T_0 \leq 0.5(sec)$ の領域では $D_{m1} \geq D_{m2}$ であり、特に短周期域で比較的大きな差が見られる。 D_{m2} は図-8(a)中の $T_0=0.2(sec)$ の場合に最小となっており、その値は $D_{m1}(=0.6)$ の約半分である。 $T_0 > 0.5(sec)$ の領域では、一部(図-8(a)中の $1.3(sec) \leq T_0 \leq 1.6(sec)$ 等)で $D_{m1} < D_{m2}$ となっているものの、概ね $D_{m1} \simeq D_{m2}$ とみなして差し支えないと思われる。また、図-7(b), (c)および図-8(b), (c)より、 $T_0 > 0.5(sec)$ の領域では、 μ_{d1} と μ_{d2} ならびに μ_{h1} と μ_{h2} の間に大差はないが、前述のように $T_0 \leq 0.5(sec)$ の領域では、 μ_{d2} 、 μ_{h2} がそれぞれ μ_{d1} 、 μ_{h1} より小さく、特に $T_0 \leq 0.2(sec)$ 付近でそれらの差が大きくなっているのがわかる。

Q-hystモデルを用いた場合の D_{mQ} 、 μ_{dQ} ならびに μ_{hQ} は、入力波によらずそれぞれ D_{m1} 、 μ_{d1} ならびに μ_{h1} 曲線の近傍で推移しているが、 D_{m1} と D_{mQ} の差は最大で約0.2程度あることがわかる。

Bilinearモデルを用いた場合の D_{mB} は、 $D_{m1}(=0.6)$ と大きく相違している部分が多く、El Centro 記録を用いた場合(図-7(a))、 $D_{mB,max}=0.9$ ($T_0=1.25sec$)ならびに $D_{mB,min}=0.1$ ($T_0=0.05sec$)であり、またKobe 記録を用いた場合(図-8(a))、 $D_{mB,max}=0.8$ ($T_0=0.5sec$)ならびに $D_{mB,min}=0.1$ ($T_0=0.2sec$)であることがわかる。

図-9(a)～(d)はEl Centro 記録に対する $T_0=1.0sec$ の場合の各モデルの復元力-変位履歴曲線を示したものである。変位反転後の剛性低下の有無により大きくその形状が異なっているのがわかる。また、図-7および図-8におけるBilinearモデルに対する D_m 、 μ_d ならびに μ_h 等は、剛性低下が考慮された他のモデルに対するそれらとは若干異なる様相を呈しているのがわかる。

5. おわりに

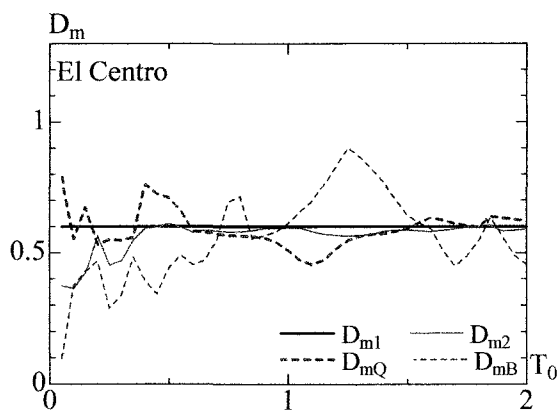
本研究は、各種復元力履歴モデルに対する「修正Parkらの損傷指標 D_m 」の適用性について、El CentroならびにJMA Kobe 記録に対する解析結果をもとに若干の比較検討を行ったものである。比較に際して、完全弾塑性型のスケルトンカーブを有する3-parameterモデル($\beta=0.15$)を用いた場合の損傷度を0.6とする入力強度比スペクトルを求め、そのスペクトル値を用いて、3-parameterモデル($\beta=0.0$)、Q-hystモデルおよびBilinearモデルに対する損傷度(D_m)、最大塑性率(μ_d)、履歴吸収エネルギー率(μ_h)等をそれぞれ求めて比較した。

以下に本研究で得られた主な知見を列挙する。なお、各復元力履歴モデルあるいは損傷指標に対する損傷度、最大塑性率、履歴吸収エネルギー率等の表記を再掲すると下記のようなものである。

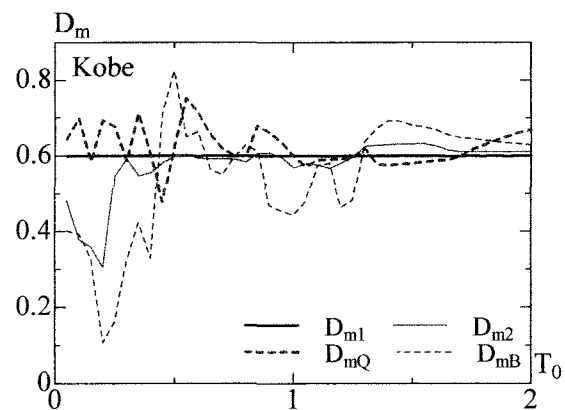
- ・ 3-parameterモデル ($\beta=0.15$) : D_{m0} , μ_{d0} , μ_{h0}
- ・ 3-parameterモデル ($\beta=0.15$) : D_{m1} , μ_{d1} , μ_{h1}
- ・ 3-parameterモデル ($\beta=0.0$) : D_{m2} , μ_{d2} , μ_{h2}
- ・ Q-hystモデル : D_{mQ} , μ_{dQ} , μ_{hQ}
- ・ Bilinearモデル : D_{mB} , μ_{dB} , μ_{hB}

- (1) 修正Parkらの損傷指標 D_{m1} と最終指向点に着目した損傷指標 D_{m0} の間には常に $D_{m1} \geq D_{m0}$ なる関係があり、その差は概ね0.1以下である。したがって、 D_{m0} を厳密解とみなすと D_{m1} は若干安全側の評価を与える指標であると言える。
- (2) $T_0 \leq 0.5(sec)$ では、 μ_{d2} 、 μ_{h2} がそれぞれ μ_{d1} 、 μ_{h1} より小さいため $D_{m1} \geq D_{m2}$ となり、 D_{m2} が $D_{m1}(=0.6)$ の約半分の場合も存在する。 $T_0 > 0.5(sec)$ の領域では、 μ_{d1} と μ_{d2} ならびに μ_{h1} と μ_{h2} の間に大差がないため、一部で $D_{m1} < D_{m2}$ となっているものの、概ね $D_{m1} \simeq D_{m2}$ である。
- (3) Q-hystモデルを用いた場合の損傷度 D_{mQ} は、 $D_{m1}(=0.6)$ の近傍で推移しており、 D_{m1} と D_{mQ} の差は最大で約0.2程度である。
- (4) Bilinearモデルを用いた場合の損傷度 D_{mB} は、 $D_{m1}(=0.6)$ と大きく異なる場合が多く、El Centro 記録に対して、 $D_{mB,max}=0.9$ ($T_0=1.25sec$)および $D_{mB,min}=0.1$ ($T_0=0.05sec$)、またKobe 記録に対して、 $D_{mB,max}=0.8$ ($T_0=0.5sec$)ならびに $D_{mB,min}=0.1$ ($T_0=0.2 sec$)である。

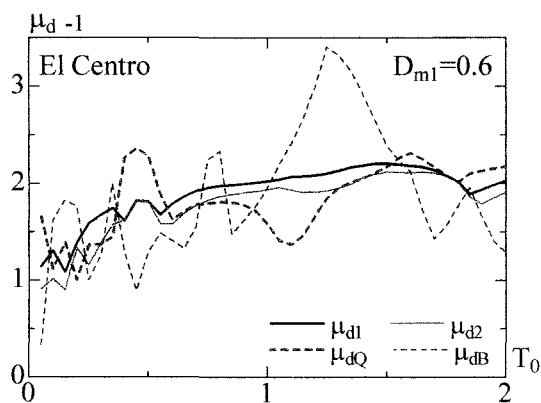
以上は限られた計算例より得られた知見であるが、これらは、一般に「修正Parkらの損傷指標」が復元力履歴特性の影響を大きく受け、特に復元力履歴モデルとしてBilinearモデルを用いた場合とそれ以外



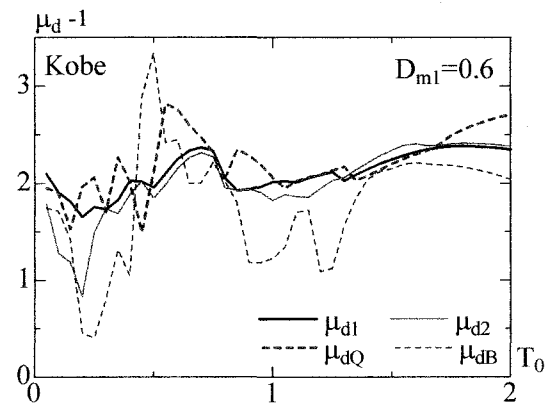
(a) D_m スペクトル



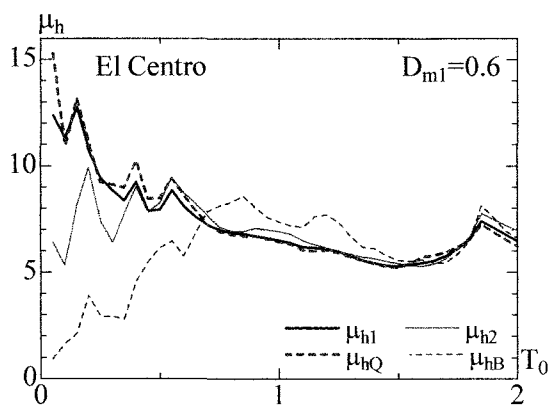
(a) D_m スペクトル



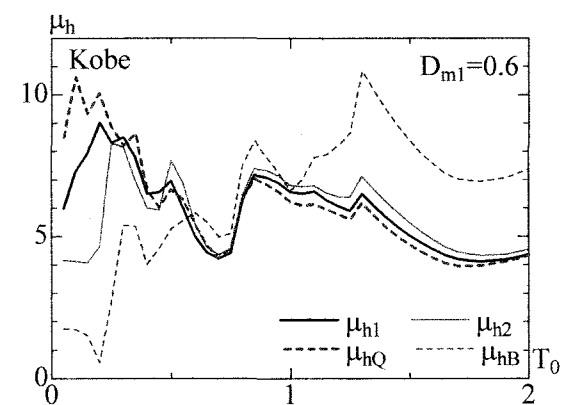
(b) μ_d スペクトル



(b) μ_d スペクトル



(c) μ_h スペクトル



(c) μ_h スペクトル

図-7 各種復元力履歴モデルに対する損傷度スペクトルの比較 (El Centro NS)

図-8 各種復元力履歴モデルに対する損傷度スペクトルの比較 (JMA Kobe NS)

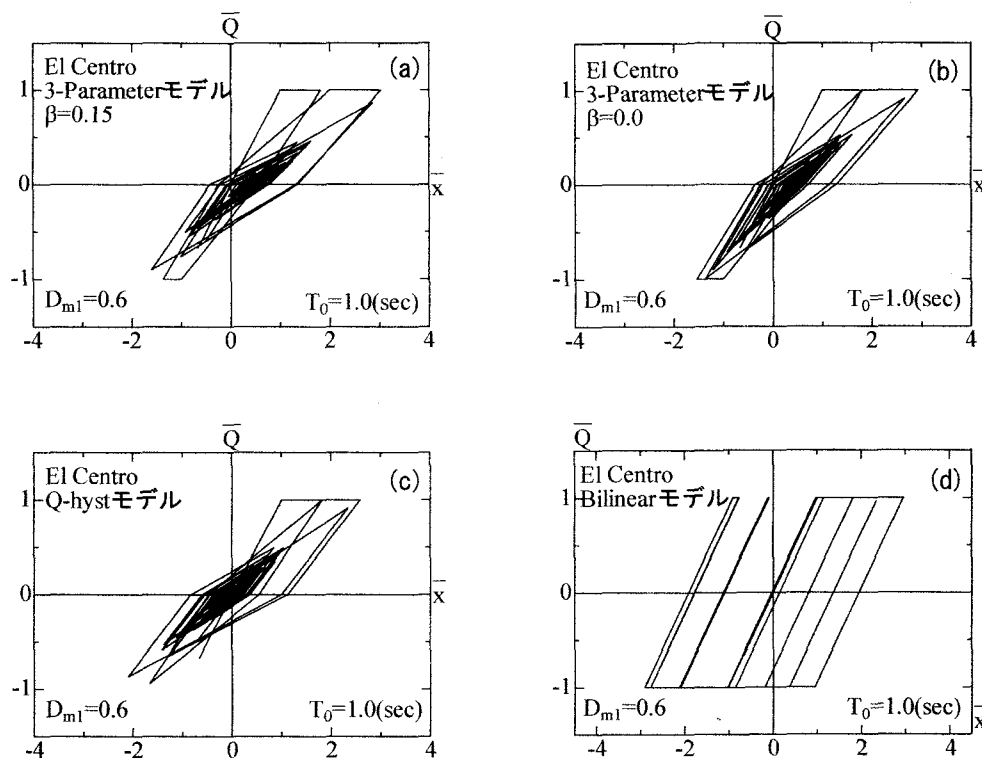


図-9 復元力-変位応答履歴曲線 (El Centro NS)

の剛性劣化型モデルを用いた場合とでは、損傷度が大きく異なることを示唆している。したがって所定の損傷度に対する変位応答スペクトル等を算定する際には、適当な復元力履歴モデルを用いる必要がある。今後、「修正Parkらの損傷指標」の適用性を高めるためには、復元力履歴モデルとして3-parameterモデル以外のモデルを用いる場合の損傷指標に含まれるパラメータ β の合理的な決定法について検討する必要があると思われる。

参考文献

- 1) Park, Y.J. and Ang, A.H-S. : Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, *Journal of Structures Engineering*, ASCE, Vol.111, No.4, pp.722-739, 1985.
- 2) Park Y.J. , Reinhorn A.M. and Kunnath S.K. : IDARC: Inelastic damage analysis of reinforced concrete frame - Shear-wall structures-, *Technical Report NCEER-87-0008*, State University of New York at Buffalo, July 1987.
- 3) Park Y.J. , Reinhorn A.M. and Kunnath S.K. : Seismic damage analysis of reinforced concrete buildings, *Proc. of 9th WCEE*, pp.VII-211-216, 1988.
- 4) 成行義文, 平尾潔, 四方康仁, 澤田勉 : 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, 構造工学論文集, Vol.40A, pp.807-817, 1994.
- 5) 三上卓, 平尾潔, 成行義文, 澤田勉, 笹田修司 : レベル2地震動に対する損傷制御震度スペクトルに関する一研究, 構造工学論文集, Vol.45A, pp.809-818, 1999.
- 6) 家村浩和, 三上卓 : 目標耐震性能に必要な降伏強度と塑性率のスペクトル, 土木学会論文集, No.689/I -57, pp.333-342, 2001.
- 7) 三上卓, 家村浩和 : 塑性域の二次剛性が必要降伏強度と応答塑性率に及ぼす影響, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.619-629, 2002.
- 8) 平尾潔, 坂上幸謙, 成行義文, 澤田勉 : 力及び変位に基づく単柱式 RC 橋脚の耐震設計に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.724/I-62, pp.201-212, 2003.
- 9) Mehdi,S. and Mete,A.S. : Simple nonlinear seismic analysis of R/C structures, *Journal of Structures Engineering*, ASCE, Vol.107, No.5, pp.937-952, 1981.
- 10) 成行義文, 平尾潔, 新川和之, 竹園雅樹 : Multi-linear型1自由度系の地震応答解析における剛性変化時刻の一算定法, 応用力学論文集, Vol.4, pp.503-514, 2001.
- 11) 成行義文, 門峰康, 平尾潔 : 所要入力強度比の算定法に関する研究, 第7回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.441-448, 2004.