

論文 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

甲田 啓太*1・山下 典彦*2・宮脇 幸治郎*3

要旨：兵庫県南部地震以降、性能照査型耐震設計の考え方が取り入れられており、許容塑性率を議論することは非常に重要な要素となっている。残留変位比は可能最大残留変位に対する残留変位の割合を示したもので、同じ解析条件であっても固有周期によって変動する。本研究では、道路橋を 1 自由度系にモデル化し、卓越周期の異なる入力地震動を用いた非線形応答解析から、地震動の周期特性が必要強度と残留変位比の関係に及ぼす影響を調べ、道路橋示方書耐震設計編(H24 年版)における残留変位の照査が 3 重応答スペクトルを用いて行えることを提案し、耐震設計への適用性について考察した。

キーワード：RC 橋脚、耐震性能、許容塑性率、必要強度、残留変位比、3 重応答スペクトル

1. はじめに

平成 7 年兵庫県南部地震に代表される大都市を襲った地震とそれに付随する橋梁の甚大な被災経験から、性能照査型設計の考え方が積極的に導入されており、強震時に構造物の応答が塑性域に伸展することを想定した上で許容できる塑性率や定められた耐震性能を満たすことは構造物の耐震性を考える上で重要な要素となっている。

強震動作用時の構造物における許容塑性率を残留変位の観点から検討する手段として、平成 6 年に川島ら¹⁾によって残留変位比応答スペクトルが提案された。許容塑性率に関する他の検討手段としては、その後、Iemura ら²⁾により必要強度スペクトルの提案がなされ、許容できる塑性率を高めることで、降伏強度の低減が可能であることが示されている。

必要強度と残留変位比については多くの研究が存在しているが、両者とも許容塑性率を考えるものであるのに対して、その関係性を検討したものは少ない。両者を一度に読み取ることができれば、残留変位及び降伏強度の両方の観点から許容塑性率の議論ができ、耐震設計時に簡便さが増し、煩雑性を減らすことが可能となる。

複数の情報を一度に表現する方法としてはスペクトルのトリパートタイム表示(3 重応答スペクトル)が挙げられ、地震応答スペクトルに対して適用されることが多い。Blume ら³⁾や田治見ら⁴⁾によって、この表示は非線形応答スペクトルに対しても適用できることが示されており、両者とも耐震設計に対して言及しているが、耐震性能の照査などでの使用例は少ない。

本研究の目的は、簡易的に耐震性能の照査を実施できる指標の作成をすることである。そこで、道路橋を 1 自由度系にモデル化を行い、卓越周期の異なる入力地震動を用いて非線形応答解析を実施し、地震動の周期特性が

必要強度と残留変位比の関係に及ぼす影響を調べる。そして、道路橋示方書耐震設計編(H24 年版)における残留変位の照査が 3 重応答スペクトルを用いて行えることを提案し、耐震設計への適用性について考察した。

2. 解析の概要

2.1 非線形応答解析

RC 橋脚を 1 自由度系にモデル化し、単位質量で、増分法($\beta = 1/6$)を使用し、減衰は質量 m と初期剛性 k_1 に比例させ減衰定数 $h(=c/2\sqrt{mk_1})=0.05$ 、時間刻み 0.001(s)として非線形応答解析を実施した。その復元力特性には、Masing 則に従うバイリニアモデル(以下、バイリニアモデル)と骨格曲線をバイリニア型とした Takeda モデル(以下、Takeda モデル)の 2 種類を用い、除荷時剛性低下指数 α を 0.5、初期剛性に対する降伏後剛性の比 r (以下、剛性比)を 0.0、0.1、目標塑性率 μ_0 を 2、5、8 とした。

2.2 残留変位比^{1),5)}

残留変位比 r_r とは式(1)で定義され、ある構造物に生じた残留変位 x_r をその構造物が取り得る最大の残留変位 x_{rmax} で除したものであり、固有周期、塑性率、減衰定数、剛性比などの他、地震動の特性により変化する。

$$r_r = x_r / x_{rmax} \quad (1)$$

ここで、 x_{rmax} は履歴法則によって変化し、バイリニアモデルでは式(2)、Takeda モデルは式(3)として定義される。

$$x_{rmax} = \begin{cases} (\mu-1)(1-r)x_y & r(\mu-1) < 1 \\ \{(1-r)/r\}x_y & r(\mu-1) \geq 1 \end{cases} \quad (2)$$

$$x_{rmax} = \left[\mu - \{1 + r(\mu-1)\} \mu^\alpha \right] x_y \quad (3)$$

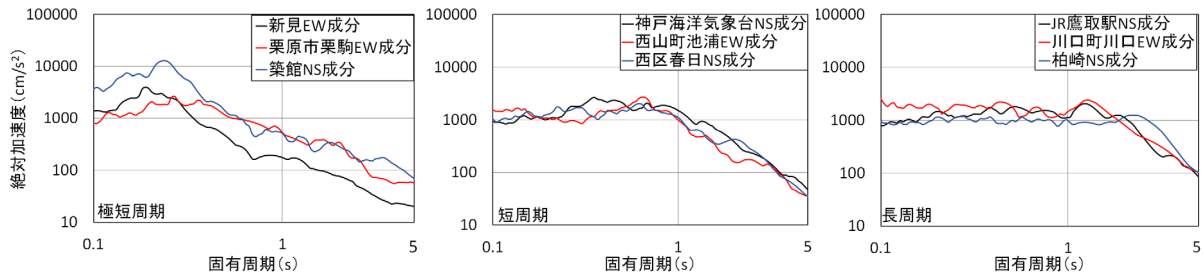
2.3 3 重応答スペクトル

一般的に応答スペクトルは振動系の減衰が小さい場合に式(4),(5)の関係式が示される。

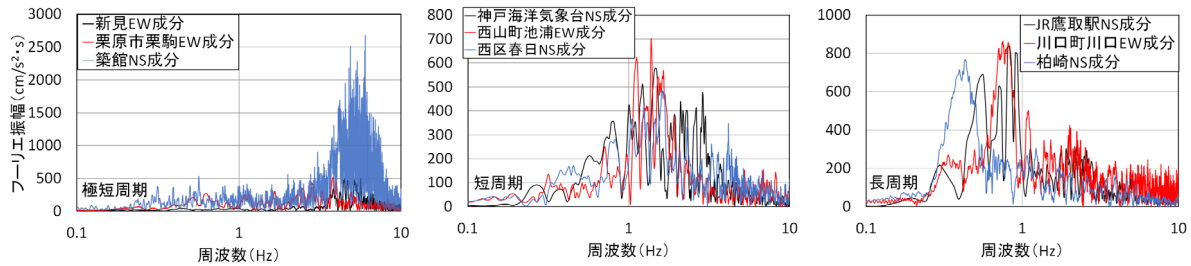
*1 大阪産業大学 工学部都市創造工学科 (学生会員)

*2 大阪産業大学 工学部都市創造工学科教授 博(工) (正会員)

*3 大阪府立工業高等専門学校名誉教授 博(工)



図－1 加速度応答スペクトル



図－2 フーリエスペクトル

$$S_d \cong (1/\omega) S_v = (T/2\pi) S_v \quad (4)$$

$$S_a \cong \omega S_v = (2\pi/T) S_v \quad (5)$$

ここで、 S_d ：変位応答スペクトル、 S_v ：速度応答スペクトル、 S_a ：加速度応答スペクトル、 ω ：固有円振動数、 T ：固有周期である。また、これらの関係式を対数関数表記するとそれぞれ式(6),(7)となる。

$$\log S_d \cong \log S_v + \{\log T - \log(2\pi)\} \quad (6)$$

$$\log S_a \cong \log S_v - \{\log T - \log(2\pi)\} \quad (7)$$

また、トリパートタイム表示の際に加速度と変位の軸線は必ず 45 度の傾きを有している必要があり、これは、 $\log T - \log(2\pi)$ の項が 45 度の傾きを生むためである。

式(4),(5)を非線形応答解析結果の降伏変位 x_y に対して適用すると、初期剛性 k_1 における固有円振動数によって変換されるため降伏加速度 a_y は式(8)で求められ、必要強度と同義となることから、非線形応答スペクトルを3重応答スペクトルとして表示できる。

$$a_y = \omega^2 x_y = (k_1/m) x_y \quad (8)$$

3. 入力地震動

表－1 に示す地震波は近年に発生した地震の中で比較的強震動であるものを選定し、地震動の周期帯⁶⁾を参考に $T < 0.5(\text{s})$ を極短周期、 $0.5(\text{s}) \leq T \leq 1.0(\text{s})$ を短周期、 $1.0(\text{s}) < T$ を長周期と定め、周期帯ごとに卓越している3波を使用した。選定した地震波について、図－1 に加速度応答スペクトル、図－2 にフーリエスペクトルを示す。図－1 から応答の最大値が生じる固有周期は、築館で0.24

表－1 解析に使用した地震波

平成7年兵庫県南部地震	神戸海洋気象台NS成分
	JR鷹取駅NS成分
平成12年鳥取県西部地震	新見EW成分
平成16年新潟県中越地震	川口町川口EW成分
平成19年新潟県中越沖地震	西山町池浦EW成分
	柏崎NS成分
平成20年岩手・宮城内陸地震	栗原市栗駒EW成分
平成23年東北地方太平洋地震	築館NS成分
平成28年熊本地震	西区春日NS成分

秒、西山町池浦で0.64秒、川口町川口で1.25秒となり、フーリエスペクトルについても同様の傾向が表れている。

4. 解析結果

4.1 残留変位比応答スペクトル

図－3 にパイリニアモデル($r=0.1$)における残留変位比応答スペクトルを示す。上段が極短周期、中段が短周期、下段が長周期を示し、横線は細線が塑性率2、中線が塑性率5、太線が塑性率8の各周期帯の平均値である。これより、残留変位比は地震動の卓越周期付近で低減する傾向があるが、明確ではなく周期特性の影響を受けているとは言い切れない。しかし、築館、西山町池浦、川口町川口及び柏崎では塑性率に関係なく残留変位比が卓越周期と同じ周期帯で明確に低減している。同様な傾向は、神戸海洋気象台の塑性率2においても得られている。各周期帯の残留変位比の平均値は、塑性率が小さい場合ほど大きくなる傾向があるが、築館では極短周期にお

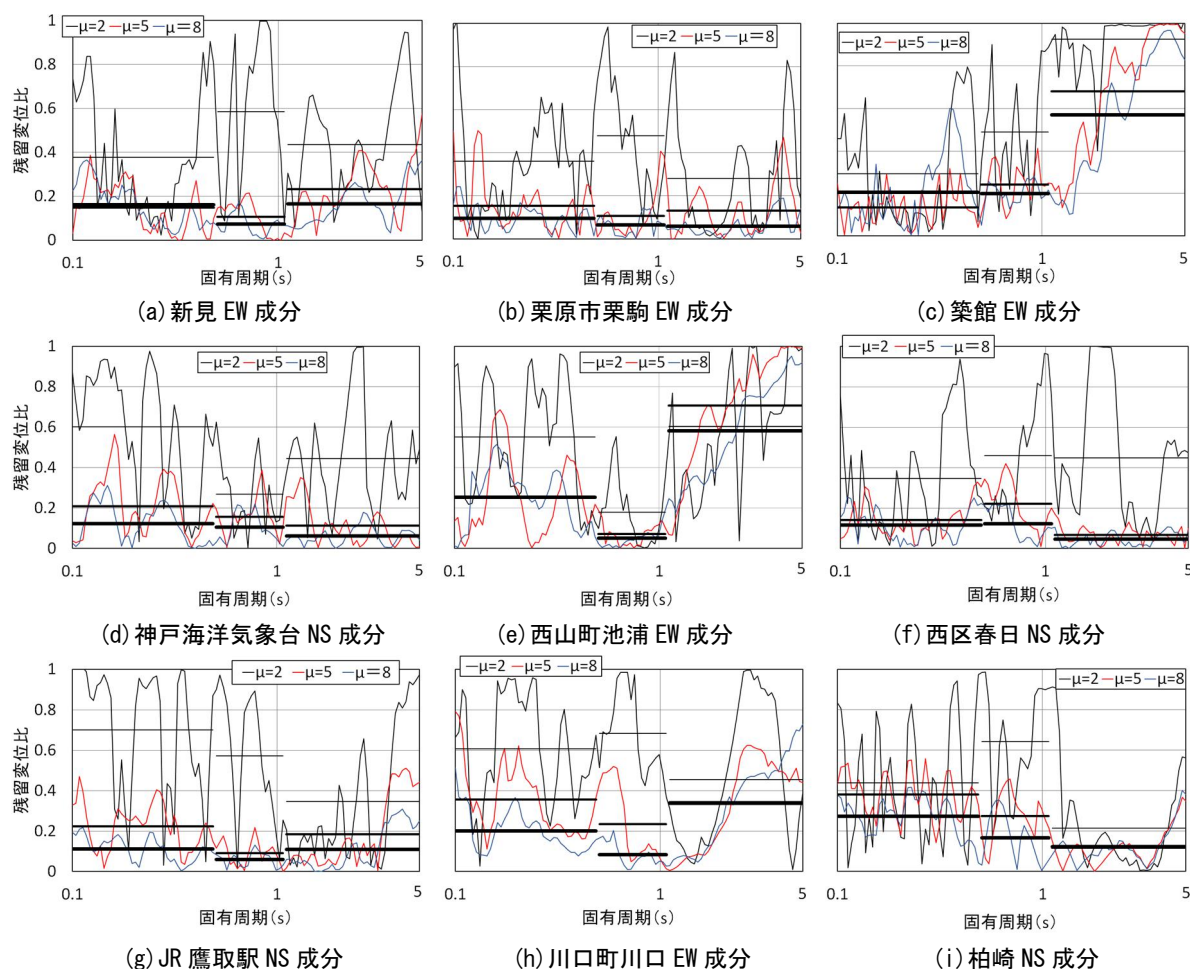


図-3 残留変位比応答スペクトル（剛性比 $r=0.1$ ）

いて、塑性率 2~8 の順に、0.29, 0.13, 0.21, 西山町池浦では長周期において、同じ塑性率の順に、0.60, 0.71, 0.58 となり、上記の傾向に当てはまらない結果も存在している。さらに、図-1 と図-3 を比較すると、築館や神戸海洋気象台及び柏崎では図-4 に示すように、残留変位比が加速度応答スペクトルを上下反転させたスペクトル形状に対応していると考えられる結果が得られた。また、Takeda モデルの場合においては、神戸海洋気象台で周期特性の影響を受けていると示唆される結果が得られたが、築館と柏崎ではそのような傾向は得られなかった。

4.2 必要強度と残留変位比の関係

図-5 に必要強度と残留変位比の関係を地震動の周期帯ごとに上から築館(極短周期), 神戸海洋気象台(短周期), 柏崎(長周期)を左から塑性率 2~8 の順にバイリニアモデル($r=0.1$)での結果を示す。図-5 より、築館では極短周期において他の周期帯と比較して必要強度と残留変位比のばらつきが大きく、塑性率 2 では他の塑性率と比較すると短周期にばらつきが表れている。神戸海洋気象台では、短周期と長周期に必要強度と残留変位比のばらつきが見られ、塑性率 2 に関しては極短周期と短周期の分布が似ているが、塑性率 5, 8 においては、周期帯ごとに必要

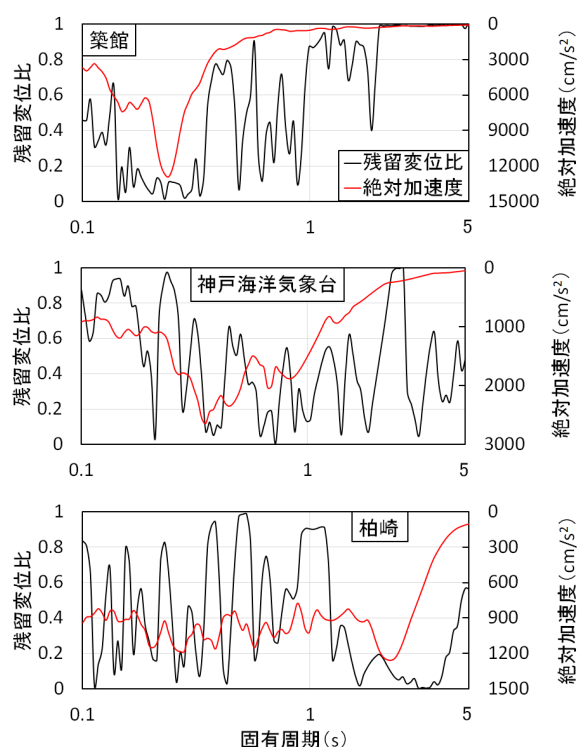


図-4 残留変位比 ($\mu=2$) と加速度応答スペクトル

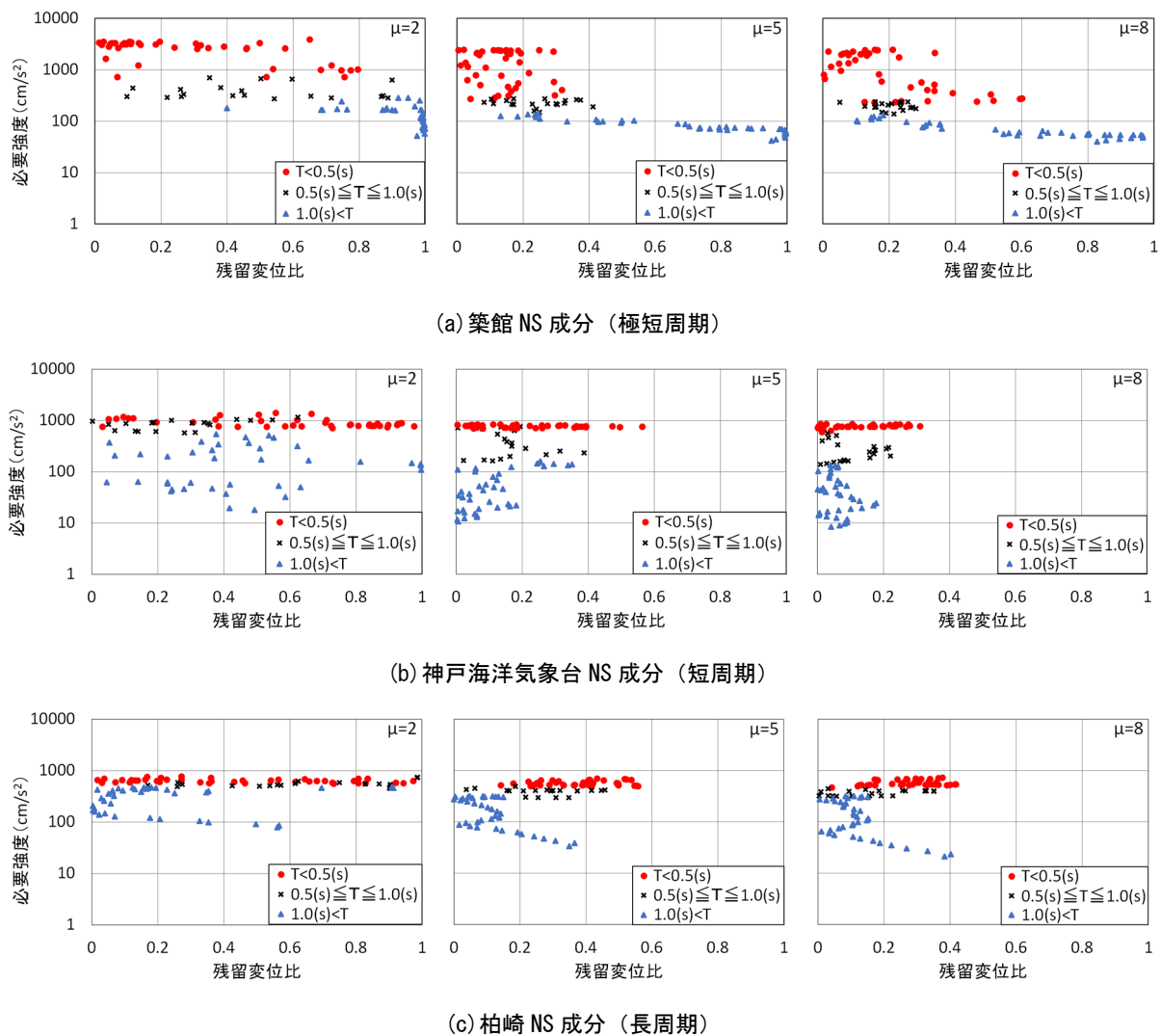


図-5 必要強度と残留変位比の関係（剛性比 $r=0.1$ ）

化している。柏崎では、長周期に必要な強度のばらつきが見られ、塑性率に関係無く極短周期と短周期の分布が似ており、長周期のみが大きくばらついている。

したがって、必要強度と残留変位比の関係は構造物の非線形性と地震動の周期特性の影響を受け、分布特性が変化しており、地震動の卓越周期が含まれる周期帯は両者の関係にばらつきが表れている。

4.3.3 重応答スペクトルの適用

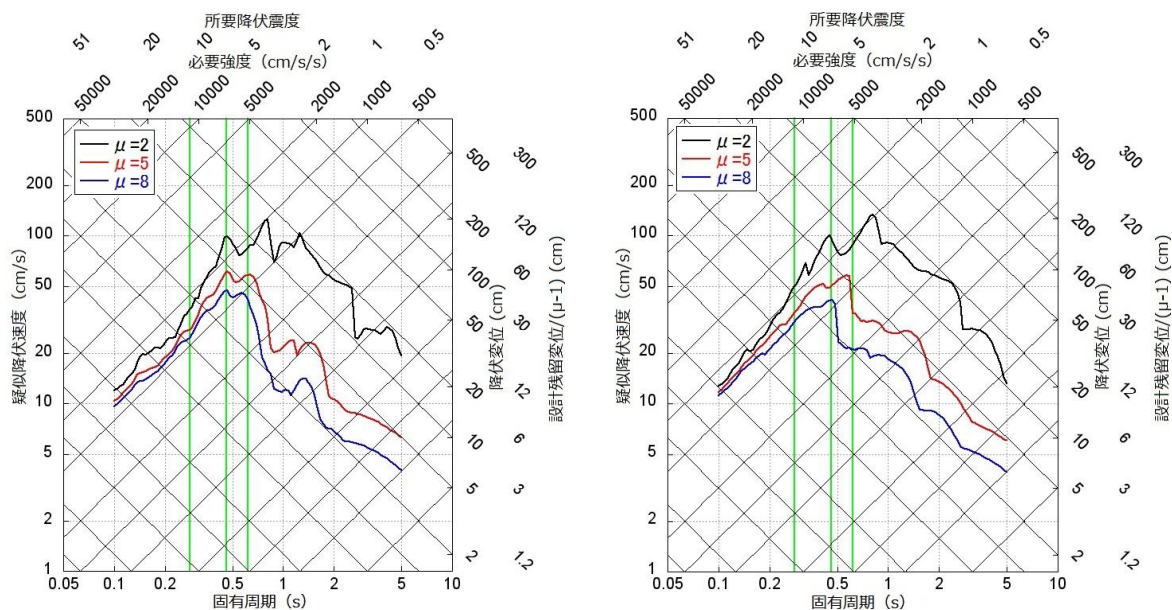
前述の検討では、必要強度と残留変位比の分布を周期帯ごとに分析していたが、耐震設計という観点では各固有周期での分析が重要となる。そこで、本節では2.3の手法により、非線形応答スペクトルをトリパーティット表示させ、その図面における耐震設計への適用性について検討する。ここで使用する地震波はRC橋脚の固有周期が0.1~1.0秒に多く分布⁷⁾していることから、1~10(Hz)に大きなフーリエ振幅を有し、周期特性が似ている⁸⁾平成7年兵庫県南部地震神戸海洋気象台NS成分と平成28年熊本地震益城EW成分の2波を用いる。

道路橋示方書ではRC橋脚に関して、慣性力作用位置の100分の1で定義される許容残留変位 x_{Ra} と式(9)で算出される設計残留変位 x_R による耐震性能2における残留変位の照査⁹⁾が存在し、設計残留変位が許容残留変位以下であることを規定している。

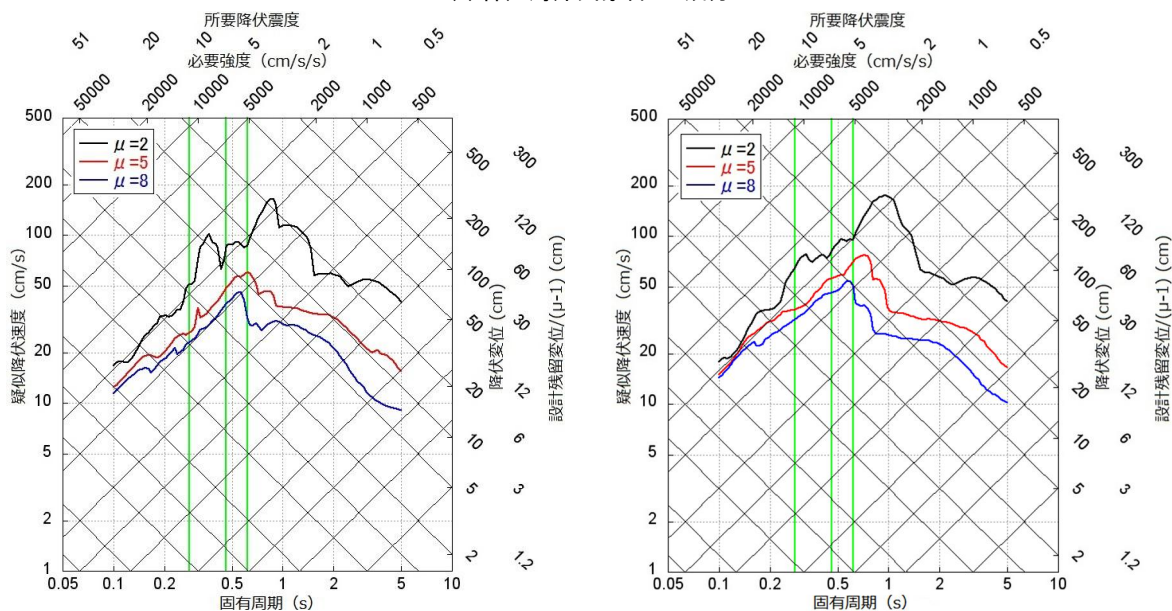
$$x_R = C_R (\mu_r - 1) (1 - r) x_y \quad (9)$$

ここで、 C_R ：残留変位補正係数、 μ_r ：最大応答塑性率、 r ：剛性比、 x_y ：降伏変位である。

残留変位補正係数 C_R は残留変位比と同義であり、道路橋示方書に準拠するとRC橋脚では0.6とし、剛性比は0としている⁹⁾。4.2の検討のように、必要強度と残留変位比の関係は構造物の非線形性と地震動の周期特性の影響を受けると考えられるため、残留変位補正係数もそれらの影響を考慮すべきであるが、本研究では暫定的に道路橋示方書に準拠して扱う。したがって、設計残留変位は最大応答塑性率が定まれば降伏変位に定数倍することで算出でき、簡便な非線形応答の評価法として知られる所



(a) 神戸海洋気象台 NS 成分



(b) 益城 EW 成分

図-6 3重応答スペクトル (左:バイリニアモデル, 右:Takeda モデル)

要降伏震度¹⁰⁾は必要強度を自重で除することで算出されるため、両者ともスペクトル形状を変化させず、降伏変位及び必要強度の目盛りに定数倍することで諸量の分析ができる。すなわち、固有周期のみの情報で、所定の塑性率になる必要強度、降伏震度に対する降伏変位、設計残留変位を読み取ることができると考えられる。

以上より、非線形応答スペクトルのトリパータイト表示の検証を行う。表-2 に示すように RC 橋脚の固有周期と慣性力作用位置の情報が与えられていると仮定し、図-6 に非線形応答スペクトルをトリパータイト表示させたものを示す。ここで、必要強度には「所要降伏震度」、降伏変位には「設計残留変位」に関する目盛りを書き加え、表-2 の固有周期を同図に示している。次に、図-7

表-2 RC 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-3 各橋脚の設計残留変位 (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

に神戸海洋気象台 NS 成分で Takeda モデルを例に、塑性率 2 における各橋脚の履歴ループを示す。履歴ループの

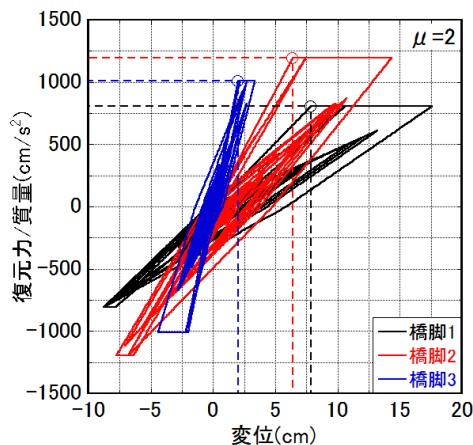


図-7 橋脚の履歴ループ(神戸海洋気象台 NS 成分)

降伏点から得られる必要強度及び降伏変位は図-6 から読み取られるものと一致し、任意の固有周期に対応した諸量を得られることがわかる。

続いて、図-6 の耐震設計に対する適用性を、道路橋示方書の耐震性能 2 における残留変位の照査⁹⁾により検討する。表-2 より、各橋脚の許容残留変位は順に 135mm、105mm、75mm となる。また、表-3 に図-6 の神戸海洋気象台から得られる Takeda モデルでの設計残留変位を示す。橋脚 1 及び 3 では全塑性率で許容残留変位を超えなかったが、橋脚 2 では塑性率 8 で許容残留変位の約 1.2 倍の設計残留変位が読みとられ、耐震性能 2 を満足できず、塑性率 8 を許容塑性率として設定できない結果が得られた。

また、図-6 より益城は神戸海洋気象台と似たスペクトルが描かれ、固有周期 1 秒以降には益城の観測波形に存在する長周期成分の影響が表れている結果が得られており、地震動の周期特性に関しても表現することができている。さらに、復元力特性の違いによる差は小さいため、本スペクトルの算出には、RC 橋脚の設計時においても簡易的にバイリニアモデルが使用できると考えられる。

すなわち、図-6 を用いることで任意の固有周期を有する構造物に対する許容塑性率ごとの設計残留変位とそれに対応する必要強度を知ることができ、さらに、慣性力作用位置の情報があれば残留変位の照査を実施することが可能となるため、許容塑性率を議論する際には簡便な指標になりうると考えられる。

5. まとめ

簡易的に耐震性能の照査を実施できる指標の作成を目的に、強震動の周期特性が必要強度と残留変位比の関係に及ぼす影響を分析し、3 重応答スペクトルにより耐震性能の照査が可能か検討した。本研究の結論を以下にまとめる。

- 1) 残留変位比応答スペクトルは地震動の周期特性によ

る影響を受けているとは言い切れないが、地震動によっては卓越する周期で残留変位比が低減した。

- 2) 必要強度と残留変位比の関係は構造物の非線形性を受け分布特性が変化し、両者のばらつく周期帯は地震動の周期特性の影響を受けていると考えられる。
- 3) 非線形応答スペクトルをトリパーティット表示させた場合、復元力特性の違いによる差異は少なく、バイリニアモデルを用いることで簡易的に扱え、耐震性能の照査と諸量の推定を一つの図で実施できるため、設計業務をより簡便なものにできると考えられる。

謝辞：本研究に際し、国立研究開発法人防災科学技術研究所、気象庁及び西日本旅客鉄道株式会社の観測波形を使用させて頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 川島一彦, Gregory A.MACRAE, 星隈順一, 長屋和宏：残留変位応答スペクトルの提案とその適用, 土木学会論文集, No.501/I-29, pp.183-192, 1994.
- 2) H.Iemura, A.Igarashi, and Y.Takahashi : Ductility and strength demand for near field earthquake ground motion, Structural safety and Probability, pp.1705-1708, 1998.
- 3) 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.
- 4) 田治見宏, 石丸辰治：「塑性率制御法」について, 日本建築学会論文報告集, No.214, pp.17-28, 1973.
- 5) 渡邊学歩：断層近傍地震動に対する残留変位の推定に関する検討, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.556-565, 2007.
- 6) 境有紀：長周期地震動と短周期地震動の違いを簡単な模型を使ってわかりやすく？示したデモンストレーション <http://www.kz.tsukuba.ac.jp/~sakai/dsn.html> (2017/1/15 アクセス)
- 7) 吉岡勉, 吉澤努, 佐藤京, 西弘明：RC 橋脚の固有周期に着目した地震時被害度指標に関する検討, 土木学会第 66 回年次学術講演概要集, pp.855-856, 2012.
- 8) 日経アーキテクチュア, 日経ホームビルダー, 日経コンストラクション：検証 熊本地震 なぜ倒壊したのか？プロの視点で被害を分析, 日経 BP ムック, pp.50-51, 2016.
- 9) 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, pp.100-103, 2012.
- 10) 西村昭彦, 室野剛隆, 齊藤正人：所要降伏震度スペクトルの作成と耐震設計への適用, 第 3 回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.43-48, 1999.