

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560448

研究課題名(和文) 震源域における地盤と基礎と重要生産・社会基盤構造物の応答評価とその予測法

研究課題名(英文) Prediction and Evaluation Method of Response Behavior of Soil Foundation Industrial and Civil Infrastructural System near Seismic 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

研究成果の概要(和文): 震源域での重要生産・社会基盤構造物の高精度な耐震設計・診断法の確立を目指し,断層永久変位を含む断層近傍の特異な地震動を受ける震源域の構造物の3次元非線形応答解析法を開発した.本解析法では,震源域の地震動計算から基礎・上部構造物全体系の非線形応答解析の全てが応力・歪レベルで一貫して取り扱えるマイクロモデルを開発した.試算例から,地盤と基礎の3次元非線形相互作用並びに震源域での地震動の空間分布特性の上部構造物に与える影響が大きいことを定量的に示した.

研究成果の概要(英文): In order to establish a high qualified seismic 3-dimensional nonlinear response prediction method of soil foundation super structural systems in near seismic source, (1) a numerical method of the stress strain level's (micro model) nonlinear seismic response analysis of the foundation structure system is developed. Also, in this study, (2) a theoretical method of simulating deterministically the spatial variability of near field ground motions is proposed. The near field ground motions with large permanent movements due to a fault are simulated using the stiffness matrix method and kinematical model of fault rupture in horizontally homogeneous layered half space. It is found from this study that the spatial variability of ground motions strongly affect on the inelastic response behavior of the lifelines near a fault and also that the nonlinear soil foundation seismic interaction affects upon the nonlinear response behavior of super structures such as cable stayed bridge and large scale BGF gas holder.

交付決定額

(金額単位:円)

|        | 直接経費      | 間接経費      | 合計        |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 2008年度 | 2,500,000 | 750,000   | 3,250,000 |
| 2009年度 | 600,000   | 180,000   | 780,000   |
| 2010年度 | 500,000   | 150,000   | 650,000   |
| 年度     |           |           |           |
| 年度     |           |           |           |
| 総計     | 3,600,000 | 1,080,000 | 4,680,000 |

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:耐震構造、地盤と基礎の非線形地震時相互作用、地震動、震源

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 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・構造物系を一体として捉えて基

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。現状では、震源から構造物に至る全体系を線形系モデルと仮定する場合には、動的サブストラクチャー法等の重ね合わせの原理に基づき全体系を適当な部分領域に分割して別々に取り扱い、全体系の地震応答を正確に計算できる。しかし、非線形系としての取り扱いが必要な構造物基礎周辺地盤から基礎・構造物系の応答を組み込んだ震源から構造物に至る全体系の3次元非線形応答挙動に関する合理的評価法とその予測法は確立されていない。

(2)そこで、震源域の断層永久変位を含む強震動の基礎・構造物への入力機構並びに基礎周辺地盤からの非線形復元力モデルの改良を行ない、震源域の特異な地震動を受ける重要生産・社会基盤構造物の3次元非線形応答への地盤・基礎系の3次元非線形地震時相互作用の影響を検討し、震源から一体として捉えた地盤・基礎・構造物系の3次元非線形応答挙動から従来の耐震設計・耐震診断法の改良点を探る。

## 2. 研究の目的

(1)本研究では、震源域における重要生産・社会基盤構造物の合理的耐震設計・耐震診断法の確立を目指し、構造物として群杭基礎を有する大型ガスホルダー・パイプライン系、ケーソン基礎を有する長大橋、幹線地中パイプラインを取り上げて、断層永久変位を含む震源断層近傍の特異な地震動を受ける震源域の基礎・構造物系の3次元非線形応答を評価し、線形系応答挙動との違いや従来の耐震設計・診断法の改良点を明らかにする。

(2)これらの理論的方法を主体とした震源から構造物に至る全体系の3次元非線形応答解析から、断層破壊特性と地盤・基礎・構造物系の非線形地震時相互作用や3次元非線形応答特性の関係、震源域での地表面の傾斜・回転運動並びに地盤・基礎系が上部構造物系の応答に与える影響など、従来の耐震設計で考慮されて来なかった要因の影響を評価し、現行の耐震設計法の適用限界とその改良手順と方法を提案する。

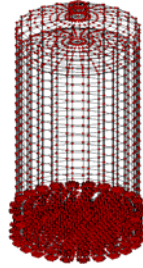
## 3. 研究の方法

(1)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)群杭基礎を有する大型ガスホルダーのモデル化と地震応答挙動の成果(論文)

15万m<sup>3</sup>クラスの大型高炉ガス(BFG)ホルダーを想定し、図-4.1のように3次元骨組にモデル化する。地震時に塑性化する可能性の高いBFGホルダー基柱は3次元ファイバー要素でモデル化する。BFGホルダーの側壁(側板)・屋根・タリット部などの平面構造と曲面構造に対しては、同様に塑性化が表現できるシェル要素(非線形積層タイプの4節厚肉シェル要素)でモデル化する。このようなモデル化により、従来耐震設計で使われる梁モデルでは表現できないオーバル振動やねじり挙動なども再現できる。外観を表示させると図-4.2のようになる。



|                 |  |
|-----------------|--|
| 基柱部:<br>ファイバー要素 |  |
| 側壁:<br>シェル要素    |  |
| 杭構造:<br>ファイバー要素 |  |

図-4.1 大型高炉ガス(BFG)ホルダーの3次元骨組モデル

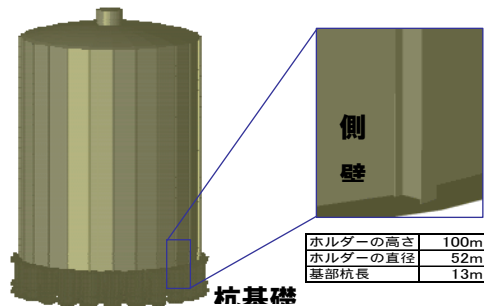
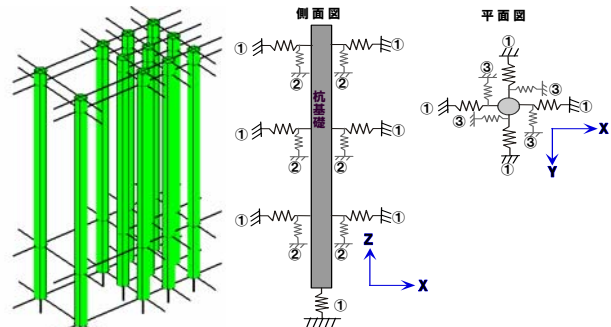


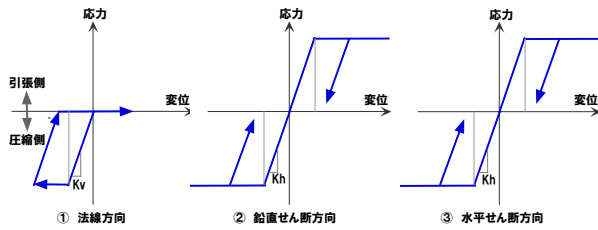
図-4.2 ガスホルダーの3次元イメージ

また、地震時のピストンと側板の挙動は重要な点であるため、ピストンと側板の間に接触ばね(非線形ばね)を配置し、隙間の状態が表現できる。ガスホルダー内は常に低圧ガスが充満しているため、ガスの圧力をばねモデル(線形ばね)で評価し、ピストンとホルダー底面の間に等分布ガスばねを配置した。



(群杭構造モデル)

a)3成分地盤ばねのイメージ図



b)3成分地盤ばねの構成則

図 - 4.3 杭基礎の提案モデル

一方、単位面積当りに作用する地盤反力と基礎変位の関係を表す Multi-Winkler モデルを用いる。地盤ばねは、法線、鉛直と水平方向の3成分の連成ばねである(図 - 4.3 参照)。例えば、法線方向圧縮応力が増加すると、せん断すべり限界応力が増加し、杭基礎と地盤の間のすべり抵抗が大きくなる。一方、地盤と基礎の間に剥離や浮き上がりが生じた場合、その基礎側面や底面地点のせん断方向抵抗応力が期待できないという現象を簡単なモデルによって表現したものである。

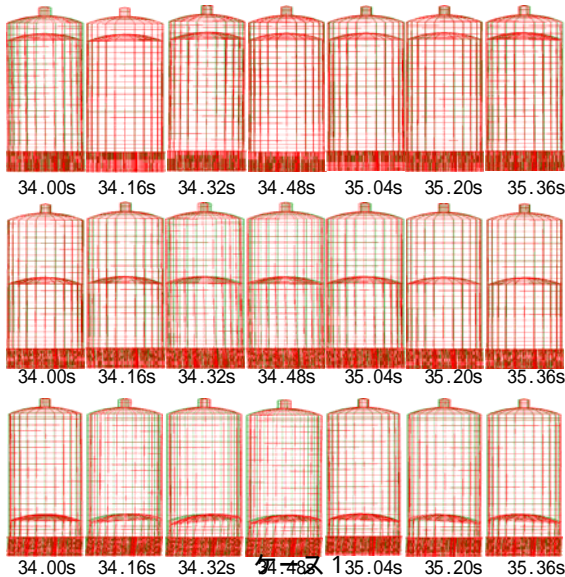


図 - 4.4 時刻 34 秒から 35.36 秒間の 0.16 秒毎の変形の様子(ケース 1 ~ 3)

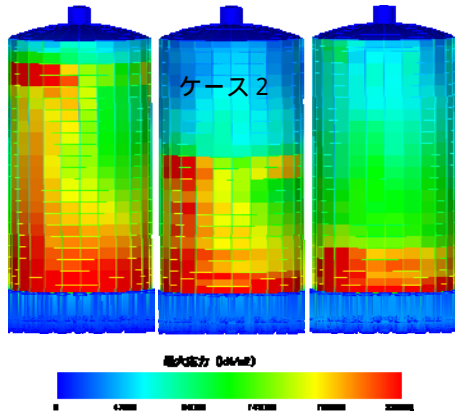


図 - 4.5 ケース毎の最大応力の分布図

図 - 4.4 は、BFG ホルダー全体系の応答挙動を見るために、応答波形の時刻 34 秒から 0.16 秒毎の時刻 35.36 秒までの応答変位の様子(スナップショット)を示す。このスナップショットから、ケース 2 や 3 では杭基礎部の変形が大きくなっていることや、ケース 3 では、ピストンのロッキング(回転・傾斜)運動が現れていることがわかる。

図 - 4.5 は、ケース毎の構造全体系の最大応力の分布を示したものである。シェル要素では最大ミーゼス応力で、ファイバー要素では最大軸応力で評価している。赤色の部分は鋼材 SS400 の降伏応力(約 235,000kN/m<sup>2</sup>)となっている。この図より、BFG ホルダーの基部とピストン部位の側壁付近で降伏応力に達する大きな応力が発生している。したがって、部材撓みや平面座屈等の局所的な塑性変形が生じる可能性が大きくなることがわかる。

以上のような重要生産施設として大型高炉ガス(BFG)ホルダーの 3 次元非線形地震応答解析のモデル化を開発し、非線形動的相互作用を考慮することで上部構造の応答変位と基柱基部の応答ひずみがかなり緩和されることがわかった。

(2)ファイバー要素による地盤と基礎の非線形動的相互作用モデルとその長大橋の地震応答解析への適用と挙動の成果(論文)

SR モデルや Penzien モデルのような基礎の任意の 1 点に集約した非線形地盤ばねモデルではなく、基礎と地盤の接触面の単位面積当りに作用する地盤反力と基礎の変位の関係を表す Winkler モデルの考え方を採用した非線形地盤ばねモデルを提案した。

図 - 4.6, 4.7 に示す基礎と地盤の接触面の単位面積当りに作用する地盤反力と基礎変位の関係を表す Winkler モデルの導入により上部構造物系に対して多用されているファイバー要素モデルの考え方が、地盤・基礎系に対しても使えるようになり、比較的簡単で、かつ基礎と上部橋梁系を全て応力・歪レベルで統一した解析手順によりモデル化すること(マイクロモデルと呼ぶ)が可能となる。

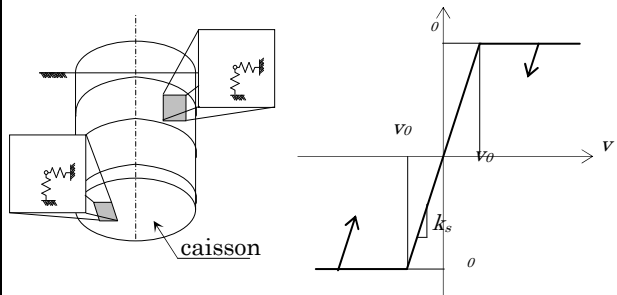


図 - 4.6.非線形地盤反力モデル(せん断方向)

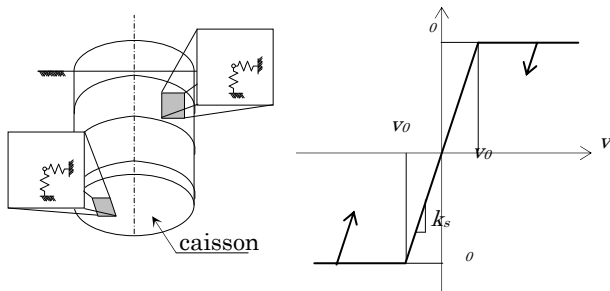


図 - 4.7 非線形形地盤反力モデル(せん断方向)

本提案モデルの特性を示すために、直接基礎の非線形集約回転ばねに対応するモーメント荷重と基礎回転角の関係をとり上げて、図 - 4.6, 4.7 に示すようなファイバー要素による Winkler モデル(本提案モデル: 応力 - 歪レベルに基づくマイクロモデルと呼ぶ.) から従来多用されている集約ばね(荷重 - 変位レベルに基づくマクロモデルと呼ぶ.) を再現して、実験結果との定性的比較を示す。

ここでは、基礎の支持力に関して次の3つの場合について検討した。Case(1) 基礎の支持力が高い場合(基礎端部の支持力が極限支持力に達しない)、Case(2) 基礎の支持力がやや低い場合(基礎端部の支持力が極限支持力を少し超える)、Case(3) 基礎の支持力が低い場合(基礎端部の支持力が極限支持力を大きく超える)。なお、極限支持力を超える場合の応力 - 変位曲線の第2勾配は、第1勾配の1/10を仮定した。また、現実には地盤の圧縮極限支持応力が変わると基礎底面の法線方向の地盤反力係数も変わるが、本数値計算は本提案モデルによるモーメント荷重と基礎回転角の非線形特性が、地盤の圧縮極限支持応力によって変わることを示すことを目的とするため、3つの場合での基礎底面の法線方向の地盤反力係数は同じ値を用いている。また、直接基礎への常時鉛直荷重も3つの場合で同じ荷重を用いている。

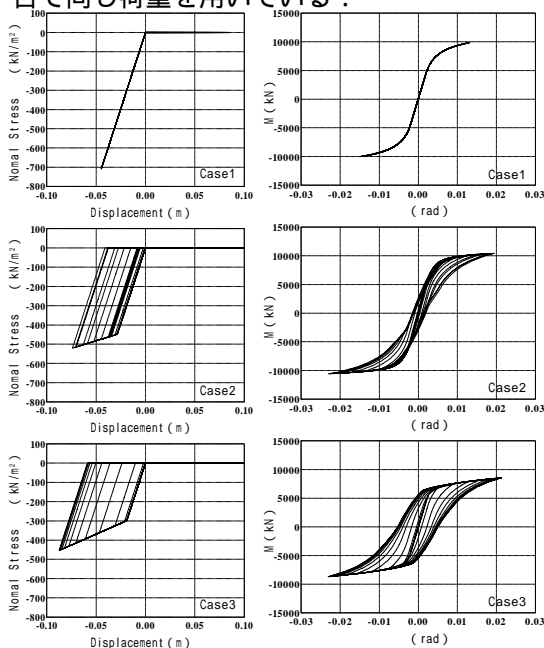


図 - 4.8 本提案モデルから求めた3ケース毎直接基礎のモーメントと回転角の履歴特性(右図)と基礎端部の鉛直方向の応力 - 変位の履歴曲線(左図)(Case(1)上段, Case(2)中段, Case(3)下段)

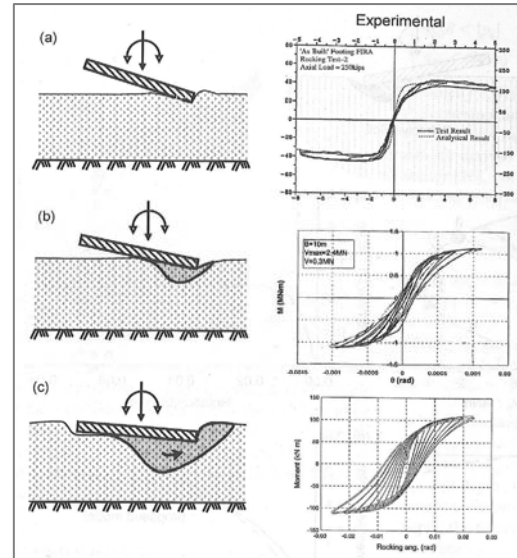


図 - 4.9 過去の実験による直接基礎のモーメントと回転角の履歴特性

図 - 4.8 は、本提案モデルから再現された直接基礎のモーメント荷重と基礎回転角の非線形特性(非線形集約回転ばね、右図)および基礎端部の鉛直方向の応力と変位の履歴曲線(左図)を示す。図 - 4.9(上段に示すものは Case(1)の結果で、基礎端部の履歴曲線(図 - 4.8 上段の左図)から基礎端部の支持力は極限支持力に達しおらず、また、引っ張り力は零となり浮き上がりが生じていることがわかる。この場合のモーメント荷重と基礎回転角の非線形特性には、履歴特性が現れず、骨格曲線のみが非線形特性を示す典型的な浮き上がりのみを考慮した非線形集約回転ばねが再現されている。

一方、Case(2)や Case(3)のように基礎端部の支持力が極限支持力を超える場合、図 - 4.8 の中段と下段に示すようにモーメント荷重と基礎回転角の非線形特性に履歴特性が現れてくる。

図 - 4.8 に示したこれらモーメント荷重と基礎回転角の非線形特性は、定性的な比較であるが、図 - 4.9 に示すような直接基礎の実験から得られている特性と同じ傾向を示している。すなわち、定性的ではあるものの、図 - 4.9 の説明図にあるように基礎端部の支持力が不足してくると、そこで基礎の沈下が局部的に発生し、基礎の浮き上がり面積が減少し、また、モーメント荷重が零となっても基礎は傾いた状態(回転角が零に戻らない)

に留まり、結果としてモーメント荷重と基礎回転角の履歴特性が成長する現象（マクロモデルの結果）が、本提案モデル（マイクロモデル）から再現できることが示されている。

対象橋梁をファイバー要素法でモデル化し、材料非線形性および幾何学的非線形性を考慮した動的複合非線形解析で検討を行う。上部工の減衰定数として 1% のレイリー減衰を仮定した。以上のようにして基礎・上部橋梁系をモデル化したものを図 - 4.10 に示す。

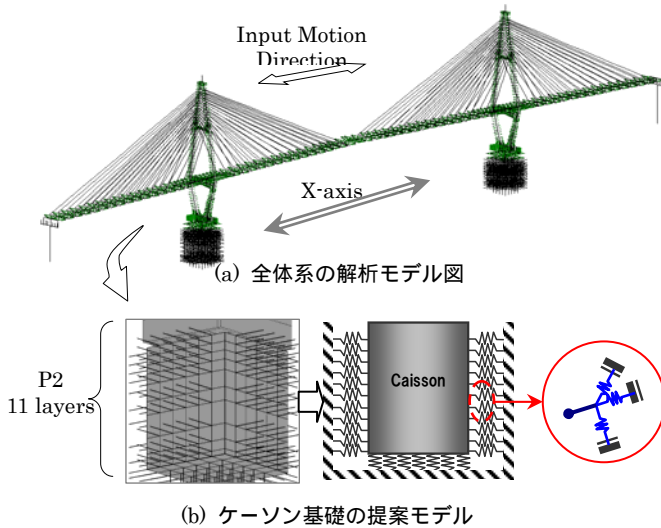


図 - 4.10 解析モデル概要

本研究成果をまとめると、以下のようになる。

ファイバー要素を用いた地盤と大型基礎の非線形動的相互作用モデルを提案し、長大橋に対してその提案モデルの適用を試みた。本論文で提案するような非線形地盤反力モデルを導入することによって、これまで上部構造物の非線形地震応答解析に多用されているファイバー要素による基礎・上部構造物全体系の統一的なモデル化が可能となり、基礎・上部構造物全体系の非線形地震応答解析の全てが応力・歪レベルで一貫して実施できるマイクロモデルを開発したことを示すことにある。そして、全体系の非線形地震応答解析から、集約地盤ばねモデルでは表現できない、基礎各部の地盤反力の時刻歴特性や履歴特性を考察するためのものである。

(3) 剛性行列による震源断層・水平成層地盤の地震動計算法の改良（論文）

剛性行列による地震波動場の定式化では、震源断層で発生した地震波の影響を表す剛性方程式の外力項の表現として、(1) 半無限弾性体の剛性行列と無限弾性体中の震源断層から放射される地震波による変位と応力を用いる方法、(2) 半無限弾性体の剛性行

列と解放基盤波を用いる方法、(3) 無限弾性体の剛性行列と無限弾性体中の震源断層から放射される地震波変位を用いる方法、の3つの方法を新しく開発した。

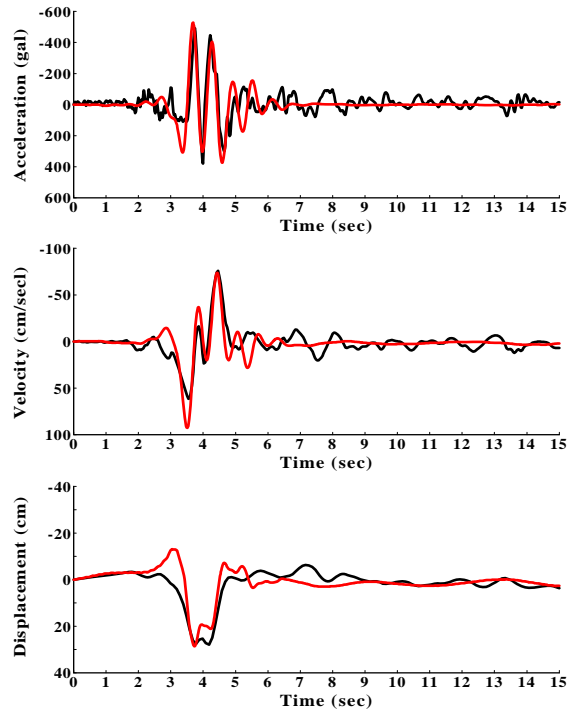


図 - 4.11 実測記録との比較(黒:観測記録, 赤:計算波形)

従来の定式化では、外力項評価が必要となる露頭波を、伝達行列法を使って求めるものであったが、本論文の定式化により、剛性行列の演算のみで地震波の影響を表す剛性方程式の外力項が求まり、完全な剛性行列法による地震波動場の定式化ができた。

図 - 4.11 は、1966 年 Parkfield 地震 ( $M_s 6.5$ ) の際に、断層破壊終了付近から約 80m 地点の地表面 (Station2) で、断層とほぼ直交する方向 (COMP N65E) の加速度記録が観測され、この加速度波形から求めた速度と変位波形と本研究の剛性行列による地震波動計算法に基づいて計算した波形を比較したもので、加速度波形 (図の上段)、速度波形 (図の中段)、変位波形 (図の下段) 全ての波形においてよい再現ができていることがわかる。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 11 件)

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, 査読有,

Vol.11, 2008, pp.1071-1079.

原田隆典, 中村真貴, 王宏沢, 齊藤将司, 強震観測点の記録と常時微動H/Vスペクトル比を利用した近傍の未観測点の強震動予測, 応用力学論文集, 査読有, Vol.11, 2008, pp.595-602.

Wang, H., Harada, T., Nonaka, T., Nakamura, M., Spatial variability of near field ground motions and its design implication of long extended lifeline structures nearby a fault, Proc. of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 査読有(アブストラクト), CD-ROM, 2008.

Harada, T., Nonaka, T., Wang, H., Magoshi, K., Iwamura, M., A nonlinear dynamic soil foundation interaction model using fiber element method and its application to nonlinear earthquake response analysis of cable stayed bridge, Proc. of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, 査読有(アブストラクト), CD-ROM, 2008.

原田隆典, 野中哲也, 王宏沢, 岩村真樹, 宇佐美勉, 震源断層近傍における上路式鋼トラス橋の応答特性, 構造工学論文集, 査読有, Vol.55A, 2009, pp.573-582.

齊藤将司, 原田隆典, 森源氏, 王宏沢, 中村真貴, 調和振動荷重による地盤構造と各層の弾性定数の推定法, 応用力学論文集, 査読有, Vol.12, 2009, pp.571-578.

齊藤将司, 原田隆典, 森源氏, 王宏沢, 中村真貴, 調和振動外力による地盤構造と各層の弾性定数の推定法に関する基礎的研究, 土木学会地震工学論文集, 査読有, Vol.30, 2009, pp.180-187.

中村真貴, 原田隆典, 王宏沢, 齊藤将司, 常時微動H/Vスペクトル比を利用した強震観測点近傍の地震動推定法, 土木学会地震工学論文集, 査読有, Vol.30, 2009, pp.65-74.

原田隆典, 野中哲也, 児玉喜秀, 中村真貴, 震源断層近傍の地震動上下成分の解析と上路式鋼アーチ橋の非線形応答挙動, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, アブストラクト査読有, Vol.13, 2010, pp.4256-4263.

中村真貴, 原田隆典, 王宏沢, 野中哲也, 剛性行列による地震波動場の定式化と震源断層近傍の変位・速度・加速度波形の

試算, 応用力学論文集, 査読有, Vol.13, 2010, pp.675-682.

児玉喜秀, 原田隆典, 野中哲也, 中村真貴, 宇佐美勉, 逆断層近傍における上路式鋼トラス橋の応答特性, 構造工学論文集, 査読有, Vol.57A, 2011, pp.454-466.

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
出願年月日:  
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:  
発明者:  
権利者:  
種類:  
番号:  
所得年月日:  
国内外の別:

〔その他〕(計0件)

## 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

研究者番号:

### (3) 連携研究者

研究者番号:

### (4) 研究協力者

野中 哲也  
株式会社 地震工学研究開発センター

王 宏沢 (Wang Hongz)  
株式会社 地震工学研究開発センター

中村 真貴  
宮崎大学大学院博士後期課程