

2016年熊本地震で観測された強震記録の地震応答特性

矢部正明¹・塚本英子²

¹正会員（株）長大 構造事業本部（〒505-0821 茨城県つくば市東平塚730）

²非会員（株）長大 構造防災技術部（〒505-0821 茨城県つくば市東平塚730）

1. はじめに

写真-1は、益城町に架かる第一畑中橋の桁と橋台頂部間と桁と中間橋脚頂部間に設置された帯状ゴム沓が橋軸直角方向に迫り出している様子を示したものである。帯状ゴム支承は、橋軸方向へのずれはわずかで橋軸直角方向に大きく迫り出していた。当然、橋軸直角方向への桁の動きによって生じたものと思われるが、橋軸直角方向への迫り出し量が大きく、桁の橋軸直角方向への振動だけでここまで迫り出すかが現地調査の際に感じた印象である。写真-2は、熊本城の石碑である。やはり、水平方向の振動だけで、これだけ綺麗に回転するかが現地調査の際に感じた印象である。

本報告は、2016年熊本地震の最大前震（2016.4.14 21:26, M6.5）と本震（2016.4.16 01:25, M7.3）に関して防災科学技術研究所の強震観測網（K-NET, Kik-net）¹⁾、気象庁の強震観測データ²⁾、やはり気象庁のホームページで公開されている地方公共団体震度計の波形データ（熊本県）³⁾を收集整理し、地震動の上下方向成分が橋の地震応答に与える影響を整理したものである。

2016年熊本地震のような内陸地殻内地震によって生じる地震動の水平方向成分と上下方向成分が構造物の地震応答に与える影響を検討した研究としては、川島らの研究⁴⁾がある。川島らは、1993年釧路沖地震、1994年Northridge地震、1995年兵庫県南部地震による強震記録を用いて、どのような確率で構造物に生じる水平方向の応答加速度と同じ瞬間に大きな上下方向地震動加速度が作用することがあるかを検討している。川島らは、一般に上下方向振動に対する構造物内の増幅は著しいものではないため、上下方向成分の地震動加速度そのものを構造物の上下方



写真-1 益城町第一畑中橋の帯状ゴム沓の迫り出し



写真-2 熊本城石碑の回転

向応答とみなし、水平方向地震動による1自由度系の線形地震応答を求め、水平方向の応答加速度が最大値に近い値をとる瞬間に上下方向加速度も最大値に近い値をとる確率を検討している。⁴⁾

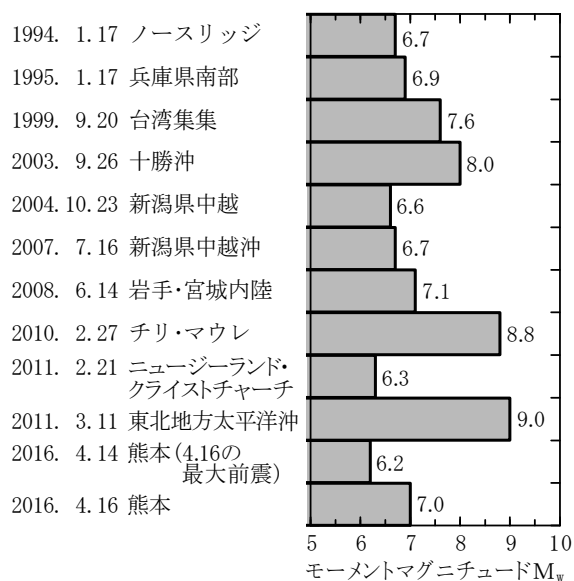


図-1 既往の被害地震と2016年熊本地震の規模

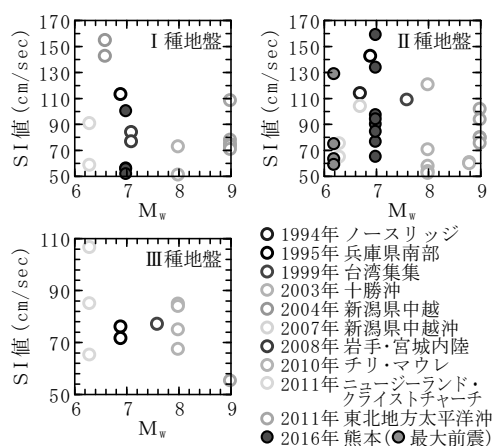


図-2 既往の被害地震による強震記録のSI値

橋梁構造物の多くが、地震動の上下方向成分による地震応答に寄与する固有振動モードは高次であり、その地震応答が大きく増幅することは少ない。しかし、橋梁形式や橋梁を構成する構造要素によっては、地震動の水平方向成分による地震応答に寄与する固有振動モードと地震動の上下方向成分による地震応答に寄与する固有振動モードが連成する橋や地震動の水平方向成分による地震応答によって上下方向の作用を受ける構造要素がある。前者の例としては、曲線橋の上部構造やラーメン橋脚の橋軸直角方向（ラーメン面内）および偏心橋脚、後者の例としては支承構造がある。本報告は、地震動の水平方向成分によって励起される地震応答と上下方向成分によって励起される地震応答を求め、地震動の上下方向成分による地震応答が橋の地震応答をどの程度増加

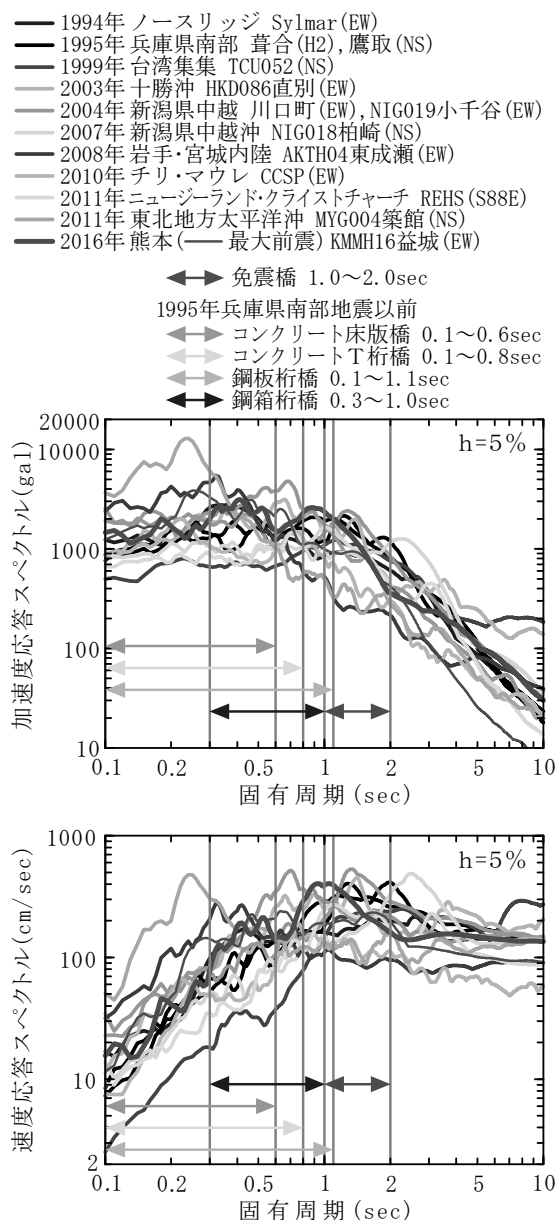


図-3 既往の被害地震による強震記録の加速度応答スペクトル

させるかを検討した。

2. 検討対象とした強震記録

図-1は、1994年以降に起きた地震のうち、橋梁等に被害を生じた地震で、強震記録が公開されている地震のモーメントマグニチュード M_w を整理したものである。2016年熊本地震の最大前震は $M_w=6.0^5$ 、本震は $M_w=7.0^6$ という気象庁が算出した値を示した。本震は、1995年兵庫県南部地震による $M_w6.9$ よりも大きいことがわかる。図-1に示した地震による強震記録を検討対象とした。図-2は、図-1に示した地震による強震記録の水平成分から求めたSI値を整理し

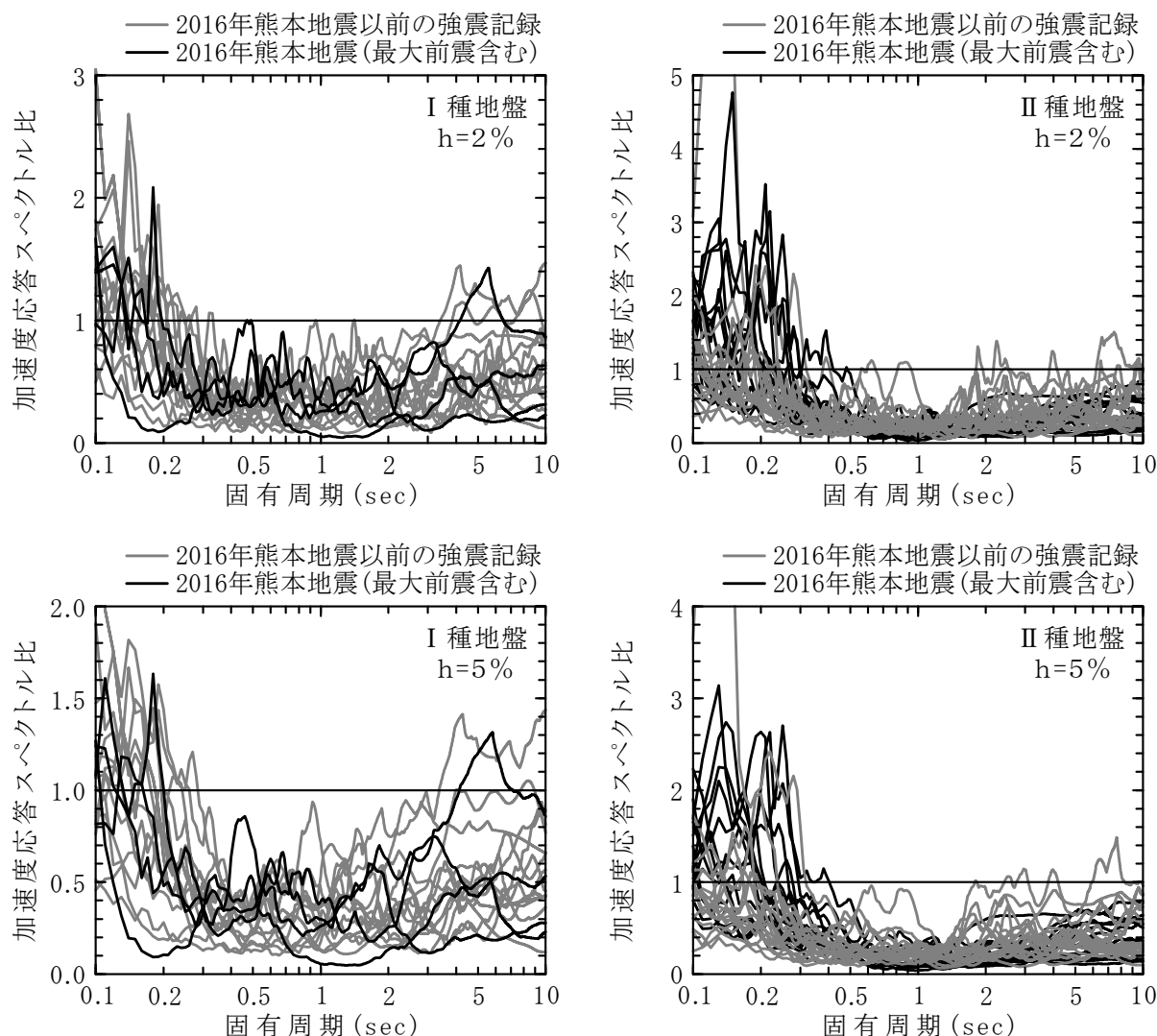


図-4 既往の被害地震による強震記録と 2016 年熊本地震による強震記録の水平方向成分と上下方向成分による地震応答の比較

たものである。2016年熊本地震で公開されている強震記録のうち、気象庁や熊本県が公開している強震記録の観測地点は耐震設計上の地盤種別の判定ができるほどの地盤条件が公開されていないため、ここでは、強震記録から求めた加速度応答スペクトルの周期特性等を参考に、II種地盤と仮定した。また、気象庁発表の震度階で最大前震と本震で7と発表された熊本県益城町宮園で観測された強震記録は、震度計が建物内に設置されているので、図-2には示していない。益城町宮園の震度計で観測された記録のSI値は、最大前震EW成分がSI値約171cm/sec、本震EW成分がSI値約195cm/secと大きい。

図-3は、図-2に示した強震記録のうちII種地盤に分類された強震記録の加速度応答スペクトルを比較したものである。熊本県は道路橋示方書V耐震設計編に規定される地域別補正係数ではB地域・C地域と設計地震動の標準値を85%～70%に低減される地

域であるが、一度地震が起きると、その地震動強度は、地域別補正係数の値に関係なく、大きな地震動強度となることがわかる。

後述する検討では、1994年ノースリッジ地震が1強震記録、1995年兵庫県南部地震が4強震記録、1999年台湾集集地震が2強震記録、2003年十勝沖地震が11強震記録、2004年新潟県中越地震が2強震記録、2007年新潟県中越沖地震が1強震記録、2008年岩手・宮城内陸地震が2強震記録、2010年チリ・マウレ地震が2強震記録、2011年ニュージーランド・クライスイトチャーチ地震が7強震記録、2011年東北地方太平洋沖地震が11強震記録、2016年熊本地震の最大前震が5強震記録、本震が12強震記録である。何れも、強震記録の水平方向成分がSI値50を超えた記録である。

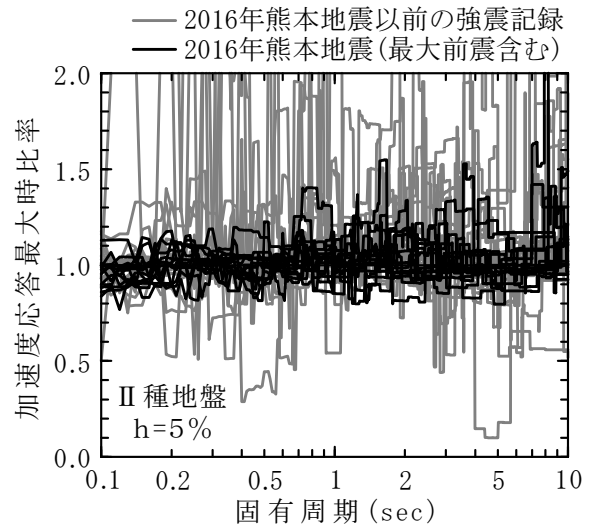
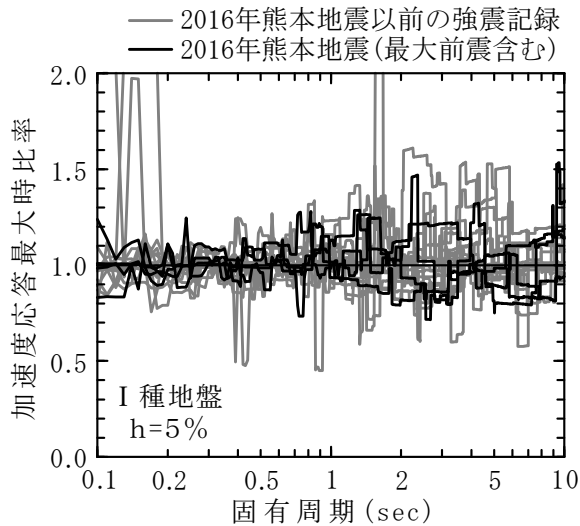


図-5 既往の被害地震による強震記録と 2016 年熊本地震による強震記録の水平方向成分と上下方向成分による地震応答の最大値発生時刻の比較

3. 水平方向成分による地震応答と上下方向成分による地震応答の比較

図-4と図-5は、減衰定数5%と2%の1自由度系の固有周期を0.1秒から10.0秒間で変化させて求めた加速度応答スペクトル比RSAと加速度応答最大時比率Rtimeを整理したものである。式(1)に加速度応答スペクトル比RSA、式(2)に加速度応答最大時比率Rtimeの定義を示す。

$$RSA(T, h) = \frac{SA_V(T, h)}{SA_H(T, h)} \quad (1)$$

$SA_V(T, h)$: 上下方向成分による固有周期 T 、減衰定数 h の加速度応答スペクトル

$SA_H(T, h)$: 水平2成分による固有周期 T 、減衰定数 h の加速度応答スペクトルの大きい方の値

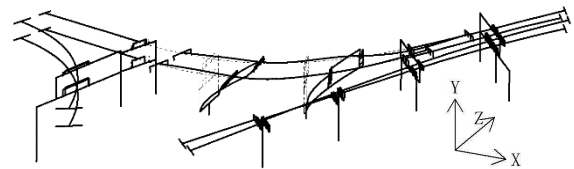
$$Rtime = \frac{time_V}{time_H} \quad (2)$$

$time_V$: $SA_V(T, h)$ の発生時刻

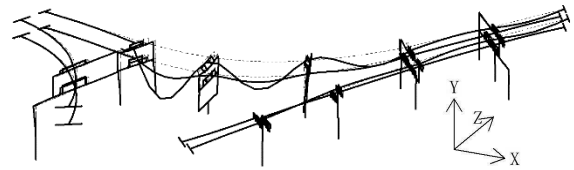
$time_H$: $SA_H(T, h)$ の発生時刻

式(1)と式(2)の定義に示すように、図-4と図-5は、固有値解析より得られる固有振動モードにおいてそのモード寄与率（刺激係数）が、3方向とも有意な値となるような複雑な固有振動モード形を有する橋梁にとって有効な情報となる。図-4と図-5は、水平方向成分と上下方向成分の比を取っているの、図-2には示さなかった益城町宮園の震度計で観測された記録も示している。

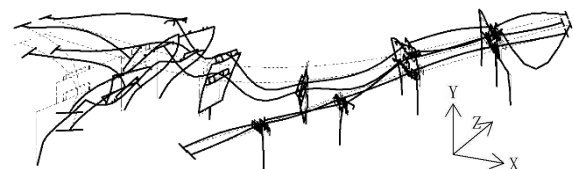
図-4より、耐震設計上の地盤種別がI種地盤の場合



1次固有振動 約 1.35 秒



34次固有振動 約 0.39 秒



37次固有振動 約 0.36 秒

図-6 水平 2 方向と上下方向の振動が連成する橋の固有振動モード形

には、2016年熊本地震が際だって上下方向成分による地震応答が大きいという傾向は現れていないことがわかる。II種地盤では、明らかに、固有周期0.4秒付近から短周期側で上下方向成分による地震応答が水平方向成分による地震応答よりも大きくなっていることがわかる。

図-5より、明らかに、2016年熊本地震による強震記録による地震応答の加速度応答最大時比率Rtimeは、1.0を中心に分布しており、地震動の上下方向成分と水平方向成分による最大地震応答が同時に生

じる可能性が高いことがわかる。

4. 上下方向成分が橋の地震応答に与える影響

図-6は、曲線橋と直線橋，ラーメン式橋脚および偏心橋脚が混在する都市内高架橋を模擬した解析モデル⁷⁾の水平2方向と上下方向のモード寄与率がそれぞれ最大となる時の固有振動モード形である。図に示すように，水平方向と鉛直方向の連成の度合いが強いことがわかる。図-7は，水平2方向と上下方向のモード寄与率（刺激係数）を整理したものである。水平X方向のモード寄与率は1次約1.35秒，上下Y方向のモード寄与率は34次約0.39秒と15・16次の約0.59秒，水平Z方向のモード寄与率は37次約0.36秒で大きな値となっているが，何れの固有振動モードとも，水平2方向と上下方向の固有振動モードが連成していることがわかる。

図-8に示す1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅記録の3成分と，2016年熊本地震KMMH16益城記録の3成分を図-6と図-7に示すような固有振動特性を有する橋に作用させて線形動的解析を行い，水平2方向成分による地震応答値の最大値と水平2方向成分と上下方向成分による地震応答値の最大値を比較した。比較は，死荷重によって生じる応答（初期状態）を無視した動的応答値だけを比較した。

図-9は橋脚上の支承構造に生じる橋軸方向変位，橋軸直角方向水平力，鉛直方向反力，橋軸方向水平力を比較したものである。図には，“水平2方向成分+上下方向成分による地震応答”を，“水平2方向成分による地震応答”で除した値を示している。図より，1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅記録による地震応答には，上下方向成分の影響はほとんど現れて

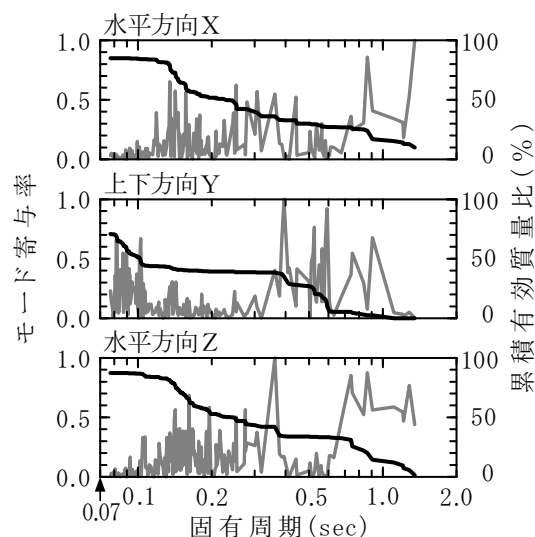
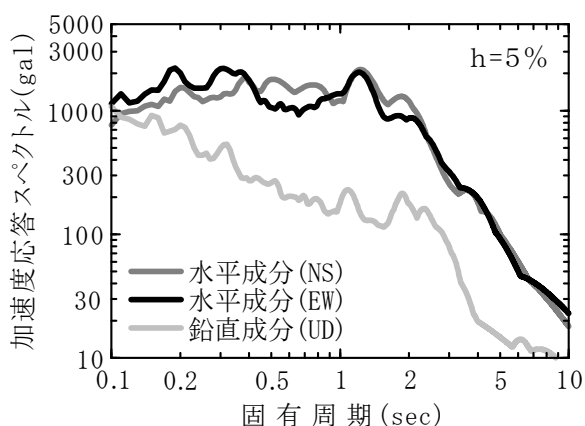


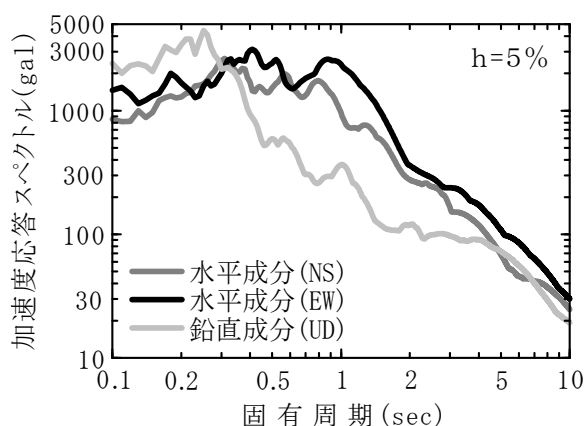
図-7 水平 2 方向と上下方向の振動が連成する橋の固有振動特性（モード寄与率）

いないのに対して，2016年熊本地震KMMH16益城記録による地震応答は上下方向成分の影響によって地震応答が大きくなるものが数多くあることがわかる。逆に，上下方向成分の影響が大きい場合，水平2方向成分による地震応答よりも小さくなるものもある。

図-10は橋脚基部の断面力，図-11は桁の中央位置に生じる断面力を，水平2方向成分による地震応答値の最大値と水平2方向成分と上下方向成分による地震応答値の最大値を比較した。橋脚基部断面力と桁の中央位置断面力ともに，1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅記録による地震応答には，上下方向成分の影響はほとんど現れていないのに対して，2016年熊本地震KMMH16益城記録による地震応答は上下方向成分の影響によって地震応答が大きくなるものが数



(1) 1995年 兵庫県南部地震 JR鷹取駅



(2) 2016年 熊本地震 KMMH16益城

図-8 地震動の水平 2 方向成分と上下方向成分による橋の地震応答の変化を検討した入力地震動

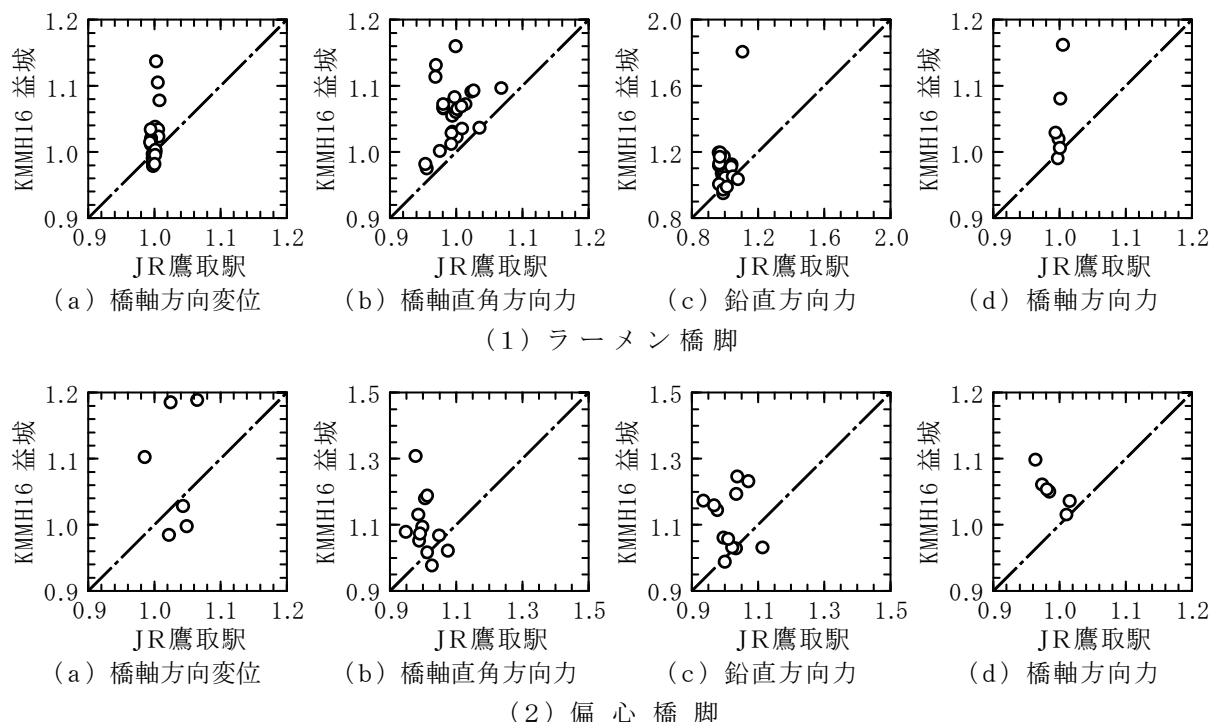


図-9 水平2方向と上下方向の振動が連成する橋の地震応答：支承構造に着目

多くあることがわかる。

図-12と図-13は、図-9で上下方向成分の影響によって地震応答が大きくなった支承の鉛直方向反力、図-10で上下方向成分の影響によって地震応答が大きくなった橋脚基部の軸力、図-11で上下方向成分の影響によって地震応答が大きくなった桁中央の面内曲げモーメントの応答波形を比較したものである。

2016年熊本地震KMMH16益城記録による地震応答波形は、水平2方向成分による地震応答波形と水平2方向成分と上下方向成分による地震応答波形で、波形の形状や周期特性に変化が生じていることがわかる。特に、偏心橋脚基部の軸力は、水平2方向成分と上下方向成分による地震応答波形に短周期成分が多く含まれた波形となっている。1995年兵庫県南部地震JR鷹取駅記録による地震応答波形は、偏心橋脚基部の軸力を除けば、水平2方向成分による地震応答波形と水平2方向成分と上下方向成分による地震応答波形は、波形の形状と周期特性ともに、近似していることがわかる。しかし、偏心橋脚基部の軸力は、水平2方向成分と上下方向成分による地震応答波形には短周期成分が多く含まれた波形となっている。

5. まとめ

本報告は、2016年熊本地震の最大前震と本震で観

測された強震記録を用いて、地震動の水平方向成分によって励起される地震応答と上下方向成分によって励起される地震応答を求め、地震動の上下方向成分による地震応答が橋の地震応答をどの程度増加させるかを検討した。以下に検討結果を列挙する。

- 1) 2016年熊本地震のⅡ種地盤上で観測された強震記録（気象庁公開も含む）は、固有周期0.4秒付近から短周期側で上下方向成分による地震応答が水平方向成分による地震応答よりも大きくなっていることがわかる。
- 2) 2016年熊本地震の強震記録による地震応答は、地震動の上下方向成分と水平方向成分による最大地震応答が同時に生じる可能性が高い。
- 3) 2016年熊本地震KMMH16益城記録による地震応答波形は、水平2方向成分による地震応答波形と水平2方向成分と上下方向成分による地震応答波形で、波形の形状や周期特性に変化が生じている。
- 4) 偏心橋脚基部の軸力は、水平2方向成分による地震応答波形に比較して水平2方向成分と上下方向成分による地震応答波形には短周期成分が多く含まれた波形となっている。

参考文献

- 1) <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 2) <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/ind>

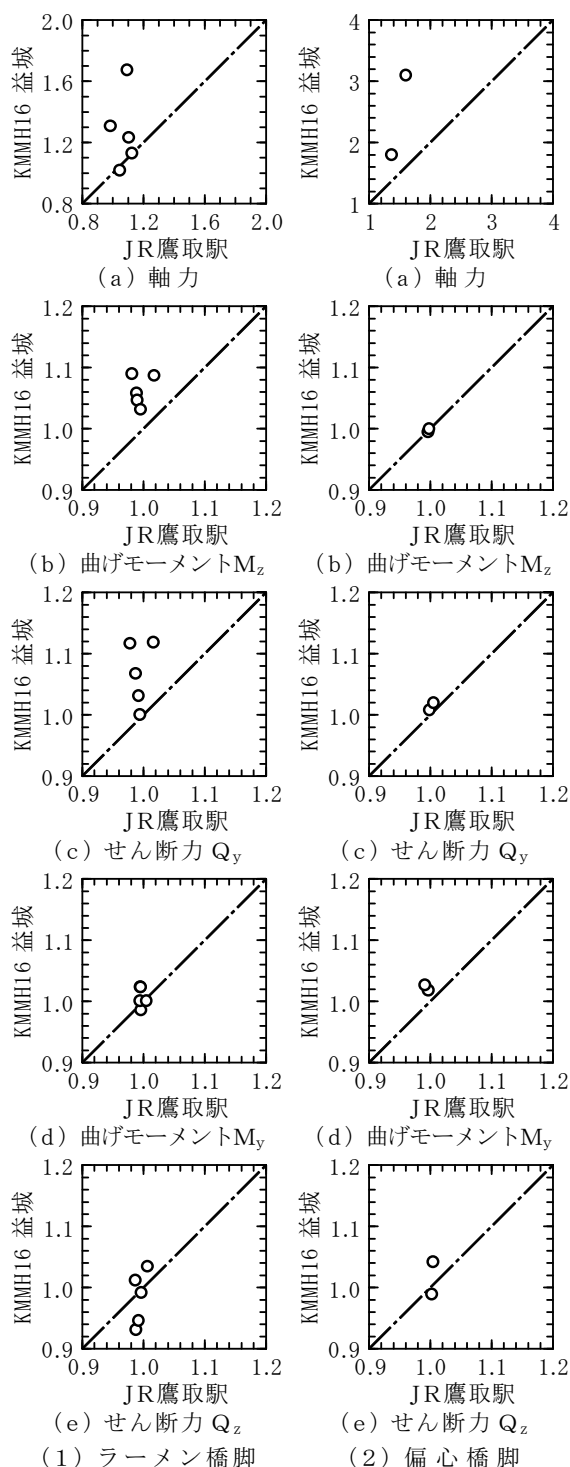


図-10 水平2方向と上下方向の振動が連成する
橋の地震応答：橋脚基部断面力に着目

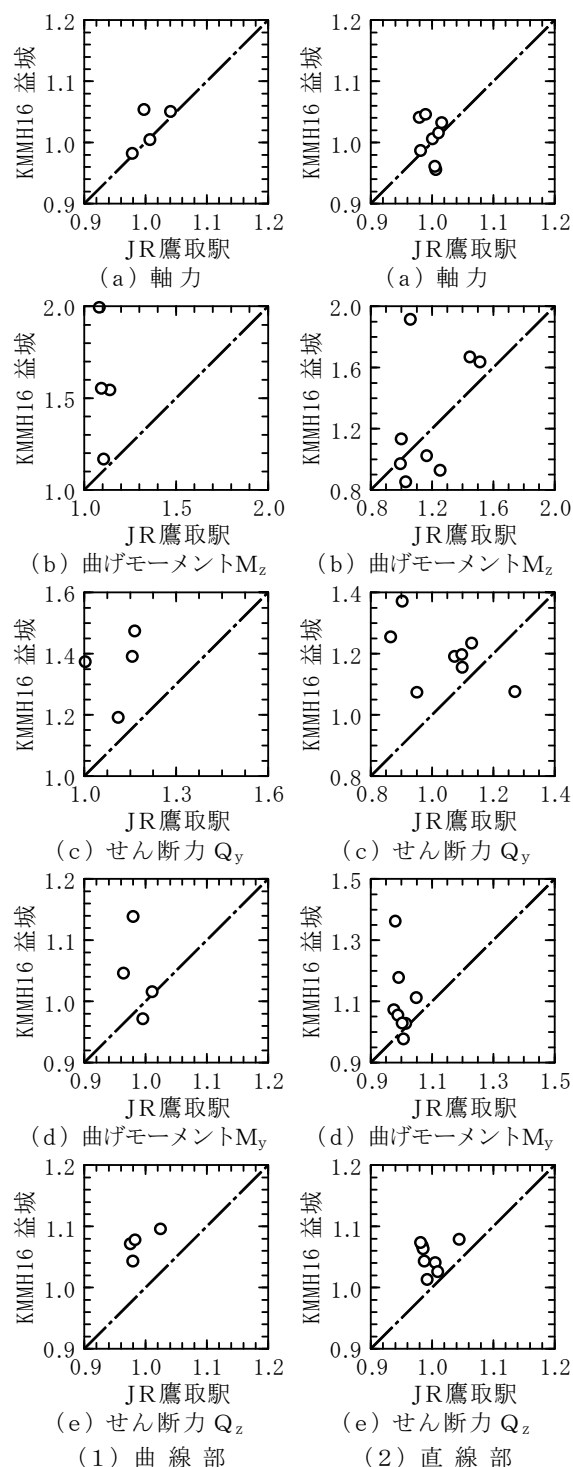


図-11 水平2方向と上下方向の振動が連成する
橋の地震応答：桁中央位置断面力に着目

[ex.html](#)

- 3) http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/160416_kumamoto/index2.html
- 4) 武村浩志，川島一彦：水平方向応答加速度と上下方向加速度がともに最大値に近い値を同時に生じる確率，東京工業大学土木工学科，Report N0.TIT/EERG

95-1, 1995.

- 5) <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/cmt/fig/cmt20160414212634.html>
- 6) <http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/mech/cmt/fig/cmt20160416012505.html>
- 7) 数井佑丞，藤野陽三，SIRINGORINGO Dionysius

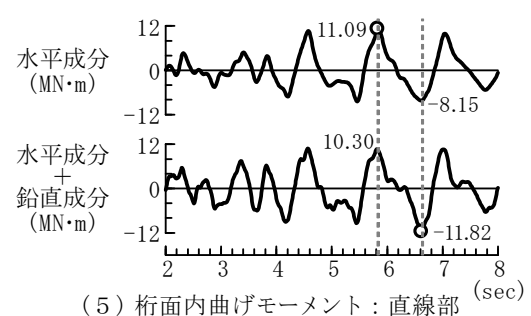
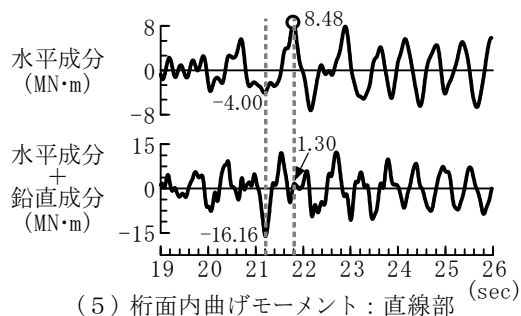
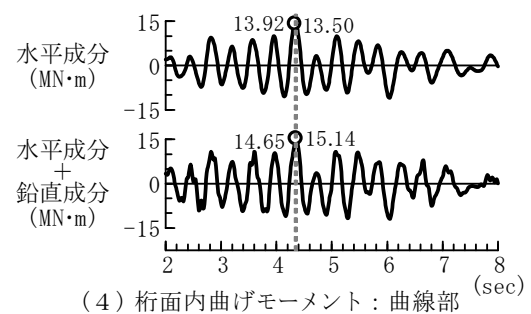
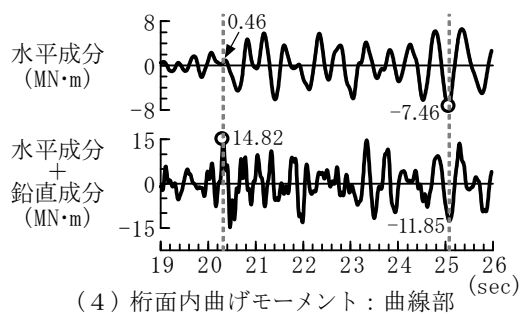
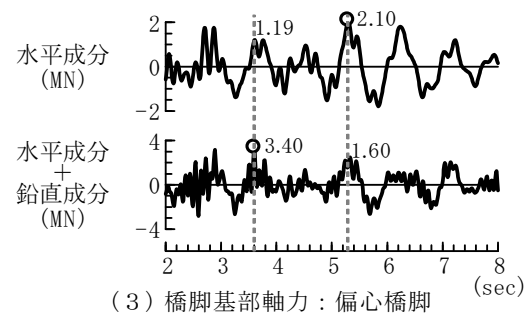
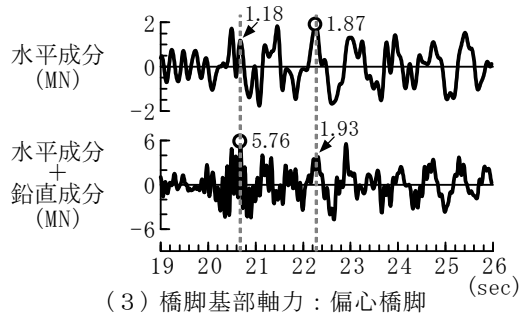
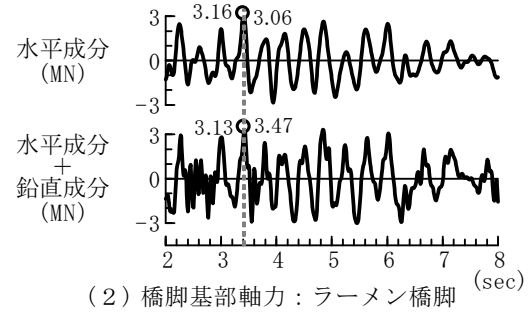
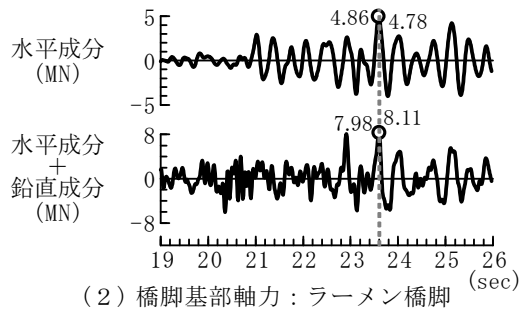
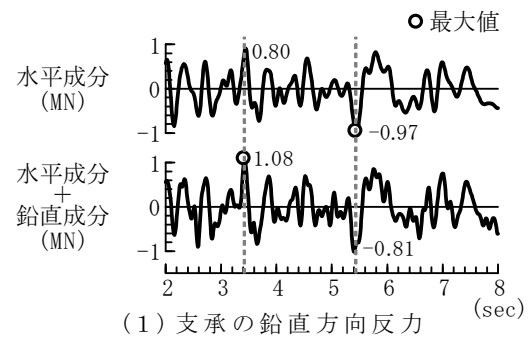
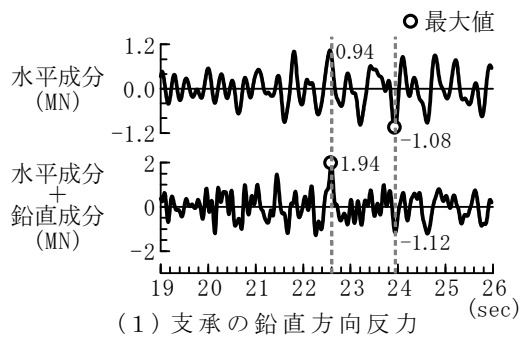


図-12 2016年熊本地震 KMMH16 益城による地震応答

図-13 1995年兵庫県南部地震 JR 鷹取駅による地震応答

Manly, 矢部正明：都市内立体高架橋の免震ゴム支承の地震時鉛直応答とその安全性，土木学会第71回年次学術講演会第I部門講演論文集，2016.（投稿中）