

所要入力強度比の算定法に関する研究

成行 義文¹・門 峰康²・平尾 潔³

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学生会員 徳島大学大学院工学研究科博士前期課程 (〒770-8506 徳島市南常三島町2-1)

³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)

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、構造物の地震時非線形挙動の照査に動的な非線形解析が広く用いられるようになってきた。しかし、実務的な観点からは、静的設計により強震下の構造物の挙動を推定し得る手法がより有用であると考えられる。非線形応答の簡易推定法として、リダクションファクター(R_μ)、降伏震度(k_{py})、降伏強度比(R_s)あるいは入力強度比(R_I)等のスペクトルの利用が提唱されている^{1)~13)}。これらのパラメータはすべて互換性があり¹⁴⁾、また、与えられた入力に対して、所定の損傷度を生じさせるような降伏復元力を推定するための無次元量でもある。所定の損傷度に対するこれらの所要スペクトルを求める際に、ある損傷度(最大変位塑性率 μ_d)に対してこれらのパラメータの解が複数個存在することが指摘されている^{2), 5), 9), 10)}。複数の解が存在する直接的な理由は、入力強度比(R_I)を例にとった場合、入力強度比(R_I)－損傷度(μ_d)曲線が損傷度に対してジグザグ形状を呈するためと考えられるが、その原因ならびに安全側の解の合理的な算定法等に関する詳細な検討はほとんど行われていない。

以上のようなことより、本研究では、まず正側および負側の各最大変位塑性率(μ_d^+ , μ_d^-)に注目して、入力強度比(R_I)－最大塑性率(μ_d)曲線の成立ちについて検討した。次いで、入力強度比(R_I)－エネルギー塑性率(μ_h)曲線、ならびに損傷度(D)指標として修正 Park らの指標^{7), 11)}を用いた場合の R_I － D 曲線の特性についても比較・検討した。それらの結果を踏まえて、目標とする損傷度(D^*)に対する入力強度比の最小解の実用的な反復計算法を導き、2・3の適用例によりその妥当性を示した。

2. 解析方法

図-1 のような地震動を受ける非線形 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。

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

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、 x_G ：地動変位、 $\ddot{x}_G$ ：地動加速度である。式(1)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(2)のようになる。

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

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、 $\bar{Q}(\bar{x}) = Q(x)/Q_y$, $\ddot{\bar{x}}_G = \ddot{x}_G/\ddot{x}_{G\max}$, $\ddot{x}_{G\max}$ ：最大地動加速度、また R_I は式(3)のように定義された入力強度比^{12), 13)}である。

$$R_I = \frac{m\ddot{x}_{G\max}}{Q_y} \quad (3)$$

式(2)より、ある入力地震動 $\ddot{x}_G$ 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。

本研究では、構造物の非線形復元力履歴特性として、最も一般的な bilinear モデル (図-2) を用いた。図中、復元力 Q 、変位 x は、それぞれ降伏復元力 Q_y 、降伏変位 x_y で正規化されている。また、 p は弾塑性剛性比、 μ_d^+ および μ_d^- はそれぞれ正および負方向の最大変位塑性率である。これらより、系の最大変位塑性率 μ_d は式(4)のように求まる。

$$\mu_d = \{\mu_d^+, \mu_d^-\}_{\max} \quad (4)$$

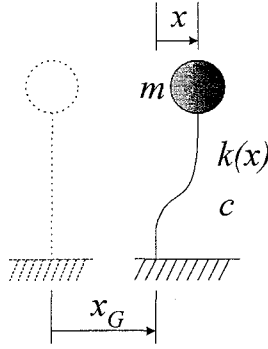


図-1 非線形 SDOF モデル

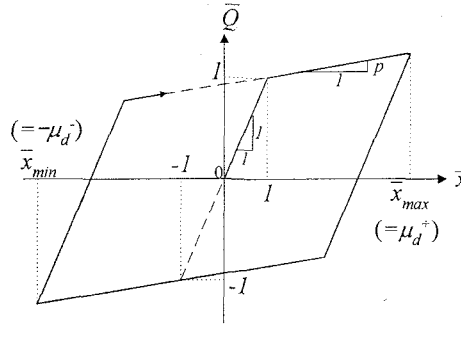


図-2 Bilinear 履歴モデル

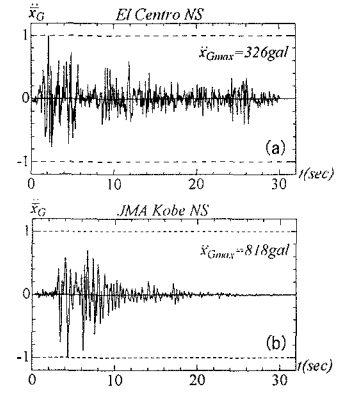


図-3 入力地震動

図-3(a), (b)は、それぞれ入力地震動加速度として用いた El Centro NS 記録 (1940 年), JMA Kobe NS 記録 (1995 年) である。図中、各加速度振幅はそれぞれの $\ddot{x}_{G\max}$ で正規化されている。

本研究では、図-3(a), (b)のような入力地震動に対して、式(2)中の入力強度比 R_I をパラメトリックに変化させ、bilinear 型 1 自由度系の地震応答を増分形式の線形加速度法により算定した¹⁵⁾。なお、以下の解析においては、減衰定数 $h=0.05$ とした。

3. 入力強度比 R_I と各種降伏強度比等との関係

入力強度比 R_I は、式(3)からわかるように、「降伏復元力 (Q_y)」に対する「構造物を剛体と仮定した場合の最大慣性力 ($m\ddot{x}_{G\max}$)」の比であり、構造物強度に対する「相対的な入力強度」を概略的に表すパラメータの一つと位置付けられる。構造物強度と入力強度との相対関係を表すパラメータとしては、 R_I 以外に、下記のようなパラメータが適宜用いられている。それぞれ、 R_{S1} (式(5a)) ならびに R_{S2} (式(5b)) は降伏強度比、 k_{hy} (式(5c)) は降伏震度、 R_μ (式(5d)) はリダクションファクターである。これらのパラメータと入力強度比 R_I との関係はそれぞれ式中に示す通りである。

$$R_{S1} = \frac{Q_y}{m\ddot{x}_{G\max}} (= \frac{1}{R_I}) \quad (5a)$$

$$R_{S2} = \frac{Q_y}{Q_{L\max}} (= \frac{1}{r_a R_I}) \quad (5b)$$

$$k_{hy} = \frac{Q_y}{mg} (= \frac{\ddot{x}_{G\max}}{g R_I}) \quad (5c)$$

$$R_\mu = \frac{Q_{L\max}}{Q_y} (= r_a R_I) \quad (5d)$$

式(5b)～(5d)中、 $Q_{L\max}$ は系を線形とみなした場合の最大復元力、 g は重力加速度、また r_a は式(5e)のような無次元パラメータである。

$$r_a = \frac{\omega_0^2 x_{L\max}}{\ddot{x}_{G\max}} \quad (5e)$$

ここに、 $x_{L\max}$ は線形系における最大変位である。式(5e)よりわかるように、 r_a は一種の擬似加速度応答倍率であり、また $p=1.0$ (線形系) ならびに $R_I=1.0$ の時の最大塑性率として比較的容易に求めることができる。式(5a)～(5e)より、各パラメータ R_{S1} , R_{S2} , k_{hy} , R_μ は、 ω_0 , $\ddot{x}_{G\max}$, $x_{L\max}$ 等が与えられれば、入力強度比 R_I より比較的簡単に求まることがわかる。本研究では、構造物強度と入力強度との相対関係を表すパラメータとして R_I に着目した。

4. 損傷度指標

一般に構造物の地震時損傷は、瞬間的損傷と累積的損傷の複合と考えられる^{12), 13)}。前者は最大変位 ($x_{\max}$) に、また後者は履歴吸収エネルギー (W_h : 塑性ひずみエネルギー) に関係しており、それぞれ最大変位塑性率 μ_d (式(6a)、以下最大塑性率と呼ぶ。) ならびにエネルギー塑性率 μ_h (式(6b)) で表される。

$$\mu_d = \frac{x_{\max}}{x_y} \quad (6a)$$

$$\mu_h = \frac{W_h}{Q_y x_y} \quad (6b)$$

Park らは構造物の地震時損傷度指標 D を、これらの損傷の線形結合として簡潔に定義した¹⁶⁾。Park らの指標は、その後、弾性限界における指標値と損傷度とが整合するように修正され、“修正 Park

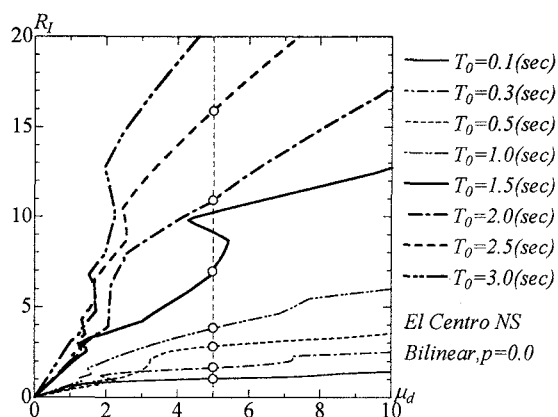


図-4 入力強度比(R_I)－最大塑性率(μ_d)曲線

らの損傷度指標” (式(7)参照)として広く用いられている^{7), 11)}。

$$D = \frac{\mu_d - 1 + \beta\mu_h}{\mu_u - 1} \quad (7)$$

ここに、 μ_u は終局変位じん性率である。また正の係数 β は復元力履歴に伴うエネルギー塑性率の変位塑性率増分への換算係数と考えられる。式(6a)よりわかるように、弾性限界状態では $\mu_d=1$ 、 $\mu_h=0$ であるため、 $D=0$ となる。また定義上、 $D=1$ の場合に構造物は終局状態に達したとみなされる。すなわち D の定義域は原則的には $0 \leq D \leq 1$ である。

本研究では、損傷度指標として、最大塑性率 μ_d (式(6a))ならびに修正 park らの指標 D (式(6b))を用いた。

5. 入力強度比 R_I と最大塑性率 μ_d の関係

ここでは、損傷度指標として最大塑性率(μ_d)を用いた場合の入力強度比(R_I)と最大塑性率(μ_d)との関係について比較・検討を行なう。

(1) 入力強度比(R_I)－最大塑性率(μ_d)曲線

図-4は、El Centro NS 記録に対する入力強度比 R_I と最大塑性率 μ_d との関係を示したものである。各線は図中に示す8つの固有周期に対応しており、弾塑性剛性比 $p=0.0$ (完全弾塑性型)である。また、入力強度比 R_I の増分 ΔR_I は0.1とした。

これらの図より、巨視的には、 R_I の増大に伴い、最大塑性率 μ_d も大きくなっているが、細かく見ると、 R_I の増大にも拘らず μ_d が減少している部分があり、それらの近傍で $R_I-\mu_d$ 曲線がジグザグ形状を呈していることがわかる。例えば、 $T_0=1.5(s)$ の場合の $\mu_d=5$ 近傍等においてその傾向が顕著に見られる。 $R_I-\mu_d$ 曲線が、部分的とは言え、ジグザグ形

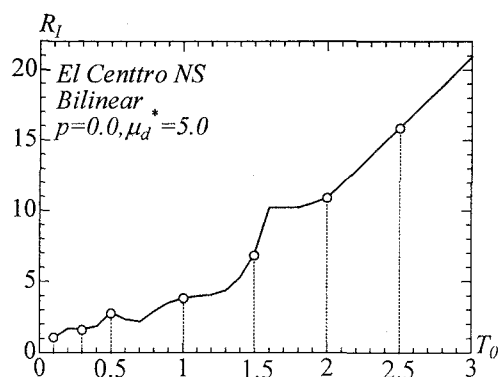


図-5 所要入力強度比(R_I)スペクトル($\mu_d^*=5.0$)

状を呈するという事は、 R_I と μ_d との間に必ずしも1対1の対応関係が存在しないことを意味している。

図-5は所定の最大塑性率 $\mu_d^*=5$ に対する所要入力強度比スペクトルを示している。これは、固有周期(T_0)を増分 $\Delta T_0=0.1(s)$ で漸増させ、各固有周期の場合の $\mu_d^*=5$ に対する R_I をプロットして結んだものである。所要入力強度比スペクトルは、3章で述べたように、各種所要降伏強度比等のスペクトルと明確な互換性があり、仮に求められた所要入力強度比が危険側の評価をもたらす場合には、当然、それに対応する所要降伏強度比等も同様な評価を与えることになる。図-5のスペクトル曲線上の○印は、前出の図-4に示した $R_I-\mu_d$ 曲線上の○印にそれぞれ対応しているが、 $T_0=1.5(s)$ の場合のように、 $\mu_d^*=5$ (所定値)に対応する入力強度比 R_I^* が複数個存在する場合には、本例のように、安全側の評価となる最小値を採用する必要がある。すなわち、固有周期 T_0 の全範囲において、必ず安全側の評価を与える所要入力強度比スペクトルを求めるためには、所定の最大塑性率 μ_d^* に対する最小の入力強度比 R_I^* を解の個数に依らず確実に算定する必要がある。

(2) R_I の複数解の出現頻度と最大誤差

図-6(a)は、JMA Kobe NS記録に対する $T_0=1.0(s)$ の $R_I-\mu_d$ 曲線を示したものである。この曲線では、例えば、 $\mu_d=1.5$ あるいは $\mu_d=8.0$ 近傍でジグザグ形状となっているのがわかる。前述のように、これらの部分では、ある最大塑性率(μ_d)に対する R_I の解が複数個(2~3個)存在する。このような複数の R_I 解を有する μ_d の範囲を明確に把握するために、この曲線の重複部分の μ_d 軸への投影範囲を、縦軸に固有周期 T_0 をとってプロットしたのが同図(b)で

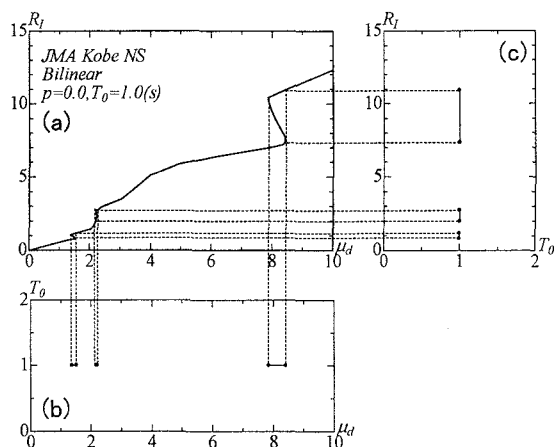


図-6 複数の R_I 解が存在する μ_d の範囲とその最大誤差の求め方

ある。複数の解を有する μ_d の範囲が明白となっている。このように、 R_I の解が複数個存在する場合には、前述のように、耐震設計上、安全側の評価として、最小の解 ($R_I^*_{min}$) が採用されなければならない。図-6(c) は、複数の R_I 解を有する各部分において、 $(R_I^*_{max} - R_I^*_{min})$ が最大となる場合の $R_I^*_{min} \sim R_I^*_{max}$ の範囲を示したものであり、横軸は固有周期 T_0 である。図-6(c) より、 R_I の解として、 $R_I^*_{min}$ でなく $R_I^*_{max}$ を誤用した場合の各部分における最大誤差が一目瞭然である。

図-6(b) および (c) で示したような「複数の R_I 解を有する μ_d の範囲」ならびに「 $(R_I^*_{max} - R_I^*_{min})$ が最大となる場合の $R_I^*_{min} \sim R_I^*_{max}$ の範囲」を、各固有周期 T_0 ($\Delta T_0 = 0.1(s)$) に対してそれぞれプロットすると、図-7(a) および (b) のようになる。ここに、同図(a) は JMA Kobe NS 記録に、また同図(b) は El Centro NS 記録に対する結果である。これらの図より、複数の R_I 解を有する場合がかなりの頻度で存在し、また $R_I^*_{max}$ と $R_I^*_{min}$ の差がかなり大きい場合も多々あることがわかる。

また $R_I^*_{min}$ が小さい場合に、かなり小さな $(R_I^*_{max} - R_I^*_{min})$ も見られるが、 $R_I^*_{min}$ に対する相対誤差としては必ずしも小さくないと考えられる。

(3) $R_I - \mu_d$ 曲線のジグザグ形状に関する考察

入力強度比 R_I と最大塑性率 μ_d とが必ずしも 1 対 1 に対応しない直接的原因は、5. (1) で述べたように、 $R_I - \mu_d$ 曲線のジグザグ形状にある。本節では、このような $R_I - \mu_d$ 曲線の成立ちについて比較・検討し、考察を加える。

任意の R_I に対する最大塑性率 μ_d は、前出の式 (4) のように、正側の最大塑性率 μ_d^+ と負側の最大塑

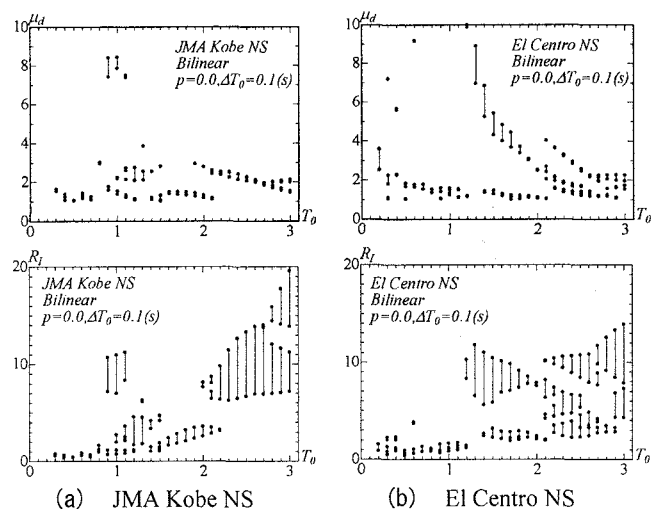


図-7 複数の R_I 解が存在する μ_d の範囲とその最大誤差

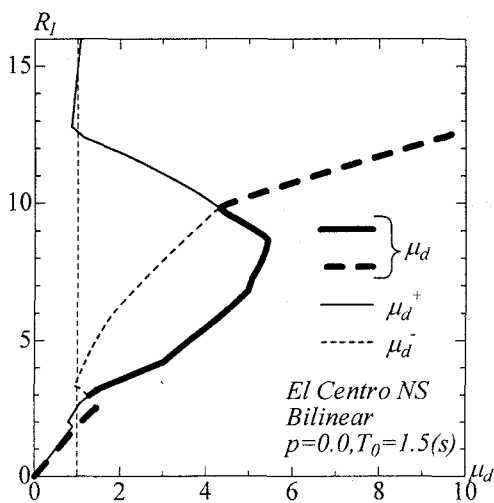


図-8 正負最大塑性率 (μ_d^+, μ_d^-) と系の最大塑性率 (μ_d) の関係

性率 μ_d^- の大きい方として求められる。例えば前出の図-4 における $T_0 = 1.5(s)$ の場合の μ_d^+, μ_d^- ならびに μ_d の関係を示すと図-8 のようである。図中の細実線および細破線は、それぞれ $R_I - \mu_d^+$ 曲線および $R_I - \mu_d^-$ 曲線を、またそれらの太線はともに $R_I - \mu_d$ 曲線を表している。図-8 より、 $R_I - \mu_d$ 曲線のジグザグ形状は、 $R_I - \mu_d^+$ 曲線あるいは $R_I - \mu_d^-$ 曲線のジグザグ形状ならびにそれらの交差に起因しており、また R_I の漸増に伴い、変位振幅が大局的に、「片振り(負側)→両振り→片振り(正側)→両振り→片振り(負側)」と推移しているのがわかる。

紙面の制約のため図は割愛するが、 $R_I - \mu_d^-$ 曲線ならびに $R_I - \mu_d^+$ 曲線の折れ曲がりの原因を探るために、主としてそれらの曲線の明確な折れ曲り点に対応する「時刻歴変位応答曲線」の比較検討を行った。その結果、各曲線における勾配の変化は主に以下の原因により生じることがわかった。

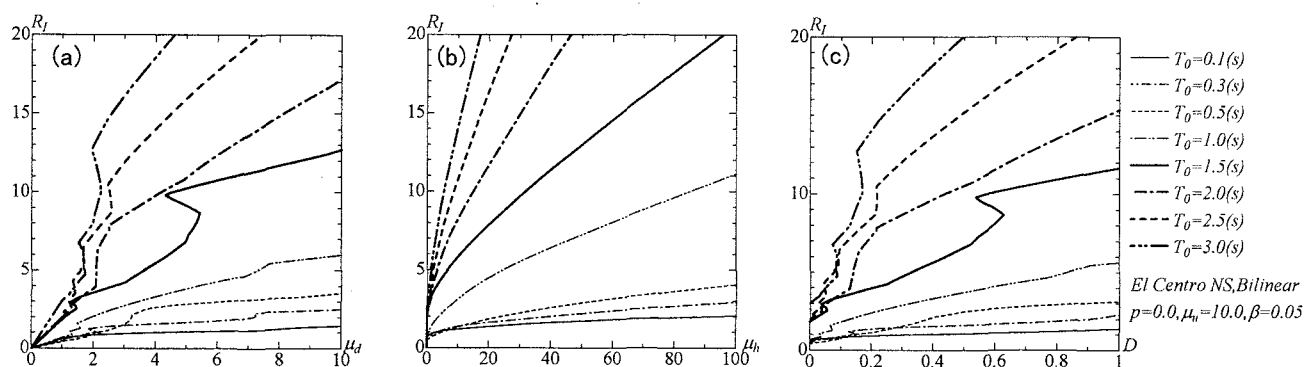


図-9 入力強度比(R_I)と最大変位塑性率(μ_d), エネルギー塑性率(μ_h)ならびに損傷度(D)との各関係

- ある R_I 値でどちらかのサイドが先に弾性限界に達した場合、それよりもわずかに大きい R_I 値では、先に塑性化した側の最大変位は増大するが、その反対側の最大変位は減少するかあるいはその増分が小さくなる傾向がある。
- 初期降伏した方向と反対方向に絶対最大変位が発生している場合、 R_I 値の増大による絶対最大変位の増分が、初期降伏側の塑性化の進行に伴うその減少分を下回る場合に、 $R_I - \mu_d$ 曲線の勾配は負となる。また、その反転点前後で絶対最大変位の発生時期は遅くなる傾向がある。

6. 入力強度比(R_I)と損傷度(D)の関係

ここでは、損傷度指標として“修正 Park らの指標 D ” (前出の式(7)参照^{7),11)})を用いた場合について、前章と同様の比較・検討を行なう。

(1) 入力強度比(R_I)－損傷度(D)曲線

図-9(a)は前出の図-4の再掲($R_I - \mu_d$ 曲線)である。また、図-9(b)は、図-9(a)に対応した $R_I - \mu_h$ 曲線を示している。図中の各線はそれぞれ右端に示す8つの固有周期に対応している。同図(b)よりわかるように、エネルギー塑性率 μ_h は最大変位塑性率 μ_d と異なり、入力強度比 R_I の増大に伴い、単調増加する傾向を示している。

損傷度 D は前出の式(7)のように最大塑性率(μ_d)とエネルギー塑性率(μ_h)の線形結合として定義されている。式中の2つの係数をそれぞれ $\beta=0.05$ ならびに $\mu_u=10$ とした場合の $R_I - D$ 曲線が図-9(c)に示されている。各曲線とも、 $R_I - \mu_d$ 曲線(図-9(a))と同様、巨視的には、 R_I の増大に伴い損傷度 D も増加傾向を示しているものの、部分的には、 R_I の増大にも拘らず D が減少している部分があり、それらの近傍で $R_I - D$ 曲線がジグザグ形状を呈していることが分かる。これは $R_I - \mu_d$ 関係と同様、 R_I

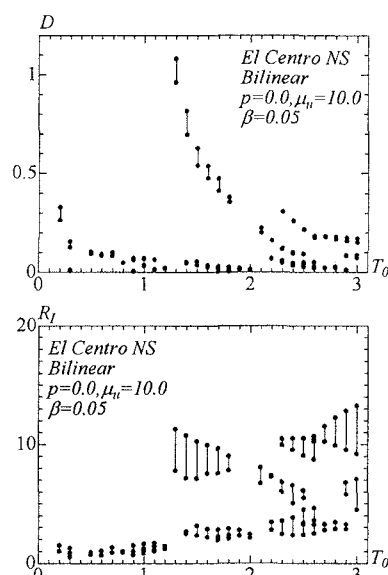


図-10 複数の R_I 解が存在する D の範囲とその最大誤差

と D との間に必ずしも1対1の対応関係が存在しないことを意味しており、所定の損傷度 D^* に対応する入力強度比 R_I^* が複数個存在する場合には、前述のように、安全側の評価となる最小値($R_{I, \min}^*$)を採用する必要がある。

図-9(a)～(c)より、 $R_I - D$ 曲線のジグザグ形状は $R_I - \mu_d$ 曲線の同形状に起因していることがわかる。また、 $R_I - \mu_h$ 曲線の形状を勘案すると、同一の $R_I - \mu_d$ 関係ならびに $R_I - \mu_h$ 関係に基づく $R_I - D$ 曲線は、終局変位じん性率 μ_u が一定の場合、損傷度指標 D に含まれる正の係数 β の値が大きいほど、そのジグザグの度合いは小さくなることが容易に類推できる。

(2) R_I の複数解の出現頻度と最大誤差

最大塑性率(μ_d)を対象とした図-7と同様に、「複数の解 R_I^* を有する損傷度 D の範囲」ならびに

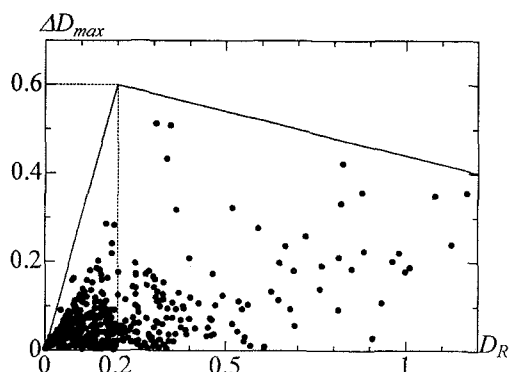


図-14 ΔD_{max} - D_R 関係

表-1 適用例 (第1次解と反復回数)

入力地震動記録		El Centro NS			JMA Kobe NS		
終局変位じん性率 μ_u		10.0			6.0		
正の係数 β		0.00	0.05	0.10	0.00	0.05	0.10
固有周期 T_0 (s)		0.20	1.40	3.00	2.40	0.30	1.20
目標損傷度 D^*		0.20	0.75	0.20	0.25	0.125	0.45
第1次解	(1) $R_{I\max}$	1.454	-	-	-	0.694	-
	(2) $R_{I\min}$	-	-	-	-	-	-
	(3) $R_{I\min}$	-	7.795	10.130	6.849	-	2.637
所要解 $R_{I\min}$		0.943	7.795	10.130	6.849	0.605	2.637
反復回数(第1次解)		4	8	13	13	8	22
反復回数(所要解)		6	9	302	199	24	75
総反復回数		10	17	315	212	32	97

なお、この方法の適用に際しては、 ΔD^* を適切に設定する必要がある。 ΔD^* が小さいと $R_{I\min}^*$ 以外に収束する可能性が高くなり、また大き過ぎると多大な反復回数が必要となる。次節(3)で ΔD^* の必要最小値と、 $R_{I\min}^*$ を求める際の合理的な設定法について述べる。

(3) ΔD^* の必要最小値(ΔD_{min}^*)と各範囲でのその最大値(ΔD_{max})

第1次解として $R_{I\max}^*$ が求まった場合(図-13のC点)、前節(2)の手順で $R_{I\min}^*$ (図-13のA点)に収束させるためには、 $\Delta D^* > \Delta D_{min}^*$ とする必要がある。ここに ΔD_{min}^* は、図-13に示すように、『点C』を、『 $R_{I\min}^*$ に最も近い解(この場合は $R_{I\min}^*$)に対応する点Bと点O'を通る直線と直線 $R_I = R_{I\max}^*$ の交点C』に平行移動する場合の移動量である。幾何学的な考察から容易に類推できるように、 $\Delta D^* < \Delta D_{min}^*$ では再び点Cに、また $\Delta D^* = \Delta D_{min}^*$ の時は点Bに、そして $\Delta D^* > \Delta D_{min}^*$ の場合に点Cに収束することになる。したがって、確実に $R_{I\min}^*$ を求めるためには、 ΔD_{min}^* を正確に把握することが重要であるが、これは目標とする D^* 値により当然異なる。例えば、図-13における $D_L \leq D \leq D_R$ の範囲では、 $D^* = D_L$ の場合に $\Delta D_{min}^* = 0$ と最小であり、また $D^* = D_R$ の場合に $\Delta D_{min}^* = \Delta D_{max}$ と最大になることがわかる。

以上のようなことより、まず入力強度比の解が複数個存在する各範囲の ΔD_{max} をすべて求め、次いでそれらの結果をもとに、安全側の $D^* - \Delta D^*$ 関係を導くのが現実的であると思われる。

(4) $D_R - \Delta D_{max}$ 関係および ΔD^* の設定法

図-14は、30通りの T_0 (=0.1~3.0(s)、 ΔT_0 =0.1(s))、3通りの β (=0, 0.05, 0.1)、2通りの μ_u (=6, 10)、および2種類の入力地震動記録(El Centro NS, JMA Kobe NS)のすべての組合せに対して $R_I - D$ 曲線を求

め、各曲線のすべてのジグザグ部の $D_R - \Delta D_{max}$ 関係をプロットしたものである。なお、減衰定数 h は0.05、また弾塑性剛性比 p は0.0と固定した。

同図より、 D_R は約0.4以下の範囲に集中しており、また $D_R \approx 0.3$ 付近に ΔD_{max} の最大値が見られる。図は示していないが、図-14にプロットされたすべての点を含む領域の包絡線はほぼ $\mu_u=6$ の場合の包絡線と一致する。これは、修正Parkらの損傷度指標 D の定義(式(7))より類推できるように、仮に「 μ_d および μ_h 」が同一でも、 μ_u が大きいほど損傷度 D は小さく算定されるため $R_I - D$ 曲線のジグザグ度は低下する。このため、 μ_u が大きいほど D_R と ΔD_{max} は、ともに小さくなると考えられる。

以上のようなことより、ここでは、 $\mu_u \geq 6$ の場合を対象とし、 ΔD_{max} の上限を図-14に示すような2本の直線(式(8a), (8b))で表わすこととした。

$$\Delta D_{max} = 3.0 D_R \quad (0 \leq D_R \leq 0.2) \quad (8a)$$

$$\Delta D_{max} = -0.2 D_R + 0.64 \quad (0.2 \leq D_R) \quad (8b)$$

ΔD_{min}^* が $D_L \leq D^* \leq D_R$ の範囲でほぼ線形的に変化する($\Delta D_{min}^* = \Delta D_{max} (D^* - D_L) / (D_R - D_L)$)と仮定すると、 ΔD^* は式(9a), (9b)により安全側に評価される。

$$\Delta D^* = 3.0 D^* \quad (0 \leq D^* \leq 0.2) \quad (9a)$$

$$\Delta D^* = -0.2 D^* + 0.64 \quad (0.2 \leq D^*) \quad (9b)$$

(5) $R_{I\min}^*$ 算定法の適用例

本法の適用例の一部を表-1に示す。いずれも目標とする損傷度 D^* に対して3個の入力強度比($R_{I\min}^*$, $R_{I\min}^*$, $R_{I\max}^*$)が存在する場合である。各場合の入力強度比の第1次解ならびに所要解($R_{I\min}^*$)と、それぞれの解に収束するのに必要な反復回数等が示されている。なお、 D^* に対する相対誤差が0.0005以下になった場合に収束したと見做した。表-1より、第1次解を得るための反復回数は高々20数回程度であるが、最終的な所要解 $R_{I\min}^*$ への収

束にはその 10 倍以上の反復回数を要している場合があることがわかる。この傾向は、 R_I-D 曲線の勾配が $0 \leq R_I \leq R_{I, \min}^*$ 区間で比較的大きく、かつ ΔD^* が大きく設定される $D^*=0.2$ 前後の場合に多く見られる。

8. まとめ

本研究では、入力強度比(R_I)-損傷度(D)曲線に着目して、目標とする損傷度 D^* に対する入力強度比の解が複数個存在する現象とその原因について比較検討するとともに、耐震設計において有用と考えられる最小の入力強度比を効率よく算定する手法について検討した。

以下に、得られた主な知見を列挙する。

- 1) 所定の損傷度に対して複数の所要入力強度比の解が存在する直接的な理由は、 $R_I-\mu_d$ (最大塑性率) 曲線がジグザグ形状を呈するためである。なお、エネルギー塑性率 (μ_h) は R_I の単調増加関数である。
- 2) $R_I-\mu_d^+$ (正側の最大塑性率) 曲線と $R_I-\mu_d^-$ (負側の最大塑性率) 曲線との交点では必ず $R_I-\mu_d$ 曲線が折れ曲がり、その近傍では R_I の複数解が存在する場合が多い。
- 3) ある R_I 値でどちらかのサイドが先に弾性限界に達した場合、それよりもわずかに大きい R_I 値では、先に塑性化した側の最大変位は増大するが、その反対側の最大変位は減少するかあるいはその増分が小さくなる傾向がある。
- 4) 複数の入力強度比の解を有する損傷度の出現頻度は比較的高い。
- 5) 提案された入力強度比の最小解の算定法は、比較的一般性のある合理的な手法である。

謝辞：本研究の一部は、平成 15 年度文部科学省科学研究費補助金の助成を受けて実施したものである。ここに、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Miranda, E. and Bertero, V.V. : Evaluation of strength reduction factors for earthquake-resistant design, earthquake spectra, pp.357-379, Vol.10, No.2, 1994.
- 2) 山本浩一, 本田利器, 田村敬一, 中尾吉宏：リダクションファクターによる弾塑性系の応答評価, 第 10 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2335-2340, 1998.
- 3) 山本浩一, 田村敬一, 中尾吉宏, 平沢高史：等価固有周期によるリダクションファクタースペクトル, 第 3 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.49-52, 1999.
- 4) 渡邊学歩, 川島一彦：荷重低減係数の特性に関する一検討, 第 3 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.53-60, 1999.
- 5) 平沢高史, 田村敬一, 中尾吉宏：地震動の位相特性が 1 質点系弾塑性系応答値に及ぼす影響について, 第 3 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.95-98, 1999.
- 6) 西村昭彦, 室野剛隆, 齊藤正人：所要降伏震度スペクトルの作成と耐震設計への適用, 第 3 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.43-48, 1999.
- 7) 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.
- 8) 吉田仁司, 田村敬一, 中尾吉宏：地震動特性を考慮した非線形応答の推定とその応用, 第 5 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.1-6, 2002.
- 9) 成行義文, 門峰康, 竹園雅樹, 平尾潔, 笹田修司：所定の最大塑性率に対する所要降伏震度の算定法, 応用力学論文集, Vol.6, pp.633-642, 2003.
- 10) 伊藤彰浩, 家村浩和, 五十嵐晃：必要強度スペクトルに基づく弾塑性耐震設計法について, 土木学会第 51 回年次学術講演会講演概要集, pp.514-515, 1996.
- 11) 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.
- 12) 成行義文, 平尾潔, 大岸独歩：地震動入力を受ける一自由度系の変位じん性率および履歴吸収エネルギーの一推定法, 構造工学論文集, Vol.36A, pp.779-790, 1990.
- 13) 成行義文, 平尾潔, 榊原伸子：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, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.615-628, 1993.
- 14) 平尾潔, 澤田勉, 成行義文：地震応答解析に用いる降伏強度比の定義とその互換性について, 土木学会論文集, No.465/I-23, pp.159-162, 1993.
- 15) 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.
- 16) 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.