

入力地震動の違いによる道路橋の地震応答の感度分析

石井 洋輔¹・片岡 正次郎²

¹正会員 国土技術政策総合研究所 道路地震防災研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1）

²正会員 博（工） 国土技術政策総合研究所 道路構造物管理システム研究官（同上）
（元 国土技術政策総合研究所 道路地震防災研究室長）

1. はじめに

道路橋のレベル2地震動の動的耐震照査は、少なくとも3波の地震動を設定し、その応答の平均を用いること¹⁾（以下、「3波平均」という。）とされている。

これは、橋の非線形応答が大きくなる位相特性を持った加速度波形を複数選択することで、加速度波形がもつ様々な地震動特性を橋の耐震設計に考慮するためである。道路橋示方書V耐震設計編（以下、「道示」という。）に示される標準加速度波形（以下、「標準波」という。）は、橋に対し大きな非線形応答を与える波形として、数多くある強震記録の中でも最大応答塑性率が大きいことが示されている²⁾。

一方、加速度波形を用いた動的解析結果の耐震設計への取り入れ方は、各構造物や国内外の耐震設計基準でばらつきがある。さらに、動的解析に用いる入力地震動として、異なる位相特性の波形を複数抽出して道路橋の非線形応答を比較した結果、多数の入力地震動による応答の結果を平均化することで、1波形のみの結果より最大応答変位に対する信頼性は高まること³⁾が示されている。耐荷性能照査の更なる信頼性向上のためには、入力地震動を増やすことが考えられるが、地震動を増やすことで、動的解析の計算時間の増加等が懸念される。そのため、耐荷性能照査に用いる入力地震動を過度に増やすことは合理的ではないことが考えられ、現行の3波平均が、他の波形による耐荷性能照査と比較して、どの程度の応答を示すのか検証する必要がある。

また、平成28年熊本地震の際、道示の設計スペクトルと同程度と評価される地震動が観測された⁴⁾。このような、基準改定以降に観測された地震動が、

耐震設計された橋に与える影響を検証することは重要であると考えられる。

そこで本研究は、道示に規定されるレベル2地震動の標準加速度応答スペクトルに対して、近年の大規模地震で得られた強震記録を含めた、位相特性の異なる18波（タイプI、タイプIIそれぞれ9波）でスペクトルフィッティングを実施し、フィッティングした波形と道示標準波に対し1自由度系の非線形地震応答解析を行い、応答塑性率および残留変位を比較した。さらに、道路橋の耐荷性能照査に用いる動的解析モデルに対し上記の波形を入力し、解析で算出される応答のばらつきを検証した。

2. 入力地震動

本研究では、道示¹⁾の耐震設計上の地盤種別でII種地盤に分類される地盤上で、平成7年兵庫県南部地震や平成30年北海道胆振東部地震等の被害地震で観測された、レベル2地震動相当の強震記録を対象とした。

本研究で検討対象とした強震記録を表-1に示す。対象とした強震記録は、参考文献²⁾の振幅調整方法を用いて、道示¹⁾に示されるレベル2地震動タイプIおよびタイプIIのII種地盤の標準加速度応答スペクトルにフィッティングした。なお、本研究でレベル2地震動タイプII相当の波形として分類したK-NET熊本およびK-NET早来は、地盤種別が判明する地盤データが得られなかったが、本研究では、II種地盤相当の波形として使用した。

また、本研究では、スペクトルフィッティングによるばらつきも検討するため、フィッティングの際の収束判定に用いる繰返し計算²⁾の回数を変化させ、

表-1 対象とした地震動（Ⅱ種地盤）

No.	レベル2地震動タイプⅠ-Ⅱ種地盤		レベル2地震動タイプⅡ-Ⅱ種地盤	
1	平成15年十勝沖地震	忠類村 X成分	平成7年兵庫県南部地震	JR西日本鷹取駅構内地盤上 NS成分
2		池田河川事務所 Y成分		JR西日本鷹取駅構内地盤上 EW成分
3		直別 Y成分		大阪ガス暮合供給所構内地盤上 N12W成分
4	平成23年東北地方太平洋沖地震	仙台河川国道事務所 EW成分	平成28年熊本地震	KiK-net菊池 NS成分
5		気仙沼国道維持出張所 EW成分		KiK-net益城 EW成分
6		阿武隈大堰管理所 NS成分		KiK-net豊野 NS成分
7		鳴瀬堰観測所 EW成分		K-NET 熊本 NS成分※
8		4号佐間川橋 NS成分	平成30年北海道胆振東部地震	K-NET 穂別 NS成分
9		K-NET 仙台 NS成分		K-NET 早来 EW成分※
10	波形No.1～9の9波平均		波形No.1～9の9波平均	
11	道示標準波 L2-TⅠ-II-1		道示標準波 L2-TⅡ-II-1	
12	道示標準波 L2-TⅠ-II-2		道示標準波 L2-TⅡ-II-2	
13	道示標準波 L2-TⅠ-II-3		道示標準波 L2-TⅡ-II-3	
14	道示標準波L2-TⅠ-II 3波平均		道示標準波L2-TⅡ-II 3波平均	

※地盤情報は未確定

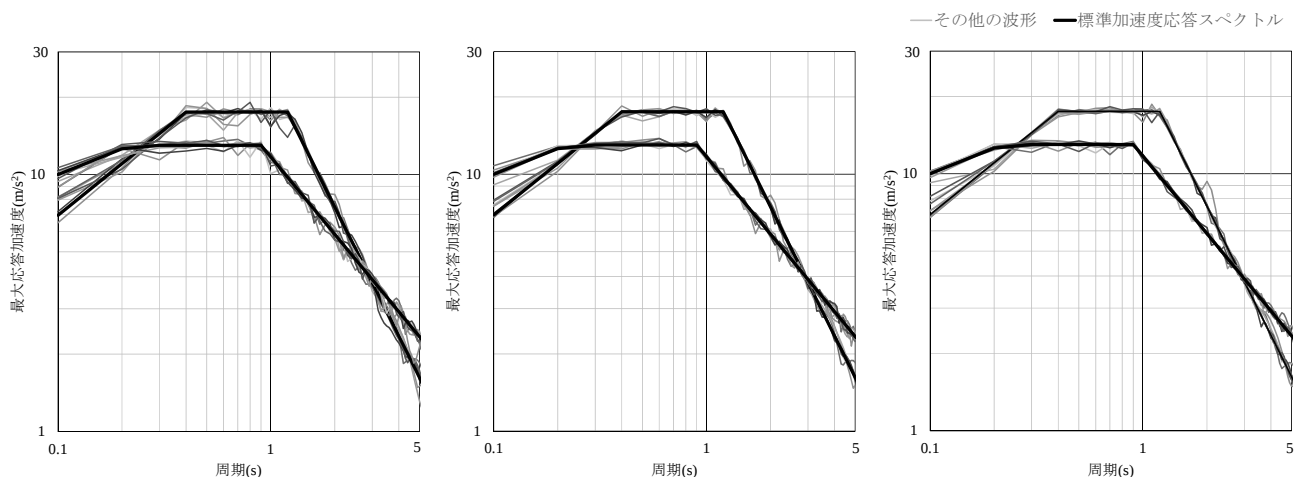


図-1 フィッティングした入力地震動の加速度応答スペクトル（減衰定数 0.05）
（左から、5回、10回、20回フィッティング波形の加速度応答スペクトル）

各波形に対して5, 10, 20回のフィッティングを実施した。

以上より、標準加速度応答スペクトルにフィッティングした54波形、標準波6波形の計60波形を本研究の対象波形とした。

本研究で作成した加速度波形の加速度応答スペクトル（減衰定数0.05）を図-1に示す。図-1には、Ⅱ種地盤のレベル2地震動の標準加速度応答スペクトルも併せて示している。図-1より、5回のフィッティングではすべての周期帯でややばらつきがみられるが、10, 20回のフィッティングでは、より標準加速度応答スペクトルに近似している。

3. 1自由度系の地震応答解析

(1) 解析条件

2. で作成したレベル2地震動相当の入力地震動54波およびレベル2地震動（Ⅱ種地盤）の標準波6波の計60波に対し、1自由度系の非線形地震応答解析を実施した。

1自由度系の非線形地震応答解析は、参考文献²⁾に準拠した。1自由度系の解析モデルは、実橋の橋脚の解析モデルを参考に、剛性、及び慣性力作用位置を固定し、固有周期0.1s～5.0sまで、0.1s刻みで設定した。降伏震度は、道示に記載されている下限値（降伏震度0.4以上）を考慮し、これを下回る降伏震度となる周期には、降伏震度を0.4として応答塑

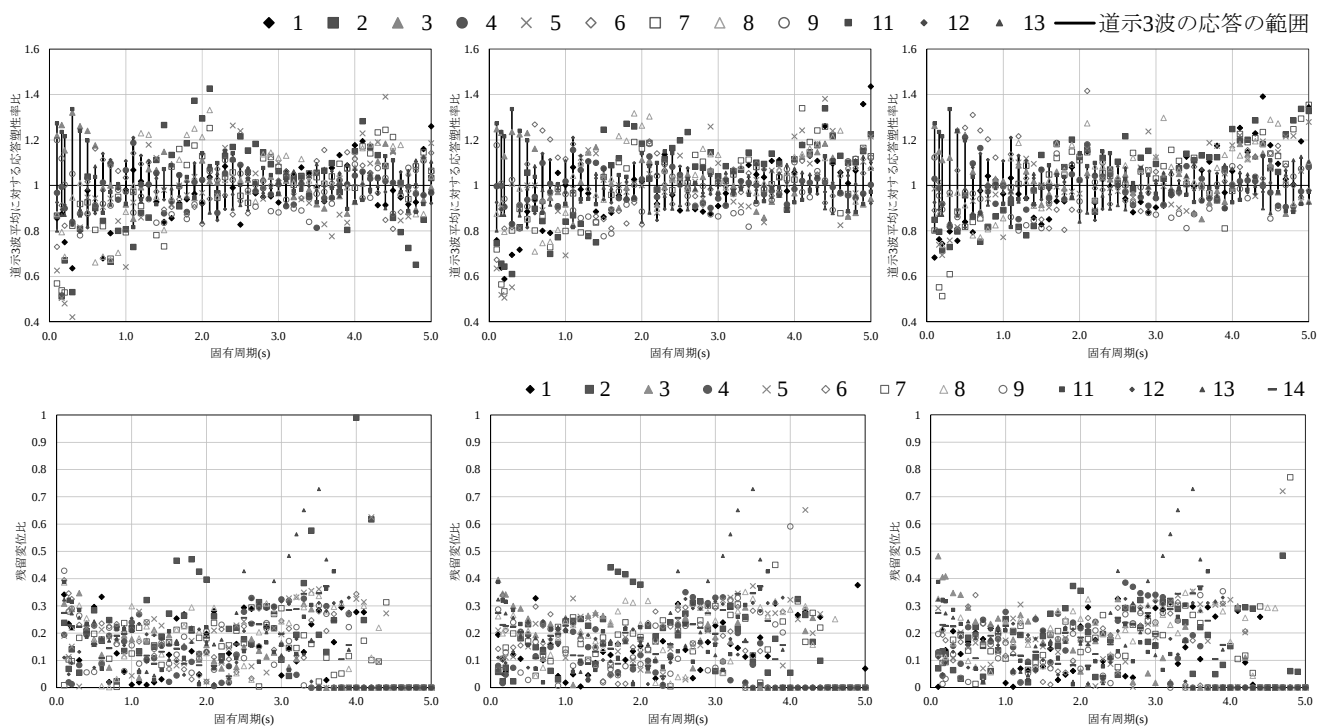


図-2 レベル2地震動タイプI（上段：応答塑性率，下段：残留変位比）
（左から，5回，10回，20回フィッティング波形の解析結果）

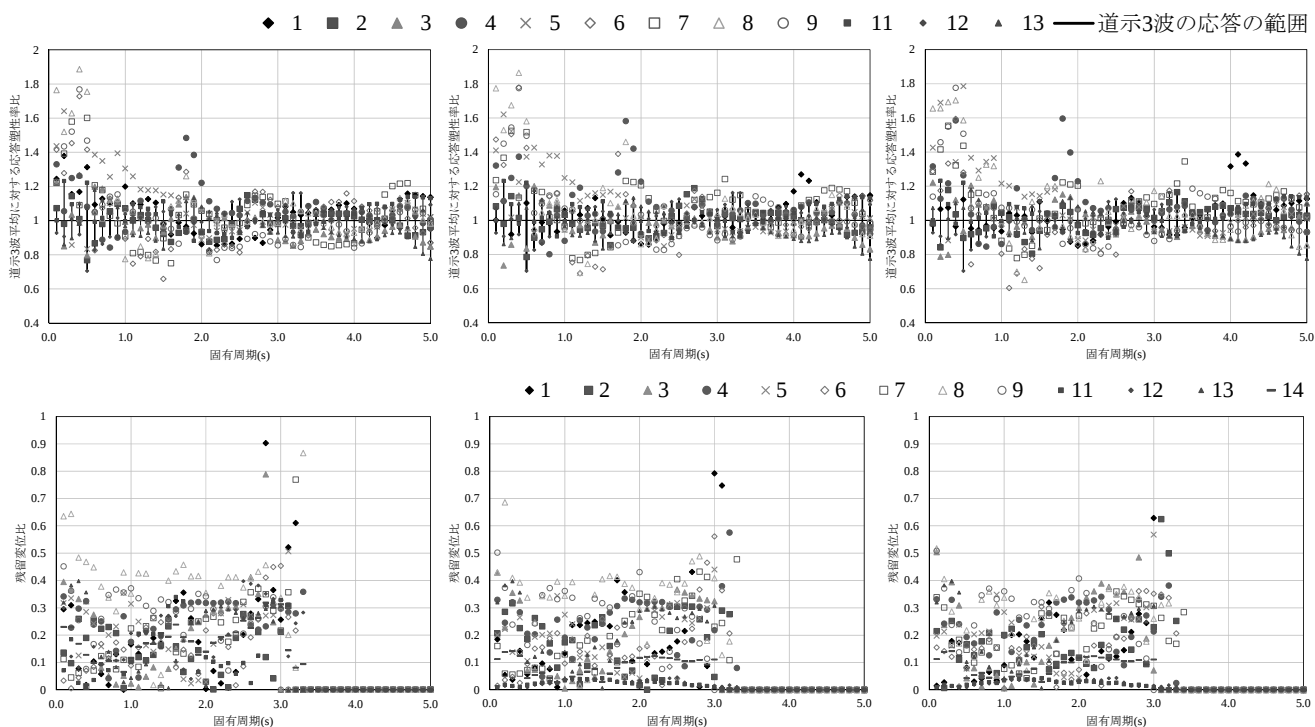


図-3 レベル2地震動タイプII（上段：応答塑性率，下段：残留変位比）
（左から5回，10回，20回フィッティング波形の解析結果）

性率で調整した．解析条件は，復元力モデルは Takedaモデル⁵⁾，減衰定数は0.02とした．

(2) レベル2地震動タイプI

レベル2地震動タイプIにフィッティングした地震動を対象に，1自由度系の非線形動的解析を実施した結果を図-2に示す．解析結果は，最大応答塑性率および残留変位比に着目した．

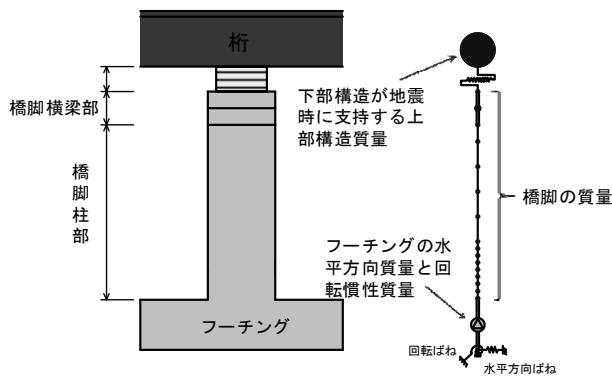


図-4 橋の解析モデル概念図

表-2 橋の解析モデルの諸元

橋梁名		A	B	C
地盤種別		Ⅱ種	Ⅱ種	Ⅱ種
固有周期(s) (固有値解析)		1.06	1.14	1.23
上部構造	重量(kN)	14847	17016	13100
下部構造	橋脚	RC橋脚		
	下部全高(m)	14.1	14.1	19.9
	柱高(m)	11.1	11.1	16.5
	フーチング高(m)	3.0	3.0	3.4
着目方向		橋軸	直角	橋軸
支承条件		免震		固定
基礎構造		杭基礎		

図-2の最大応答塑性率は、フィッティングした波形および道示の標準加速度波形の解析結果と3波平均の応答塑性率との比を示している。それぞれの波形は、3波平均の0.8~1.2倍程度の範囲であり、全体的にばらつきは小さいことが分かった。また、5回のフィッティングと比較し、10、20回のフィッティングのばらつきは小さいことが分かった。

図-2の残留変位比は、10、20回のフィッティングの結果で概ね0.6以下となっている。また、応答塑性率の傾向と同様、5回と比較して10、20回のフィッティングのばらつきは小さいことが分かった。

(3) レベル2地震動タイプII

レベル2地震動タイプIIの解析結果を図-3に示す。図-2と同様、応答塑性率および残留変位比に着目した。応答塑性率は、0~1.0秒の周期でばらつきが大きいものの、それ以外の周期は3波平均の0.8~1.2倍程度の範囲であった。

残留変位は、図-2の傾向と同程度であり、5、10、20回のそれぞれの波形で概ね0.6以下となっている。また、応答塑性率の傾向と同様、5回と比較して10、20回のフィッティングのばらつきは小さいことが分かった。

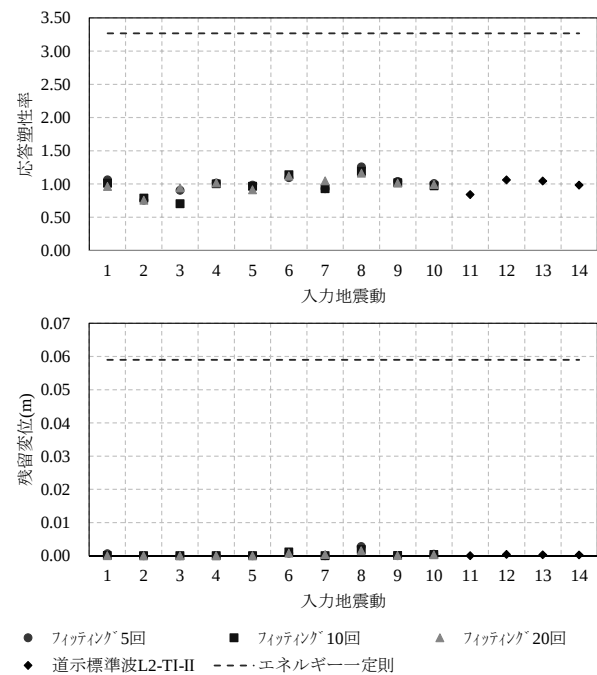


図-5 レベル2地震動タイプIの解析結果
(上段：応答塑性率，下段：残留変位)

4. 道路橋モデルの地震応答解析

(1) 解析モデル

本研究で用いた解析モデルの概念図を図-4に示し、解析モデルの諸元を表-2に示す。道路橋の解析モデルは、平成14年道路橋示方書・同解説⁶⁾もしくは平成24年道路橋示方書・同解説⁷⁾を基に耐震設計されている。

表-2より、本研究で使用する解析モデルは、耐震設計上の地盤種別がⅡ種地盤に区分されている地盤上に建設されるRC橋脚3基（A、およびB橋は橋軸方向と橋軸直角方向に着目）である。支承条件は、A、Bが免震支承、Cが固定支承である。

解析モデルは、図-4より、1基の下部構造とそれが支持する上部構造質量系で構築し、橋脚基部から塑性ヒンジ区間の約2倍に相当する範囲に対しては、各断面位置の死荷重時の軸力の大きさに応じた曲げモーメントー曲率関係でモデル化した。骨格曲線はトリリニア型とし、その復元力モデルにはTakedaモデル⁵⁾を用いた。免震支承は、バイリニア型の移動硬化則を用いており、解析モデルの減衰は、要素別レーリー型粘性減衰より設定した。

なお、静的解析は、道示に示されるエネルギー一定則¹⁾に基づき、解析モデルに対してプッシュオーバー解析を実施して応答値を算出した。動的解析および静的解析の結果は、最大応答塑性率および残留

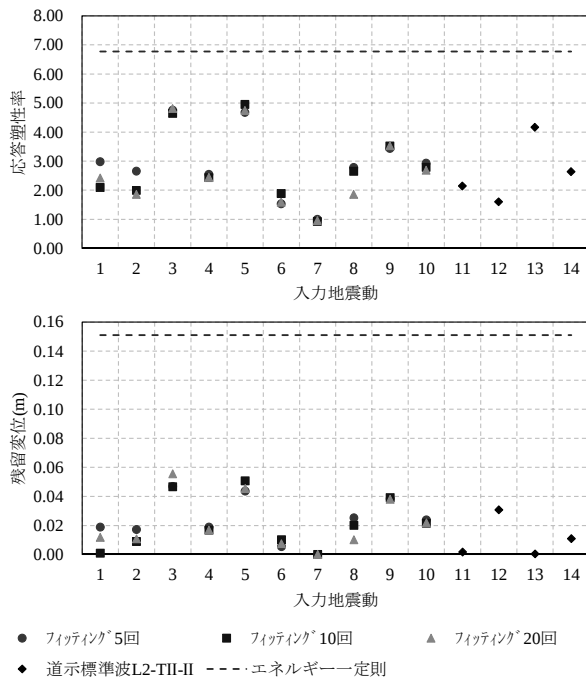


図-6 レベル2地震動タイプIIの解析結果
(上段：応答塑性率，下段：残留変位)

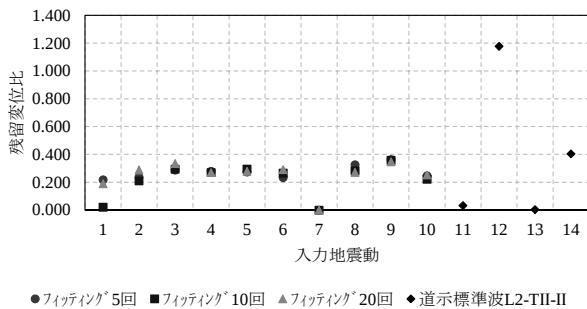


図-7 レベル2地震動タイプIIの解析結果
(残留変位比)

変位比に着目した。

(2) A橋モデルの解析結果

a) レベル2地震動タイプI

A橋のレベル2地震動タイプI相当の波形を入力した解析結果の応答塑性率および残留変位を図-5に示す。応答塑性率は、それぞれの入力地震動を比較してばらつきは小さく、フィッティングの違いもみられない。3波平均の解析結果は、9波平均の結果と比較すると同程度の大きさとなるが、エネルギー一定則と比較して小さい値となった。動的解析の結果は概ね応答塑性率が1前後であるが、エネルギー一定則では、3よりも大きい。動的解析の結果は、エネルギー一定則と比較して応答塑性率が小さい値となっている。これは、解析対象橋が免震支承であり、支承部でのエネルギー吸収が発生しているためと考

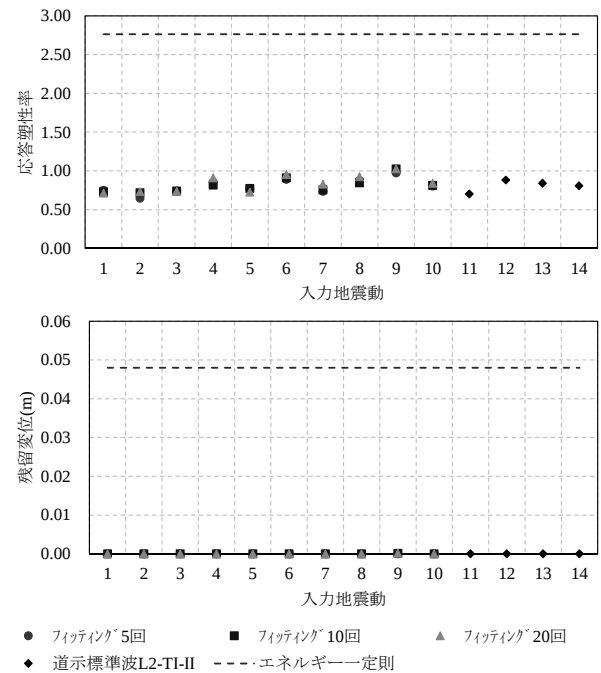


図-8 レベル2地震動タイプIの解析結果
(上段：応答塑性率，下段：残留変位)

えられる。標準波の解析結果は、波形12と波形13は同程度であり、波形11が小さめの応答となった。

残留変位は、応答塑性率が1前後のため、ほとんど残留変位が発生しない結果となった。

b) レベル2地震動タイプII

レベル2地震動タイプII相当の波形を入力した解析結果の応答塑性率および残留変位を図-6，残留変位比を図-7に示す。応答塑性率は、タイプIの解析結果と比較してそれぞれの入力地震動ごとのばらつきが大きい。なお、JR鷹取駅の波形（波形1，2）でフィッティングの違いが一部確認できるものの、その他の入力地震動でフィッティングの違いはみられない。3波平均の解析結果は、9波平均の結果と同等であるが、エネルギー一定則と比較して小さくなった。標準波の解析結果は、波形13が大きく、波形12は小さい。

残留変位は、応答塑性率の傾向とほぼ同様の結果となっており、3波平均の解析結果は、エネルギー一定則、9波平均と比較して小さい値となっている。図-7の残留変位比は、9波平均よりも3波平均の解析結果が大きめの値となり、特に標準波の2-II-II-2の波形が大きい。

(3) B橋モデルの解析結果

a) レベル2地震動タイプI

B橋のレベル2地震動タイプI相当の波形を入力し

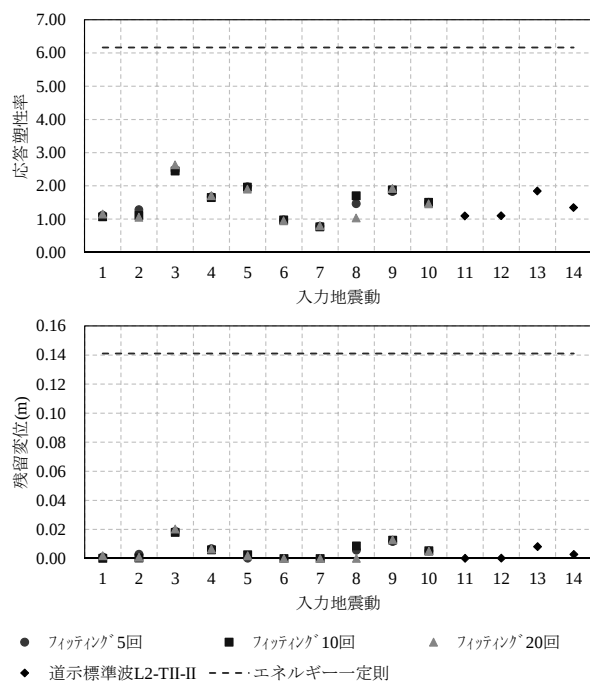


図-9 レベル2地震動タイプIIの解析結果
(上段：応答塑性率，下段：残留変位)

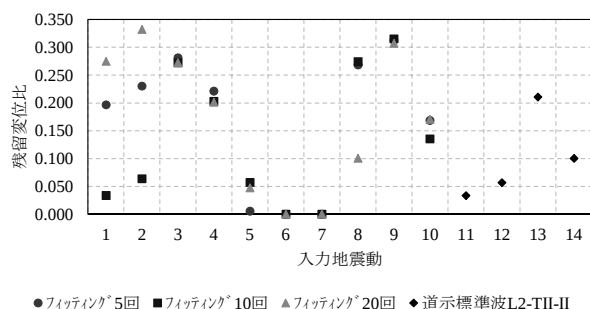


図-10 レベル2地震動タイプIIの解析結果
(残留変位比)

た解析結果の応答塑性率および残留変位を図-8に示す。応答塑性率は、それぞれの入力地震動を比較してばらつきは小さく、フィッティングの違いも見られない。3波平均の解析結果は、9波平均の結果と比較すると同程度の大きさとなるが、エネルギー一定則と比較して小さい値となった。動的解析の結果は概ね応答塑性率が1より小さいが、エネルギー一定則の結果は大きい値となった。動的解析の結果は、エネルギー一定則と比較して応答塑性率が小さい値となった。これは、解析対象橋が免震支承であり、支承部でのエネルギー吸収が発生しているためと考えられる。標準波の解析結果は、波形12と波形13が同程度であり、波形11が小さい値となった。

残留変位は、応答塑性率が1以下のため、発生しない結果となった。

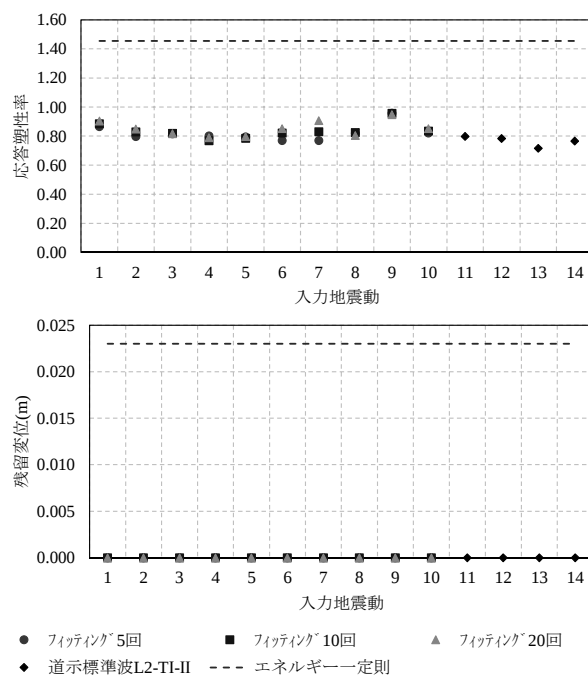


図-11 レベル2地震動タイプIの解析結果
(上段：応答塑性率，下段：残留変位)

b) レベル2地震動タイプII

レベル2地震動タイプII相当の波形を入力した解析結果の応答塑性率および残留変位を図-9，残留変位比を図-10に示す。応答塑性率は、タイプIの解析結果と比較してそれぞれの入力地震動ごとのばらつきが大きい。なお、K-NET穂別の波形（波形8）でフィッティングの違いが一部見られるものの、その他の波形で違いはみられない。3波平均の解析結果は、9波平均の結果と同等であるが、エネルギー一定則と比較して小さい値となった。標準波の解析結果は、波形13がやや大きい値となり、波形11と波形12は同程度である。

残留変位は、応答塑性率の傾向とほぼ同様の結果となっており、3波平均の解析結果は9波平均の結果よりも小さく、残留変位比も同様である。

(4) C橋モデルの解析結果

a) レベル2地震動タイプI

C橋のレベル2地震動タイプI相当の波形を入力した解析結果の応答塑性率を図-11に示す。応答塑性率は、それぞれの入力地震動を比較してばらつきは小さく、鳴瀬堰観測所の波形（波形7）でフィッティングの違いが確認できるものの、その他の波形でフィッティングによる違いはみられない。3波平均の解析結果は、9波平均の結果と比較すると同程度であるが、エネルギー一定則と比較すると小さい値となった。動的解析の結果は概ね応答塑性率が1よ

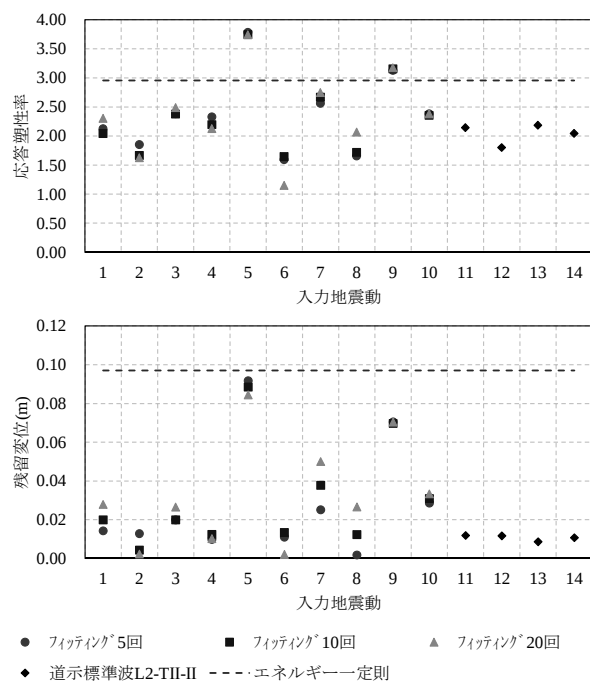


図-12 レベル2地震動タイプIIの解析結果
(上段：応答塑性率，下段：残留変位)

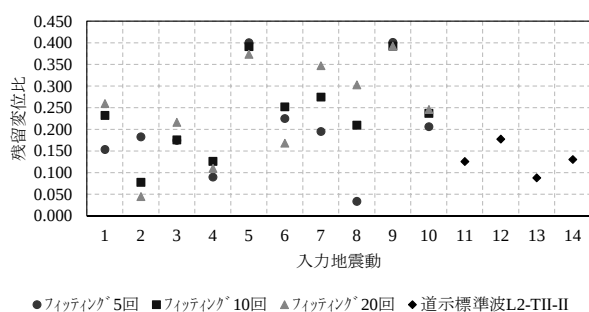


図-13 レベル2地震動タイプIIの解析結果
(残留変位比)

り小さいが、エネルギー一定則では、1よりも大きい。標準波の解析結果は、波形11と波形12が同程度であり、波形13がやや小さい値となった。

残留変位は、応答塑性率が1以下のため、発生しない結果となった。

b) レベル2地震動タイプII

レベル2地震動タイプII相当の波形を入力した解析結果の応答塑性率および残留変位を図-12、残留変位比を図-13に示す。応答塑性率は、KiK-net益城の波形（波形5）およびK-NET早来の波形（波形9）でエネルギー一定則より大きい値となるなど、A橋モデルおよびB橋モデルの解析結果と比較して、入力地震動による応答値のばらつきが大きい。さらに、KiK-net豊野の波形（波形6）などでフィッティング

によるばらつきが確認された。しかし、この程度のばらつきは、設計断面や配筋等に変更が生じるような大きなばらつきはないことが分かった。3波平均の解析結果は、エネルギー一定則と比べるとやや小さく、9波平均の結果と比較して同程度となる。標準波の解析結果は、波形12が小さく、波形11と波形13は同程度である。

残留変位は、3波平均の解析結果は、9波平均の結果と比較して小さい値となり、残留変位比も同様の傾向である。フィッティングによるばらつきは、やや確認できているものの、フィッティング10、20回で差はほとんどないことが分かった。

5. まとめ

本研究では、位相特性の異なる波形と3波平均の応答値を比較するとともに、標準加速度応答スペクトルのフィッティングによる応答値のばらつきを検討した。

本研究で得られた知見は、下記の通りである。

- 橋の非線形動的解析より、動的解析モデルでばらつきはあるものの、道示標準波の3波平均は、9波平均と比べて同等以上の応答が得られている。
- 近年の被害地震で得られた強震記録も含め、本研究の対象波形が橋の地震応答に与える影響は、3波平均および標準波の応答値と同程度であることが確認された。
- 10回と20回の繰返し計算で作成したフィッティング波形は、本研究で構築したモデルを用いた動的解析で得られる応答に大きな差はみられない。

なお、2017年に改定された道路橋示方書では、道路橋の設計に限界状態設計法が取り入れられ⁸⁾、橋に求める共通的な性能が明確になった。性能照査による設計合理化の観点から、動的解析で評価される地震応答のばらつきを検証しておくことが重要であると考えられる。今後は、橋全体系の動的耐震照査の応答のばらつきや、橋全体系の実挙動に基づく検討を実施し、引き続き道路橋の地震応答特性を検証する。

謝辞：本研究では、（国研）防災科学技術研究所、西日本旅客鉄道（株）、大阪ガス（株）、国土交通省の強震記録を使用した。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2017.
- 2) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編に関する参考資料，2015.
- 3) 星隈順一，運上茂樹：時刻歴応答解析に用いる入力地震動の数と非線形応答値のばらつき，構造工学論文集，Vol. 49A, 2003.
- 4) 国土交通省：社会資本整備審議会道路分科会第 6 回道路技術小委員会資料 2，
http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000312.html (2020 年 11 月 27 日閲覧)
- 5) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N. : Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Journal of Structural Division, ASCE, Vol.96, No.12, pp.2557-2573, 1970.
- 6) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2002.
- 7) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，2012.
- 8) 国土交通省：「橋，高架の道路等の技術基準」(道路橋示方書) の改定について，
https://www.mlit.go.jp/report/press/road01_hh_000862.html (2020年11月27日閲覧)