

### 3 重応答スペクトルを用いた RC 橋脚の耐震設計に関する一検討

大阪産業大学大学院 甲田 啓太

#### 1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震での被災経験から、従来までの仕様設計に対して性能照査型設計の考え方が積極的に取り入れられており、許容できる塑性率の議論は対象とする構造物の耐震性を検討する上で非常に重要な要素となる。

既往の研究<sup>1)</sup>では必要強度と残留変位比の關係に着目し、周期特性の異なる地震動を使用してその分布特性を分析してきた。そして、耐震設計に関する簡易的な指標の作成を目的に、限られた特性を有する地震動を用い、暫定的に作成した図面から耐震性能の照査に対する考察を行ってきた。

本検討では、上記の内容より、非線形応答スペクトルのトリパータイト表示<sup>2)</sup>から、固有周期を横軸として、強度や残留変位に関する複数の情報を読み取ることができる図面を作成する。そして、道路橋示方書耐震設計編(平成24年版)による残留変位の照査<sup>3)</sup>が3重応答スペクトルを用いて実施可能であることを示し、耐震設計に対する適応性と応用性を検討する。さらに、本図面から得られる結果と非線形応答解析結果による得られる結果との比較分析を加える。

#### 2. 解析の概要

本検討での非線形応答解析はすべて1自由度系により実施し、所定の塑性率へ収束させる。その際、目標塑性率を2, 5, 8の3種とし、単位質量で固有周期 $T$ は0.1~5.0秒の範囲で変化させた。また、数値積分はNewmarkの $\beta$ 法( $\beta=1/6$ )を使用し、減衰定数は5%、時間刻みは0.001秒とした。復元力特性にはMasing則に従うバイリニアモデルと骨格曲線がバイリニア型のTakedaモデル(除荷時剛性低下指数 $\alpha=0.5$ )の2種を用い、両者とも剛性比 $r$ は0とした。入力地震動は、既往の研究<sup>1)</sup>より、平成7年兵庫県南部地震 JMA 神戸 NS 成分(以下、神戸 NS)、平成19年新潟県中越沖地震 K-NET 柏崎 NS 成分(以下、柏崎 NS)、平成23年東北地方太平洋沖地震 K-NET 築館 NS 成分(以下、築館 NS)の3波を使用した。

#### 3. 非線形応答スペクトルのトリパータイト表示

3重応答スペクトルは一般に地震応答スペクトルに対して適用され、減衰力が微小であるという仮定のもと、固有周期等を介した各スペクトル間の關係式が存在している。

そして、両対数軸であるとき式(1),(2)に示す対数關係として表される。

$$\log S_a = \log p S_v - \{\log T - \log(2\pi)\} \quad (1)$$

$$\log S_d = \log p S_v + \{\log T - \log(2\pi)\} \quad (2)$$

ここに、 $S_a$ : 加速度応答スペクトル、 $p S_v$ : 擬似速度応答スペクトル、 $S_d$ : 変位応答スペクトルである。

トリパータイト表示では、加速度と変位の軸線は45度の傾きを有している必要があり、これは、 $\log T - \log(2\pi)$ の項によって固有周期度に45度の傾きが生じるためである。

また、スペクトル間の關係式を降伏変位 $x_y$ に対して適用すると、式(3)のように、弾性固有周期を用いて降伏加速度 $a_y$ が算出され、必要強度と同義であるため、非線形に関連する諸量に対してトリパータイト表示が可能となる。

$$a_y = (2\pi/T)^2 x_y = (k_1/m) x_y \quad (3)$$

#### 4. 耐震設計への適用

道路橋示方書では、慣性力作用位置の100分の1として定義される許容残留変位 $x_{Ra}$ と式(4)に示す設計残留変位 $x_R$ から、耐震性能2における残留変位の照査<sup>3)</sup>が行われており、設計残留変位が許容残留変位を上回らないことを規定している。

$$x_R = C_R (\mu_r - 1)(1 - r) x_y \quad (4)$$

ここに、 $C_R$ : 残留変位補正係数、 $\mu_r$ : 最大応答塑性率である。

残留変位補正係数は道路橋示方書に準拠すると0.6として与えられ、剛性比は0とするため、設計残留変位は塑性率が定まっている場合、降伏変位に定数倍することで算出することが出来る。すなわち、固有周期度に得られる降伏変位のスペクトル形状を変化させないため、軸を追加させることで設計残留変位を読み取ることができる。同様の考え方は、非線形応答の簡便な評価法として知られる所要降伏震度に対しても適用でき、必要強度を重力加速度で除して得られるため、スペクトルに定数倍することで分析することが可能となる。

そのため、3重応答スペクトルの軸にそれぞれ定数倍した目盛りを加えれば、一つのスペクトルから固有周期を横軸として、強度に対する変位や残留変位に関する諸量を分析することが可能となる。したがって、その他のスペクト

ルに対しても応用できる可能性がある。

図-1 に、Takeda モデルでの非線形応答スペクトルをトリパーティット表示させ、表-1 における3種のRC橋脚の固有周期と同時に示す。各地震動ごとにスペクトルの卓越は大きく異なり、塑性率2に着目すると橋脚1及び2では神戸NSの必要強度が大きい、橋脚3では築館NSが最大となっている。また、疑似降伏速度は塑性率が大きくなるほど短周期側に卓越周期が移行しており、構造物の非線形性によって共振現象の影響を大きく受ける固有周期が変化することが読み取れる。

続いて、残留変位の照査により耐震設計への適応性を検討する。表-1 より慣性力作用位置の情報から、各橋脚の許容残留変位は順に、135mm, 105mm, 75mm となる。ここで、神戸NSを例として、図-1 から読み取れる設計残留変位を表-2 に示す。設計残留変位と許容残留変位を比較すると、橋脚1及び3では全塑性率で耐震性能2における残留変位の照査を満足しているが、橋脚2では塑性率8において設計残留変位が許容値を超えたため、許容塑性率に8を設定すると耐震性能2を満足できない結果が得られた。

上記のように図-1 を使用して、耐震性能2における残留変位の照査が簡易的に実施可能であることが分かる。そこで、図-2 に神戸NSで塑性率2を例として、図-1 より得られる結果と非線形応答解析結果により得られる残留変位を重ねて示す。Takeda モデルを用いた場合には、設計残留変位が非線形応答解析結果を上回っており、全体的に安全側の解を与えていることが分かる。しかし、過剰に大きく評価している固有周期も存在しており、橋脚の断面等を過大に評価する可能性がある。

### 5. まとめ

耐震設計に関する簡易的な指標の作成を目的に、3重応答スペクトルを利用することで、その図面の耐震設計に対する適応性と応用性を検討した。非線形応答スペクトルのトリパーティット表示によって、ある固有周期における複数の諸量を一度に推定でき、慣性力作用位置の情報があれば、残留変位の照査が実施できるなど、現行の耐震設計との適応性も良いため、設計業務の複雑性を低減できると考えられる。

しかし、得られる設計残留変位は非線形応答解析結果と比較して、過剰に安全側の解を与える可能性もあるため、この点は今後の課題として挙げられる。

謝辞：入力地震動に関して、気象庁及び国立研究開発法人防災科学技術研究所の観測波形を使用させて頂きました。

表-1 各橋脚の固有周期と慣性力作用位置

	固有周期(s)	慣性力作用位置(mm)
橋脚1	0.62	13500
橋脚2	0.46	10500
橋脚3	0.28	7500

表-2 設計残留変位 (mm)

	$\mu=2$	$\mu=5$	$\mu=8$
橋脚1	51	80	87
橋脚2	42	89	129
橋脚3	14	40	62

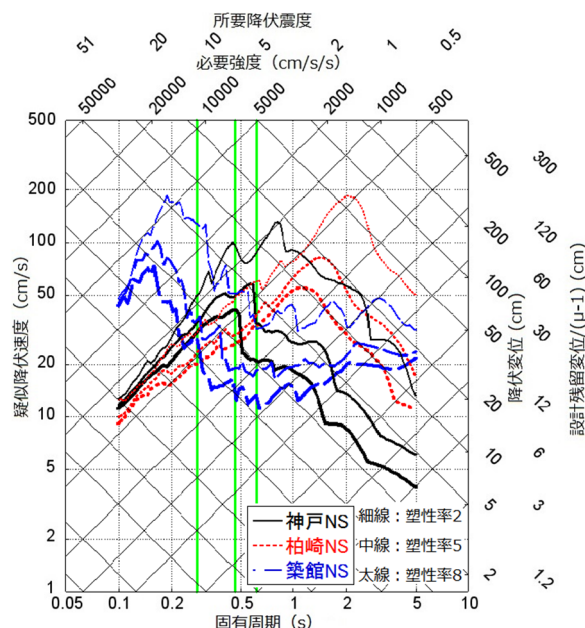


図-1 3重応答スペクトル

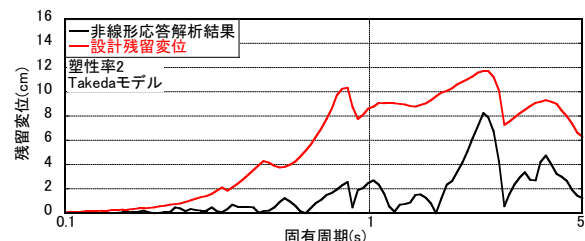


図-2 非線形応答解析結果と設計残留変位

ここに記して謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 甲田啓太, 山下典彦, 宮脇幸治郎: RC橋脚の耐震設計に3重応答スペクトルを用いた一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.697-702, 2017.
- 2) Blume J.A., Newmark N.M. and Corning L.H.: Design of Multistory Reinforced Concrete Buildings for Earthquake Motions, Portland Cement Association, pp.1-16, 1961.
- 3) 社団法人 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善出版, pp.100-103, 2012.