

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

山本浩一¹・田村敬一²・中尾吉宏³・平沢高史⁴

¹正会員 復建調査設計（株） 岡山支社 （〒700-0921 岡山県岡山市東古松4-5-16）

²正会員 工博 建設省土木研究所 耐震技術研究センター 振動研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

³正会員 工修 建設省土木研究所 耐震技術研究センター 振動研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

⁴正会員 建設省土木研究所 耐震技術研究センター 振動研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

1 はじめに

地震時における構造物の非線形挙動の推定法としては、非線形動的解析が主流になりつつある。しかし、設計の実務レベルから考えて、全ての橋梁に対して非線形動的解析を実施するのは難しく、静的設計により構造物の地震時の挙動を推定する方法も高度化させていくことが必要であると考えられる。そこで、非線形応答を簡易に推定する方法の1つとして、リダクションファクター（ $R\mu$ ）スペクトルを用いる方法が考えられる。

$R\mu$ スペクトルについては、既往の研究でいくつかの推定式が提案されているが¹、一質点系の非線形動的解析により実際に算出される $R\mu$ スペクトルは、固有周期や地震動特性による変動が大きく、設計用の推定式を提案するためには更に検討が必要であると考えられる。そこで、本研究では、非線形動的解析により実際に算出される $R\mu$ スペクトルの変動幅が大きくなる理由について検討を行い、靱性率に応じた等価固有周期により $R\mu$ スペクトルを整理することを試みた。

2 弾性固有周期による $R\mu$ スペクトル

既往の多くの研究では、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} ）との比として $R\mu = F_{ye}/F_y$ と定義し、弾性固有周期対して $R\mu$ をプロットすることにより $R\mu$ スペクトルを求めている。

弾性固有周期による $R\mu$ スペクトルに関しては、いくつかの研究報告^{2,3}がなされているが、地震動特性や固有周期によるスペクトルの変動が大きいことが知られている。

図1は、神戸海洋気象台 NS 成分の $R\mu$ スペクトルであるが、固有周期 0.5sec 付近を境に、短周期側と長周期

表1 解析に用いた波形

番号	記録名	観測地点名	地震名	成分	発生日時	M	最大加速度 (gal)	地震種別
1.2	302-GR-35	関北橋	宮城県沖	LG,TR	1978.06.12.17:14	7.4	364.413	I
3.4	308-GR-2	板島橋	日向灘	LG,TR	1968.04.01.09:42	7.5	196.216	II
5.6	JMA KOBE	神戸海洋気象台		NS,EW			818.617	I
7.8	FUKIAI	基合	兵庫県南部	Y,X	1995.01.17.05:46	7.2	802.687	II
9.10	PORT ISLAND	ポートアイランド		NS,EW			341.284	III

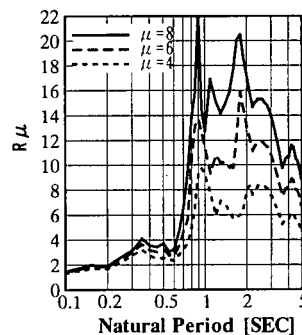


図1 神戸海洋気象台記録NS成分の $R\mu$ スペクトル

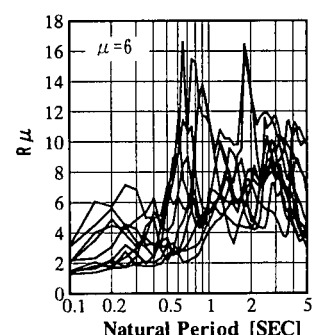


図2 10記録分の $R\mu$ スペクトル

側で $R\mu$ の値に大きな違いが見られることや、固有周期 0.8sec～2sec 付近で凹凸の多い形状を呈していることから、固有周期による $R\mu$ スペクトルの変動が大きいことがわかる。

また、図2は表1に示す10成分の強震記録について、靱性率 $\mu=6$ の場合の弾性固有周期による $R\mu$ スペクトルを重ねて示したものであるが、同一固有周期においてそれぞれの地震動の $R\mu$ の値がかなり異なっていることがわかる。

このように、弾性固有周期による $R\mu$ スペクトルは固有周期や地震動特性により大きな変動を示すため、推定式を提案する際の大きな障壁となっている。

3 弾性固有周期による $R\mu$ の変動について

$R\mu$ スペクトルは、弾性の必要強度スペクトルと目標靱性率の必要強度スペクトルの比で表される。したがって、 $R\mu$ スペクトルを考える際に、必要強度スペクトルの特徴を把握することが重要であると考えられる。なお、目標靱性率の必要強度スペクトルは、非線形履歴モデルを完全バイリニアとし、目標靱性率になる F_y を一次剛性

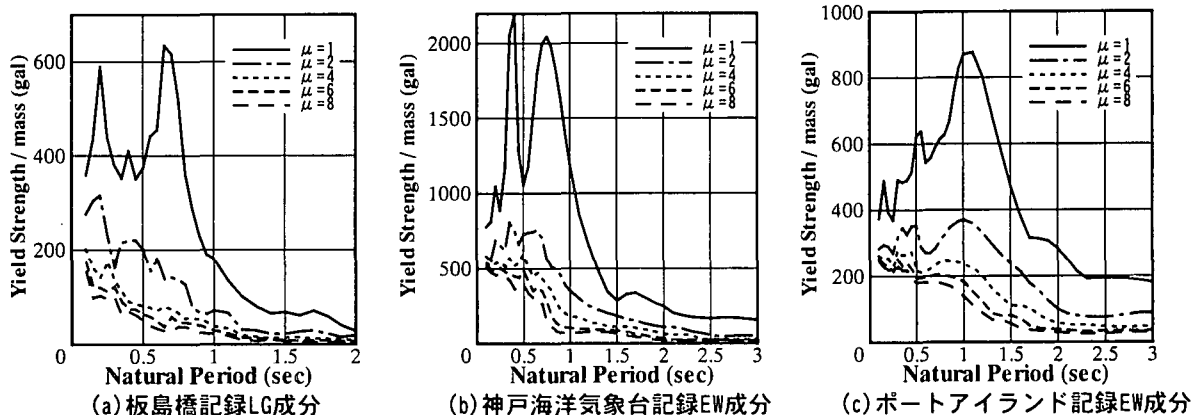


図3. 必要強度スペクトル

の固有周期に対しプロットしたものである。また、本研究に用いた内部減衰は全て $h=0.05$ である。

図3は、強震記録の必要強度スペクトルであるが、例えば、ポートアイランド記録の必要強度スペクトルに着目すると、 $\mu=1$ (F_y) は $1.0 \sim 1.2$ sec 付近にピークがあり、それより長周期側では急激に下降しているが、このピークに対応すると考えられる各靱性率のピークは、 $\mu=2$ では 1.0 sec 付近、 $\mu=4$ では 0.8 sec 付近と、靱性率が大きくなるほどピークを示す固有周期が短周期側に移行しているのがわかる。この傾向は、板島橋記録や神戸海洋気象台記録でも同様である。

$R\mu$ は前述のように、同一の弾性固有周期において $F_y(\mu=1)$ を $F_y(\mu)$ で除したものである。したがって、大きな靱性率に対する必要強度スペクトルでは下降を始める固有周期が短周期側に移行しているため、 $\mu=1$ のピーク付近の $R\mu$ が大きな値を示すことになる。このように、 $\mu=1$ と各靱性率の必要強度スペクトルが下降を始める固有周期がずれていることが、固有周期間での $R\mu$ スペクトルの変動が大きくなる理由の1つと考えられる。

また、地震動特性の面から $R\mu$ スペクトルの変動を考えると、 $\mu=1$ の必要強度スペクトルが下降を始める固有周期がそれぞれの地震動により異なるため、 $R\mu$ スペクトルの形状に違いが出るものと考えられる。

4 解析に用いた等価固有周期

$R\mu$ スペクトルの変動の原因として、図3に示すように $\mu=1$ の必要強度スペクトルが下降を始める固有周期と、各靱性率の必要強度スペクトルが下降を始める固有周期がずれていることを挙げたが、これは、構造物が塑性化して固有周期が延びると考えれば、図3の $\mu=1$ 以外の靱性率の必要強度スペクトルは、曲線全体が長周期側に移動することになる。移動量によっては、 $\mu=1$ と各靱性率の必要強度スペクトルのピークが概ね合ってくるのが考えられ、これによりピーク付近の $R\mu$ の値自体を小さ

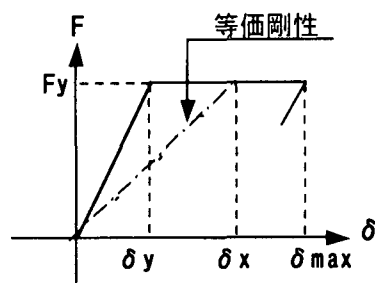


図4. 等価剛性

くすることができる。

構造物が塑性化することにより、弾性状態よりも固有周期が長くなることは周知のことであるが、どの程度長くなるかについては不明な点が多く、今後の研究課題として残るが、本研究では図4に示す δ_x を想定し、その等価剛性により等価固有周期を与えるという方法を用いた。

$$k' = \frac{F_y}{\delta_y} \quad T' = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k'}} \quad (m=1)$$

ここに、 k' : 等価剛性

F_y : 目標靱性率を与える降伏変位

δ_x : 等価剛性を与える応答変位

T : 等価固有周期

また、 δ_x の推定について以下の3ケースを考え、その時の等価固有周期を T と μ の関数として求めた。

$$\text{CASE1} \quad \ddot{a}_x = \ddot{a}_{\max} \times 0.7 \quad T' = \sqrt{0.7\mu} \times T \quad \text{-----(1)}$$

$$\text{CASE2} \quad \ddot{a}_x = \ddot{a}_y + \frac{\ddot{a}_{\max} - \ddot{a}_y}{3} \quad T' = \sqrt{1 + \frac{\mu-1}{3}} \times T \quad \text{-----(2)}$$

$$\text{CASE3} \quad \ddot{a}_x = \ddot{a}_y + \frac{\ddot{a}_{\max} - \ddot{a}_y}{5} \quad T' = \sqrt{1 + \frac{\mu-1}{5}} \times T \quad \text{-----(3)}$$

ここに、 T : 弾性固有周期

μ : 靱性率

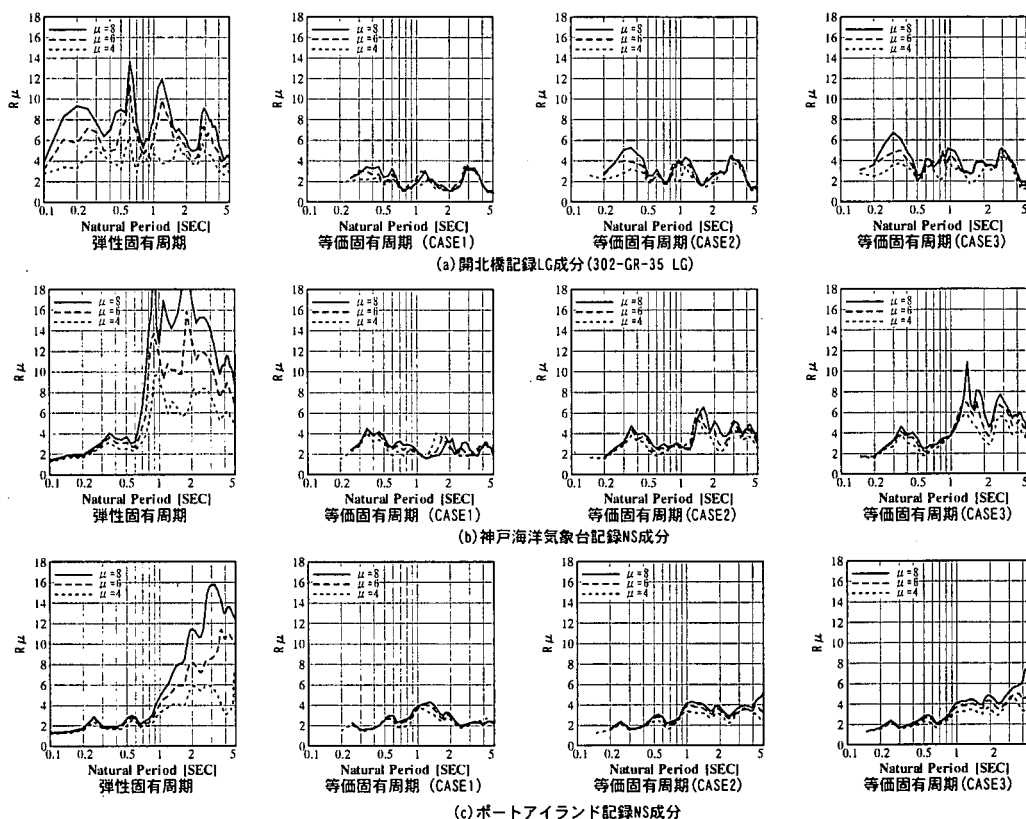


図5 等価固有周期を用いた場合の $R\mu$ スペクトルの比較

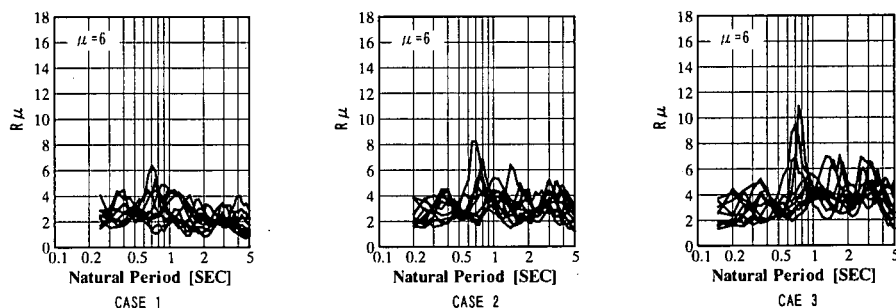


図6 10波形を重ねた等価固有周期による $R\mu$ スペクトル

CASE1は最大応答変位に0.7を乗じ等価剛性とする方法であり、等価線形化法では比較的良好に用いられる数値である。ただし、この方法は靱性率が小さくなってくると $\delta x < \delta y$ となる問題点がある。 $\delta y < \delta x < \delta \max$ の関係は常に成り立つ必要があるため、CASE2および3も加えた。CASE2および3は δy と $\delta \max$ の間を $1/n$ するという考え方であるが、今回の検討では $n=3$ および5としてスペクトルを作成することとした。

5 等価固有周期による $R\mu$ スペクトル

等価固有周期による $R\mu$ は、任意の固有周期 T_i に対する F_{ye} ($\mu=1$ の必要降伏耐力)を算出し、式(1)～(3)により、 $T^*=T_i$ となる構造系の F_y を目標靱性率に対し算出することにより、 $R\mu = F_{ye}/F_y$ として定義することとした。

(1) 弾性固有周期による $R\mu$ スペクトルとの比較

図5は、弾性固有周期による $R\mu$ スペクトルと等価固有周期によるCASE1～3の $R\mu$ スペクトルを各強震記録に対し算出したものである。

図5から明らかなように、等価固有周期で整理した $R\mu$ スペクトルは、弾性固有周期によるものに比べ、スペクトルの変動幅が著しく小さくなっていることがわかる。

図6は、各CASE毎に、表1に示す10成分の $R\mu$ スペクトルを重ねて示したものであるが、弾性固有周期で整理している図2と比較して、同一固有周期における各地震動の $R\mu$ の変動幅がかなり小さくなっていることがわかる。

以上のことより、等価固有周期により整理した $R\mu$ スペクトルは、弾性固有周期で整理したものに比べ固有周期や地震動特性によるスペクトルの変動幅を小さくできることがわかる。

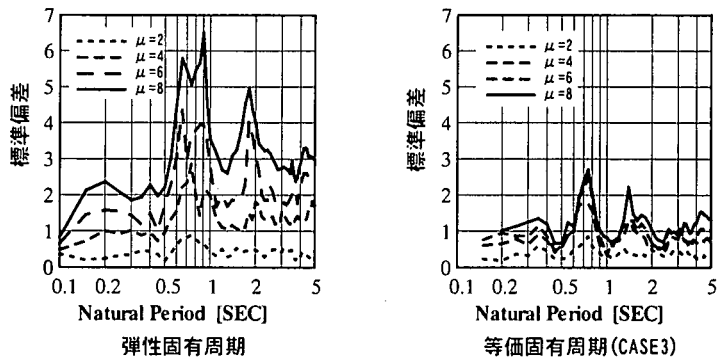


図7 標準偏差による $R\mu$ スペクトルの変動幅の差

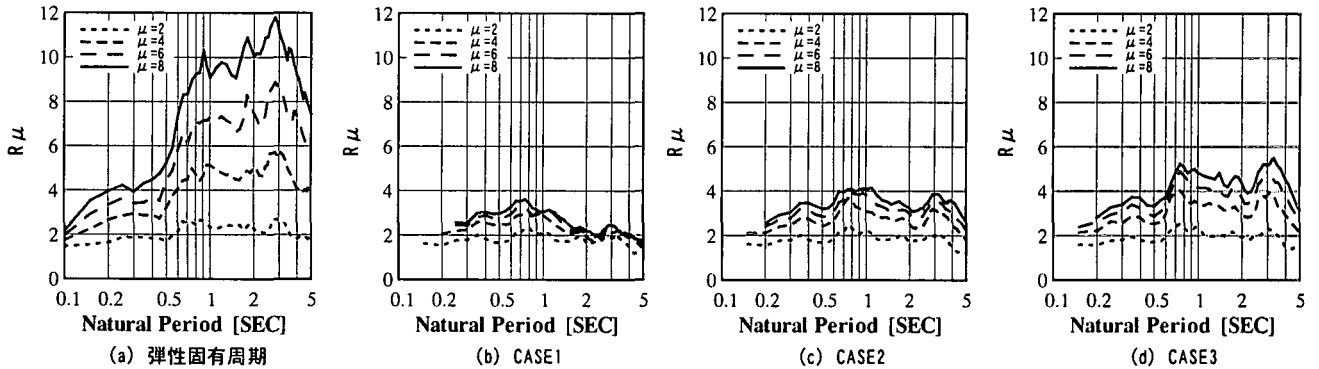


図8 10波形の平均による $R\mu$ スペクトル

(2) $R\mu$ の変動幅について

等価固有周期による $R\mu$ スペクトルの変動幅が、弾性固有周期によるものに比べ、どの程度小さくなっているかについて、標準偏差を用いた検討を行った。

図7は、各固有周期で算出した10波形の $R\mu$ の標準偏差を、弾性固有周期とCASE3の等価固有周期について示したものである。この図から判断して、等価固有周期のCASE3では、弾性固有周期に比べ標準偏差の値が1/2から1/3程度に小さくなっており、地震動特性による $R\mu$ の変動幅が小さくなっていることがわかる。

6 $R\mu$ スペクトル推定式の可能性

非線形動的解析により算出される $R\mu$ スペクトルの推定式を考える際に、地震動特性や固有周期によるグラフの変動幅が大きな問題点となるが、今回提案した等価固有周期を用いた場合には、 $R\mu$ スペクトルの変動がかなり小さくなることがわかった。

また、図8に、表1の10成分の $R\mu$ を単純平均したスペクトルを示すが、弾性固有周期のスペクトルに比べ、等価固有周期のスペクトルは比較的平坦な形状を示していることがわかる。

以上より、等価固有周期の算出方法を確立し、対象波形の数を増加させることにより、 $R\mu$ スペクトルの推定式を提案することも可能性であると考えられる。

また、等価固有周期による $R\mu$ スペクトルの推定式が提案できれば、橋梁の固有周期として靱性率に応じた等

価固有周期を用いることにより、地震時保有水平耐力法での非線形応答の推定精度を向上させることができると考えられる。

7 まとめ

本研究では、等価固有周期による $R\mu$ スペクトルにより、以下の結論を得た。

- ・等価固有周期による $R\mu$ スペクトルは、地震動特性や固有周期によるスペクトルの変動を小さくできる。
- ・等価固有周期による $R\mu$ スペクトルは、弾性固有周期による $R\mu$ スペクトルに比べ形状が平坦である。
- ・以上のことより、 $R\mu$ スペクトルの推定式の提案も可能であると考えられる。

今後の課題としては、等価固有周期の算出方法の確立や、地盤種別および地震動特性による影響の確認などが必要と考えられる。また、 $R\mu$ スペクトルは1質点系の応答を対象としており、多質点への拡大も必要である。

参考文献

- 1) Miranda, E. and Bertero, V.V., "Evaluation of Strength Reduction Factors for Earthquake-Resistant Design" Earthquake Spectra, Vol.10, No.2, 1994
- 2) 山本、田村、中尾、本田「リダクションファクタースペクトルの評価式について」第2回保有水平耐力法シンポジウム平成10年12月
- 3) 山本、本田、田村、中尾「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平成10年11月