

等価減衰定数によるリダクションファクタースペクトル

山本 浩一¹・中尾 吉宏²

¹正会員 復建調査設計（株）岡山支社（〒700-0983 岡山県岡山市東島田町1-3-5）

²正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所地震防災研究室（〒305-0804 つくば市大字旭1番地）

1. はじめに

構造物の非線形応答の簡便な推定法としては、エネルギー一定則や変位一定則などが知られているが、非線形応答は地震動特性や構造物の固有周期などに応じて大きく変動するため、これらの推定精度には課題があることが知られている。筆者らは非線形応答の推定精度の向上を図るため、リダクションファクター（ $R\mu$ ）に着目した研究を行ってきたが¹⁾、 $R\mu$ スペクトルについても地震動特性や固有周期による変動が大きく、提案された $R\mu$ スペクトルの推定式には大きな推定誤差が伴うものであった。

そこで、本研究では、 $R\mu$ スペクトルが大きく変動する理由について検討を行い、 $R\mu$ スペクトルを算定するために必要な線形応答の計算に等価減衰定数を用いることにより、 $R\mu$ スペクトルの変動が小さくなることを示すとともに、 $R\mu$ スペクトルの推定式を導出した。

2. $R\mu$ スペクトルの変動について

$R\mu$ スペクトルは、一質点弾塑性系の最大応答変位が、目標の靱性率（ μ ）に一致するために必要な降伏耐力（ F_y ）と、同じ一次剛性を持つ系が塑性化しないために必要な降伏耐力（ F_{ye} ）とを用いて式(1)で定義される。

$$R\mu = \frac{F_{ye}}{F_y} \tag{1}$$

図1は、一質点弾塑性系に内部減衰5%を仮定し、表1に示す10成分の強震記録について $\mu=6$ の $R\mu$ スペクトルを算定したものである。同図から、 $R\mu$ は地震動特性や固有周期による変動が大きいことが認められる。既往の研究により、 $R\mu$ スペクトルの推定式が提案されている（例えば2)）が、このように大きな変動があるため、推定式の精度には課題があると考えられる。

本研究では、周期は同一であるが繰り返し回数が

表1 解析に用いた記録

記録名	観測地点	地震名	成分	M	最大加速度 (gal)
302-GR-35	開北橋	宮城県沖	LG,TR	7.4	364
308-GR-2	板島橋	日向灘	LG,TR	7.5	196
JMA KOBE	神戸海洋気象台	兵庫県南部	NS,EW	7.3	818
FUKIAI	釜合		X,Y		802
PORT ISLAND	ポートアイランド		NS,EW		341

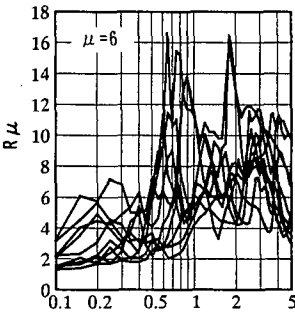


図1 10成分の $R\mu$ スペクトル

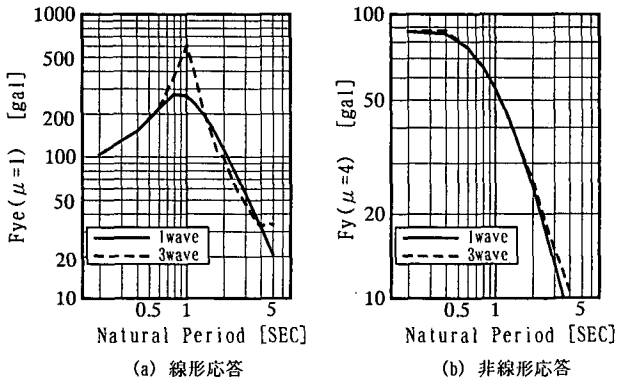


図2 正弦波1波と3波の必要降伏耐力

異なる定常波を入力地震動として用い、 $R\mu$ スペクトルの変動の原因を検討することとした。図2は、周期1(sec)の正弦波1波と3波とを入力地震動として用いた場合について、線形応答における必要降伏耐力 F_{ye} と、靱性率が $\mu=4$ になる必要降伏耐力 F_y とを算定した結果を示すものである。同図から、繰り返し回数が異なる正弦波の入力に対して、靱性率4の必要降伏耐力 F_y については概ね同様な結果が得られているのに対し、線形応答の必要降伏耐力 F_{ye} については共振周期1(sec)付近で大きく異なる結果が算定されている。このように、入力地震動の繰り返し

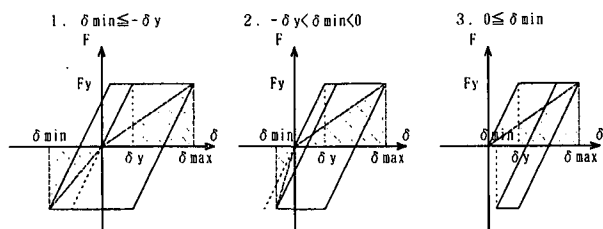


図3 等価減衰定数の求め方

しの影響により線形応答 F_y が大きく変動するため、 $F_y/F_{y(\mu=4)}$ で算出される R_μ スペクトルの形状も1波入力と3波入力では大きく異なるものとなる。

線形応答に比べ、非線形応答において繰り返しの影響が小さいのは、非線形性による履歴減衰が見込まれ、大きな減衰効果が生じるためと考えられる。 R_μ スペクトルは線形応答と非線形応答の応答値により算出されるが、既往の研究は、応答値の計算に上記のような減衰効果の差異の影響が考慮されたものではなかった。

本研究では、 R_μ スペクトル算定にあたって、減衰効果が等価な線形応答と非線形応答を考慮することとし、 R_μ スペクトルを求める際の線形応答の計算には、目標靱性率の非線形応答に応じた等価減衰定数を用いることとした。

3. 等価減衰定数

等価減衰定数は式(2)に示すように履歴ループの面積 ΔW と最大応答時の弾性ポテンシャルエネルギー W_e により算出される。履歴ループとしては図3に示す3種類のケースが考えられるため、ここでは、実際の履歴ループの形状に応じて heq を式(3)~(5)で算出することとした。 heq は、表1に示した10成分の強震記録を入力地震動とした場合について算出した。

$$heq = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{\Delta W}{W_e} \right) \quad (2)$$

CASE1 $\delta_{min} \leq -\delta_y$

$$heq = \frac{2}{\pi} \frac{\delta_{max} - 2\delta_y - \delta_{min}}{\delta_{max} - \delta_{min}} \quad (3)$$

CASE2 $-\delta_y < \delta_{min} < 0$

$$heq = \frac{1}{\pi} \frac{2\delta_{max} - 3\delta_y - \delta_{min}}{\delta_{max} - \delta_{min}} \quad (4)$$

CASE3 $0 \leq \delta_{min}$

$$heq = \frac{1}{\pi} \frac{2\delta_{max} - 3\delta_y - \delta_{min}}{\delta_{max}} \quad (5)$$

ここで、式(3)~(5)の δ_y は、一質点弾塑性系の降伏変位である。また、式(3)~(5)の δ_{max} 及び δ_{min}

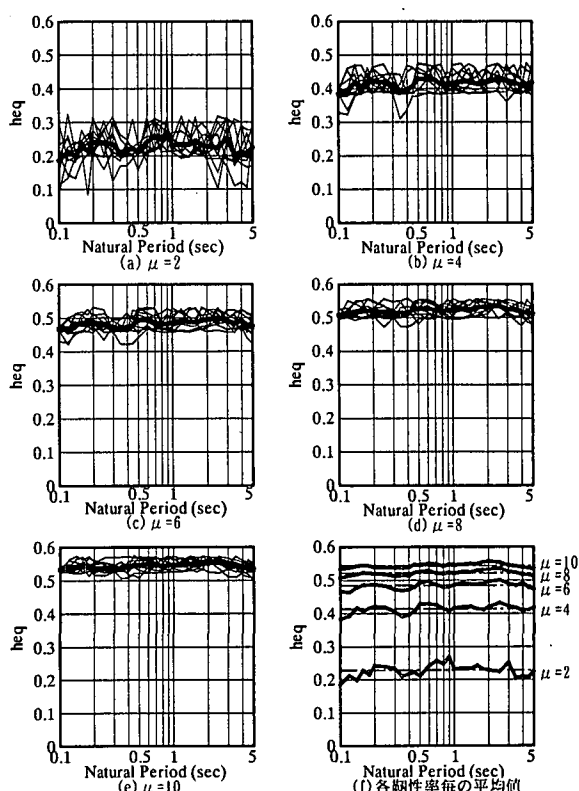


図4 等価減衰定数

表2 等価減衰定数の比較

μ	2	4	6	8	10
$heq(\alpha=0.7)$	0.182	0.409	0.485	0.523	0.546
$heq(\mu i)$	0.228	0.415	0.485	0.522	0.544

は、表1に示した10成分の強震記録ごとに算定することとし、強震記録ごとの非線形応答が目標靱性率になる F_y を一質点弾塑性系に与える応答計算により求めた。表1の10成分の強震記録を入力地震動として用い、固有周期や靱性率毎に算出した heq を図4(a)~(e)に示す。また、同図(f)には、固有周期や靱性率毎に算定された heq の平均値 $heq(\mu i)$ を示す。図4(a)~(e)より、記録毎に算出される heq は、 $\mu=2$ で若干のばらつきはあるが、靱性率と共に大きくなり、固有周期にはほとんど依存しない傾向が認められる。

ここで、定常ループにおける heq については、式(6)で $\alpha=1$ として算出することができるが、これは δ_{max} が+側-側共に同じ最大値を取る場合であり、実際の heq はこれより小さくなる。

$$heq = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\alpha\mu} \right) \quad (6)$$

表2は、式(6)において $\alpha=0.7$ の場合の $heq(\alpha=0.7)$ と、図4(f)の固有周期 $T=1.0$ secにおける $heq(\mu i)$ とを比較したものであるが、 $\mu=2$ で若干の違いはあるものの、両者は良い一致を示している。そこで、本研究で考慮する heq は、簡単のため、式(6)で $\alpha=0.7$ として靱性率ごとに算定することとした。

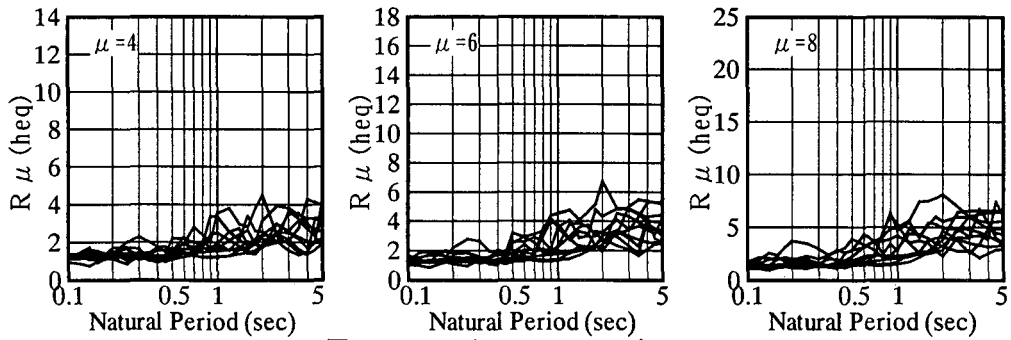


図5 heqによるRμスペクトル

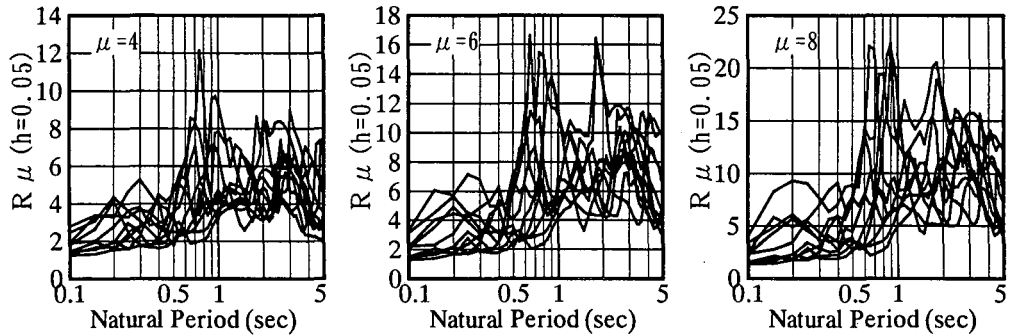


図6 h=0.05によるRμスペクトル

4. 等価減衰定数によるRμスペクトル

表1の10成分に対し等価減衰定数によるRμスペクトル(Rμ(heq))を式(7)により求める。式(7)のFye(heq(μ))は、式(1)におけるFyeを求める際に、目標靱性率に応じたheqを考慮したものである。

$$R\mu(heq) = \frac{Fye(heq(\mu))}{Fy(\mu)} \quad (7)$$

図5にheqによるRμ(heq)スペクトルを示す。また、図5との比較のため、線形応答の計算に内部減衰h=0.05を仮定し算定した従来のRμスペクトルを図6に示す。これらの図から、heqによるRμ(heq)スペクトルはh=0.05のRμスペクトルに比べ変動幅が著しく小さいことがわかる。また、図5より固有周期が長くなるにしかたがって漸増する傾向も認められる。図7には表1の10成分を用いて靱性率毎に算出した各固有周期のRμ(heq)スペクトルの平均値を示すが、固有周期と靱性率による相関が認められる。

5. Rμ(heq)の推定式

従来のRμに比べ、地震動特性や固有周期による変動が小さい等価減衰定数によるRμ(heq)について、その推定式を導出する。Rμスペクトルは短い固有周期で1となり、長い固有周期でμに漸近する関数とするのが合理的であると考えられている³⁾。これを踏まえ、ここでは、Nassarらが提案した式を変形させた式(8)をRμ(heq)の推定式の式形として用いることとした。

ここで、Tは固有周期(sec)、A,B,C,Dは回帰係数

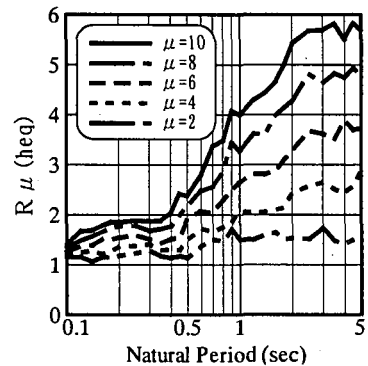


図7 Rμ(heq)の平均スペクトル

$$R\mu(heq) = [\alpha(\mu-1)+1]^{1/\beta} \quad (8)$$

$$\text{ここに: } \alpha = \frac{T^C}{1+T^C}$$

$$\beta = \frac{T^A}{D+T^A} + \frac{B}{T}$$

である。なお、渡邊ら³⁾が指摘するように、式(8)は係数の意味があいまいであることと各係数の決定が難しいという問題点があり、今後の課題となるが、図7のグラフに対する適合性が良いという理由から、ここでは式(8)を用いることとしたものである。

Rμ(heq)の推定式は、推定値が図7のRμ(heq)の平均値に最も適合するようにA=0.8、B=0.65、C=0.1、D=0.5と与えることとした。

6. Rμ(heq)の精度検証

式(8)より求めたRμ(heq)の推定結果と、図7に示したRμ(heq)の算定値とを図8に示す。同図から、いずれの靱性率においても、式(8)による推定値Rμ(heq)が、応答計算から得られたRμ(heq)に良く適合

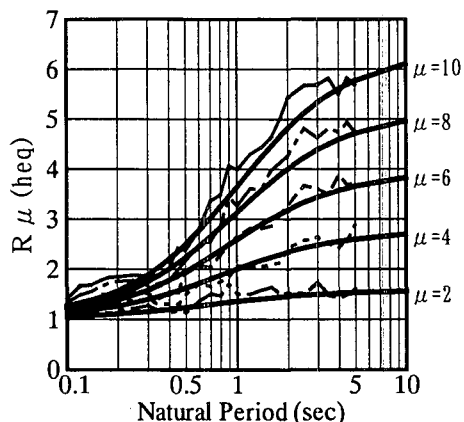


図8 Rμ (heq) スペクトルの推定

していることがわかる。

ここでは、表1とは異なる表3の強震記録を用いて、以下の手順でRμ (heq) スペクトルの推定式の精度検証を行った。

- 1) それぞれの強震記録に対し、目標靱性率μに見合う heq を用いて線形応答の必要降伏耐力 $F_y(\text{heq}(\mu))$ を算定する。
- 2) 式(8)を用いて推定した $R\mu(\text{heq})$ と、1) で算定した $F_y(\text{heq}(\mu))$ とを用いて、目標靱性率で非線形応答する一質点弾塑性系の必要降伏耐力の推定値 $F_y(R\mu)$ を求める。
- 3) 一質点弾塑性系の降伏耐力を変更した非線形動的解析を繰り返し行うことにより、系が目標靱性率で応答する場合の必要降伏耐力 F_y を算定する。
- 4) 2) で推定した $F_y(R\mu)$ と、3) で算定した F_y を用いて式(9)により誤差を算出する。

$$e = \left| \frac{F_y - F_y(R\mu)}{F_y} \right| \quad (9)$$

既往の研究による推定式と、本研究で導出した推定式の精度を比較するため、エネルギー一定則と渡邊ら³⁾が提案した式より推定した必要降伏耐力についても、式(9)により誤差を求めた。図9は推定方法による誤差の違いを示したグラフであり、図中の太線は推定方法ごとの誤差の平均値を示したものである。同図から、本研究による推定 ($R\mu(\text{heq})$) は他の方法に比べ誤差が小さくなっていることがわかる。また、エネルギー一定則や渡邊らの推定式では、例えば、 $T=0.25\text{sec}$ 付近で線形応答のピークの影響を受け、誤差が大きくなっている箇所が見られるが、本研究による推定 ($R\mu(\text{heq})$) では、このピークが小さく抑えられており、このような箇所においてもある程度の適合性が認められる。

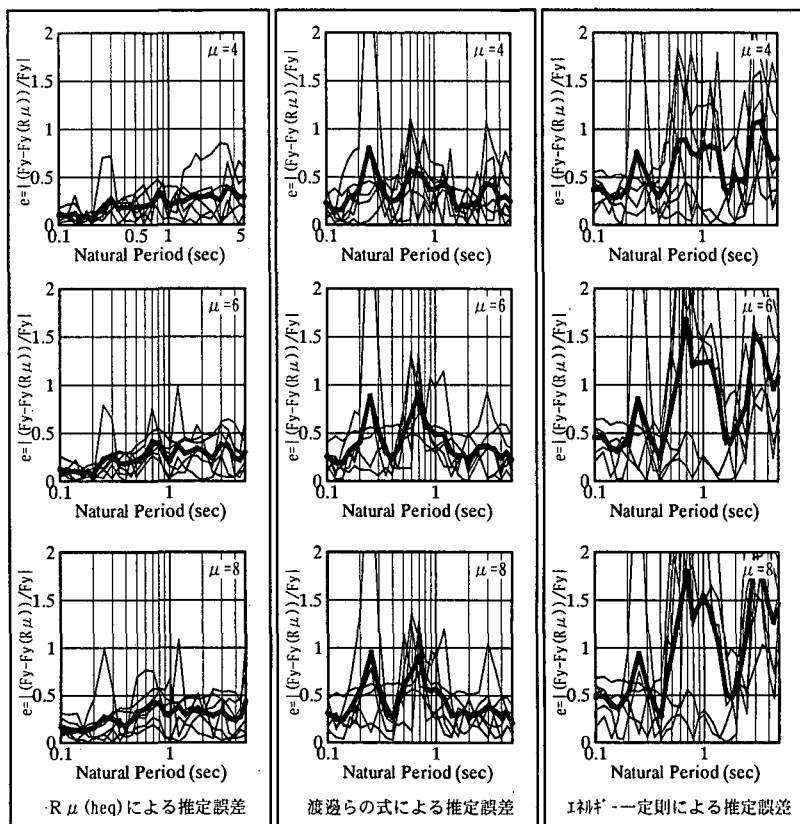


図9 各推定式による誤差

表3 検証に用いた6成分

記録名	308-GR-4	INAGAWA	HIGASHI KOBE
観測地点	板島橋	猪名川	東神戸大橋
地震名	愛媛県西部沿岸	兵庫県南部	
成分	TRLG	NS,EW	N12W,N78E
M	6.6	7.3	
最大加速度 (gal)	594	422	327

7. まとめ

本研究から得られた結果は以下のとおりである。

- 1) 等価減衰定数による $R\mu$ スペクトルは、地震動特性や固有周期による変動を小さく抑えることができる。また、スペクトルの形状が短い固有周期から長い固有周期に向けて緩やかに上昇するという傾向が認められる。
- 2) 等価減衰定数による $R\mu$ スペクトルは、過去に提案された $R\mu$ 推定式より高い推定精度が得られ、既往の $R\mu$ 推定式では十分な推定精度を確保することが難しかった記録においてもある程度の適合性が認められる。

参考文献

- 1) 山本、田村、中尾、平沢「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平成11年2月
- 2) Miranda, E. and Bertero, V.V. "Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake Resistant Design", Earthquake Spectra, Vol. 10, No. 2, 1994
- 3) 渡邊、川島「荷重低減係数の特性に関する研究」土木学会論文集No.682 平成13年7月