

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 29 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360180

研究課題名(和文)交通荷重と高架橋 - 地震連成系における包括的耐震性能評価手法の構築と安全対策検討

研究課題名(英文) Estimation of seismic performance of viaducts incorporated with vehicles and counter-measurement of safety

研究代表者

川谷 充郎 (KAWATANI, MITSUO)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：00029357

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,200,000円

研究成果の概要(和文)：大規模地震動下の橋梁 - 車両 - 地盤連成系の非線形動的応答解析手法を検討した。レベル1地震動の場合は研究代表者が開発してきた解析プログラムにより振動系車両走行状態を解析してきたが、レベル2の大規模地震動下では非線形応答となるため汎用解析プログラムを用い、振動系車両をFEモデルとして扱った。実橋梁における車両載荷時加振実験により開発した手法の妥当性を検証した。地盤との相互作用は地盤条件および杭基礎構造を反映しては要素でモデル化し、それらの特性による影響の大きいことが分かった。さらに、新幹線車両の連結のモデル化が車両の走行安全性評価に影響することを解析的に検討した。

研究成果の概要(英文)：To investigate the dynamic influence of vehicles on the seismic response of viaducts, nonlinear seismic analyses of highway viaduct, Shinkansen one and monorail one are carried out using general-purpose program, in which vehicles are modeled as three-dimensional finite elements. Analytical procedures are verified comparing with field experiment using oscillator on highway viaduct. Dynamic responses of superstructures are different due to ground conditions, so that piles in ground should be modeled adequately using FE beam elements in dynamic analyses. The seismic responses of viaducts considering vehicles as additional mass are compared with those of the cases considering either no vehicles' load or vehicles as 3D FE model. Analytical results show seismic responses of viaducts are greatly influenced due to the dynamic effect of vehicles and the ground motion characteristics. Therefore, in the seismic design of viaducts it is important to further examine the dynamic effect of vehicles.

研究分野：工学

キーワード：地震防災 耐震設計 高架橋立体解析 車両走行安全性 大規模計算

1. 研究開始当初の背景

(1) 交通荷重を考慮した橋梁の耐震性能評価について、**道路橋**において**亀田弘行ら**の先駆的研究(土木学会論文集, No.626/I-48, 1999.7)があるが、限られたケースであり、車両は走行せず停止状態で考えている。**鉄道車両 - 橋梁連成系の地震応答**に関する解析的研究は、**日本国内**において比較的詳細な列車モデルを用いて高架橋との相互作用解析による検討(**松本ら**, 土木学会論文集A, Vol.63, pp.533-551, 2007.7; **曾我部ら**, 応用力学論文集, Vol.10, pp.1037-1046, 2007.9)が始められているが、大規模地震時における問題の複雑さにより、橋脚を非線形ばねに置き換える簡易な構造モデルを用いざるを得ず、車両の走行性検討に主眼を置いているのが現状である。**国外**においても鉄道橋に走行列車と地震荷重が同時に作用する場合の解析検討(**Y. B. Yang & Y. S. Wu**, *Journal of Sound and Vibration* (2002), 258(1), 65-94; **H. Xia & N. Zhan**, *Computers and Structures* (2005), Vol.83, 1891-1901)が進められている。さらに近年、ネバダ大学でI. G. Buckleを中心に曲線桁道路橋を対象に**2/5スケールの大規模な模型実験**が実施されているが(**Wibowo, H., Sanford, D.M., Buckle, I.G., and Sanders, D.H.**, *Civil Engineering Dimension*, Vol. 14, No. 3, December 2012 (Special Edition), 166-172), これらの研究は線形の範囲内に留まっている。

(2) 本研究課題の構想の発端は**兵庫県南部地震による都市高架橋の被害**である。地震発生が早朝ではなく、頻繁に車両が通行あるいは交通渋滞下の場合、高架橋および走行車両はどのような事態になるのかを明らかにすべきと考えた。そして平成16年に**新潟県中越地震**が発生し、橋梁構造物の被害に加え、我が国で初めて**高架橋を走行中の新幹線車両が脱線**する事態になった。この事故により橋梁 - 走行列車システムの耐震性能評価および有効な対策が非常に重要かつ緊急な課題であることが明らかとなった。さらに道路橋と鉄道橋以外に、**モノレール高架橋など都市新交通システムに対する地震応答評価**も喫緊な課題である。この種の問題は、走行車両や構造物、さらに周辺地盤で構成される非常に複雑なシステムであり、実験や実測による完全な現象解明が不可能な現状において、有効な解析的評価手法の構築が急務となっている。

2. 研究の目的

(1) 現行**道路橋示方書**では、**耐震設計において活荷重との組み合わせを考慮していない**が、大型かつ重量化しつつある車両の通行する高架橋では、頻繁に起る交通渋滞の間に地震の発生する可能性を考慮すべきである。**鉄道高架橋の耐震設計**においては、列車荷重を考慮して

いるが、走行列車と橋梁との相互作用が完全に解明されていないことなどから、大規模地震時列車走行安全性の確保が困難であるとしている。**モノレール等の都市新交通システムにおいては合理化鋼軌道桁の開発**が進められ、**死荷重に対する活荷重の比が大きくなり**、その耐震信頼性が問われている。また、新潟県中越地震において、周辺地盤沈下や液状化といった地盤変状が新幹線高架橋と列車の地震応答に大きく影響した可能性が指摘されており、**車両と橋梁連成系の地震応答に対する周辺地盤の影響**も正確に考慮する必要がある。さらに、**曲線区間における走行車両と橋梁との相互作用**はより複雑になり、その現象の解明は特に車両走行安全性確保の観点から重要である。

(2) 申請者がこれまでに開発した走行車両 - 橋梁連成系の地震応答解析手法を基礎に、上記諸課題を踏まえた**包括的な交通荷重 - 橋梁 - 地盤連成システムの耐震性能評価手法を確立**する。モノレールシステムにおける非線形構造解析の経験を活用し、部材レベルの非線形挙動を再現できる有限要素モデルを構築し、**大規模地震動を受ける橋梁 - 走行車両連成系の非線形応答解析手法を確立**し、**実験および実測結果との比較よりその妥当性を検証**する。さらに、申請者らの交通振動による橋梁周辺地盤振動解析の経験を生かし、**車両 - 橋梁 - 周辺地盤連成系の地震応答解析手法の構築**を実現させる。確立される解析手法を駆使し、**曲線区間を含む地震時高架橋の耐震性能および車両走行安全性の評価**を行う。

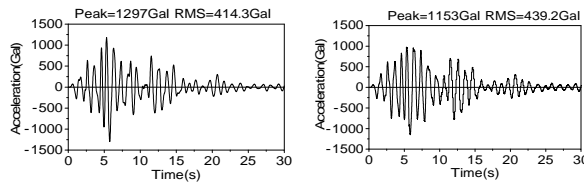
3. 研究の方法

線形地震応答解析で妥当性が検証された高架橋および走行車両モデルをもとに、非線形挙動による橋梁と車両との相互作用を適切に表現できるようにし、直接積分法を用いて地震応答を求める。また、車両と橋梁連成系の地震応答に対する周辺地盤の影響を適切に考慮するため、地盤条件に応じた地盤解析モデルを導入し、橋梁基礎と地盤との相互作用を解析する。非線形動的解析では汎用ソフトを活用し、車両も有限要素でモデル化し減衰を適切に評価する。また、高速走行する新幹線を含む地震時車両と橋梁との相互作用を十分に表現し、さらに、車両の連結の影響を考慮して、実際の現象を解明する。

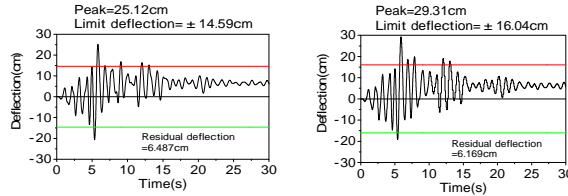
解析の妥当性は現地起振機実験、および他の研究者の大規模模型振動台実験の結果と比較して検証する。

4. 研究成果

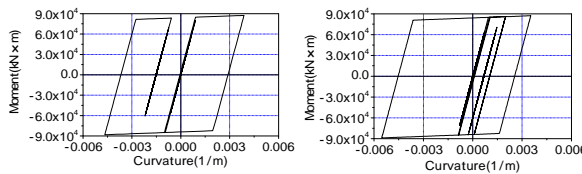
(1) **曲線桁高架道路橋と車両連成系の非線形解析による耐震性能評価** 2径間連続曲線桁高架橋を対象に満載車両の質量を考慮する場合と、それを振動系とする場合の



(i) Acceleration in Y direction at central pier top



(ii) Deflection in Y direction at central pier top



(a) Vehicles as additional mass (b) Vehicles stopping
(iii) Hysteresis curve in Y direction at central pier basement

図1 曲線桁高架橋非線形地震応答解析結果
(Level 2-Type , Curvature radius:100m)

非線形応答の比較を図1に示す。図1()の残留変位は許容値を下回り耐震性能2を満足するが、変位応答の最大値は若干限界を超える。車両振動系の場合は車両質量を考慮する場合と比較して、加速度応答の最大値は小さくなるが、変位については最大応答も残留変位も大きくなり、橋脚下端の履歴ループと対応している。

(2) **高速鉄道高架橋の車両考慮による非線形地震応答解析** 新幹線高架橋の典型的なRCラーメン構造を対象とし、その解析モデルを図2に示す。また、新幹線車両の有限要素モデルを図3に示す。非線形解析における橋脚下端の復元力特性を図4に示す。これらの解析モデルを用いてレベル2地震動下の非線形応答の特性は(1)の曲線桁高架道路橋の場合とほぼ同じ傾向である。耐震補強工が列車の動的作用を考慮した場合の橋梁地震応答に及ぼす影響を検討した。また、列車走行時に地震が発生したときの脱線の危険性についても解析的に検討した。さらに、新幹線車両の連結のモデル化が車両の走行安全性評価に影響することを解析的に検討した。

(3) **跨座型モノレールPC桁高架橋の地震応答解析** 地盤条件の異なる2箇所における橋脚の基礎構造については、基礎-地盤相互作用の影響を評価するために、図5に示すように地盤ばねモデル、杭要素モデルにて考慮する。種地盤と種地盤に相当する地盤条件であり、ここでは種地盤の場合につ

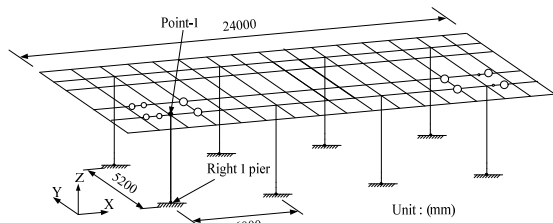


図2 新幹線高架橋モデル

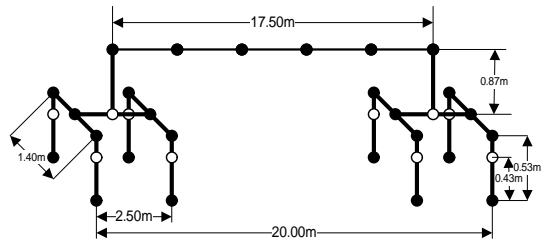


図3 新幹線車両有限要素車両モデル

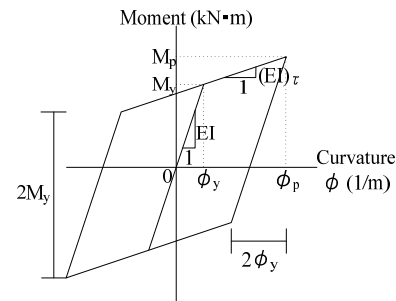
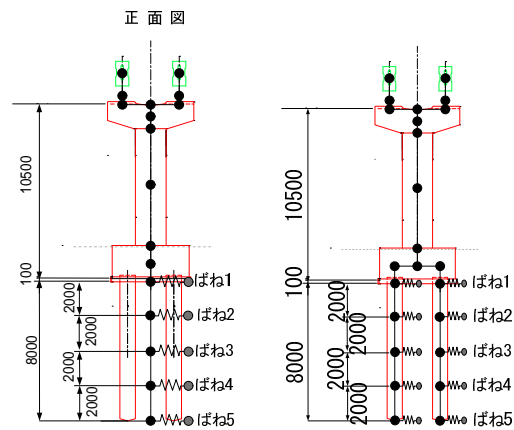


図4 新幹線高架橋橋脚下端復元力特性



(a) 杭基礎集約モデル (b) 杭基礎離散モデル

図5 モノレール高架橋基礎の杭要素モデル

き、レベル1地震動による応答解析結果を図6および図7に示す。ここで、CASE1: 車両無視, CASE2: 車両を付加質量として考慮, CASE3: 振動系車両が走行する場合である。この結果から地盤ばねのモデル化による応答の相違が確認できる。まず、卓越振動数は地表ばねモデルに比べ、全てのケースで杭基礎集約モデルの方が小さくなっていることが分かる。これは杭基礎集約モデルでは、基礎杭の長さ方向の構造が加味されているこ

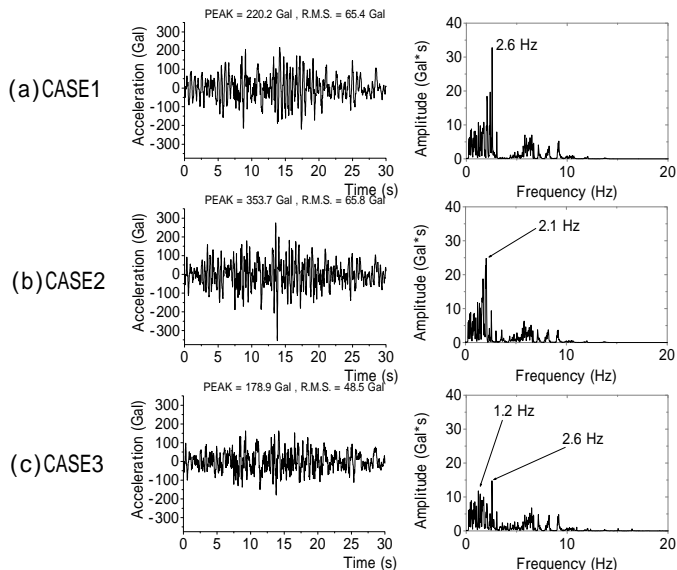


図6 橋脚天端加速度応答：地表ばねモデル

とから卓越振動数が小さくなっていると考えられる。また、車両モデルにおいて、CASE2に比べCASE3の加速度応答が小さくなっているのは、車両振動系によるダンパー効果によるものと考えられる。

(4) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

次節の「主な発表論文等」に示すように研究代表者・分担者がそれぞれ得意の領域で研究成果を論文として公表・国内および国際会議で発表してきた。国際誌・国際会議での発表論文は海外研究者から引用され、国際会議でも活発な討議を受けて、着目されていることが分かる。

研究分担者の何興文氏(Prof. Xingwen He, 北大助教)はこれまでの国際レベルの研究成果が認められ、今年2015年9月より、母校の中国大連理工大学の教授に昇進して赴任することになった。我が国と中国との国際交流・共同研究に貢献されることが期待される。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者には下線)

〔雑誌論文〕(計17件)

- 1) Qin Tian, Toshiro Hayashikawa, Takashi Matsumoto and Xingwen He: Effect of shock absorber devices on seismic response of curved viaduct equipped with viscous dampers under great earthquakes, Journal of Structural Engineering, JSCE, 査読有, Vol.61A, March 2015, pp. 322-334.
- 2) Zhiping Gan, Toshiro Hayashikawa, Takashi Matsumoto and Xingwen He: Seismic response analysis of base isolated bridge subjected to long duration earthquake in low temperature

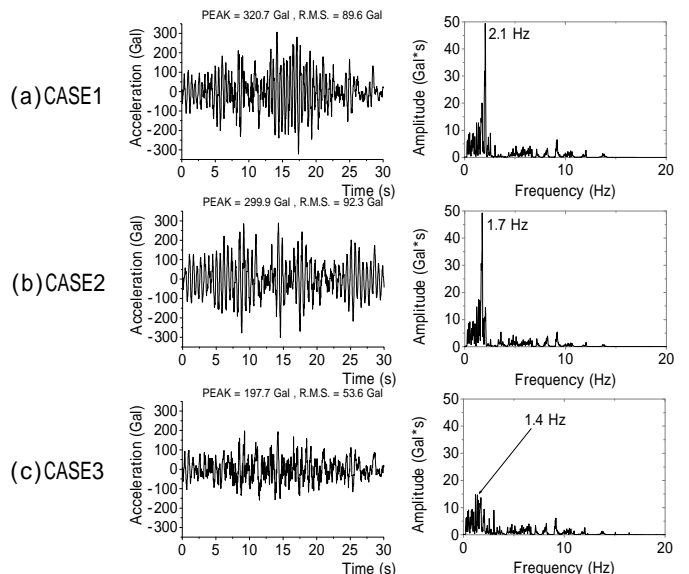


図7 橋脚天端加速度応答：杭基礎集約モデル

environment, Journal of Structural Engineering, JSCE, 査読有, Vol.61A, March 2015, pp. 335-343.

3) GimenezJavier Lopez Gimenez, Toshiro Hayashikawa, Takashi Matsumoto and Xingwen He: Seismic damage evaluation of highway viaducts equipped with FPS bearings subjected to level II earthquake ground motions, Journal of Structural Engineering, JSCE, 査読有, Vol.61A, March 2015, pp. 344-355.

4) 山口恭平, 早坂洋平, 曾田信雄, 大西弘志: FWDを用いた既設RC床版の健全度評価手法に関する一提案, 土木学会 構造工学論文集, 査読有, Vol. 61A, 2015.3, pp.1062-1072.

5) 石橋健, 古田均, 野村泰稔, 中津功一郎, 高橋亨輔: セルオートマトンPSOを用いた多重モード解析による構造物の信頼性評価, 材料, 査読有, Vol.64, No.3, 2015.3, pp.190-195.

6) Sudanna Borjigin, C.W. Kim, K.C. Chang and K. Sugiura: Nonlinear Seismic Response Analysis of Vehicle-bridge Interactive System, Steel Construction, 査読有, Vol.8, No.1, 2015, pp.2-8.

7) K.C. Chang, C.W. Kim and Sudanna Borjigin: Variability in Bridge Frequency Induced by a Parked Vehicle, Smart Structures and Systems, An Int J., 査読有, Vol. 13, No. 5, 2014, pp.755-773.

8) 田欽, 林川俊郎, 松本高志, 何興文: 異なる粘性ダンパーと鋼製支承を有する曲線高架橋の地震応答解析, 鋼構造年次論文報告集, 査読無, Vol.22, 2014.11, pp. 167-174.

9) 干 治平,林川俊郎,松本高志,何 興文:
低温環境下における免震支承を有する高架
橋の地震応答性状,鋼構造年次論文報告集,
査読無, Vol.22, 2014.11, pp. 258-264 .

10) Xingwen He, Mitsuo Kawatani, Yoshihumi
Hashimoto and Shuhei Matsumoto: Train
dynamic effect on nonlinear seismic response of
high-speed railway viaducts, The 2014
International Conference on Advances in
Coupled Systems Mechanics (ACSM14), 査読
有, August 24-28, 2014, Busan, Korea,
CD-ROM(10 pages).

11) Chul-Woo Kim, Kazuyuki Ono, Mitsuo
Kawatani, and Takuya Enmei: Seismic
performance of straddle-type monorail
pre-stressed concrete bridges considering
interaction with train under moderate earthquakes,
The 9th International Conference on Structural
Dynamics (EURODYN2014), 査読有, June 30
-July 2, 2014, Porto, Portugal, USB(8 pages).

12) T.KUSAKA, T.KONO, Y.NOMURA,
H.WAKABAYASHI: Dynamic Compression
Test of CFRP Laminates Using SHPB
Technique, Applied Mechanics and Materials,
査読有, Vol.566, 2014.6, pp.122-127.
DOI:10.4028/www.scientific.net/AMM.566.12
2

13) Chul-Woo Kim, Mitsuo Kawatani, Takeshi
Kanbara and Nobuo Nishimura: SEISMIC
BEHAVIOR OF STEEL MONORAIL BRIDGES
UNDER TRAIN LOAD DURING STRONG
EARTHQUAKES, Journal of Earthquake and
Tsunami, 査読有, Vol.7, No.2, 2013, (17 pages).
DOI: 10.1142/S1793431113500061

14) Mitsuo Kawatani, Chul-Woo Kim and Ayumi
Yamamoto: Oscillator Experiment of Simple
Girder Bridge coupled with Vehicle, Advances in
Coupled Systems Mechanics(ACSM12), 査読
有, 26-30 August, 2012, Seoul, Korea,
pp.2114-2120.

〔学会発表〕(計 22 件)

1) 片瀬 慶嗣,何 興文,林川 俊郎,松本高
志,川谷充郎:新幹線高架橋の地震応答軽減
対策検討および列車走行安全性評価,土木学
会北海道支部年次技術研究発表会論文報告
集,第 71 号, A-23, 2015.1.31-2.1, 室蘭工業
大学(北海道)。

2) C. Xu, K. Hashimoto, K. Sugiura, H. Kanaji:
Mechanical Investigation on Seismically
Designed Integrated Steel Pipes Bridge Pier
System, The 5th Asia Conference on Earthquake
Engineering, (8 pages, CD-ROM), 2014.10.16-18,
Taipei (Taiwan).

3) K. Hashimoto, K. Sugiura, M. Shinohara, H.
Kanaji: Real Scale Experimental Study on Shear
Panel Damper of Multi-pipe Integration Bridge
Pier, The 5th Asia Conference on Earthquake
Engineering, (8 pages, CD-ROM), 2014.10.16-18,
Taipei (Taiwan).

4) 川谷充郎, 金 哲佑, 横山晋矢: 曲線桁
高架道路橋-車両連成系の線形・非線形解析
による耐震性能評価, 第 69 回土木学会年次
学術講演会, 2014.9.10-12, 大阪大学(大阪
府)。

5) 川谷充郎, 何 興文, 橋本圭史, 松本修平:
車両考慮による高速鉄道高架橋の非線形地
震応答解析, 第 69 回土木学会年次学術講演
会, 2014.9.10-12, 大阪大学(大阪府)。

6) 川谷充郎, 金 哲佑, 小野和行, 延命卓哉:
地盤種別を考慮したモノレール PC 桁高架橋
の非線形地震応答解析, 第 69 回土木学会年
次学術講演会, 2014.9.10-12, 大阪大学(大阪
府)。

7) Mitsuo Kawatani, Chul-Woo Kim, Ayumi
Yamamoto, and Shinya Yokoyama: Seismic
Response Characteristics of Curved Girder
Viaducts Incorporating Bridge-Vehicle
Interaction, 7th International Symposium on Steel
Structures, (2 pages, CD-ROM), November 7-9,
2013, Jeju (Korea).

6 . 研究組織

(1)研究代表者

川谷 充郎 (KAWATANI, Mitsuo)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 00029357

(2)研究分担者

金 哲佑 (KIM, Chul-woo)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 80379487

野村 泰稔 (NOMURA, Yasutoshi)
立命館大学・理工学部・講師
研究者番号: 20372667

何 興文 (HE, Xingwen)
北海道大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号: 20454605

杉浦 邦征 (SUGIURA, Kunitomo)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 70216307

大西 弘志 (OONISHI, Hiroshi)

岩手大学・工学部・准教授
研究者番号： 70283728

橋本 国太郎 (HASHIMOTO, Kunitaro)
神戸大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号： 40467452
(H26 から研究分担者として参画)