

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560574

研究課題名(和文) 震源域の大きな上下動の影響を含む地盤と基礎と重要生産・社会基盤構造物の応答評価法

研究課題名(英文) A Method of Seismic 3-Dimensional Nonlinear Response Evaluation for the Important Soil Foundation Infrastructures Subjected to Large Vertical Motion including Permanent Ground Displacement near Faults

研究代表者

原田 隆典 (Harada, Takanori)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号：70136802

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円、(間接経費) 1,260,000円

研究成果の概要(和文)：震源域での断層永久変位を含む大きな上下動の影響を含む地盤と基礎と重要生産・社会基盤構造物の応答挙動を調べ、従来多用されている履歴型制震器による補強法は、必ずしも有効ではなく、最も有効な補強法は速度依存型の制震ダンパーであることを数値計算によって示した。また、大きな上下動が発生する正・逆断層近傍の橋梁では、支承の上下方向を拘束しないデバイスにより、橋梁の応答が大きく低減できることを示した。最後に、橋梁の現行のRC床板から最近開発が進んでいる軽量のアルミニウム床板へ置換は、橋梁の重量の軽減と変形性能の向上により、震源断層近傍の耐震補強法として極めて効果的であることを数値計算により定量化した。

研究成果の概要(英文)：To establish a method of seismic 3-dimensional nonlinear response evaluation for the important infrastructures subjected to large vertical motion with permanent displacement near fault, (1) a method of the stress strain based response analysis of soil foundation structure system is developed. Also, (2) a theoretical method of simulating near fault ground motion is proposed.

The study shows that the most effective device of the response reduction of bridges near faults is the viscous damper although the hysteresis type devices are currently used, because the pulse type motion with large ground displacement near fault cannot generate hysteresis loop of device. The study also reveals that the vertical free support of the bridge girder is effective to reduce the stresses in bridges due to large vertical motion near fault. Finally the study shows that the replacement from the RC bridge slabs to the aluminum slabs is effective to reduce response of the bridges near fault.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：震源断層近傍 大きな地震動上下成分 断層永久変位 3次元非線形地震応答解析 多地点入力地震動  
耐震補強 重要生産・社会基盤構造物 3次元地震動

### 1. 研究開始当初の背景

重要生産・社会基盤構造物は規模が大きく、また横方向にも長く、構造物が基礎を通し多地点で支えられ、地盤と構造物とが強く結びついている。そして震源域では、振幅・振動数特性並びに位相特性の違う地震波があらゆる方向から伝播し、基礎を通じて構造物に入射されるため、震源域での重要生産・社会基盤構造物に対しては、「震源から地盤・基礎・構造物系を一体的に捉えて基礎・構造物系の3次元非線形応答挙動」を分析しなければならない。

研究代表者のこれらの研究成果は、内陸地震の典型的な横ずれ断層を想定した研究成果であり、地震動水平成分に比べ上下成分が小さい場合を取り扱ったものである。そして、これまでの地震工学の分野では、構造物の非線形応答に及ぼす地震動の水平成分の影響に関する研究に比べると、大きな上下動成分の影響に関する研究は少ない。通常の構造物の耐震設計では、上下方向の設計荷重として水平成分の加速度応答スペクトルの50~70%を採用しているものが多い。しかし、震源断層近傍の強震観測記録の蓄積に伴い、水平成分に比べると最大加速度、最大速度の大きい地震動上下成分が観測されてきている。例えば、2008年岩手・宮城内陸地震は逆断層の地震であり、KiK-net 一関西で水平最大加速度1435(cm/s<sup>2</sup>)に対して上下成分では、断層永久変位を含む3866(cm/s<sup>2</sup>)の大加速度が観測された。内陸および海洋型地震には逆断層や正断層も多く、これらの断層種類では断層永久変位を含む大きな上下動成分が卓越することが考えられる。

そこで次の段階として、逆断層等の断層種類や断層パラメータ及び表層地盤特性が震源域の永久変位を含む地震動、特に上下動特性に及ぼす影響を調べ、震源特性と構造物の非線形特性を考慮し、上下動成分を含む地震波入力機構を取り入れた基礎・構造物系の3次元非線形応答挙動の予測法を開発して、大きな上下動の影響を調べ、従来の耐震設計・耐震診断法の改良点を探る段階にある。

### 2. 研究の目的

本研究では、震源域での重要生産・社会基盤構造物の合理的耐震設計・診断法の確立を目指し、構造物として橋梁を取り上げて、逆断層等の断層種類や断層パラメータと表層地盤特性が震源域での永久変位を含む地震動、特に上下動特性に及ぼす影響を調べ、震源特性と構造物の非線形特性を考慮し、大きな上下動成分を含む地震波入力による基礎・構造物系の3次元非線形応答挙動の予測法を開発し、大きな上下動の影響と線形系モデルの応答挙動との違いを調べ、従来の耐震設計・耐震診断法の改良点を明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究期間は3年間とする。本研究は、研究代表者と大学院学生1名と計算やモデル化に精通した企業からの研究協力者2名の体制で実施する。企業からの研究協力者2名は、長年、共同研究を実施してきている。

### 4. 研究成果

(1) 震源断層近傍の地震動上下成分性の解析とそれに基づく上下成分波形の作成(論文)

我が国の観測記録による地震動のモデル化方法と、震源断層モデルと水平成層地盤モデルによる理論的方法、の2つの方法から震源断層近傍の地震動上下成分の波形作成方法を新しく提案し、これら2つのモデルから断層永久変位を含む地震動記録である2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net 一関西の観測記録の再現ができることを示した。

図-1は、2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net 一関西の地表面での観測加速度記録の積分で求めた変位波形と断層モデルによる変位波形の比較を示したもので、よい一致が見られる。

また図-2は、その加速度波形の上下成分と水平成分(EW)のスペクトル振幅比 $|V(T)|/|H(T)|$ の比較で、両者のよい一致が得られた(詳細は論文参照)。

図-3は、断層最短距離が20km以内の28のK-NET 観測点での加速度記録から、地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比 $(|V(T)|/|H(T)|; T = \text{地震動の周期})$ を計算し、その平均値と標準偏差を求め、観測点の表層地盤特性を考慮して、地盤分類毎の地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比の「平均値」と「平均値 + m × 標準偏差」をモデル化したモデル式(詳細は論文参照)と、2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net 一関西の観測加速度波形から求めた地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比の比較を示す。

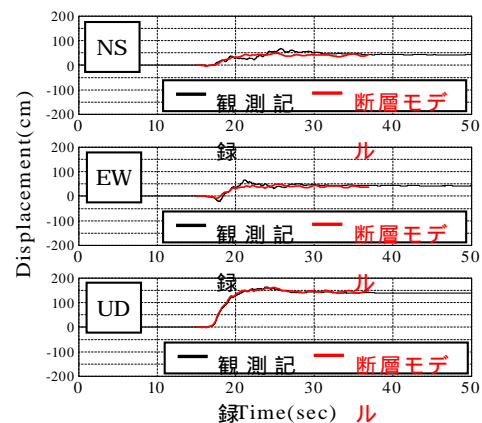


図-1 2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net一関西の地表面での観測加速度記録の積分で求めた変位波形と断層モデルによる変位波形の比較

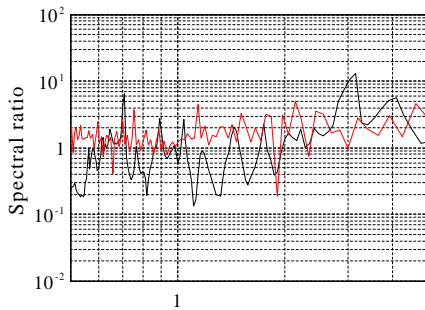


図-2 2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net一関西の地表面での観測加速度記録と断層モデルによる地震動上下成分と水平成分(EW成分)のフーリエスペクトル振幅比の比較

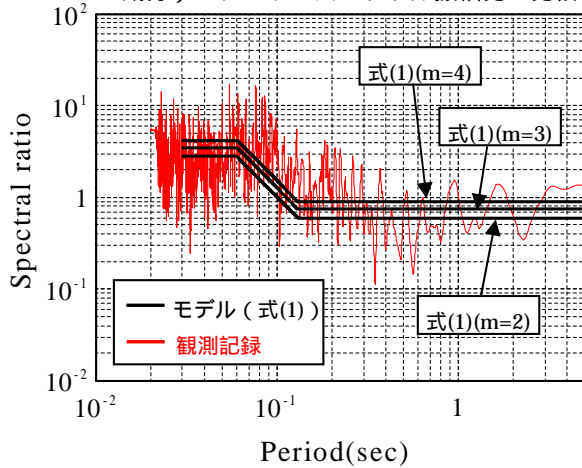


図-3 KiK-net一関西の観測加速度波形から求めた地震動上下成分と水平成分のフーリエスペクトル振幅比と波形合成に用いた振幅比モデル(式(1))の比較

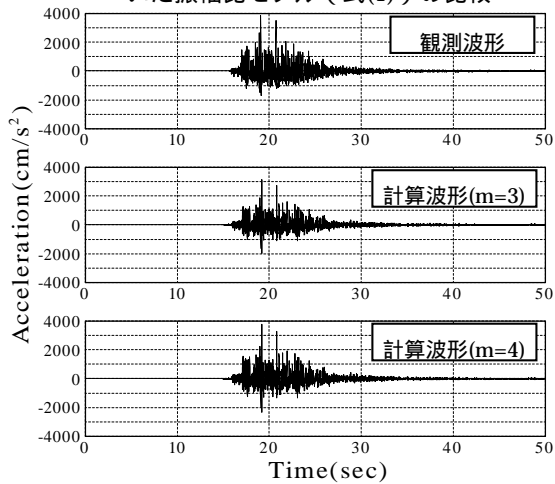


図-4 作成した地震動上下成分波形とKiK-net一関西の観測加速度波形の比較

また、図-4は、位相波と水平成分として観測記録を用いて、モデル化したフーリエスペクトル振幅比から地震動上下成分加速度波形を作成し、観測波形との比較を示す。

図-3と図-4より、2008年岩手・宮城内陸地震によるKiK-net一関西で観測された地震動上下成分加速度波形は、全国の平均的特性からモデル化された「平均値+4×標準偏差」、「平均値+3×標準偏差」の上限値を使

うことで再現できていることがわかる。

(2) 震源断層近傍の上路式鋼トラス橋と上路式鋼アーチ橋の3次元非線形応答挙動と耐震性向上方法(論文)

M6の逆断層近傍の上路式鋼トラス橋と上路式鋼アーチ橋の3次元非線形応答挙動と耐震性向上方法を提案した。

図-5は、その概略図で複雑な応答挙動を示す橋梁として分類される上路式鋼トラス橋と各橋脚への異なる地震動入力の様子を示す。上路式鋼アーチ橋についても入力地震動は同じものを用いた。

図-6と表-1は、本研究で検討した9ケースを示す。すなわち、3通りの断層近傍の橋梁の位置と逆断層上端が地表にある地表断層と逆断層上端上に0.5km, 1.0kmの表層地盤が存在する2つの伏在断層の合計3つの断層・表層地盤系に対する応答挙動を調べた。

図-7と図-8は、地表断層で橋梁が断層中央を横断する場合の各橋脚基礎地点の地震動変位波形と加速度応答スペクトルを示す。橋脚基礎A2とP2は逆断層の上盤上に、A1と

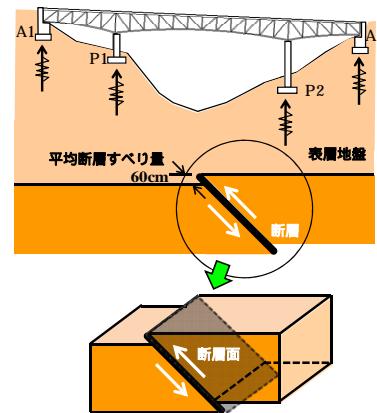


図-5 入力地震動の条件

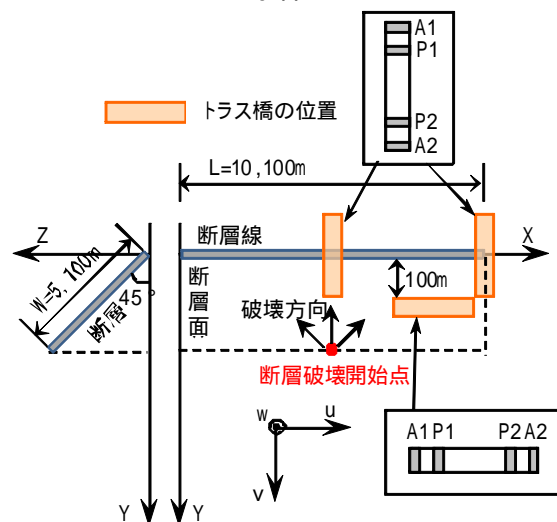


図-6 逆断層と対象橋梁の位置関係

表-1 逆断層の検討ケース

	断層中央 横断	断層終端 横断	断層 並行
逆断層	case211	case212	case213
	case221	case222	case223
	case231	case232	case233

した。上路式鋼アーチ橋に対しても同様な結果であった。

以下では、結果の図等の詳細は省略するが、応答挙動の解析からは、断層近傍の橋梁が大きく損傷する結果が得られたので、有効な耐

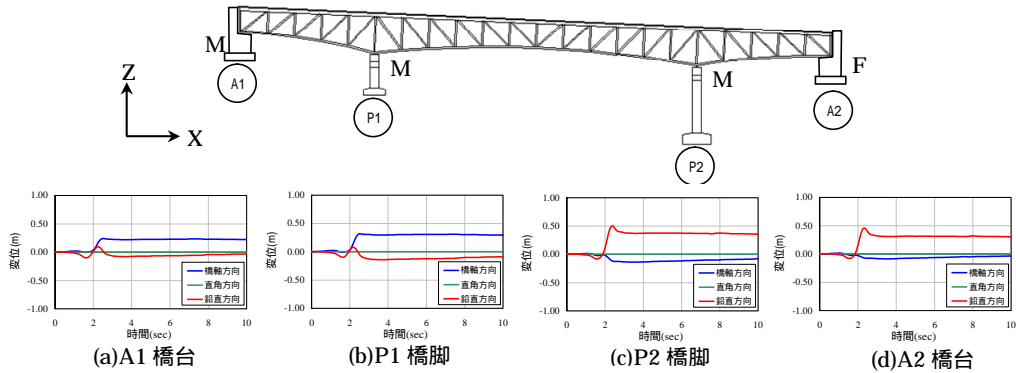


図-7 各基礎への入力変位波形

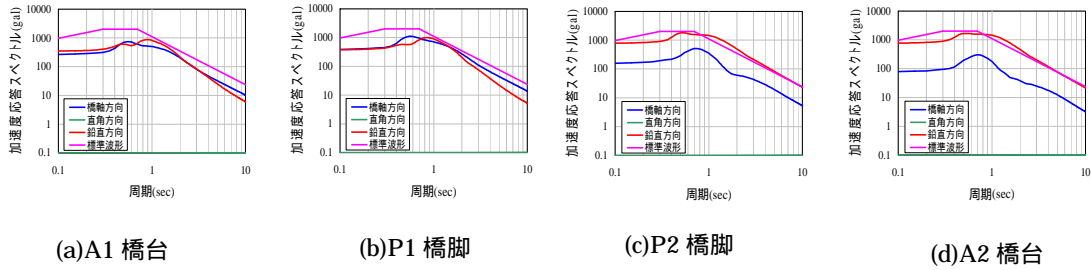


図-8 加速度応答スペクトル(5%減衰)(CASE211)

P1は下盤に位置し、上盤の方が下盤の地震動変位波形よりも大きい。また、永久変位を含む鉛直地震動変位波形(赤線)が卓越していることがわかる。

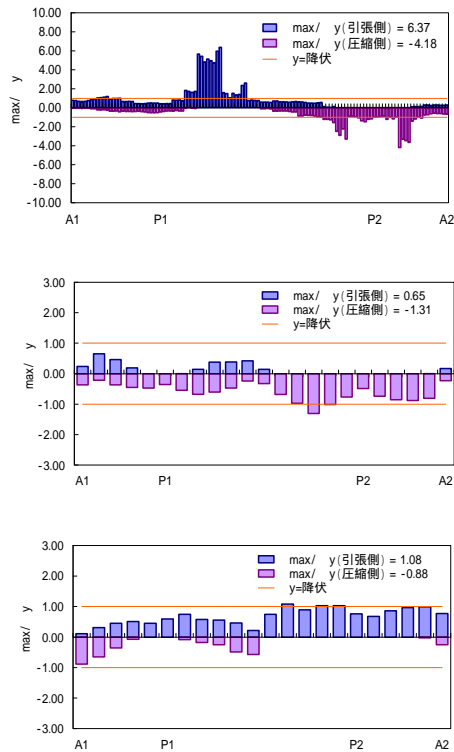
図-8に示す各橋脚位置での加速度応答スペクトルでは、上盤に位置する橋脚基礎A2とP2において、周期0.5秒から3.0秒の周期帯で、桃色で示す道路橋水平動標準加速度応答スペクトル(標準波形)よりも大きい鉛直加速度応答スペクトルとなっている。

図-9は、各部材の応答最大ひずみ/降伏ひずみ比を示す。特に、上段に示す下弦材の最大ひずみは降伏の6倍と大きなひずみとなり下弦材が大きく損傷する結果となった。

図-10は、対象橋梁の最大変位時の変形図を示すが、上盤側の大きな断層鉛直変位により橋梁が突き上げられている状況がわかる。

図-11は、橋梁の応答への断層永久変位の影響を見るために、断層永久変位の3成分の変位量だけ強制変位として入力する静的3次元非線形応答解析の各部材の最大ひずみを示す。これを図-9の結果と比較すると、ひずみの分布傾向は同じであるため、断層の永久鉛直変位の影響は大きく、さらに地震時の慣性力により応答ひずみが大きくなったものといえる。

これまででは、上路式鋼トラス橋の3次元非線形応答挙動に及ぼす断層永久変位を含む大きな上下動成分の影響を調べた結果を示



(c)斜材の最大ひずみ一覧

図-9 解析結果(CASE211)



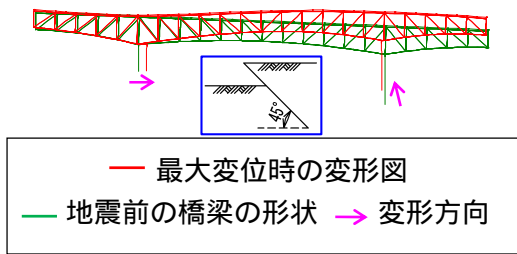


図-10 最大変位時の変形図 CASE211 )  
(表示変形倍率 10 倍)

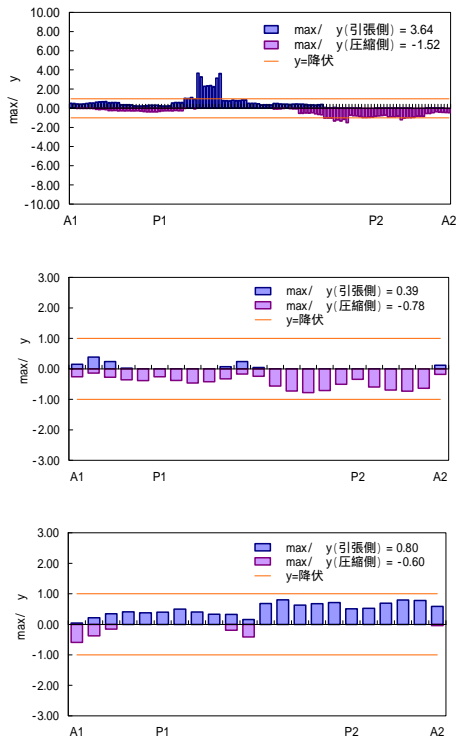


図-11 強制変位の静的解析結果

震性向上策を検討した結果のみを記述する (詳細は論文 と宮崎大学学術情報リポジトリ、児玉喜秀 博士論文、2014. (<http://ir.lib.miyazaki-u.ac.jp/dspace/> を参照)。

耐震性向上方法として、

従来多用されている履歴型制震器による補強法は、必ずしも有効ではなく、最も有効な補強法は速度依存型の制震ダンパーであることを数値計算によって示した。

また、大きな上下動が発生する正・逆断層近傍の橋梁では、支承の上下方向を拘束しないデバイスにより、橋梁の応答が大きく低減できることを示した。

最後に、橋梁の現行のRC床板から最近開発が進んでいる軽量のアルミニウム床板への置換は、橋梁の重量の軽減と変形性能の向上により、震源断層近傍の耐震補強法として極めて効果的であることを定量化した。

(3) 震源断層近傍の大型ケーソン基礎を有する斜張橋の3次元非線形応答挙動に及ぼす

## 大きな鉛直地震動の影響

単位面積当たりの非線形ウィンクラーモデル (参考論文 参照) による基礎周辺地盤の非線形復元力特性を考慮した震源断層近傍の大型ケーソン基礎を有する斜張橋の3次元非線形応答挙動に及ぼす大きな鉛直地震動の影響の結果を示す。

入力地震動は、図-7や図-8で示した地表逆断層の波形を入力した。

図-12は、橋長1km、中央径間長0.5kmの対称の斜張橋とそのファイバー要素によるモデル化を示す。

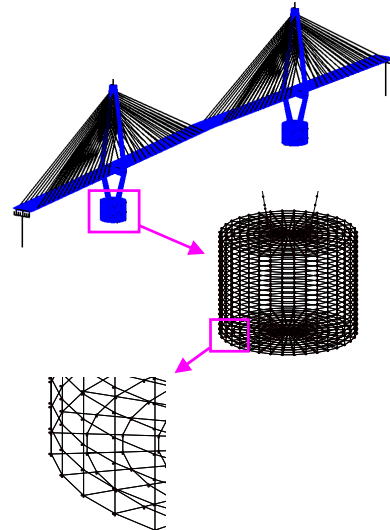


図-12 単位面積当たりの非線形ウィンクラーモデルによる基礎周辺地盤の非線形復元力特性を考慮した大型ケーソン基礎を有する斜張橋のファイバー要素によるモデル化

図-13は、大きな鉛直成分を含む3成分波形を入力した場合、鉛直成分を無視した場合、鉛直成分の半分の波形を使った場合の3ケース入力による主桁の応答最大ひずみ分布を示す。3成分入力の場合に主桁中央部付近のひずみは降伏ひずみの5倍程度と大きく、損傷する結果となっている。鉛直成分を無視した場合やその半分を入力した場合には、降伏ひずみ内に応答ひずみはとどまっている。

図-14は最大変位時の応答変位を示す。

図-13と図-14の結果より、逆断層近傍の斜張橋においては、大きな鉛直成分を含む3成分波形を入力した場合、主桁が降伏し損傷することが明らかとなった。

従来の耐震設計では、大きな上下成分は考慮されていないため、逆断層等の断層近傍の重要橋梁等では、本研究のような「震源断層から一貫して捉えた地盤・基礎・構造物系の3次元非線形応答解析方法」による慎重な検討がなされるべきである。

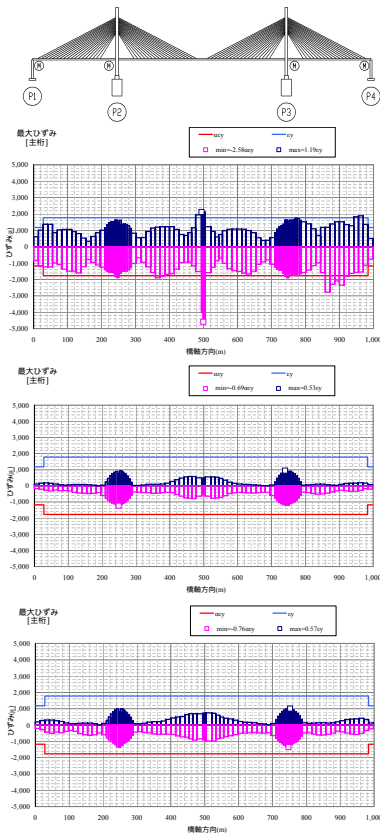


図-13 主桁の応答ひずみ分布図(上段:3成分入力結果、中段:鉛直成分無視の結果、下段:水平2成分+0.5x鉛直成分入力の結果)

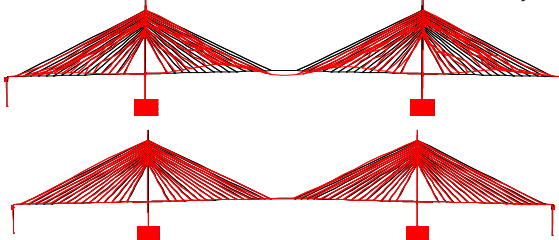


図-14 最大変位時の応答変位10倍(上段:3成分入力結果、下段:鉛直成分無視の結果)

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計8件:研究期間中6件)

児玉喜秀, 原田隆典, 野中哲也, 宇佐美勉, 中村真貴: R C床板をアルミニウム床板に取り替えることによる鋼アーチ橋の耐震性向上に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.60A, 2014, pp.326-334. (査読有)

中村真貴, 原田隆典, 金井則之, 野中哲也, 児玉喜秀, 本橋英樹: 震源断層近傍の地震動上下成分・位相特性の解析とそれに基づく上下成分波形の作成方法, 土木学会論文集, Vol.68, No.4, 2012, pp.1\_1-1\_12. (査読有)

Harada T., Nakamura M., Kanai N., Nonaka T., Kodama Y. and Motohashi H.: Analysis of vertical ground motion/phase motion

near fault records in Japan and its application to simulation of vertical application to simulation of vertical ground motion, Proc. of the 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, CDRom Paper No.1719, 2012.

12pages. (査読有)

児玉喜秀, 原田隆典, 野中哲也, 中村真貴, 宇佐美勉: 震源断層近傍における鋼アーチ橋の応答特性と耐震補強法, 構造工学論文集, Vol.58A, 2012, pp.436-447. (査読有)

原田隆典, 松田良介, 吉田一博, 粟田勇志: 直交座標系と2重フーリエ変換を用いた水平成層弾性体の動的グリーン関数とその検証, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.68, No.2, 2012, 1\_805-1\_812. (査読有)

原田隆典, 松田良介, 中村真貴, 粟田勇志: 直交座標系とフーリエ変換を用いた水平成層弾性体の動的グリーン関数, 土木学会論文集A2, Vol.67, No.2, 2011, pp.1\_915-1\_924. (査読有)

原田隆典, 野中哲也, 馬越一也, 岩村真樹, 王宏沢: ファイバー要素を用いた地盤・基礎の非線形動的相互作用モデルとその橋梁全体系の地震応答解析への適用, 応用力学論文集, Vol.10, 2007, pp.1047-1054. (査読有)

原田隆典, 浜崎晃, 王宏沢, 杉野仁彦: 地盤との非線形動的相互作用を考慮した高炉ガスホルダーの地震応答解析, 応用力学論文集, Vol.11, 2008, pp.1071-1079. (査読有)

[学会発表](計0件)

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]

ホームページ等

宮崎大学学術情報リポジトリ、児玉喜秀博士論文、2014、(<http://ir.lib.miyazaki-u.ac.jp/dspace/>)

宮崎大学ベンチャー企業(株)地震工学研究開発センター (<http://www.eerc.co.jp/>)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

原田隆典 (Harada Takanori)

宮崎大学・工学部・教授

研究者番号: 70136802

(2)研究分担者

無し

(3)連携研究者

無し

(4)協力研究者

野中哲也, 児玉喜秀, 中村真貴