

# 2016年熊本地震で得られた強震記録による 道路橋の耐震設計に用いる地震動の検証

片岡正次郎・石井洋輔・中尾吉宏

## 1. はじめに

平成29年に改定された道路橋示方書V耐震設計編<sup>1)</sup>では、橋の耐荷性能の照査にあたり、2段階の地震動による影響を適切に設定することが規定されている。一つは、変動作用として定義する、橋の設計供用期間中にしばしば発生する地震動（レベル1地震動）であり、もう一つは、偶発作用として定義する、橋の設計供用期間中に発生することは極めて稀であるが一旦生じると橋に生じる影響が甚大であると考えられる地震動（レベル2地震動）である。

平成28年（2016年）熊本地震では道路橋にも多くの被害が生じたことから、社会資本整備審議会道路分科会道路技術小委員会においても橋に作用する地震動に関して種々の検討が進められた<sup>2)</sup>。また、熊本地震では最大前震と本震の2回にわたり震度7が計測されたことから、国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）では、実測された強震記録を用い、橋脚に繰り返し作用する地震動の影響に関する調査を進めた。

その結果、熊本地震の加速度応答スペクトルは従来の内陸直下型地震を想定したレベル2地震動（以下「レベル2地震動（タイプII）」という。）と同程度であると評価された。また、熊本地震で観測された地震動が橋脚に繰り返し作用しても、従来の耐震設計で対応できていることを確認した。これらの知見を踏まえた上で、改定前の示方書で考慮されてきた地震動の特性値が踏襲されることとなった。本稿では、この検証内容をレベル2地震動（タイプII）の設定経緯を踏まえて紹介する。

## 2. レベル2地震動(タイプII)の検証

熊本地震では一部の周期帯でレベル2地震動（タイプII）を超える加速度応答スペクトルを示す地震動が観測された。熊本県はレベル2地震動

（タイプII）の地域別補正係数 $c_{1z}$ が0.85（一部0.7）の地域であることから、地域別補正係数とあわせて、レベル2地震動（タイプII）の妥当性の検証が行われた<sup>2)</sup>。検証にあたっての論点としては、以下の2点が挙げられている。

論点①：地震動そのものの大きさ

論点②：地震動の影響によって橋に生じた状態は目標とする性能を満足するものであったか

論点①については、熊本地震で観測された地震動と地域別補正係数を考慮したレベル2地震動（タイプII）、並びにその設定根拠である平成7年（1995年）兵庫県南部地震の地震動との比較が行われた。

平成8年以降の示方書では、内陸直下型地震が構造物に与える影響という観点で、それまでに地表面で観測された中で最も強い地震動である兵庫県南部地震の地震動を基本にレベル2地震動（タイプII）が耐震設計に導入されている。その標準加速度応答スペクトルは、兵庫県南部地震の際に地表面で観測された地震動の加速度応答スペクトル（減衰定数0.05）をもとに設定されたものである。その際、短周期地震動は地盤から構造物に入力する際に低減する効果等が見込めるという工学的判断から、短周期では地盤種別によっては観測された地震動を下回る値が設定された（図-1）。

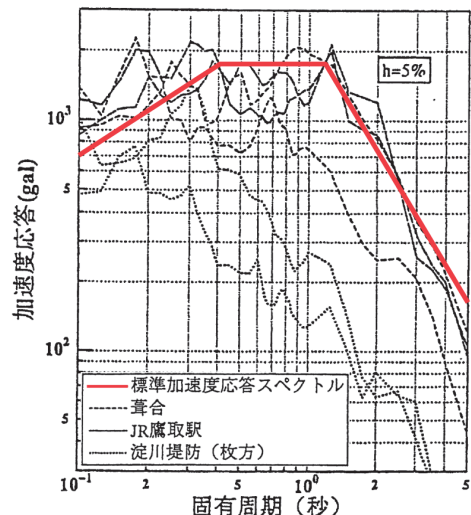


図-1 レベル2地震動(タイプII)の標準加速度応答スペクトル及びそのもととなった強震記録(II種地盤)

Examination of the Earthquake Motion used for the Seismic Design of Highway Bridges Using the Strong Motion Records of the 2016 Kumamoto Earthquakes

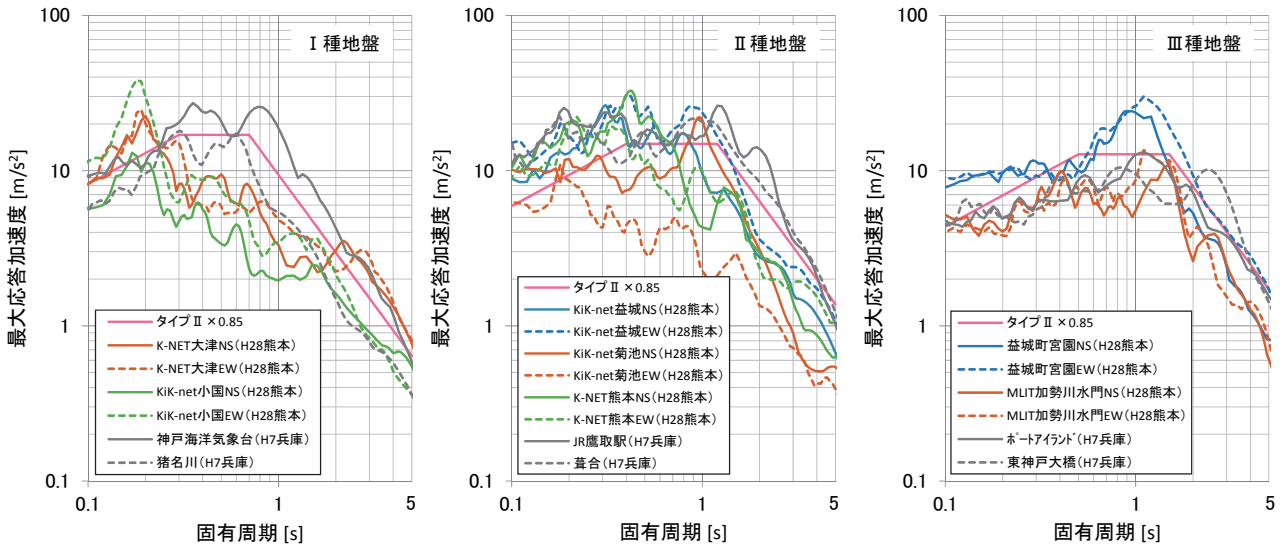


図-2 熊本地震と兵庫県南部地震の地震動及びレベル2地震動（タイプII）の比較(左からI種地盤、II種地盤、III種地盤)

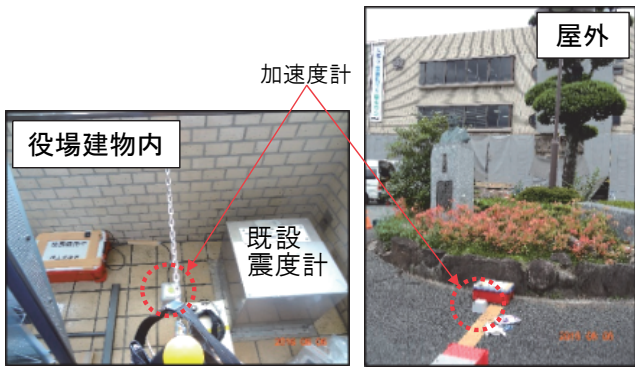


写真-1 役場建物内と屋外での余震観測状況

このような経緯を踏まえ、熊本地震の地震動とレベル2地震動（タイプII）及び兵庫県南部地震の地震動の比較が行われた。熊本地震で強い地震動が観測され、かつ地盤種別が判明している強震観測点の記録の加速度応答スペクトルを計算したものを図-2に示す。この図から、一部の周期帯で地域別補正係数を考慮したレベル2地震動（タイプII）を超えているものが見られ、特に益城町宮園の地震動は、構造物に影響の強い周期1秒程度で大きく超えていることがわかる。

ただし、この地震動は役場建物内で観測されたものであることから、建物の振動が影響したと考えられたため、国総研の余震観測調査<sup>3)</sup>によりその影響が分析されている<sup>2)</sup>。写真-1に益城町役場建物内に設置されている既設震度計近傍での余震観測状況と、建物の振動の影響が少ない屋外での余震観測状況を示す。2つの地震計で2016年6月18日および22日に観測された地震動の加速度応答スペクトル（減衰定数0.05）を図-3に示す。比較した結果、加速度応答スペクトルのピークには明らかに違いがあることから、建物内で観測された記

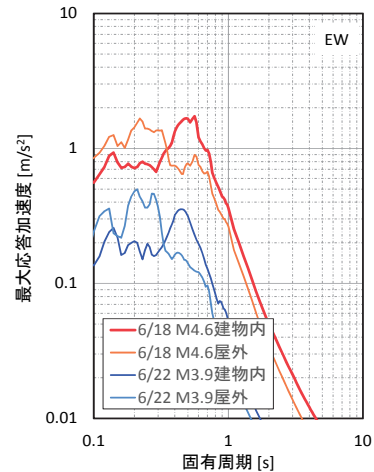


図-3 建物内外での余震観測記録の比較

録は建物の振動の影響が加わったものであり、橋の性能照査に用いる設計地震動と直接比較して議論できるデータではないとされた<sup>2)</sup>。なお、図-3の観測記録以外でも、同様の傾向が見られることが確認されている。建物内で得られた余震記録には周期約0.5秒に卓越したピークが見られる一方で、図-2の益城町宮園の地震動のピークは約1秒である。これは、熊本地震本震時の極めて強い地震動による地盤の塑性化が影響したものと考えられる。

益城町宮園以外の地震動は全体的にはレベル2地震動（タイプII）と同程度であり、短周期成分が卓越しているものは地震動が地盤から構造物に入力する際に低減する効果等を見込むことができる。以上のことから、熊本地震の地震動は、一部の周期帯でレベル2地震動（タイプII）を超えているものの、全体的には兵庫県南部地震の地震動に基づき設定されたレベル2地震動と同程度であると評価された。

論点②について、平成8年以降の示方書を適用

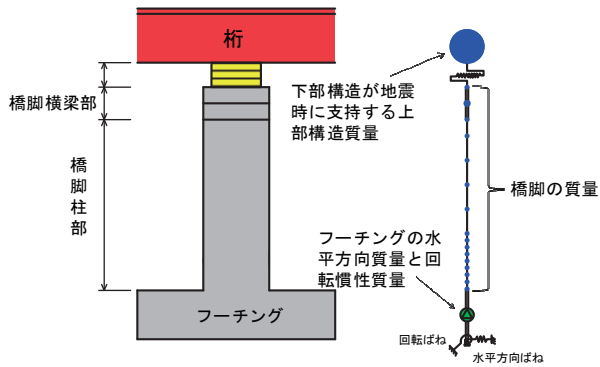


図-4 検討対象とする道路橋の解析モデル

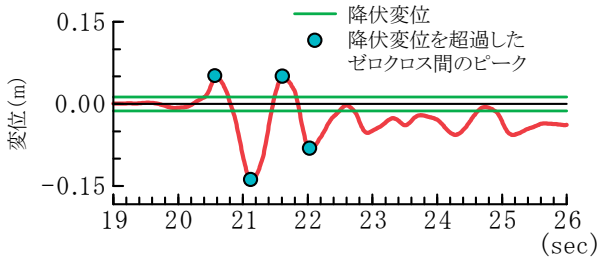


図-5 塑性応答の正負交番繰返し回数の計数の一例

したと考えられる一千を超える道路橋の大多数では、設計の目標とされた「落橋、倒壊しない」あるいは「損傷が限定的」という性能が達成されていた。目標が達成されなかった3橋（俵山大橋、扇の坂橋、大切畑大橋）に対し、被害状況の分析が行われた結果、地震動の影響だけでなく、いずれも地盤変状に伴う下部構造の移動の影響が加わって生じた被害であると評価されている<sup>2)</sup>。

以上のような妥当性の検証を踏まえ、平成29年の示方書でも、地域別補正係数を含め、従来のレベル2地震動（タイプII）の加速度応答スペクトルが踏襲されている。一方、断層変位、斜面崩壊等による地盤変状は、地震動による慣性力等とは橋に対して作用する機構や不確実性が大きく異なるため、橋の設計状況としては見込まれていない。地盤変状の影響は、架橋位置と形式の選定において耐震設計上考慮するものとされ、その影響を受けないことが標準であり、やむを得ず影響を受ける場合は、少なくとも致命的な被害が生じにくくなるような構造とする等の対策を講じることとされている<sup>1)</sup>。

### 3. 繰返し作用する地震動の影響

熊本地震では最大前震と本震の2回にわたり最大震度7が計測された。平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震や平成16年（2004年）新潟県中越地震も含め、近年の地震では、本震及び前震・余震により強い地震動が繰返し作用した道路橋

表-1 繰返し入力パターン

地盤種別	区分	観測地点	入力パターン	名称
II	KiK-net	益城	最大前震 <sup>*1</sup> +前震 <sup>①</sup> *2+前震 <sup>②</sup> *3+本震 <sup>*4</sup> +余震 <sup>*5</sup>	(1)
	KiK-net	豊野	最大前震 <sup>*1</sup> +本震 <sup>*4</sup>	(2)
II・III	K-NET	熊本	最大前震 <sup>*1</sup> +本震 <sup>*4</sup> +余震 <sup>*5</sup>	(3)
	K-NET	宇土	最大前震 <sup>*1</sup> +本震 <sup>*4</sup>	(4)
III	MLIT	加勢川	最大前震 <sup>*1</sup> +本震 <sup>*4</sup>	(5)
	MLIT	緑川	最大前震 <sup>*1</sup> +本震 <sup>*4</sup>	(6)

※1: 4/14 21:26 発生、※2: 4/14 22:07 発生、※3: 4/15 00:03 発生、  
 ※4: 4/16 01:25 発生、※5: 4/16 01:45 発生

表-2 検討対象とした道路橋の構造概要

道路橋名	A	B	C	D	E	F
地盤種別	II		III			
上部構造	3径間連続合成少数鋼板桁	3径間連続非合成鋼箱桁	4径間連続非合成鋼板桁	6径間連続非合成細鋼箱桁	3径間連続非合成鋼板桁	
橋脚	張出し式橋脚					
支承条件	固定	分散			固定	
基礎構造	杭基礎					
固有周期(s)	1.23	1.01	0.90	1.11	0.53	0.68

表-3 塑性応答の正負交番繰返し回数の計数結果

地盤種別	道路橋	入力パターン	地域別補正係数 1.0		地域別補正係数 0.85	
			応答塑性率		応答塑性率	
			2~3	3~4	2~3	3~4
II	A	(1)	0	0	1	0
	B	(4)	1	0	3	1
	C	(4)	1	0	3	0
III	D	(4)	0	0	1	0
		(5)	0	0	2	0
	E	(3)	2	0	2	0
		(4)	1	0	2	0
	F	(4)	0	1	0	1

※表内の数字の単位は(回)

もみられた。しかし、平成8年以降の示方書を適用して設計された道路橋に関しては、繰返しの影響を含め、地震動のみが原因で目標とする性能が達成されなかったものは確認されていない。

橋に作用する地震動の特性値は、従来、前震・余震の影響を明確に考慮して設定されてきてはいない。しかし、本震単独でも震源過程や地盤構造の影響により強い地震動が繰返し作用することがあるため、道路橋の耐震設計では、地震動の繰返し作用の影響を考慮して部材の抵抗の特性値が設定されている<sup>4)</sup>。

図-2のとおり、熊本地震では、建物の振動による影響がない益城町宮園以外のII種地盤およびIII種地盤の観測地点でも、構造物への影響が大きいとされる固有周期1秒程度が卓越する強震記録が得られている。そこで、II種地盤またはIII種地盤に架橋されており、レベル2地震動を考慮して耐震設計された道路橋に対し、架橋地点と同じ地盤種別の観測地点で実測された熊本地震の前震・本震・余震による大加速度の強震記録を順次作用させる非線形動的解析を実施した。使用した道路橋の解析モデルを図-4に、地震動の入力パターンを表-1に示す。

検討対象とした道路橋は、表-2の通り上部構造や支承条件、架橋地点の地盤種別等が異なる実際



に供用中の道路橋A～Fである。本検討では、強い地震動の繰返し作用による影響を評価する指標として、曲げ破壊型RC橋脚の終局限界状態を設定する上で重要である塑性応答の正負交番繰返し回数に着目した。塑性応答の正負交番繰返し回数の計数方法は、図-5の通り降伏変位（正負）より大きな振幅変位が地震応答中に生じる回数を計数した<sup>5)</sup>。さらに、検討対象とした道路橋に対し、地域別補正係数0.85を考慮して新たに耐震設計した道路橋の解析モデルを設定し、同様の解析を行った。

表-3は、実施した解析ケースのうち、塑性応答の正負交番繰返し回数が1以上となったケースを抜粋したものである。応答塑性率は、橋脚に生じる塑性変形の度合いを示した指標である。RC橋脚のレベル2地震動に対する耐震設計で考慮される限界状態に対応する特性値は、正負交番載荷実験に基づき<sup>1)</sup>、塑性率3～4の塑性応答の繰返し回数を根拠に設定されている<sup>4)</sup>。それを踏まえ、本検討では塑性率3～4と2～3に着目した。表-3より、多くの解析ケースでは、強い地震動を順次作用させても橋脚頂部の応答変位は降伏変位を一度も超えなかった。また地域別補正係数を小さくしても、塑性応答の正負交番繰返し回数が大きく増加したものは見られなかった。

なお、道路橋示方書・同解説V耐震設計編<sup>1)</sup>に示される上述のRC橋脚の正負交番載荷実験は、応答塑性率2～3及び3～4で塑性応答の正負交番繰返し回数が6回を計数する載荷パターンで実施されている。表-3より、本検討で実施した解析ケースでは、実験の際に考慮された塑性応答の正負交番繰返し回数を下回る結果となった。

上記を踏まえ、レベル2地震動（タイプⅡ）の特性値は、従来の示方書のものが踏襲されている。

#### 4. おわりに

平成29年に改定された示方書では、熊本地震で道路橋にも被害が生じたことを受け、熊本地震で実測された強震記録を基に地震動の特性値の設定経緯を踏まえた検証が行われた。その結果、熊本地震の地震動は、全体的には従来のレベル2地震動（タイプⅡ）と同程度であると評価された。また、熊本地震の前震や余震を含めた応答の繰返し作用は、橋脚の抵抗の特性値の設定において考慮している繰返し作用よりも小さいことを確認した。

国総研では今後も、強震観測や地震直後の余震観測調査等による実測記録の取得を継続し、橋の耐震設計に用いる地震動の検討を進めていく。

#### 謝 辞

大阪ガス（株）、気象庁、熊本県、神戸市、西日本旅客鉄道（株）、（国研）防災科学技術研究所（以上五十音順）並びに旧建設省土木研究所及び国土交通省の観測による強震記録を使用した。ここに記して謝意を表する。

#### 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) 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、2016 ([http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01\\_sg\\_000312.html](http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000312.html)) (2018. 5. 7閲覧)
- 3) 石井洋輔、片岡正次郎、羽田浩二、山田雅行：余震観測調査に基づく益城町役場の地震観測記録の検証、土木学会第73回年次学術講演会概要集、2018（予定）
- 4) （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
- 5) 石井洋輔、矢部正明、中尾吉宏、片岡正次郎：2016年熊本地震の強震動の繰返し作用が道路橋の耐震性に及ぼす影響の検討、土木学会論文集A1（構造・地震工学）、Vol.74、No.4（地震工学論文集第37巻）、2018（掲載予定）

片岡正次郎



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部道路地震防災研究室長、博（工）  
Dr. Shojiro KATAOKA

石井洋輔



国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部道路地震防災研究室 研究員  
Yosuke ISHII

中尾吉宏



研究当時 国土交通省国土技術政策総合研究所道路構造物研究部道路地震防災研究室主任研究官、現 社会資本マネジメント研究センター社会資本マネジメント研究室長  
Yoshihiro NAKAO