

リダクションファクタースペクトルの評価式について

山本浩一¹・田村敬一²・中尾吉宏³・本田利器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 工修 京都大学 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

1 はじめに

地震動特性を表す一つの指標として、一質点弾塑性系の応答計算より求められるリダクションファクター (以降 $R\mu$ と記す) スペクトルが考えられる¹⁾。 $R\mu$ とは、一質点弾性系の必要降伏耐力を、弾塑性系の必要降伏耐力で除した値であり、例えばエネルギー一定則を仮定する場合、じん性率 μ を用いて $\sqrt{2\mu-1}$ として与えられるものである。 $R\mu$ を異なる固有周期の一質点系に対して算出することにより $R\mu$ スペクトルが得られる。 $R\mu$ スペクトルについては既往の研究により、いくつかの評価式が提案されており²⁾、弾性応答から弾塑性応答を推定する試みがなされている。そこで、本研究では既往の研究により提案されている評価式が、兵庫県南部地震を含む我が国で観測された強震記録による $R\mu$ スペクトルと比較し、どの程度適用性を有するかについて検討を行った。また、 $R\mu$ を用いて必要強度スペクトルを求めることができるが、これについても検討を行った。

2 解析モデル

非線形時刻歴応答解析を行うにあたって、非線形履歴モデルを与える必要がある。ここでは、バイリニアモデル、剛性低下型バイリニアモデル及び武田モデルの3種類のモデルについて、履歴モデルが $R\mu$ スペクトルに及ぼす影響について検討を行った。

解析に用いた波形は、表1に示される開北橋記録 TR 成分(番号6)と神戸海洋気象台記録 NS 成分である。

図1に、上記2種類の履歴モデルによるじん性率 $\mu=6$ の $R\mu$ スペクトルを示す。なお、各履歴モデルにおける2次勾配は全て $K2=0$ とし、剛性低下型モデルの剛性低下指数は $\beta=0.4$ とした。図1からわかるように、履歴モデルによる差異は比較的小さく、特に神戸海洋気象台記録では、ほとんど違いが見られない。したがって、本検

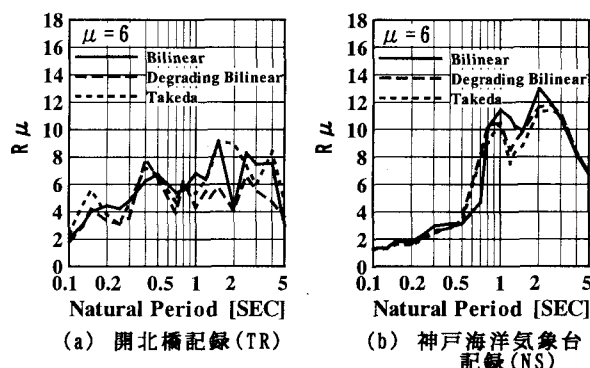


図1 各履歴モデルによる $\mu=6$ の $R\mu$ スペクトル

討ではできるだけ単純な履歴モデルを採用することとし、完全バイリニアモデルにより計算を行うこととした。ただし、 $R\mu$ スペクトルの値はほぼ一致している場合でも時刻歴応答には差異がある。

3 既往の $R\mu$ スペクトル評価式

既往の $R\mu$ スペクトルの評価式については、Mirandaらがまとめたもの²⁾がある。ここでは、その中から Arias and Hidalgo の式、Nassar and Krawinkler の式、Vidic, Fajfar and Fichtinger の式及び Miranda の式について検討を行った。また、式中の T 及び μ はそれぞれ初期剛性から計算される固有周期及びじん性率である。なお、解析に用いた強震記録は表1に示す16記録28成分であり、計算に用いた減衰定数は $h=0.05$ である。

(1) 評価式について

a) Arias and Hidalgo の評価式

$$R\mu = 1 + \frac{T}{kT_0 + \frac{T}{\mu-1}} \quad (3.1)$$

k 及び T_0 については、Miranda の計算例に準じ、そ

表1 計算に用いた強震記録

番号	観測地点名及び地盤種別	地震名	M	成分	最大加速度 (gal)
1	米山大橋 (I種)	1971年新潟県南西部	5.5	HB	179
2	小見川大橋 (III種)	1974年千葉県東方沖	6.1	HA,HB	106, 137
3	大船渡港 (II種)	1978年宮城県沖	7.4	E41S	226
4	小見川大橋 (III種)	1974年銚子沖	6.1	HB	111
5	開北橋 (I種)	1978年宮城県沖 (2月20日)	6.7	LG,TR	108, 161
6	開北橋 (I種)	(6月12日)	7.4	LG,TR	364, 413
7	板島橋 (II種)	1968年日向灘沖	7.5	LG,TR	196, 216
8	板島橋 (II種)	1968年愛媛県西部沿岸	6.6	LG,TR	594, 615
9	津軽大橋 (III種)	1983年日本海中部	7.7	LG	278
10	利根川河口堰 (III種)	1974年銚子沖	6.1	LG,TR	164, 127
11	神戸海洋気象台 (I種)	1995年兵庫県南部	7.2	NS,EW	818, 617
12	猪名川 (I種)			NS,EW	422, 417
13	大阪ガス荻合供給所 (II種)			YX	802, 687
14	JR 鷹取駅 (II種)			NS,EW	642, 666
15	東神戸大橋 (III種)			N12W,N78E	327, 281
16	ポートアイランド (III種)			NS,EW	341, 284

それぞれ $k=0.1$ 及び $T_0=0.2$ とした。

強震記録の加速度応答スペクトル及び速度応答スペクトルを算出し、それぞれの平均値を $\phi_{ev}V$ 及び $\phi_{ea}A$ とした。

b) Nassar and Krawinkler の評価式

$$R\mu = [c(\mu-1)+1]^{1/c} \quad (3.2)$$

$$c(T, \alpha) = \frac{T^\alpha}{1+T^\alpha} + \frac{b}{T} \quad (3.3)$$

a 及び b については、 α の値によって表2のように提案されている。 α は初期剛性に対する二次剛性の比率である。ここでは、 $\alpha=0.0$ を採用し、 $a=1.0$ $b=0.42$ とした。

表2 α に対応する係数 a 及び b

α	a	b
0	1.0	0.42
0.02	1.0	0.37
0.1	0.8	0.29

c) Vidic, Fajfar and Fischinger の評価式

$$R\mu = (\mu-1)\frac{T}{T_0} + 1.0 \quad \text{for } T \leq T_0 \quad (3.4)$$

$$R\mu = \mu \quad \text{for } T > T_0 \quad (3.5)$$

$$\text{ここに、} \quad T_0 = 0.65 \mu^{0.3} T_1 \quad (3.6)$$

$$T_1 = 2\pi \frac{\phi_{ev} V}{\phi_{ea} A} \quad (3.7)$$

V: 地盤上での最大速度

A: 地盤上の最大加速度

ϕ_{ev} : 速度応答スペクトル倍率

ϕ_{ea} : 加速度応答スペクトル倍率

$\phi_{ev}V$ 及び $\phi_{ea}A$ は、それぞれ、最大速度応答及び最大加速度応答に相当するため、本解析では、計算に用いた

d) Miranda の評価式

$$R\mu = \frac{\mu-1}{\phi} + 1 \quad (3.8)$$

ここに、

For rock sites

$$\phi = 1 + \frac{1}{10T - \mu T} - \frac{1}{2T} \exp \left[-\frac{3}{2} \left(\ln T - \frac{3}{5} \right)^2 \right] \quad (3.9)$$

For alluvium sites

$$\phi = 1 + \frac{1}{12T - \mu T} - \frac{2}{5T} \exp \left[-2 \left(\ln T - \frac{1}{5} \right)^2 \right] \quad (3.10)$$

For soft soil sites

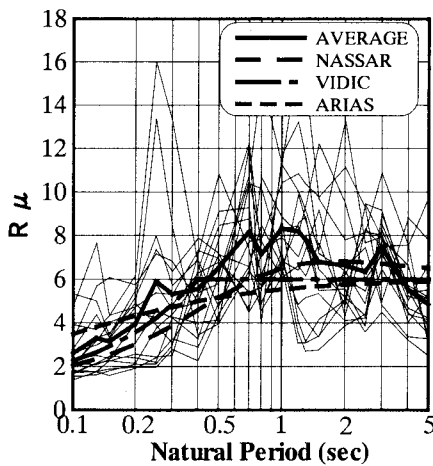
$$\phi = 1 + \frac{T_g}{3T} - \frac{3T_g}{4T} \exp \left[-3 \left(\ln \frac{T}{T_g} - \frac{1}{4} \right)^2 \right] \quad (3.11)$$

本解析では、兵庫県南部地震以外の強震記録、並びに兵庫県南部地震による強震記録のそれぞれについて、速度応答スペクトルから判定した卓越周期の平均値を算出し、それを T_g とした。

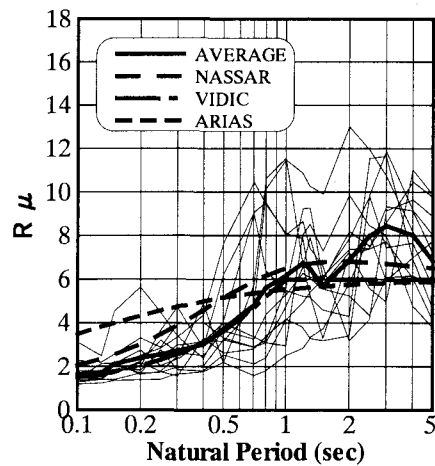
(2) 評価式の適応性

地盤条件を明確に考慮しているのは Miranda の式のみであるが、Vidic らの式は $(\phi_{ev}V/\phi_{ea}A)$ により地盤条件を区分できるため、Miranda 及び Vidic らの式による評価では地盤種別を考慮することとした。Nassar らの式及び Arias らの式では地盤条件を考慮していないため、地盤種別による区分は行わないこととした。なお、Vidic らの式については、地盤種別を考慮しない場合にも検討対象とした。

図2に、地盤種別を考慮しない場合についての兵庫県



(a) 兵庫県南部地震記録以外の $R\mu$ スペクトルと評価式の比較 ($\mu=6$)



(b) 兵庫県南部地震記録の $R\mu$ スペクトルと評価式の比較 ($\mu=6$)

図2 $R\mu$ スペクトルの評価式との比較 (Nassar, Vidic, Ariasらの式)

南部地震記録以外の $R\mu$ スペクトルと評価式の比較、並びに兵庫県南部地震記録の $R\mu$ スペクトルと評価式の比較を示す。

図2によれば、各強震記録で $R\mu$ スペクトルのばらつきが大きい。兵庫県南部地震記録以外の場合、平均値と比較すると Arias ら、Nassar ら及び Vidic らの評価式は、いずれも同程度または若干低めの結果を与えている。一方、兵庫県南部地震記録の場合、1sec 程度以下の固有周期領域については、Arias ら及び Nassar らの式は平均値を上回るのに対して、Vidic らの式は概ね平均値と適合する。また、1sec 程度以上の固有周期領域においては、いずれの評価式も概ね同程度の値を示している。

次に、地盤種別ごとに Miranda 及び Vidic らの式と強震記録から算出した $R\mu$ スペクトルとの比較を、図3及び図4に示す。地盤種別については、Miranda の式を用いる場合には、rock、alluvium 及び soft soil を、それぞれ、道路橋示方書³⁾のⅠ種、Ⅱ種及びⅢ種地盤と見なすことにした。また、Vidic らの式を用いる場合には、各地盤種別の強震記録から $\phi_{av}V/\phi_{sa}A$ を求め、その平均値を用いた。

図3の兵庫県南部地震以外の強震記録の場合、Miranda の式は、Ⅰ種地盤の固有周期1sec 程度以下の領域で強震記録から求めた $R\mu$ スペクトルよりも小さい値を示し、Ⅲ種地盤の固有周期0.3sec 程度以下の領域では大きな値を示す以外は、全般に強震記録から求めた $R\mu$ スペクトルと整合している。一方 Vidic らの式は、Ⅱ種地盤とⅢ種地盤の固有周期1sec 以下の領域で強震記録から求めた $R\mu$ スペクトルよりも小さい値を示す以外は、概ね強震記録から求めた $R\mu$ スペクトルと整合している。

図4の兵庫県南部地震の強震記録の場合、Miranda の式は、Ⅰ種地盤の固有周期0.3sec 以下及びⅡ種地盤の1sec 以下の領域で強震記録から求めた $R\mu$ スペクトルより大きい値を示す以外は適合性が良く、特にⅢ種地盤に

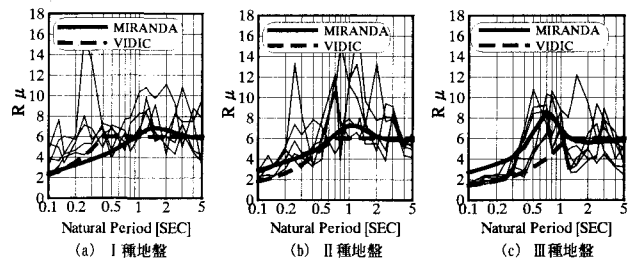


図3 兵庫県南部地震記録以外の $R\mu$ スペクトルと評価式の比較 ($\mu=6$)

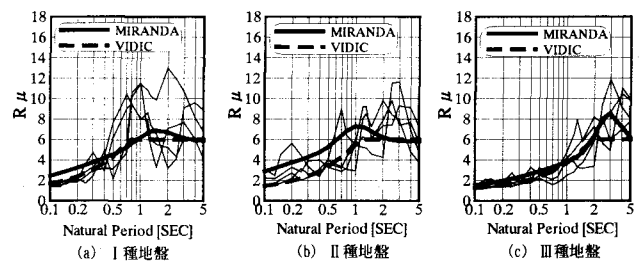


図4 兵庫県南部地震記録の $R\mu$ スペクトルと評価式の比較 ($\mu=6$)

おいては広い周期帯で整合している。一方、Vidic らの式は、Miranda の式より低めの値を与える傾向があり、Ⅰ種地盤の固有周期1sec 以上及びⅢ種地盤の2sec 以上の領域において、強震記録から求めた $R\mu$ スペクトルより小さい値を示す以外は適合性が良い。また、Vidic らの式は $R\mu$ の最大を μ としているため、兵庫県南部地震記録の $R\mu$ スペクトルの特徴である、1~3sec 付近に見られるピーク⁴⁾が再現できない。ただし、 $R\mu$ の最大値を μ (変位一定則が最大) としているのは Arias らも同様である。

$R\mu > \mu$ となる場合とは、図5に示すように、弾性応答変位 δ_{ye} よりも弾塑性応答変位の方が小さくなる場合である。解析上、そのような現象が生じ得るのは明らかである。しかし、実際の構造物の動的な挙動については必ずしも明確になっていないのが現状であり、 $R\mu > \mu$ となる現象については、実験を含め検討が必要であると考えられる。また、耐震設計を行う上で $R\mu$ の上限値をどのように考えるかについても、今後十分な検討が必要である。

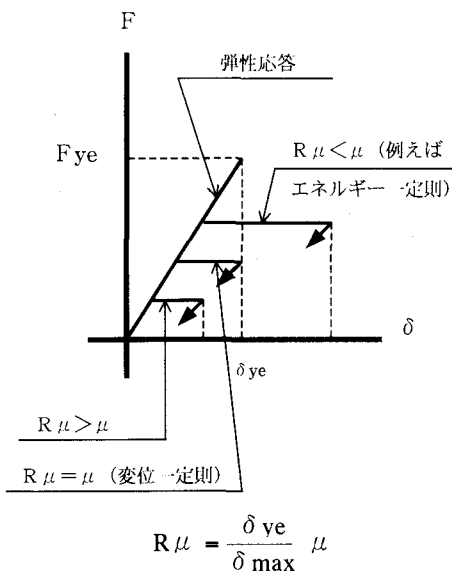


図5 $R\mu$ と μ の関係

$R\mu$ スペクトルは一般に、強震記録ごとの変動が大きく、単純な式で精度良く評価することは困難であるが、今回の検討から、図4のⅢ種地盤のようにかなり再現性の良い式も見られることから、 $R\mu$ スペクトルに影響を及ぼす地震動特性を把握できれば、評価式の提案の可能性も考えられる。

4 必要強度スペクトルについて

必要強度スペクトルは、構造物の弾塑性応答を考慮した耐震設計をする場合、有用な指標である。必要強度スペクトルは1質点弾塑性型せん断バネモデルにより、目標のじん性率になるために必要な降伏耐力を求めたものであり、加速度応答スペクトルを $R\mu$ で除したものと同値である。

図6に神戸海洋気象台記録 NS 成分、JR 鷹取駅記録 NS 成分及び開北橋記録 TR 成分の必要強度スペクトルを示す。また、図6にそれぞれの記録の $R\mu$ スペクトルを示す。

図7の神戸海洋気象台記録 NS 成分と JR 鷹取駅記録 NS 成分では、兵庫県南部地震記録で特徴的な、固有周期 2sec 付近のピークがあり、 $R\mu > \mu$ となる箇所が確認できる。開北橋記録 TR 成分も 0.4sec、1.5sec 及び 3sec 付近に $R\mu > \mu$ となる箇所が見られ、前述したような $R\mu$ が μ を越える部分が比較的広く存在することがわかる。一方、必要強度スペクトルのみを用いる場合、 $R\mu > \mu$ となる周期帯は確認することができず、場合によっては過度に低減した必要強度を与える危険性があることを認識しておく必要がある。

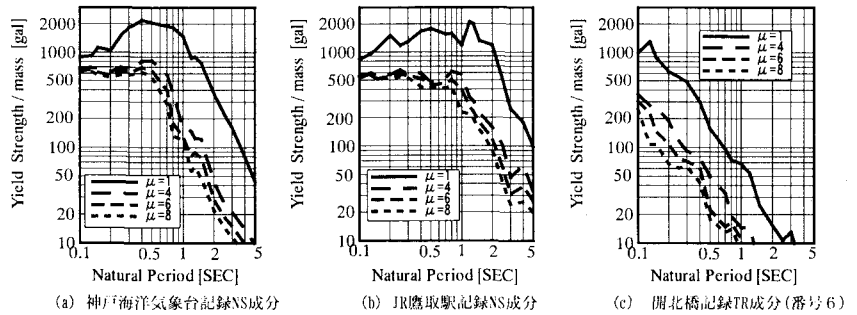


図6 必要強度スペクトル

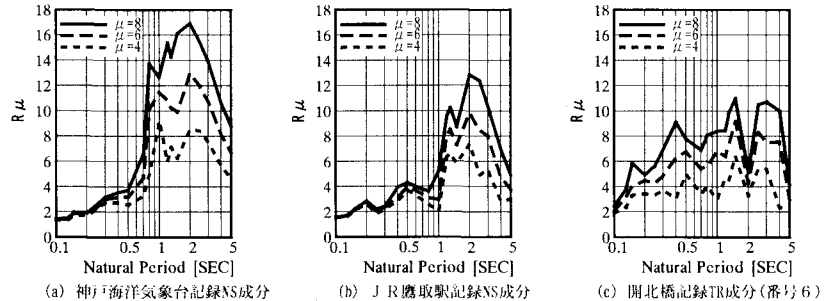


図7 $R\mu$ スペクトル

5 まとめ

過去に提案されたりダクションファクタースペクトルの評価式について、その適合性を検討した。その結果、強震記録ごとのばらつきは大きいものの、かなり適合性が良いケースも見られ、 $R\mu$ に影響を及ぼす地震動特性を把握できれば、評価式の提案も可能であると考えられる。また、評価式を提案する上で、 $R\mu$ が変位一定則を超える ($R\mu > \mu$) 部分については、応答解析の信頼性も含め実務レベルでの検討が必要と考えられる。

必要強度スペクトルは、 $R\mu$ スペクトルと等価なものと考えられるが、そのスペクトルからだけでは $R\mu > \mu$ となる周期帯が確認できないため、必要強度を過小評価してしまう可能性があることを認識しておかなければならない。

参考文献

- 1) 山本、田村、本田「直下型の地震動が非線形系の応答に与える影響について」第24回地震工学研究発表会 平成9年7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) 道路橋示方書 V耐震設計編 平成8年12月
- 4) 山本、田村、本田「兵庫県南部地震による地震動が非線形系の応答に与える影響について」第52回土木学会年次学術講演会 I—B360 平成9年9月