

上下方向地震動が橋梁の地震応答に及ぼす影響

松崎裕¹・川島一彦²

¹正会員 修(工) 東京工業大学助教 大学院理工学研究科土木工学専攻(〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²フェロー会員 工博 東京工業大学教授 大学院理工学研究科土木工学専攻(同上)

1. はじめに

従来、地震動の上下方向成分は水平方向成分に比べて強度が小さく、また構造物の地震応答は一般に水平方向の振動モードが卓越することから、構造物の耐震設計や地震応答の評価に際して、地震動の上下方向成分については水平方向成分ほどには関心が持たれてこなかった。道路橋示方書¹⁾をはじめとする我が国の各種耐震基準においても、耐震安全性の照査時に上下方向成分の影響は考慮されていない。

一方、近年の強震観測網の充実により、震源のごく近傍での強震記録が次第に観測されるようになってきた。2008年に発生した岩手・宮城内陸地震におけるKiK-net一関西観測点での強震記録はその代表例であり、水平方向成分の最大加速度を大きく上回る、上下方向成分の最大加速度が4g近い短周期成分が卓越した強震動が観測された。震源のごく近傍、かつ震源深さが比較的浅い場合には、従来の震源から離れた強震記録からの知見とは異なり、上下方向成分が極めて卓越した地震動が生起することが観測事実として明らかになった。

こうした上下方向地震動が構造物の地震応答に及ぼす影響については、菊池ら²⁾、Papazoglou and Elnashai³⁾、Elnashai and Papazoglou⁴⁾の研究がある。菊池ら²⁾は、弾性解析による検討ではあるものの、耐震壁が直上にある柱に生じる軸力は上下方向地震動の考慮の有無によって有意に変化することを明らかにしている。Papazoglou and Elnashai³⁾は、被害地震における被害の特徴や地震応答解析の結果から、上下方向地震動の影響を考慮して耐震設計や地震応答解析を行う必要性を指摘している。Elnashai and Papazoglou⁴⁾は、上下方向地震動に着目して、その設計用加速度応答スペクトルを既往の強震記録に基づいて試算している。

しかしながら、これらの既往の研究で対象としている上下方向地震動は、水平方向成分の強度をやや上回る程度のものである上に、橋梁の地震応答に及ぼす上下方向地震動の影響は明らかにされていない。そこで、本論文では、上下方向地震動が地震応答に及ぼす影響を桁橋を対象として検討した結果を報告する。

2. 検討対象とする地震動

検討対象とする地震動は、2008年の岩手・宮城内陸地震の際に、防災科学技術研究所の基盤強震観測網KiK-netの一関西観測点において観測された図-1に示す強震記録である。NS、EW成分の最大加速度はそれぞれ11.4m/s²、14.3m/s²であるが、UD成分の最大加速度は38.7m/s²に達している。加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を図-2に示すが、3成分とも固有周期0.1~0.3秒前後で卓越しており、特にUD成分は固有周期0.1秒で92.4m/s²もの応答加速度を示すような短周期成分が極めて卓越した地震動である。

本研究では、このKiK-net一関西観測点において観測された原波形に加えて、上下方向地震動の短周期成分が橋梁の地震応答に及ぼす影響を検討するため、図-2の加速度応答スペクトルにおいて、UD成分のうち、他の水平2成分よりも大きな応答加速度を示している3Hz以上の高振動数成分を以下のローパスフィルター $w(f)$ を用いて除去した波形も検討対象とする。

$$\begin{cases} w(f) = 1, f \leq 3\text{Hz} \\ w(f) = 0, f > 3\text{Hz} \end{cases} \quad (1)$$

なお、後述するように、このローパスフィルター処理を行うことで、本研究で解析対象とする橋梁の

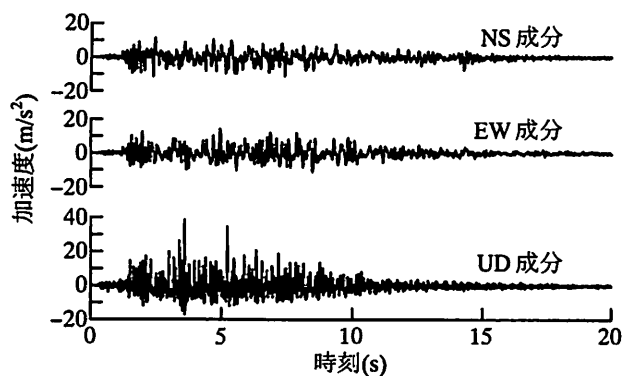


図-1 KiK-net 一関西の加速度記録

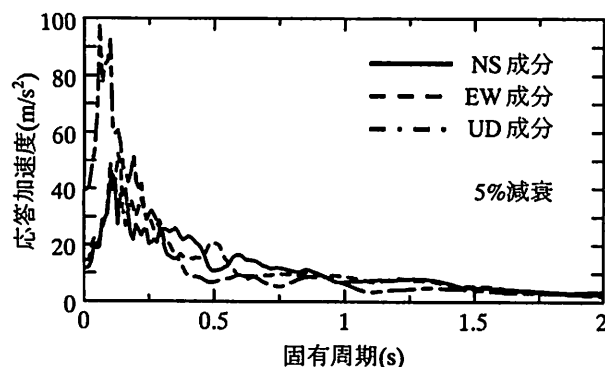


図-2 KiK-net 一関西記録の加速度応答スペクトル

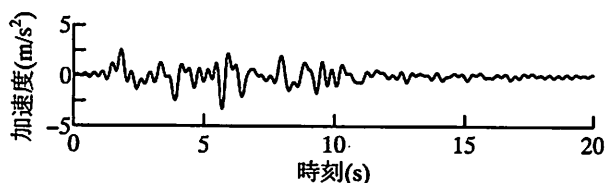


図-3 KiK-net 一関西記録の UD 成分に対して 3Hz のローパスフィルター処理を行った波形

上下方向の基本固有周期帯域におけるUD成分は完全に除去されることになる。ローパスフィルター処理を行った後のUD成分の加速度記録を図-3に示す。図-4では、ローパスフィルター処理を行う前後のUD成分の加速度応答スペクトルを比較しているが、3Hz以上の高振動数成分を除去したことに伴い、対応する短周期領域での応答加速度が大きく低下している。

また、上下方向地震動が卓越していない従来型の強震記録として、1995年の兵庫県南部地震の際にJR鷹取駅で観測された強震記録も比較対象として用いる。図-5にその加速度記録を、図-6に加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を示すが、UD成分の応答加速度が他の水平2成分に比べて小さくなっている点がKiK-net一関西記録とは異なっている。

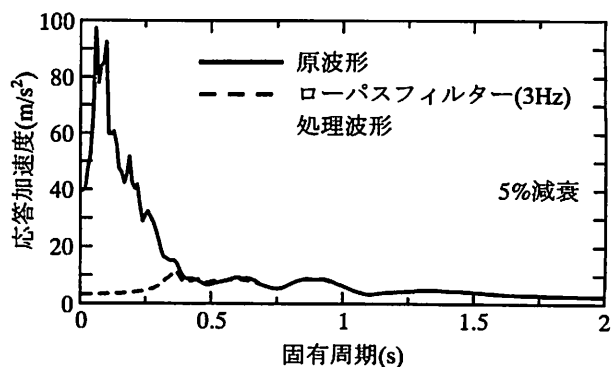


図-4 ローパスフィルター処理前後の KiK-net 一関西記録 UD 成分の加速度応答スペクトル

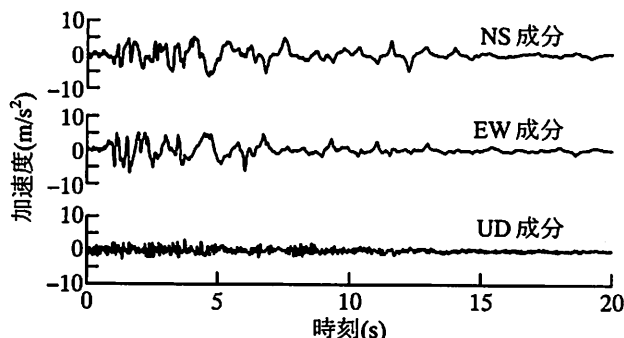


図-5 兵庫県南部地震 JR 鷹取駅の加速度記録

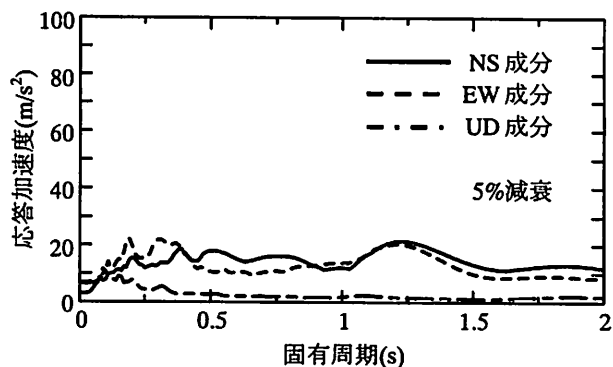
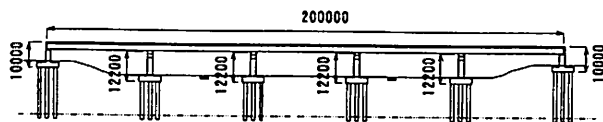


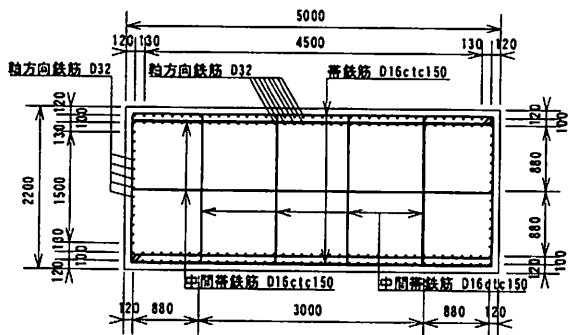
図-6 JR 鷹取駅記録の加速度応答スペクトル

3. 解析対象橋梁とそのモデル化

解析対象とする橋梁は、図-7 に示す 5 径間連続鋼桁橋⁵⁾である。解析においては、橋脚基部の塑性ヒンジ部はファイバー要素によって、その他の部材は線形はり要素によってモデル化した。塑性ヒンジ部におけるコンクリートの応力-ひずみ履歴については、包絡線は Hoshikuma et al.による提案モデル⁶⁾を、除荷・再載荷履歴には Sakai and Kawashima によるモデル⁷⁾を用いた。また、鉄筋の応力-ひずみ履歴には堺・川島による修正 Menegotto-Pinto モデル⁸⁾を用い、ひずみ硬化の影響を取り込むために、鉄筋の降伏後の剛性は初期弾性係数の 2%と仮定した。コンクリート圧縮強度は 20.6N/mm²、鉄筋の降伏強度

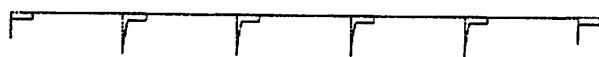


(a) 側面図



(b) 橋脚断面図

図-7 解析対象橋梁



(a) 1次モード(0.86Hz)



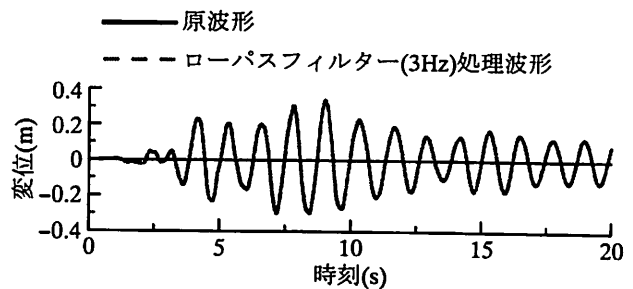
(b) 9次モード(4.33Hz)

図-8 固有振動モード

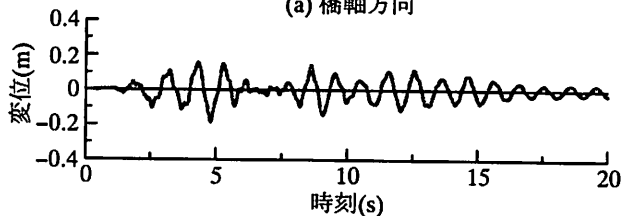
は 295N/mm^2 としている。

固有値解析の結果、橋脚の塑性ヒンジ部が弾性範囲にある場合には、橋梁全体系の基本固有周期は橋軸方向には 1.17 秒、橋軸直角方向には 1.00 秒となる。図-8 は、橋軸方向の基本周期に対応する 1 次モード(0.86Hz)と、本研究では上下方向地震動が橋梁の地震応答に及ぼす影響に着目することから、上下方向の振動に対応する 9 次モード(4.33Hz)を比較したものである。前述したように、本研究では、KiK-net 一関西記録の UD 成分について、3Hz のローパスフィルター処理を行った波形も考慮するが、ローパスフィルター処理を行うことにより、こうした上下方向の振動モードに対応する短周期成分が除去されていることになる。

動的解析に際して、減衰は Rayleigh 減衰により与えた。各構造要素の減衰定数としては、桁および橋脚躯体には 2%、基礎には 20%を与え、ひずみエネルギー比例減衰法によって算定されるモード減衰定数を基に、1 次と 6 次の振動モードを基準モードとして Rayleigh 減衰のパラメータを定めた。また、Newmark の β 法($\beta=1/4$)による直接積分法を用い、積分時間間隔は 0.001 秒とした。

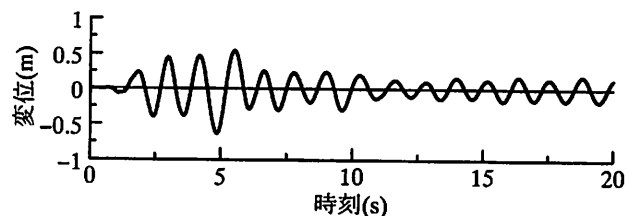


(a) 橋軸方向

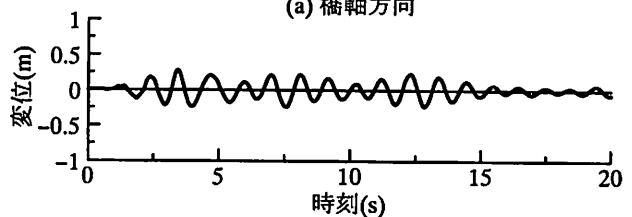


(b) 橋軸直角方向

図-9 KiK-net 一関西記録に対する P1 橋脚上の桁の変位



(a) 橋軸方向



(b) 橋軸直角方向

図-10 JR 鷹取駅記録に対する P1 橋脚上の桁の変位

この橋梁に対して、KiK-net 一関西記録および JR 鷹取駅記録のいずれについても、EW 成分及び NS 成分をそれぞれ橋軸方向および橋軸直角方向に、UD 成分を上下方向に入力した。なお、KiK-net 一関西記録の UD 成分についてローパスフィルター処理を行った波形についても上下成分に入力するが、EW 成分および NS 成分をそれぞれ橋軸方向および橋軸直角方向に入力するという点は同一である。

4. 上下方向地震動が橋梁の地震応答に及ぼす影響

解析結果の一例として、P1 橋脚上の桁に生じる応答変位を示すと、図-9 のようになる。原波形を入力した場合とローパスフィルター処理をした波形を入力した場合とでは、応答変位にほとんど相違は生じない。なお、図-10 に示す JR 鷹取駅の記録に比べ

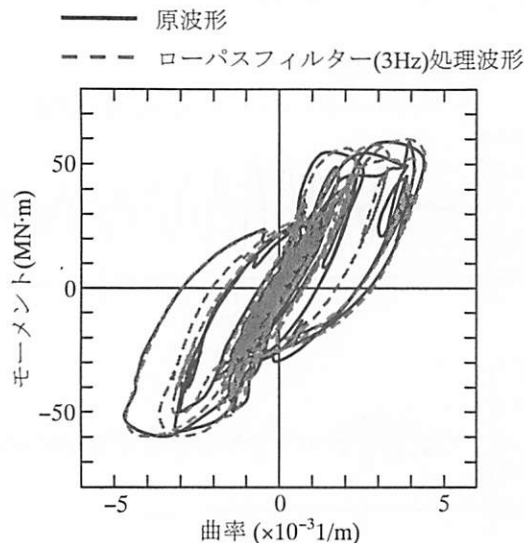


図-11 KiK-net 一関西記録に対する P1 橋脚基部のモーメント-曲率の履歴(橋軸方向)

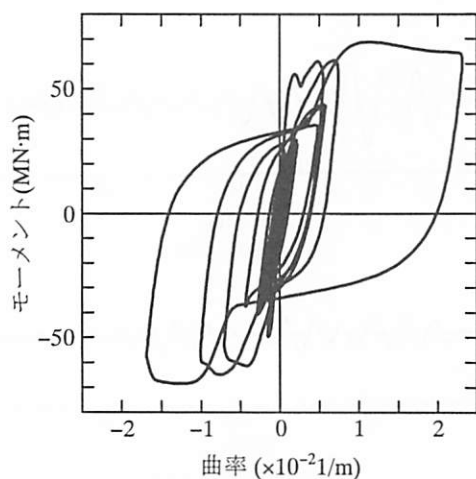
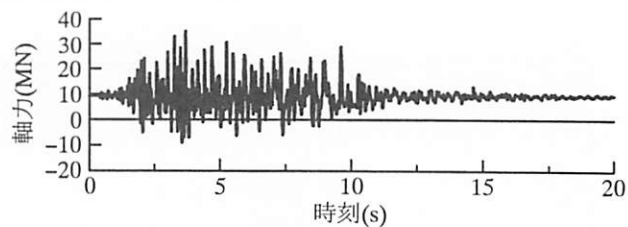


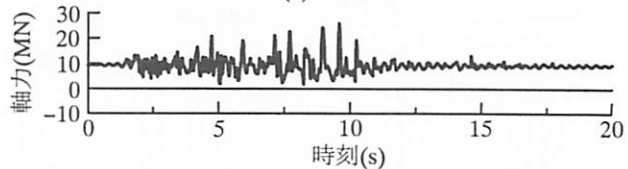
図-12 JR 鷹取駅記録に対する P1 橋脚基部のモーメント-曲率の履歴(橋軸方向)

ると、橋軸直角方向の応答にはわずかに短周期成分が含まれているが、UD 成分のローパスフィルター処理の有無によって応答特性にはほとんど変化がないことから、これは図-2 と図-6 の加速度応答スペクトルに示したように、KiK-net 一関西記録の水平成分に含まれる短周期成分に起因すると考えられる。

次に、橋脚基部のモーメント-曲率の履歴の観点から上下方向地震動の及ぼす影響を検討する。P1 橋脚基部における橋軸方向のモーメント-曲率の履歴を図-11 に示す。前述したように、応答変位の履歴にほとんど影響がないことから、モーメント-曲率の履歴も原波形とローパスフィルター処理をした波形とでほぼ同じであるが、ローパスフィルター処理を行った波形を入力した場合には履歴が滑らかに変化するのに対して、原波形を入力した場合には履歴にごく短周期での変動が見られる。なお、比較対象としている JR 鷹取駅記録の場合には、図-12 にモ



(a) 原波形



(b) 3Hz のローパスフィルター処理をした波形

図-13 KiK-net 一関西記録に対する P1 橋脚基部の軸力

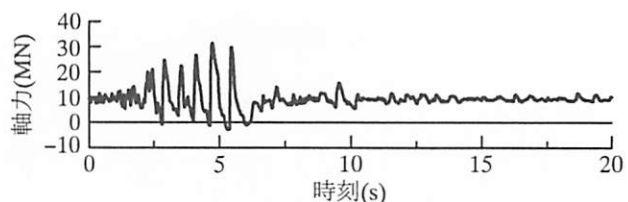


図-14 JR 鷹取駅記録に対する P1 橋脚基部の軸力

ーメント-曲率の履歴を示すように、KiK-net 一関西記録においてローパスフィルター処理を行った波形の場合と同様に、モーメント-曲率の履歴は滑らかに変化している。

モーメント-曲率の履歴にこうした現象が生じる理由は、図-13 に示すように、ローパスフィルター処理を行った UD 成分を入力した場合には橋脚基部には引張軸力を生じない程度の軸力変動しか生じないが、原波形を入力した場合には、図-8(b)に示した橋梁の上下方向の振動モードを励起させる結果、自重と同レベルの引張軸力が生じる程の軸力変動が生じ、この結果、橋脚の曲げ耐力が変化するためである。図-14 に示すように、JR 鷹取駅記録を入力した場合についても、わずかな引張軸力が生じているが、この軸力変動は主に橋梁の水平方向の振動モードに応じて連続桁を介して生じたものであり、KiK-net 一関西の原波形の場合に比べて軸力変動は長周期であり、モーメント-曲率の履歴を短周期の時間変化で乱すようなものとはなっていない。

なお、こうした引張力が作用する程度の軸力変動が RC 橋脚の復元力特性に及ぼす影響について、堺・川島⁹⁾が 1N/mm^2 の引張軸力から 2.7N/mm^2 までの圧縮軸力の範囲での軸力変動を考慮した静的繰返し正負交番載荷実験およびファイバー解析による検討を行っている。その結果によれば、自重による圧縮応力と同レベルの 1N/mm^2 の引張応力に相当する変動軸力作用下であっても、曲げ復元力特性は安

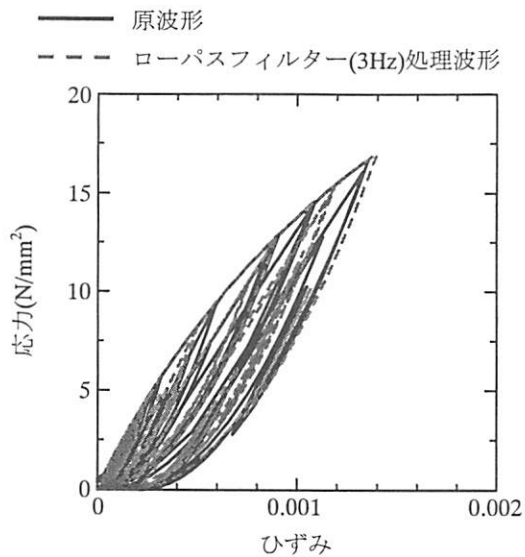


図-15 コアコンクリートの応力-ひずみ履歴
(KiK-net 一関西記録, 橋軸方向最外縁軸方向鉄筋位置)

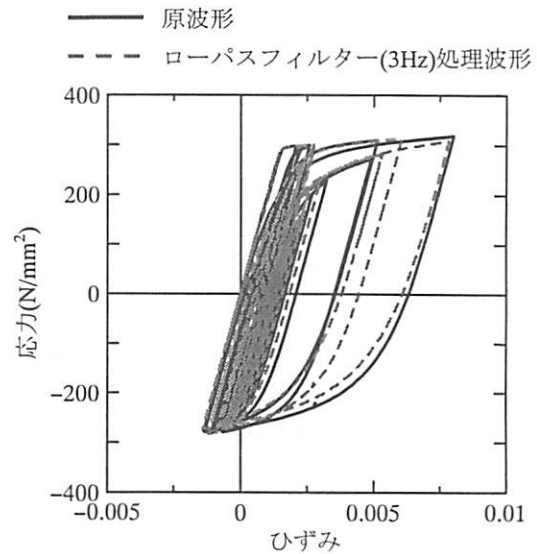


図-16 軸方向鉄筋の応力-ひずみ履歴
(KiK-net 一関西記録, 橋軸方向最外縁軸方向鉄筋)

定しており、急激な耐荷性能の低下などは生じないことが示されている。また、引張軸力を生じるような変動軸力作用下でも、ファイバー解析により、通常の圧縮力作用下と同等の精度で曲げの復元力特性を評価できていることが示されている。

最後に、コアコンクリートおよび軸方向鉄筋の応力-ひずみ履歴に、上下方向地震動が及ぼす影響について述べる。橋軸方向の最外縁軸方向鉄筋位置におけるコアコンクリートの圧縮側の応力-ひずみ履歴を図-15 に、また同位置における軸方向鉄筋の応力-ひずみ履歴を図-16 に示す。これらの結果より、ローパスフィルター処理を行った UD 成分地震動を作用させることにより、橋脚基部の引張軸力が小さくなることの影響を知ることができる。すなわち、ローパスフィルター処理を行った波形を入力した場合には、原波形を入力した場合に比べて、最大応答変位時にコアコンクリートに生じる圧縮ひずみはわずかに増加し、一方、軸方向鉄筋に生じる引張ひずみはわずかに低減している。なお、最大応答変位時以外には、ローパスフィルター処理した波形を入力した場合の方が原波形を入力した場合よりも、より大きな引張ひずみが軸方向鉄筋に生じる。これらの応力-ひずみ履歴は、橋脚基部に生じる軸力と曲げモーメントの変動に合わせて中立軸の位置が変化することに対応したものである。

以上、応答変位、モーメント-曲率の履歴、コアコンクリートおよび軸方向鉄筋の応力-ひずみの履歴の観点から、短周期成分が極めて卓越した上下方向地震動の影響について検討してきた。以上の検討結果は KiK-net 一関西記録だけを用いた結果であり、今後は様々な地震動を対象とした検討が必要ではあ

るが、短周期成分が極めて卓越した上下方向地震動が作用した場合には、引張軸力を含む大きな軸力変動が橋脚基部に生じることが明らかとなった。しかしながら、その軸力変動が RC 橋脚の曲げの復元力特性等に及ぼす影響は極めて限定的であり、一般的な橋梁の耐震性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

5. まとめ

本研究では、2008年岩手・宮城内陸地震で観測された KiK-net 一関西記録を用いて、短周期成分が著しく卓越した上下方向地震動が一般的な桁橋の地震応答に及ぼす影響について、ファイバー解析により検討した。本解析の結果、明らかとなった事項は以下の通りである。

- 1) 上下方向地震動が極めて大きいと、桁の上下方向応答を励起させ、自重に匹敵する引張軸力を含む大きな軸力変動が橋脚に生じる。大きな軸力変動は橋脚の曲げ耐力を変化させるため、橋梁の地震応答に影響を与える可能性があるが、本解析の条件では、軸力変動が桁の応答変位や橋脚の塑性ヒンジ部におけるモーメント-曲率の履歴、コアコンクリートや軸方向鉄筋の応力-ひずみの履歴に及ぼす影響は限定的である。
- 2) 引張軸力を受けた状態で水平曲げを受ける橋脚の耐震性に関する研究が不十分であり、今後、この方面の研究をさらに進める必要がある。
- 3) 今回は、桁橋を対象としたが、水平モードと上下方向モードの連成があるアーチ橋や斜張橋等の構造系に対する検討を実施する必要がある。

謝辞：本研究を実施するに当たり，独立行政法人防災科学技術研究所の基盤強震観測網KiK-netの観測記録を使用させて頂きました。関係各位に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2002.
- 2) 菊池健児，吉村浩二，篠田広明：上下地震動がRC造有壁立体架構の動的弾性挙動に及ぼす影響，第8回コンクリート工学年次講演会論文集，1986.
- 3) Papazoglou, A. J. and Elnashai, A. S.: Analytical and field evidence of the damaging effect of vertical earthquake ground motion, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.25, No.10, pp.1109-1137, 1996.
- 4) Elnashai, A. S. and Papazoglou, J.: Procedure and spectra for analysis of RC Structures subjected to strong vertical earthquake loads, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol.1, No.1, pp.121-155, 1997.
- 5) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.
- 6) Hoshikuma, J., Kawashima, K. and Taylor, A.W.: Stress-Strain Model for Confined Reinforced Concrete in Bridge Piers, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.123, No.5, pp.624-633, 1997.
- 7) Sakai, J. and Kawashima, K.: Unloading and Reloading Stress-Strain Model for Confined Concrete, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.132, No.1, pp.112-122, 2006.
- 8) 堺淳一，川島一彦：部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正Menegotto-Pintoモデルの提案，土木学会論文集，No.738/I-64, pp.159-169, 2003.
- 9) 堺淳一，川島一彦：引張力を含む軸力変動がRC橋脚の変形性能に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.48A, 2002.