

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

山本 浩一¹・田村 敬一²・本田 利器³

¹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 茨城県つくば市旭1番地)
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 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 茨城県つくば市旭1番地)

兵庫県南部地震のような内陸直下型地震の地震動が、構造物の非線形挙動に与える影響を解明するため、 $R\mu$ (リダクションファクター) スペクトルにより検討を行った。 $R\mu$ は、1質点弾塑性系の最大応答塑性率が、ある与えられた値 μ に一致するために必要な降伏耐力 F_y と、同じ系が塑性化しないために必要な耐力 F_{ye} との比として $R\mu = F_{ye}/F_y$ と表される値である。これにより、兵庫県南部地震において震源域近傍で観測された地震動と、過去に観測された地震動の $R\mu$ スペクトルには、違いがあることがわかった。本研究では、両者の $R\mu$ スペクトルの差異が生ずるメカニズムについて検討を行うと共に動的解析用の波形についても検討を行った。

Key Words: strength reduction factor, time history response analysis, ductility factor, inelastic response, ground motion characteristics, Hyogoken Nanbu Earthquake

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、設計における非線形解析の重要性が認識されてきており、道路橋示方書にも動的解析による設計が示されている。しかし、動的解析を行うにあたって、入力波形が、非線形系の応答に、どのような影響を与えるのかについては十分解明されていないのが現状である。

したがって、本研究では、地震動が非線形系に与える影響について、特に直下型地震と、我が国で観測された過去の地震との違いに着目し、検討を行った。また、動的解析を行う場合の入力波形についても検討を行った。

2. 解析方法

本研究では、1質点弾塑性型せん断バネモデルにより非線形時刻歴応答解析を行い、 $R\mu$ (リダクションファクター) スペクトルにより整理を行った。 $R\mu$ は、系が弾性領域内で耐えるために必要な降伏耐力(F_y)と、弾塑性応答が目標とする靱性率(μ)を与える場合の降伏耐力(F_y)によって $R\mu = F_{ye}/F_y$ により求められる値(図-1 参照)である。すなわち、 $R\mu$ はエネルギー一定則における $\sqrt{2\mu - 1}$ に相当するものである。この場合の F_y は、目標の靱性率になるように降伏耐力を変化さ

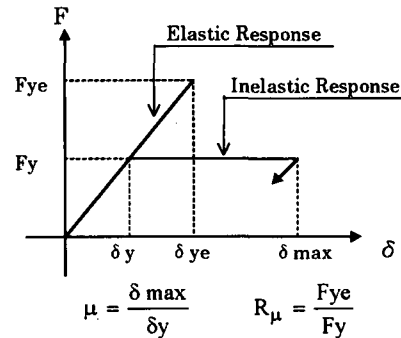


図-1 $R\mu$ の計算方法

表-1 計算に用いた強震記録

番号	観測地点名	地震名	M	最大加速度(gal)
1	開北橋(TR)	1978年	7.4	414
2	開北橋(LG)	宮城県沖		364
3	板島橋(TR)	1968年	7.5	217
4	板島橋(LG)	日向灘沖		197
5	津軽大橋(LG)	1983年	7.7	278
		日本海中部		
6	神戸海洋気象台(NS)	1995年	7.2	818
7	大阪ガス葦合供給所(N27W)			802
8	JR 鷹取駅(NS)			642
9	東神戸大橋(N12W)			327
10	ポートアイランド(NS)			341

※ LG及びTRは、それぞれ、橋軸方向及び橋軸直角方向を表す

せ収束計算を行い求めた。このようにして求まる $R\mu$ を複数の固有周期に対して計算を行い、 $R\mu$ スペクト

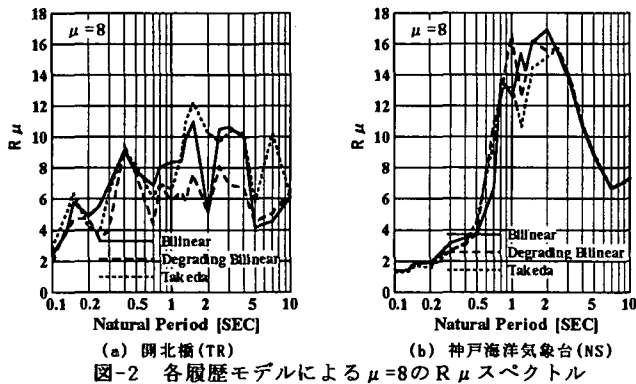


図-2 各履歴モデルによる $\mu=8$ の $R\mu$ スペクトル

ルを作成した。ここで、固有周期は弾性領域における剛性から求められる値である。なお、計算に用いた内部減衰 h は線形・非線形ともに $h=0.05$ とした。

解析に用いた強震記録は表-1 に示す 10 波形である。波形番号の 1~5 までは道路橋示方書のタイプ I に相当し、6~10 はタイプ II に相当する元波形である。

3. 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が、ここでは、パイリニアモデル、剛性低下型パイリニアモデル、武田モデルの 3 種類のモデルについて検討を行った。

図-2 に、波形番号 1 の開北橋 (TR) と 6 の神戸海洋気象台 (NS) の強震記録による、 $\mu=8$ の各履歴モデルによる $R\mu$ スペクトルを示す。これによると、履歴モデルの影響は明確ではなく、特に神戸海洋気象台の強震記録による $R\mu$ スペクトルは、各履歴モデルでほとんど差がない。したがって、以降の検討では $R\mu$ スペクトルの傾向を把握するために、履歴特性が単純なパイリニアモデルを用いることとした。

4. 地震動による $R\mu$ スペクトルの特徴

図-3 に開北橋記録及び神戸海洋気象台記録による $\mu=4,6,8$ の $R\mu$ スペクトルを示す。これによると、開北橋記録の $R\mu$ スペクトルでは、広い周期帯で $R\mu$ の値が大きく、また靱性率 (μ) による $R\mu$ の変化が大きいことがわかる。一方、神戸海洋気象台記録の $R\mu$ スペクトルは、短周期側では靱性率によらず値が小さく、固有周期が 0.5sec を越えたあたりから急激に立ち上がり 2.0sec 付近でピークを迎えている。また、ピークの現れ方が、大きな一つの山で形成されており、開北橋記録の $R\mu$ スペクトルとはかなり形状が異なっている。そこで、兵庫県南部地震で観測された強震記録による $R\mu$ スペクトルと、過去に観測された強震記録による $R\mu$ スペクトルの違いを調べるため、 $\mu=6$ について過去の地震及び

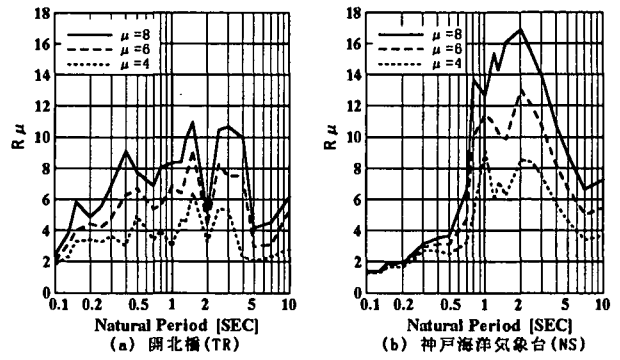


図-3 開北橋と神戸海洋気象台強震記録の $R\mu$ スペクトル

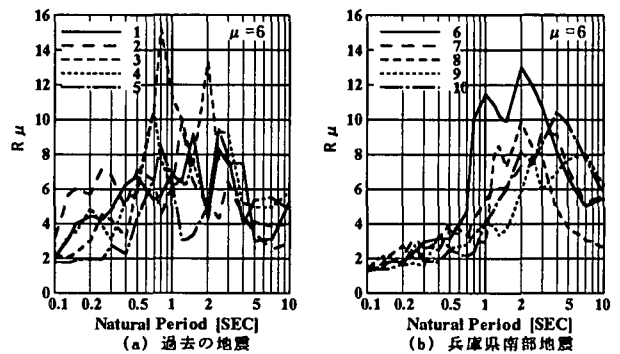


図-4 過去の地震と兵庫県南部地震記録の $R\mu$ スペクトル ($\mu=6$)

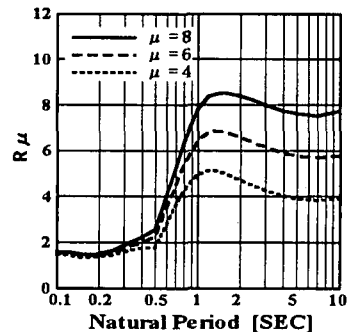


図-5 正弦波 1 周期の $R\mu$ スペクトル

兵庫県南部地震による強震記録の $R\mu$ スペクトルを求め、それを重ねて表示したものを図-4 に示す。なお、図-4 の凡例の番号は、表-1 の番号と一致している。これによると、兵庫県南部地震記録では、いずれも神戸海洋気象台に見られるような傾向があり、過去の強震記録とは $R\mu$ スペクトルの形状が異なっていることがわかる。したがって、兵庫県南部地震は過去に観測された地震に比べ、実構造物の非線形挙動に対しても特徴的な影響を与えたものと推測される。

そこで、兵庫県南部地震の強震記録による $R\mu$ スペクトルの特徴が生じる要因について検討を行うため、これらの地震動に特徴的であった衝撃的な波形を考え、これを単純化し、正弦波 1 周期のみの波形による $R\mu$ スペクトルを求めた。ここで計算した正弦波の周期は $T=1.0\text{sec}$ である。図-5 にその $R\mu$ ス

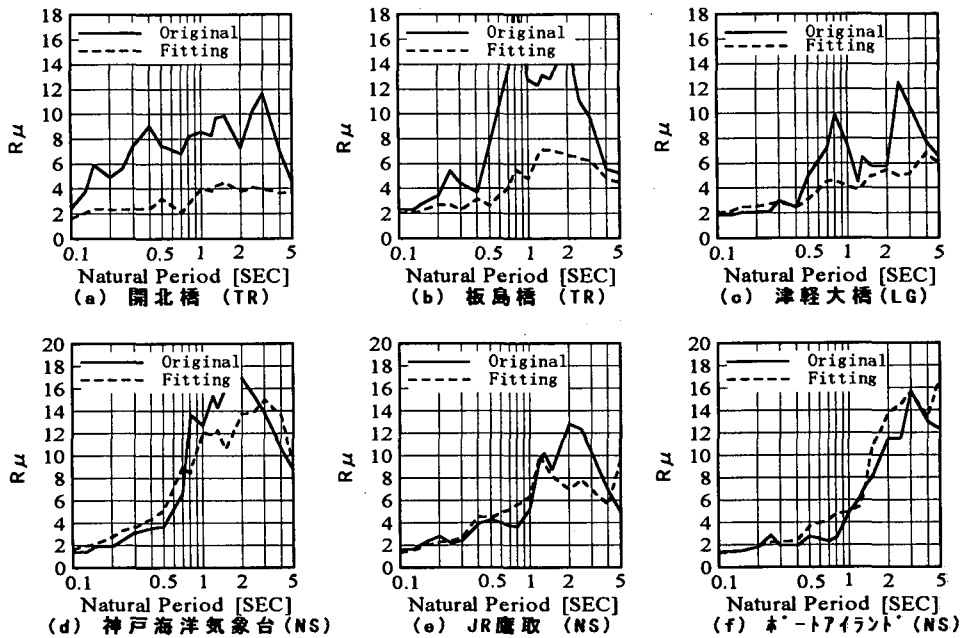


図-6 元波形と標準スペクトルに調整した波形の $\mu=8$ の $R\mu$ スペクトル

ペクトルを示す。この正弦波1周期の $R\mu$ スペクトルは兵庫県南部地震の強震記録によるものと似た傾向を示しており、短周期側で靱性率によらず低い $R\mu$ を示し、固有周期 0.5sec 以降急激に立ち上がっているのがわかる。このことから、衝撃的な主要動が、兵庫県南部地震による強震記録から得られる $R\mu$ スペクトルの特徴の一要因であると考えられる。

5. 動的解析用の入力地震波について

兵庫県南部地震の地震動と、過去に観測された地震動は、 $R\mu$ スペクトルにおいて違いがあることがわかったが、これは構造物の非線形挙動を考える上でも重要であり、地震の種類により非線形系に与える影響が異なることを意味している。設計上、この違いを考慮することは必要であると考えられ、道路橋示方書においても、2種類の地震動が定められている。しかし、一般に橋梁などの動的解析用の入力波形は、振動数領域における振幅調整によって、目標の線形加速度応答スペクトルに適合するように作成された、いわゆる調整波形¹⁾であり、元波形とは異なる加速度波形であるため、その影響の違いを把握しておくことが重要であると考えられる。したがって、ここでは元波形と調整波形の $R\mu$ スペクトルの違いについて検討を行う。

(1) 標準スペクトルに適合する調整波形と元波形の $R\mu$ スペクトルについて

道路橋示方書に示される動的解析用の標準スペクトル²⁾に適合する調整波形を作成し、その波形と元

波形の $R\mu$ スペクトルについて比較を行った。

タイプI、タイプIIから3波形ずつ抽出し、これらの元波形と調整波形の $R\mu$ スペクトル ($\mu=8$) を図-6に示す。ここで、(a)(b)(c)がタイプIで、(d)(e)(f)がタイプIIである。

これによると、タイプIの調整波形は、元波形に比べ、なだらかで小さな $R\mu$ スペクトルを有していることがわかる。一方、タイプIIについては、元波形と調整波形の $R\mu$ スペクトルには大きな差はない。

これは、タイプIIの場合、振幅調整は元波形の加速度応答スペクトルを平滑化する程度の調整であるため、調整波形は元波形の特性を維持しているものと考えられる。一方、タイプIの場合、元波形の加速度応答スペクトルは標準スペクトルに対して、特に長周期成分が小さく、波形調整における振幅の調整度合いが大きくなり、地震動特性も影響を受けているものと考えられる。

以下に、振幅調整が $R\mu$ スペクトルに与える影響について検討する。

(2) 目標とするスペクトルが $R\mu$ スペクトルに与える影響について

振幅調整を行う場合の、目標とする加速度応答スペクトルが、 $R\mu$ スペクトルに与える影響を調べるため、図-6で用いた6波形について、図-7に示すように目標の加速度応答スペクトルの長周期成分を変化させ、それぞれの目標スペクトルに適合する調整波形を作成した。それらの $R\mu$ スペクトルを図-8に示す。

タイプIの FittingA は道路橋示方書の標準スペ

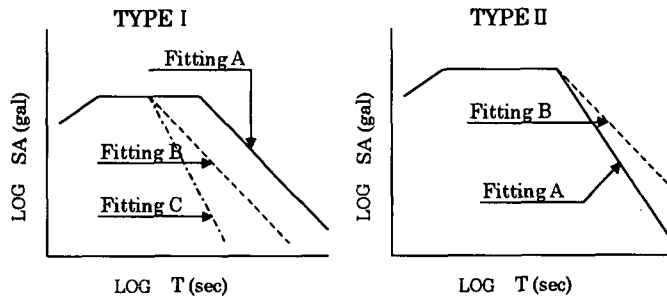


図-7 目標加速度応答スペクトルの調整

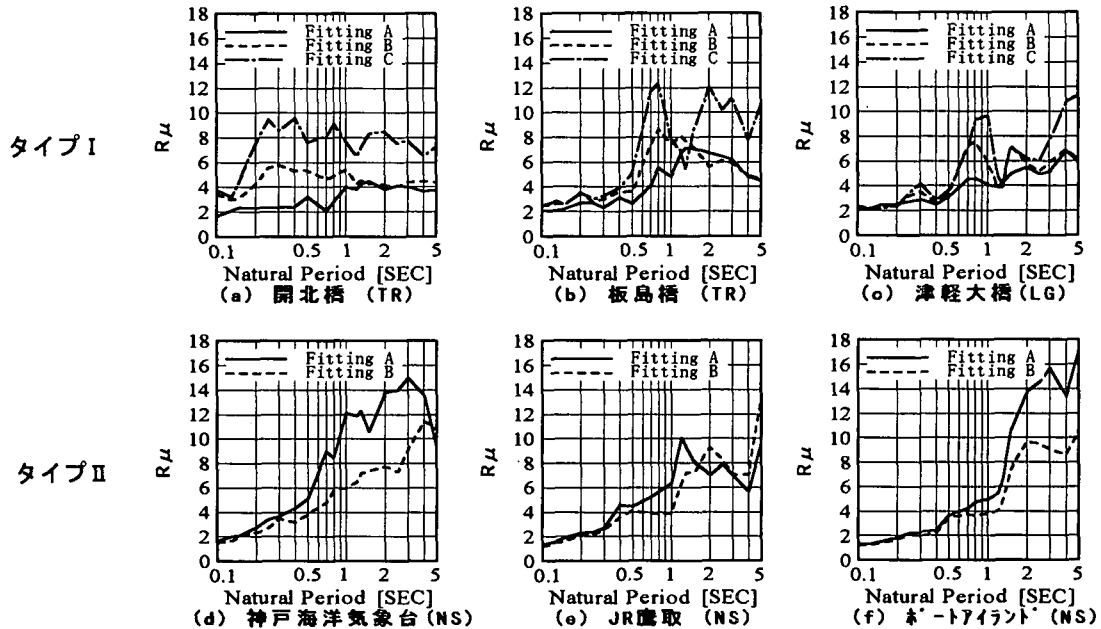


図-8 長周期成分を変化させた調整波形の $\mu=8$ の $R\mu$ スペクトル

クトルであり、Bは長周期領域での勾配はAと同じであるがスペクトル肩部の固有周期を変えたものである。また、FittingCは、長周期領域での勾配を元波形のスペクトル勾配に合わせたものである。タイプIIについては、FittingAは標準スペクトルで、Bは長周期領域の勾配を両対数グラフ上で1:1にしたものである。

タイプIの $R\mu$ スペクトルは、図-8の(a)～(c)に示されるように、長周期成分が小さいほど $R\mu$ の値は大きくなっており、FittingCでは元波形に近い $R\mu$ (図-6参照)となっている。タイプIIの $R\mu$ スペクトルについても同様の結果となっており、 $R\mu$ の値はFittingAの方がBよりも大きくなる傾向にある。

以上のことより、振幅調整波形の $R\mu$ スペクトルは、線形加速度応答スペクトルの特性に影響を受けることがわかる。

6. まとめ

本研究では、 $R\mu$ スペクトルを用いて、地震動が非線形系の応答に与える影響について検討を行った。その結果、直下型地震である兵庫県南部地震の強震記録による $R\mu$ スペクトルには、過去の強震記録とは特徴的な違いがあり、その一つの要因として、これらの波形に特徴的な衝撃的な波形が考えられる。

また、直下型地震と過去の大地震の $R\mu$ スペクトルの差異をふまえ、耐震設計等で用いる振幅調整波形の $R\mu$ スペクトルについても検討した。その結果、目標とする線形加速度応答スペクトルの特性が、 $R\mu$ スペクトルに影響を与えることがわかった。

非線形応答解析を前提とした入力地震動の設定においては、今後このような影響を考慮していくことが重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所「動的解析用入力地震動の設定法」土木研究所資料 第2120号、昭和59年3月
- 2) 道路橋示方書・同解説V耐震設計編 日本道路協会 平成8年12月