

2016年熊本地震の鉛直地震動が 曲線橋のゴム支承部の引張反力に及ぼす影響

崔 準祐¹・中島 昌矢²・植田 健介³

¹正会員 九州大学大学院 助教 工学研究院 社会基盤部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡744)
E-mail: choi@doc.kyushu-u.ac.jp

²学生会員 九州大学大学院 修士課程 建設システム工学専攻
(〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

E-mail: nakashima@doc.kyushu-u.ac.jp

³正会員 ゴム支承協会 技術委員会 (〒107-0051 東京都港区元赤坂 1 丁目 5-26 東部ビル)
E-mail: ueda@mgb-gouda.co.jp

2016 年 4 月に発生した平成 28 年熊本地震では、観測史上初めて震度 7 が 2 回立て続けて観測された。この大地震により道路や橋梁などの社会基盤施設に甚大な被害をもたらしたが、今回の地震の特徴の一つとして、鉛直地震動の加速度が水平地震動ほど大きかったことが挙げられる。これまで鉛直地震動が構造部の動的応答に及ぼす影響は小さいとされてきたが、今後もこれほどの大きい鉛直地震動が発生するとなると構造物の耐震設計において看過できないものと考えられる。本研究では、地震時上部構造の挙動が複雑と言われている仮定の曲線橋モデルと直線橋モデルを対象に、2016 年熊本地震の観測波を用いた地震応答解析を実施し、鉛直地震動が曲線橋モデルのゴム支承部の引張反力に及ぼす影響について基礎的検討を行った。

Key Words : Kumamoto earthquake, vertical wave, curved bridge, rubber bearing, uplift force

1. はじめに

2016 年 4 月に発生した平成 28 年熊本地震（以降、熊本地震と表記）では、観測史上初めて震度 7 が 2 回立て続けて観測された。また、余震活動も活発で震度 6 弱以上を観測した地震が 7 回発生しており、こうした複数の大地震により道路や橋梁などのインフラに甚大な被害をもたらした。今回の地震の特徴としては、強震が複数回発生していることも挙げられるが、観測波における鉛直地震動の加速度レベルが水平地震動ほど大きかったことも挙げられる。KiK-net 益城において観測された鉛直地震動の加速度を調べてみると、4 月 14 日に観測された地震動では 1399gal、4 月 16 日に観測された地震動では 873gal であり、道示標準波のレベル 2 地震動の水平方向加速度レベルを上回っていることがわかる。過去の地震では鉛直地震動が水平地震動より小さいこともあり、これまで鉛直地震動が構造部の動的応答に及ぼす影響は小さいとされてきたが、今後もこれほどの大きい鉛直地震動が発生するとなると構造物の耐震設計において看過できないものと考えられる。

また、熊本地震により被災した橋梁においてゴム支承が破損、破断した橋梁が複数橋存在している。写真-1 には、大切畑大橋の A2 橋台に設置しているゴム支承の破損状況を示している。本橋は、平成 8 年の道路橋示方書に基づいて修正設計され、平成 13 年に竣工された 5 径間連続鋼曲線鋼桁橋であるが、ほとんどのゴム支承が熊本地震により破損、破断している。周辺には地表断層



写真-1 熊本地震により破損したゴム支承
(大切畑大橋 A2 橋台のゴム支承, 2016.5.13 撮影)

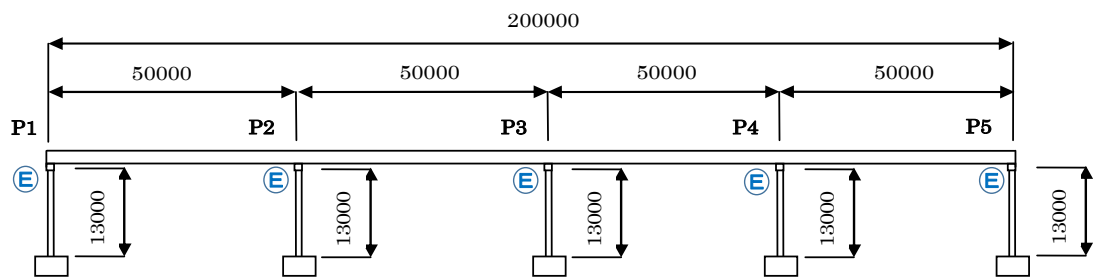


図-1 検討対象橋梁の概略図 (単位: mm)

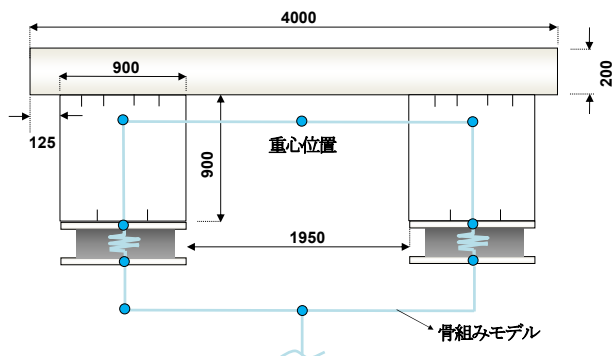


図-2 上部構造の断面図 (単位: mm)

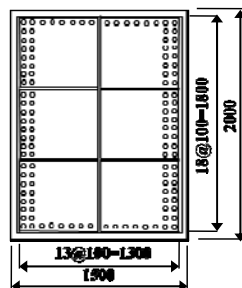


図-3 橋脚柱の断面図 (単位: mm)

表-1 上部構造の諸元

断面積(m^2)	0.124
断面2次	I_z 0.100
モーメント(m^4)	I_y 0.209
ねじり剛性(m^4)	0.203

も確認されており、断層破壊による大きな地盤変形によりゴム支承がせん断破壊した可能性もあるが、写真-1に示すようにプレートとゴム支承が剥がれた形で破壊したものもあることから、強い鉛直地震動と曲線橋の上部構造の複雑な動的挙動によりゴム支承部に大きな上揚力が発生した可能性も考えられる。

そこで本研究では、鉛直地震動が地震時上部構造の挙動が複雑と言われている曲線橋モデルの地震時応答に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、ゴム支承を有する仮想の曲線橋モデルと直線橋モデルを対象に熊本地震の観測波を用いた地震応答解析を実施した。本解析検討では、ゴム支承部の上揚力（本稿では、引張反力として扱う）を中心に鉛直地震動の影響を調査しているが、検討ケースとしてゴム支承部の鉛直剛性を一般的な線形モデルとした場合に加え、ゴム支承部の鉛直剛性を圧縮側と引張側で異なるように設定した非線形モデルとした場合についても検討を行った。ゴム支承の地震時鉛直挙動に着目した検討事例はあるが²⁾³⁾、そこにはゴム支承の実剛性に基づいた検討は行われていない。筆者らが過去に実施した実験では、ゴム支承の引張剛性は圧縮剛性に比べ 1/10 程度低く評価されていることから⁴⁾、本研究ではゴム支承の引張実験結果に基づいて検討した。

2. 解析対象橋梁

本研究では、図-1 と示すような橋長 200m を有する仮想の 4 径間連続鋼箱桁橋を対象とし、直線橋モデル（以

後、Model A）と曲率半径 R をパラメーターとし、2 つの曲線橋（Model B : $R=150m$, Model C : $R=106m$ ）を作成して比較検討を行った。上部構造は鋼箱桁とコンクリート床版で構成されており、その諸元と断面図ををそれぞれ表-1 と図-2 に示す。橋脚は図-3 に示す柱断面を有する RC 単柱 T 型橋脚とし、橋脚高は 13m とした。支承はすべて積層ゴム支承を採用し、1 支承線上に 2 基の支承を配置する構造とした。

3. 解析モデルと解析条件

(1) 解析モデル

図-4 に対象橋梁の解析モデルを示す。桁及び橋脚は梁要素で、支承部は 6 方向成分を有するばね要素でモデル化した。支承部については、主桁の接線方向から法線方向に張り出した剛梁と橋脚の張り出し部の剛梁を連結

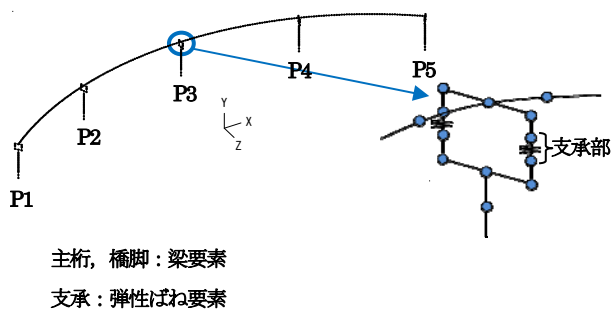


図-4 解析モデル

する構造とし、支承部の高さを考慮している。また解析モデルの P1 と P5 を結ぶ直線方向を全体座標系の X 軸方向、X 軸方向の法線方向を Z 軸と設定し、鉛直方向を Y 軸方向とした。

本研究で用いるゴム支承の寸法は、今回対象とした曲線橋モデルに対し、先行研究⁵⁾にて事前に行った試設計の結果に基づいて 900mm×900mm×100mm とし、水平剛性および鉛直剛性に関しては道路橋支承便覧⁶⁾を参考に式(1a)～(1d)を用いて算定した。また、積層ゴム支承の回転条件は、道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編⁷⁾を参考にし、接線方向軸回りに対しては固定、法線方向軸回りと鉛直軸回りに対してはフリーとした。本モデルにおけるゴム支承部の剛性を表-2 に示す。なお、本検討では、上述のようにゴム支承の鉛直剛性における引張特性と圧縮剛性を異なるように設定した非線形モデルを用いた検討も行っているが、非線形モデルの設定については5章にて詳述する。

$$K_s = \frac{G(\gamma)A_e}{\sum t_e} \quad (1a)$$

$$S_1 = \frac{A_e}{2(a+b)t_e} \quad (1b)$$

$$K_v = \frac{E \times A_e}{\sum t_e} \quad (1c)$$

$$E = \alpha S_1 G(\gamma) \quad (1d)$$

ここに、 a : 橋軸方向の有効寸法 (mm)

b : 橋軸直角方向の有効寸法 (mm)

$G(\gamma)$: ゴムのせん断弾性係数 (N/mm²)

E : ゴム支承縦弾性係数 (N/mm²)

A_e : ゴム支承の断面積 (mm²)

$\sum t_e$: 総ゴム厚 (mm)

α : 35 (積層ゴム支承)

表-2 支承部の剛性

接線方向	法線方向	鉛直方向
9.7×10^3	9.7×10^3	3.06×10^6
接線軸回り	法線軸回り	鉛直軸回り
1.0×10^5	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}

(単位 軸方向: kN/m, 回転方向: kNm/rad)

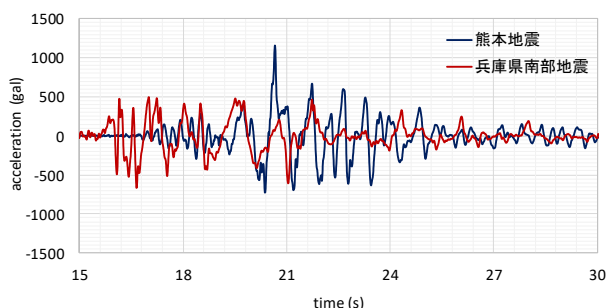
(2) 解析条件

本モデルでは橋脚の柱部のみ材料非線形性を考慮して解析手法は Newmark- β 法 ($\beta=0.25$) による直接積分法を用い、積分時間間隔は 0.001 秒、減衰は Rayleigh 減衰に

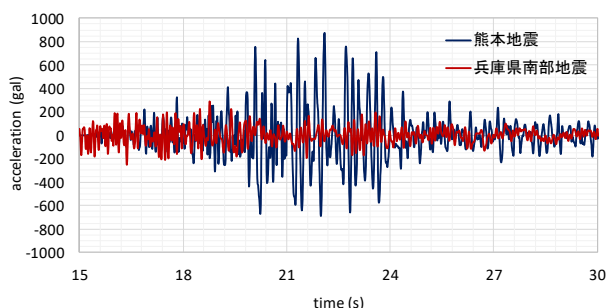
より評価した。なお、本解析では非線形有限要素解析ソフト ScanFEM を用いた。

(3) 対象地震動

本解析で用いた入力地震動としては、防災科学技術研究所の強震観測網 (KiK-net, K-net)⁸⁾より観測された 2016

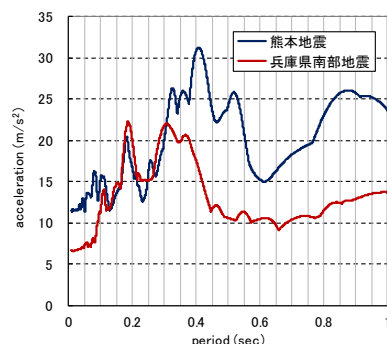


(a) 水平地震動 (EW 成分)

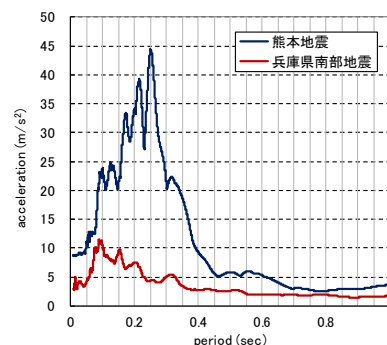


(b) 鉛直地震動 (UD 成分)

図-5 入力地震動の時刻歴



(a) EW 成分



(b) UD 成分

図-6 地震動の加速度応答スペクトルの比較 (減衰 5%)

表-3 固有値解析の結果

Model A					Model B					Model C				
モード 次数	周期 (sec)	有効質 量比X	有効質 量比Y	有効質 量比Z	モード 次数	周期 (sec)	有効質 量比X	有効質 量比Y	有効質 量比Z	モード 次数	周期 (sec)	有効質 量比X	有効質 量比Y	有効質 量比Z
1	0.74	0%	0%	60%	1	0.73	47%	0%	0%	1	0.74	57%	0%	0%
2	0.71	0%	0%	0%	2	0.72	0%	0%	61%	2	0.70	0%	0%	60%
3	0.69	69%	0%	0%	3	0.68	20%	0%	0%	3	0.67	6%	0%	0%
5	0.62	0%	0%	4%	5	0.63	0%	0%	4%	5	0.63	0%	0%	6%
6	0.56	0%	7%	0%	6	0.57	0%	7%	0%	6	0.57	0%	7%	0%
9	0.35	0%	39%	0%	9	0.35	0%	38%	0%	9	0.35	0%	38%	0%

年 4 月 16 日に発生した熊本地震の益城町の観測波と、道示レベル 2 地震動の基となる 1995 年に発生した兵庫県南部地震の JR 鷹取駅の観測波を用いた。それぞれ地震動における主要動の加速度時刻歴を図-5 に示す。本検討では、水平方向入力地震動として観測波の EW 成分を用い、鉛直方向には地震動の UD 成分を入力して鉛直地震動による影響を調べた。また、図-6 には熊本地震および兵庫県南部地震の加速度応答スペクトルを示す。この結果より、全ての方向において兵庫県南部地震に比べ熊本地震の加速度応答スペクトルがほとんどの周波数領域で卓越していることがわかる。

4. 固有値解析の結果

Model A, Model B, Model C の 3 つの解析検討モデルについてそれぞれ固有値解析を行い、各橋梁モデルの固有振動特性について確認した。Model A, Model B, Model C の固有値解析の結果を表-3 に示す。

まず、各橋梁モデルの 1 次モードは上部構造が水平方向に卓越するモードであるが、Model A では Z 軸方向に卓越しているのに対し、Model B, Model C では X 軸方向に卓越しており、曲率半径の違いによって水平方向の主要モードが変化することがわかる。一方、各橋梁モデルの鉛直方向の振動特性について比較してみると、橋梁全体系の固有振動数と有効質量比に関してはほとんど変化がないことがわかったが、P3 橋脚の支承部においては Model A と Model B, Model C の鉛直方向の固有変形モードが異なることが確認された。

5. 解析検討ケース

(1) 鉛直地震動がゴム支承部の引張反力に及ぼす影響

本検討では、熊本地震と兵庫県南部地震の観測波を用い、各橋梁のモデルに対して図-4 に示す X 軸方向と Z 軸方向に水平地震動 EW 成分を加震し、それに Y 軸方向に UD 成分の地震動を加えることで、鉛直地震動がゴ

ム支承部の引張反力に及ぼす影響について検討を行った。ゴム支承部のモデルとしては、2 章にて示した圧縮剛性と引張剛性が等しい線形モデルを採用している。

(2) ゴム支承の鉛直引張剛性を考慮した検討

積層ゴムに対して圧縮剛性検証試験、引張破壊実験を行った既往の実験より、圧縮剛性に比べ引張剛性は小さく、その比率は10%~15%であることが知られている⁴⁾。本実験結果を参考に、本検討で用いたゴム支承部の鉛直剛性の非線形モデルでは、図-7 に示すように引張剛性を圧縮剛性の1/10にした非線形モデルを採用した。本検討により、ゴム支承に引張反力が作用していた際に、ゴム支承部の鉛直剛性の違いにより引張反力がどの程度変化するかについて検討した。

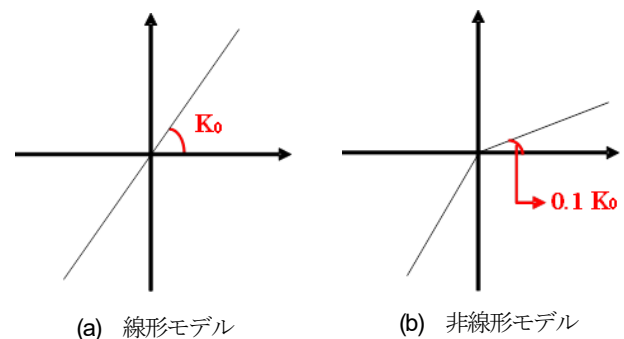


図-7 ゴム支承の鉛直方向に対する解析モデル

6. 地震応答解析の結果

(1) 鉛直地震動がゴム支承部の引張反力に及ぼす影響

a) X軸方向とY軸方向に加震したケース

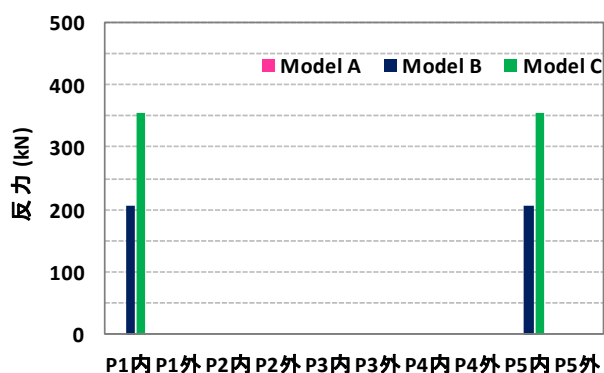
ここでは、図-5 に示す地震動を用いて X 軸方向と Y 軸方向に同時加震した解析を行い、熊本地震と兵庫県南部地震の鉛直地震動がゴム支承部の引張反力に及ぼす影響について検討した。図-8 に熊本地震を入力した場合のゴム支承部の引張反力を、図-9 に兵庫県南部地震を

入力した場合のゴム支承部の引張反力をそれぞれ示す。
また、鉛直地震動による影響を確認するため、2 方向同時加震した場合のゴム支承部の引張反力から X 軸方向単独加震した場合の引張反力を引いた値も示した。

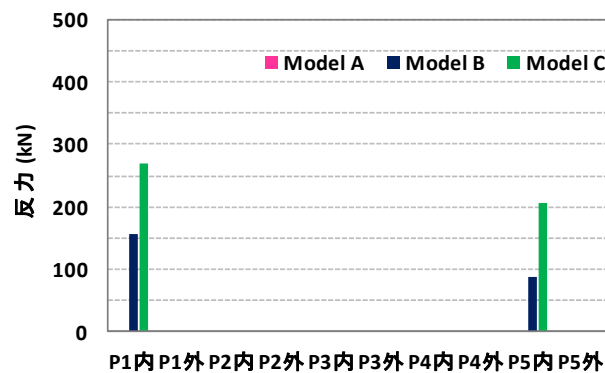
まず、水平地震動のみ加震した場合、Model A のゴム支承部では死荷重反力の分も計算に引き継いでいることもあり、引張反力が生じない結果となった。一方、曲線橋である Model B と Model C では熊本地震および兵庫県南部地震ともに端部の橋脚上の内側のゴム支承部で引張反力が生じているが、これは曲線橋の端部の橋脚では外側の支承部により死荷重反力が偏載する特徴があるため、地震時には内側の支承部で引張反力が生じやすくなるた

めである。またこの特徴は曲率半径が小さいほど顕著に現れることがわかった。

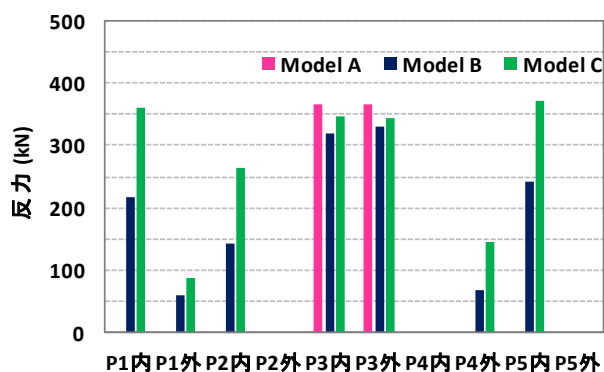
また、鉛直地震動も加えて同時加震とした場合、兵庫県南部地震では大きな変化はみられないが、熊本地震では中央径間に位置する支承部において引張反力が上昇し、特に P3 上の支承部で大きな引張反力が生じていることが確認された。図-8 と図-9 の(c)より引張反力の増加分を比較してみると、兵庫県南部地震の加震では Model A の場合引張反力が生じておらず、Model B と Model C の場合でも最大 25kN 程度であり、鉛直地震動の影響はそれほど大きくない。一方、熊本地震の場合には、全てのモデルで 300kN 以上の引張反力が生じており、鉛直地震



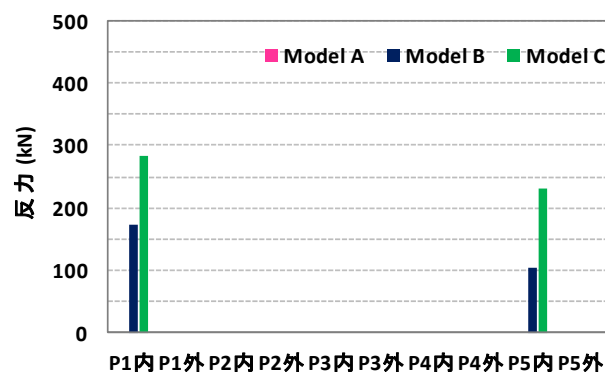
(a) X 軸方向加震時の引張方向反力



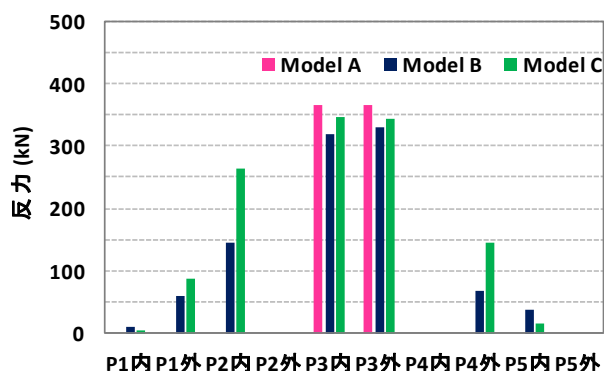
(a) X 軸方向加震時の引張方向反力



(b) X 軸+Y 軸方向加震時の引張方向反力

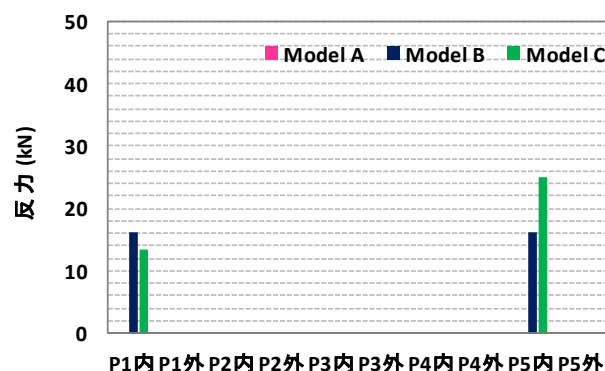


(b) X 軸+Y 軸方向加震時の引張方向反力



(c) 引張方向増加反力

図-8 支承部の引張反力（熊本地震加震）



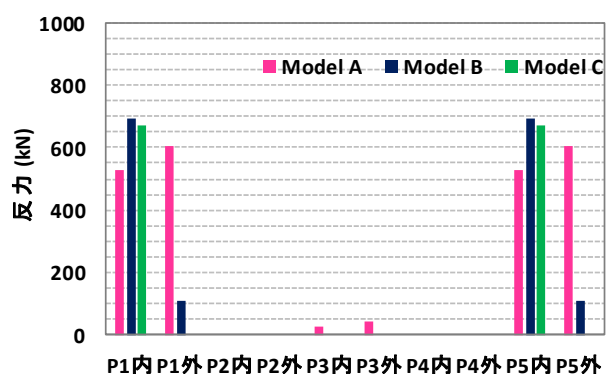
(c) 引張方向増加反力

図-9 支承部の引張反力（兵庫県南部地震加震）

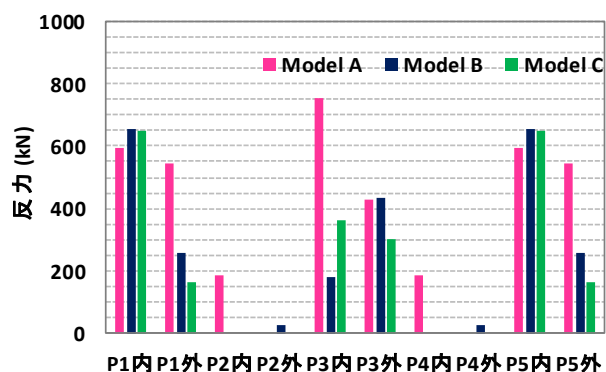
動の影響がみられた。このことから、兵庫県南部地震より熊本地震のUD成分の方がゴム支承部の引張反力に及ぼす影響が大きいことがわかった。これは図-6に示した鉛直地震動の加速度スペクトルの比較より、全ての周期において熊本地震動の方で大きな値を示していることから推察できる。

Model BとModel CではP2、P4の内側でも引張反力の増加がみられ、曲率半径の小さいModel Cの方でその増加は大きい。これは、曲線橋では地震時に上部構造がねじり挙動を示すが、このねじり挙動が曲率半径が小さいほど大きくなることが一因と考えられる。

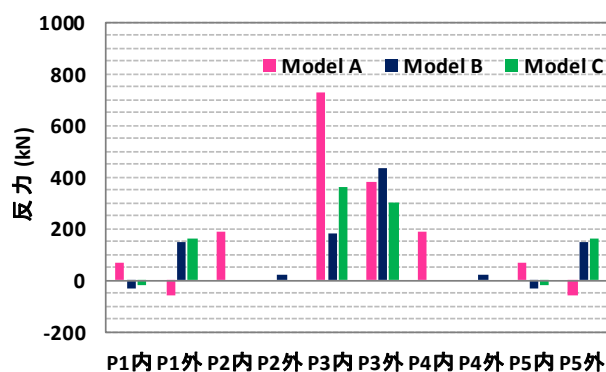
b) Z軸方向とY軸方向に加震したケース



(a) Z軸方向加震時の引張方向反力



(b) Z軸+Y軸方向加震時の引張方向反力

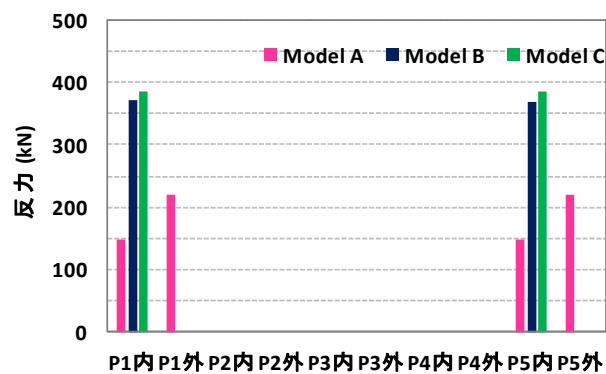


(c) 引張方向増加反力

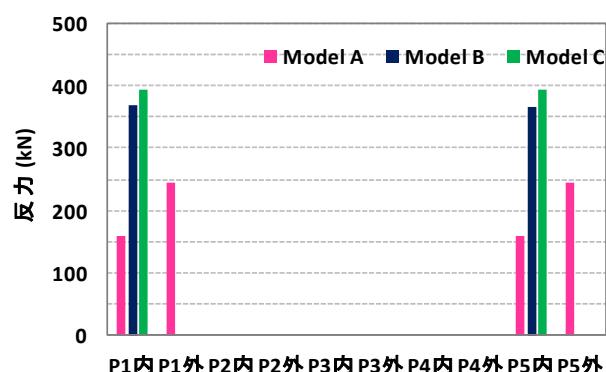
図-10 支承部の引張反力（熊本地震加震）

ここでは、図-5に示す地震動を用いてZ軸方向とY軸方向に同時加震した解析を行い、熊本地震と兵庫県南部地震の鉛直地震動がゴム支承部の引張反力に及ぼす影響について検討した。図-10に熊本地震を入力した場合のゴム支承部の引張反力を、図-11に兵庫県南部地震を入力した場合のゴム支承部の引張反力をそれぞれ示す。また、鉛直地震動による影響を確認するため、2方向同時加震した場合のゴム支承部の引張反力からZ軸方向単独加震した場合の引張反力を引いた値も示した。

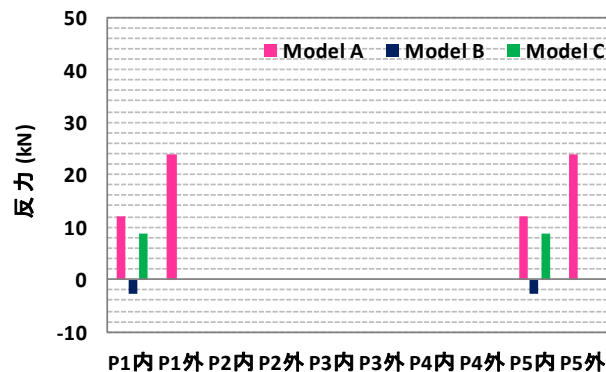
まず、水平地震動のみ加震した場合、全てのモデルにおいて桁端部のゴム支承で引張反力が生じていることが確認された。Model Aの場合、X方向に水平単独加震し



(a) Z軸方向加震時の引張方向反力



(b) Z軸+Y軸方向加震時の引張方向反力



(c) 引張方向増加反力

図-11 支承部の引張反力（兵庫県南部地震加震）

たケースではゴム支承部に引張反力が生じていなかったが、Z 方向に水平単独加震したケースではゴム支承部に引張反力が生じる結果となった。これは Z 方向に地震動を加震することで上部構造のロッキングが生じやすくなり、X 軸方向加震時より支承部に引張反力が生じやすくなったためと考えられる。

また、鉛直地震動を加えて同時加震とした場合、兵庫県南部地震の加震では端部で引張反力の増加がみられるが、その増加量は X 軸方向加震ケースと同様に 30kN 以下であり、鉛直地震動による影響はそれほど大きくない。一方、熊本地震の加震では全てのモデルにおいて P3 支承部を中心に大きな引張反力が生じていることがわかった。このことから、Z 軸方向加震時においても兵庫県南部地震より熊本地震の鉛直地震動の方がゴム支承部の引張反力に大きな影響を与えるといえる。

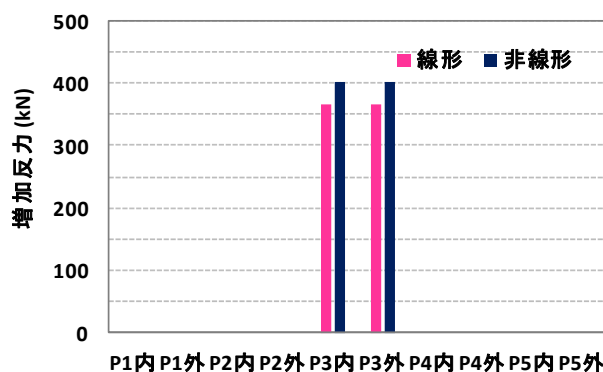
橋梁モデルの中で最も大きな増加反力を示したのは Model A であり、その値はおおよそ 750kN である。Model B、Model C においても 400kN に近い反力が引張方向に増加している。P3 以外でも Model A では P2、P4 の支承部において 200kN の反力増加がみられていることから、熊本地震の水平地震動を Z 方向に加震したケースでは、中央橋脚の支承部で最も大きな鉛直地震動の影響を受け、桁端部にいくほどその影響は小さくなるような傾向にある。一方、Model B、Model C では中央橋脚の支承部で最も反力増加が大きく、P2、P4 ではほとんど引張反力が生じておらず、桁端部の支承部で 200kN ほどの増加反力がみられる。これは、中央径間の支承部では鉛直地震動が直接的に関与して引張反力が生じるが、桁端部の支承部ではねじりの影響が加わり引張反力が生じたと推察される。鉛直地震動によって生じた引張反力が大きい順でみると、Model A、Model B、Model C であり、曲率半径が大きいほどより鉛直地震動による影響を受けやすいという結果となった。これは、4 章にて述べた固有値解析の結果において、曲率半径の違いによって水平方向の主要モードが変化することが大きな原因と考えられる。

(2) ゴム支承の鉛直引張剛性を考慮した検討

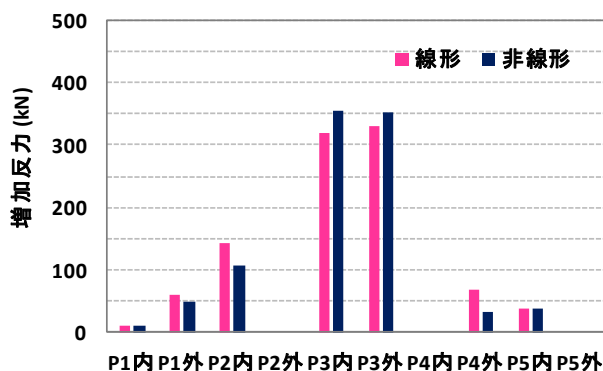
a) X 軸方向と Y 軸方向に加震したケース

ここでは、図-7 (b)に示すゴム支承の鉛直方向に対する非線形モデルを採用した橋梁モデルに対し、X 軸方向と Y 軸方向に同時加震した検討により、ゴム支承の引張剛性が引張反力に及ぼす影響について検討した。入力地震動としては、(1)の検討より熊本地震の鉛直地震動の影響が大きかったことから、本節では図-5に示す熊本地震の観測波を対象とした。

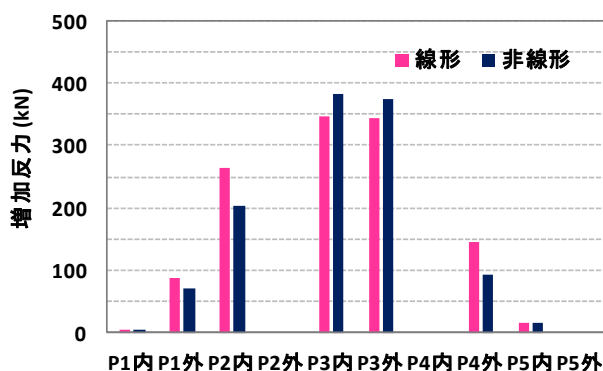
図-12には、各橋梁モデルにおいてX軸とY軸に同時加震した場合の支承部の引張反力からX軸方向に単独加震した場合の支承部の引張方向反力を引いた増加反力示す。



(a) Model A の引張方向増加反力



(b) Model B の引張方向増加反力



(c) Model C の引張方向増加反力

図-12 引張方向増加反力の比較 (X 軸, Y 軸加震)

本結果より、各支承部においてゴム支承の線形モデルと非線形モデルを用いた解析結果の差が生じていることが確認できるが、その傾向をみてみると曲線橋モデルの場合側径間の支承部においては線形モデルの方が引張方向増加反力が大きく、中央橋脚のP3の支承部では直線橋モデル、曲線橋モデルともに非線形モデルの増加反力が大きいことがわかった。ゴム支承の鉛直方向に対する非線形モデルでは、引張側の剛性が圧縮側より小さいため、同外力を静的に載荷すると引張側反力が小さくなるのが容易に考えられるが、本検討結果では逆の傾向を示す箇所もみられた。この原因としては、本地震応答解析においてゴム支承部に作用する鉛直方向反力が引張領域に

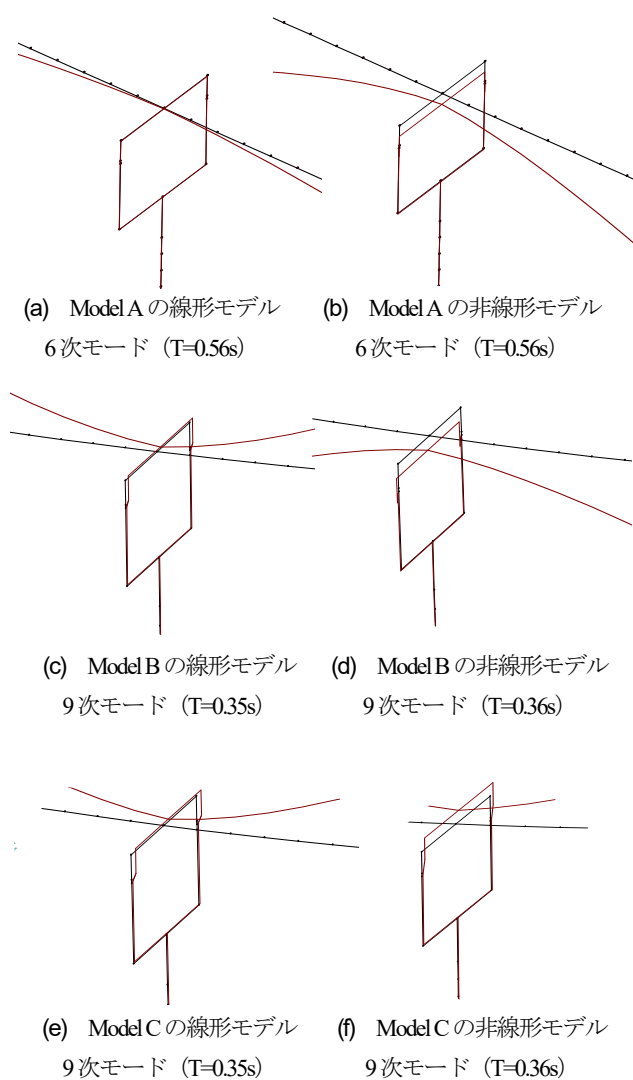
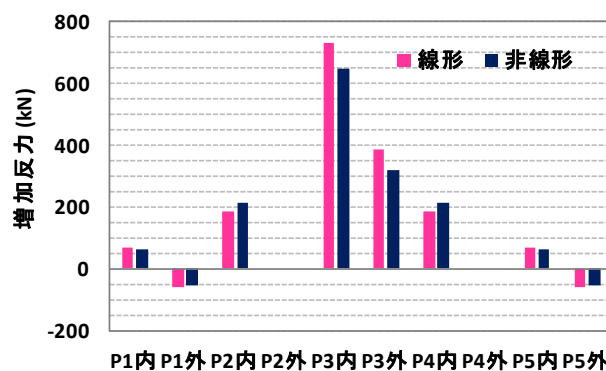


図-13 固有モード図 (P3 支承部の変形モード)

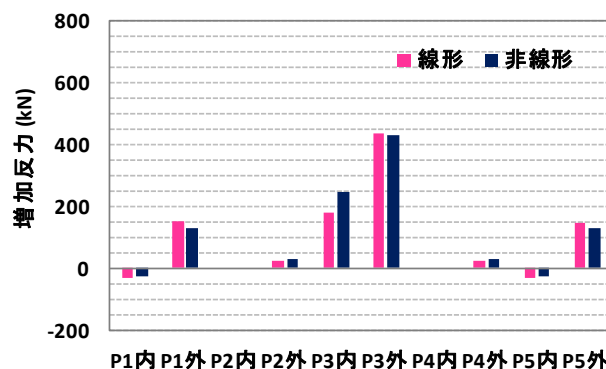
入った際、ゴム支承部の鉛直剛性が変化し、それより橋梁モデルの振動特性が変化していた可能性が考えられる。ゴム支承部の鉛直方向反力が圧縮領域にある場合と引張領域にある場合で振動特性の差があるか確認するため、支承部の初期剛性を引張側の剛性に設定したモデルを用いて固有値解析を実施した。図-13に支承部の初期剛性を圧縮側の剛性に設定したモデルと引張側の剛性に設定したモデルのP3支承部が鉛直方向に変形する固有モード図を比較して示しているが、両モデルとも固有周期は近似しているものの、支承部の変形モードにおいては微小の差がみられた。こうした支承部の剛性変化による振動特性の変化により、ゴム支承部の鉛直方向に対する非線形モデルを採用したモデルで引張反力が増加していたと考えられる。

b) Z軸方向とY軸方向に加震したケース

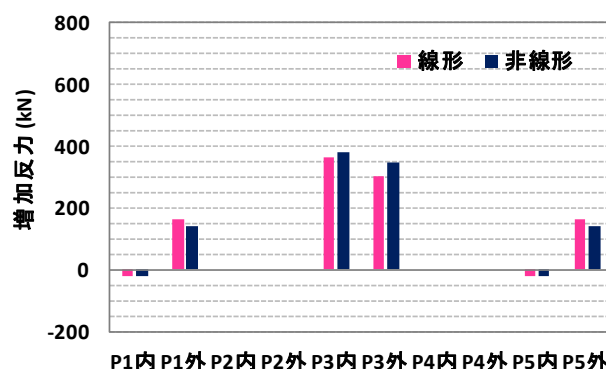
ここでは、図-7 (b)に示すゴム支承の鉛直方向に対する非線形モデルを採用した橋梁モデルに対し、Z 軸方向と Y 軸方向に同時加震した検討により、ゴム支承の引



(a) Model A の引張方向増加反力



(b) Model B の引張方向増加反力

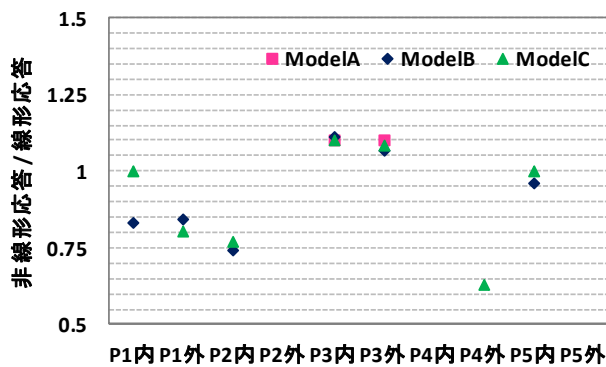


(c) Model C の引張方向増加反力

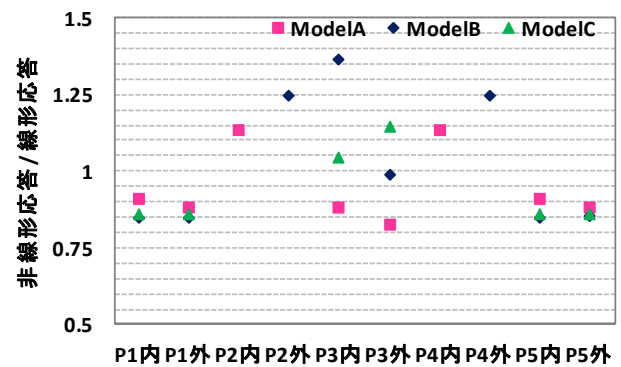
図-14 引張方向増加反力の比較 (Z 軸, Y 軸加震)

張剛性が引張反力に及ぼす影響について検討した。入力地震動としては、a)の検討と同様に図-5 に示す熊本地震の観測波を対象とした。

図-14には、各橋梁モデルにおいてZ軸とY軸に同時加震した場合の支承部の引張反力からZ軸方向に単独加震した場合の支承部の引張方向反力を引いた増加反力示す。本結果より、Z軸方向とY軸方向加震による検討においてもゴム支承の線形モデルと非線形モデルを用いた解析結果の差が生じていることが確認できるが、支承部位置と橋梁モデルごとに応答傾向に一貫性が無くばらついていて、増加反力が最も大きいP3支承部に着目してみると、Model Aでは線形モデルの方で、Model BのP3内側と



(a) X軸, Y軸加震の検討結果



(b) Z軸, Y軸加震の検討結果

図-15 非線形モデルの採用による引張反力の増加率

ModelCのP3支承部においては非線形モデルの方でそれぞれ増加反力が大きくなっており、X軸方向加震時の結果とは傾向が異なっている。これは、上述のようにZ軸方向加震の場合には直線橋と曲線橋で水平方向の固有振動特性が異なることや曲線橋の場合上部構造のねじり挙動が影響することが原因と考えられる。

c) 非線形モデルの採用による引張反力の増加率

ゴム支承の鉛直剛性に対して線形モデルを用いて解析した場合のゴム支承部の引張反力に対する非線形モデルを用いて解析した場合の引張反力の比率を求め、非線形モデルの採用によるゴム支承部の引張反力の増加率を求めた。その結果を図-15に示す。X軸方向加震の場合、全モデルにおいて中央橋脚の支承部で約10%増加、側径間においては非線形モデルより線形モデルの引張反力が大きい。一方、Z軸方向加震の場合には、ゴム支承部の位置によってばらつきはみられているが、曲線橋モデルではP2～P4支承部において5%～37%増加していることがわかった。このことから、曲線橋のゴム支承部に対し地震動が法線方向と鉛直方向に作用すると、ゴム支承部の引張剛性を考慮することで支承部が非常に複雑な挙動を示すことがわかった。

6. まとめ

本研究では、直線橋モデルと曲率半径の異なる2種類の曲線橋モデルに対し、2016年4月16日に発生した熊本地震と兵庫県南部地震の観測波を用いて橋梁全体系地震応答解析を行い、鉛直地震動が橋梁モデルのゴム支承部の引張反力に及ぼす影響について検討した。また、ゴム支承部の鉛直引張剛性が圧縮剛性に比べ低いことから、鉛直剛性を圧縮側と引張側で異なるように設定した非線形モデルとした場合の検討を行い、ゴム支承部の引張剛性がゴム支承部の引張反力に及ぼす影響についても検討

した。本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 鉛直地震動がゴム支承部の引張反力に及ぼす影響

a) X軸方向とY軸方向に加震したケース

鉛直地震動も加えて同時加震とした場合、兵庫県南部地震では大きな変化はみられなかったが、熊本地震ではすべてのモデルにおいて中央径間に位置する支承部において引張反力が上昇し、特にP3上の支承部で大きな引張反力が生じていることが確認された。また、曲線橋モデルのModelBとModelCではP2、P4の内側でも引張反力の増加がみられ、曲率半径の小さいModelCの方でその増加は大きいことがわかった。これは、曲線橋の地震時上部構造のねじり挙動が曲率半径が小さいほど大きくなることが一因と考えられる。

b) Z軸方向とY軸方向に加震したケース

兵庫県南部地震の加震では端部で引張反力の増加がみられるものの、その増加量は30kN以下であり、X軸方向加震時と同様に鉛直地震動による影響はそれほど大きくない。一方、熊本地震の加震ではX軸方向加震時と同様にすべてのモデルにおいてP3支承部を中心に大きな引張反力が生じていることが確認された。また、曲線橋モデルのModelB、ModelCでは中央橋脚の支承部で最も反力増加が大きい、桁端部の支承部でも200kNほどの増加反力がみられた。これは、中央径間の支承部では鉛直地震動が直接的に関与して引張反力が生じるが、桁端部の支承部ではねじりの影響が加わり引張反力が生じたと推察される。

(2) ゴム支承の鉛直引張剛性を考慮した検討

ゴム支承部の鉛直剛性に対して線形モデルと非線形モデルを用いて解析を行い、ゴム支承部の引張反力の増加に着目して比較したところ、水平地震動をX軸方向に加震したケースでは鉛直地震動を入力することにより全てのモデルで非線形モデルの方が大きな引張反力が生じ、

Z 軸方向に加震したケースでは、中央橋脚において曲率半径が小さくなるほど、非線形モデルの方で大きな引張反力が生じた。この原因としては、ゴム支承部に作用する鉛直方向反力が引張領域に入った際、ゴム支承部の鉛直剛性が変化し、それより橋梁モデルの振動特性が変化していた可能性が考えられる。

また、非線形モデルの採用による引張反力の増加率を調べたところ、Z軸方向加震の場合、ゴム支承部の位置によってばらつきはみられているが、曲線橋モデルではP2～P4支承部において5%～37%増加していることがわかった。曲線橋のゴム支承部に対し地震動が法線方向と鉛直方向に作用すると、ゴム支承部の引張剛性を考慮することで支承部が非常に複雑な挙動を示すことがわかった。

(3) 総括

本研究より、熊本地震のような加速度レベルの大きい鉛直地震動を用いると、設計地震動の基となる兵庫県南部地震の鉛直地震動に比べ、ゴム支承部の引張反力が大きく上昇することがわかった。その上昇傾向は曲線橋ほど大きいことが確認されたが、本研究で用いた橋梁モデルでは仮想橋を対象としており、実橋梁構造の応答とは異なる可能性があることに留意されたい。今後は実橋梁構造を対象とし、より詳細なモデルより検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) (公社) 土木学会西部支部：平成 28 年熊本地震被害調査報告書，2017.
- 2) 川原林浩，伊津野和行：免震ゴム支承の鉛直剛性が橋梁の地震応答に及ぼす影響，2003.
- 3) 飯山かほり，大町達夫：引張特性を考慮した橋梁用積層ゴム支承の鉛直地震応答に関する検討，東京工業大学都市地震工学センター平成 19 年度成果報告シンポジウム予稿集，2009.
- 4) 植田健介，星隈順一，岡田太賀雄，堺淳一：鉛プラグ入り積層ゴムの引張特性に関する研究，土木学会第 65 回年次学術講演会，pp.65-66，2010.
- 5) 崔準祐，岩本周哲，植田健介：ゴム支承の引張特性試験に基づく解析モデルを用いた橋梁全体系解析によるゴム支承の地震時挙動特性とコンパクト化について，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.71，No.4（地震工学論文集第 34 巻），pp.I_650-I_658，2015.
- 6) (公社) 日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.
- 7) (公社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.
- 8) 国立研究開発法人防災科学技術研究所強震観測網ホームページ：<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>

INFLUENCE OF VERTICAL WAVE OF THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE ON THE DYNAMIC RESPONSE OF RUBBER BEARINGS ON CURVED BRIDGES

Joon-Ho CHOI, Masaya NAKASHIMA and Kensuke UEDA

In the 2016 Kumamoto earthquake occurred in April 2016, seismic intensity 7 was continuously observed in twice for the first time in an observation history. By the couple of earthquakes, there were severe damage on infrastructure facilities such as roads and bridges. One of the features of the earthquake was that the maximum accelerations of the vertical earthquake motions were larger than those of the horizontal earthquake motions. Although the influence of vertical earthquake motions on the dynamic response of bridge structure has been considered small, the seismic safety of bridge structure for the vertical earthquake motions could be required by Kumamoto earthquake.

Here in, in order to evaluate the influence of vertical wave of the 2016 Kumamoto earthquake on the dynamic responses of rubber bearings on curved bridges, dynamic analyses for 4 types bridge models which curvatures were different were conducted. By the calculations using the observed ground motions of 2016 Kumamoto earthquake and design earthquake, how the uplift forces of rubber bearings increase by the vertical ground motions was examined.