

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360203

研究課題名(和文) 大規模地震時における高架橋と交通荷重連成系の耐震性能評価および安全対策

研究課題名(英文) Seismic performance evaluation of traffic load-viaduct interaction system and development of safety countermeasures

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

研究成果の概要(和文)：交通荷重の高架橋走行中に地震発生事態を想定し、立体三次元橋梁および車両モデルを構築し、橋梁-走行車両連成系の地震応答線形解析手法を確立した上で、非線形地震応答解析手法の開発にも取り組んだ。確立した手法を駆使し、道路橋・新幹線高架橋および跨座型モノレール高架橋を対象に耐震性能および車両走行安全性の評価を行い、交通荷重の動的効果や地盤種別さらに地震動特性などの各種要因が橋梁構造物と車両の地震応答に及ぼす影響を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：An analytical approach to evaluate the dynamic effect of traffic loads on seismic responses of roadway, railway and monorail viaducts is established and the running safety of vehicles and trains is investigated. Seismic responses of the bridge-train/vehicle interaction system are firstly simulated within linear structural behaviors, and the non-linear seismic analytical approach is also under development. Dynamic effects of traffic loads on bridge response are analytically examined. Influences of soil and ground motion characteristics on seismic responses of bridges are also investigated. The importance of considering properly the dynamic effect of traffic loads in the seismic design of bridges is indicated.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,000,000	2,100,000	9,100,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

研究分野：橋梁工学・構造力学

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：地震応答解析, 交通荷重, 非線形解析, 走行安全性, 耐震性能

1. 研究開始当初の背景

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。そこでは幸いに早朝で通行車両が極めて少ない状況であったが、頻りに車両が通行する状況、あるいは交通渋滞下で地震を受けると、高架橋および走行車両はどのような事態になるのか明らかにすべきと考えた。当時、道路橋を対象に三次元車両モデルによる交通振動解析の目的が立った頃であった。そして平成 16

年 10 月 23 日、新潟県中越地震が発生し、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り、地震時の列車走行安全性検討および有効な対策の策定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。平成 17 年 2 月、政府・中央防災会議の専門調査会が公表した首都直下地震の被害想定において、初めて新幹線の脱線を盛り込んだ。本研究はまさに高架橋を車両が走行中に地震を受けると、どのような挙動にな

るかを解析的に明らかにしようとするものである。

2. 研究の目的

現行の道路橋示方書では、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、都市域の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。鉄道高架橋では耐震設計において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。さらに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。

本研究では、上述諸課題を踏まえ、走行車両-橋梁連成系の地震応答をシミュレーションする解析手法を構築し、車両と橋梁との相互作用を高精度に表現できる連成モデルを確立することを目指す。さらに、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の開発を行う。確立される解析手法を駆使し、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い、より安全かつ合理的な橋梁耐震設計における交通荷重の重要性および然るべき扱い方を提言する。

3. 研究の方法

(1) 三次元橋梁-走行車両連成系線形地震応答解析手法の確立

これまでの研究において、新幹線鉄道車両、跨座型モノレール車両および大型ダンプトラックの水平方向振動まで考慮できる三次元車両モデルを構築し、高架橋梁システムについてはり部材から構成される三次元格子構造を用い、モード法により橋梁の振動方程式を定式化し、橋梁-走行車両-地震連成系の三次元解析プログラムを開発した。

以下の各項目は解析モデルを構築する際の具体的な内容を示す。

① 解析対象高架橋

- 都市高速道路に用いられるT型橋脚を有する高架橋および曲線桁橋
- 新幹線鉄筋コンクリートラーメン高架橋(軌道構造を考慮)
- 跨座型モノレール高架軌道桁橋

② 橋梁システムのモデル化

- 上部構造：三次元格子構造
- 下部構造：三次元はり-柱モデル

③ 走行車両の三次元モデル化

- 12自由度系自動車モデル

•15 自由度系新幹線列車モデル

•15 自由度系モノレール車両モデル

(2) 大規模地震時の橋梁-走行車両-地震連成非線形解析手法の開発

大規模地震による橋梁-走行車両連成系の応答は非線形である上に橋梁と車両との相互作用は非常に複雑な現象である。本研究では、申請者らがこれまで交通振動解析や線形地震応答解析から蓄積してきたノウハウやモノレール列車-高架橋連成系の非線形地震応答解析の経験を活かし、大規模地震動に対する橋梁-三次元走行車両-地震連成系の非線形振動解析手法を開発する。そのため、線形地震応答解析において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、直接積分法を用いて地震応答を求める。

ここで、構造物の大変形とくに降伏時の車両と橋梁との連成が非常に複雑になり、膨大な収束計算が必要になると予想され、場合によって収束不能に陥る可能性が考えられる。この場合、大規模構造非線形計算汎用ソフト等で用いられている最先端の収束計算理論の導入や、計算量が膨大になり過ぎないように収束困難な時間ステップだけを細分する技術の応用により、解決していく必要がある。

(3) 連成解析手法の妥当性検討

開発した走行車両と橋梁との相互作用モデルの妥当性と有効性を検証するために、線形範囲内での車両通行時高架橋動的応答の実測値と比較する。また、非線形構造地震応答解析プログラムの妥当性を車両無しでの汎用プログラムによる高架橋の地震応答解析値と比較する。

①これまで橋梁交通振動の実験的研究において蓄積した実測データ(鉛直方向の応答が主体)を活用するとともに、地震時に卓越する橋軸直角水平方向の応答値が必要なため、実際の高架橋における現地振動実験結果を用いる。

②非線形構造解析が可能な汎用動的解析プログラムを用い、振動系車両無しでの高架橋の地震応答解析結果との比較検討より、高架橋モデルによる応答解析の妥当性を検証する。

4. 研究成果

本研究では、立体三次元有限要素橋梁および質点-ばね振動系車両モデルを構築し、橋梁-走行車両連成系の地震応答をシミュレーションする線形動的解析手法を確立し、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い、交通荷重の動的効果や地盤および地震動特性など各種要因が橋梁構造物と車両の地震応答に及ぼす影響を明らかにした。以下道路橋、モノレール高架橋およ

び新幹線高架橋を例に、代表的な研究成果を紹介する。

(1) 橋梁上の車両を考慮する高架橋の地震応答と車両の走行安全性

近年の都市高架橋は、大型車両混入率の高まりとともに慢性的な交通渋滞状況である。このような現状を踏まえると、現行の設計方書では考慮していない耐震設計における自動車荷重（走行作用）の取り扱いについて検討の必要がある。本研究では、中小規模地震時において、橋梁の地震応答に与える車両の存在効果の検討や地震時における車両の滑り評価を行う。

まず、地震時の水平運動まで考慮する12自由度振動系車両モデルの定式化を行い、車両と高架橋の連成振動を考慮する三次元動的な地震応答解析手法を構築する。構築した解析手法を用い、車両載荷時の都市高架橋 (Fig.1) の地震応答解析を行う。解析結果の一例を Fig.2 および Fig.3 に示す。Fig.2 の地震波 GI および GII はそれぞれ固い地盤および普通地盤での地震波の入力により得られる高架橋地震応答加速度の実効値を表す。Fig.2 に示すように、橋梁の地震応答解析結果より、車両振動系が地震波の周波数特性によって橋梁応答を増幅あるいは低減させることが分かる。また、車両が高架橋および路盤上を走行する際の地震時滑り評価の結果、車両が橋梁上を走行する方 (Fig.3(a)) が路盤上 (Fig.3(b)) に比べて滑り易い状況にあることが明らかになった。また、停車時より走行時のほうが滑りやすくなることを確認している。

大型車両列の高架道路橋の地震応答に及ぼす影響についての検討も行い、橋梁応答の RMS 値に着目すると両地震波において車両無載荷時に比べて車両付加質量時が大きくなることを確認した。これは慣性力が増加すること、また、橋梁の固有振動数が変化することが考えられる。次に、車両付加質量時と車両振動系停車時の橋梁の応答を比較すると、車両振動系停車時のほうが低減しており、これは車両が振動系として橋梁に対してダンパーとして働いているためと考える。さらに、車両振動系走行時の応答は車両無載荷時と車両振動系停車時の中間的な挙動を示していることが分かった。

(2) モノレール車両載荷時における PC 高架橋の地震時動的応答特性

近年の橋梁設計には強度のみではなく経済性も必要とされており、合理化設計が求められている。モノレール高架橋においても、建設コストの削減を目指し、長スパン化が検討されている。現在、大阪モノレールの PC 標準桁長は 22m であり、これを 28m にすることで建設費を約 14% 削減できると推測されている。また、耐震性向上を目指してゴム支承の採用も検討されている。しかし、長ス

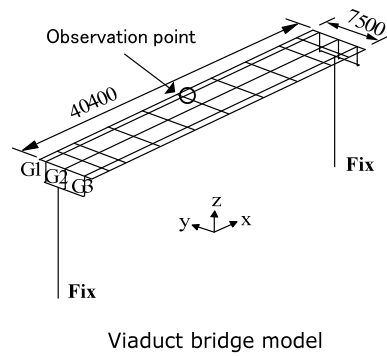


Fig.1 FE model for a viaduct.

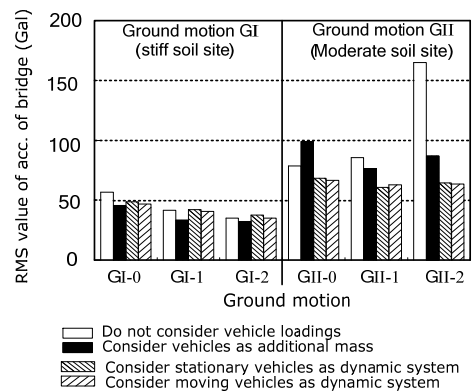
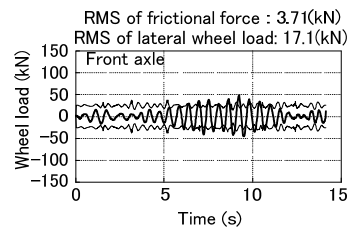
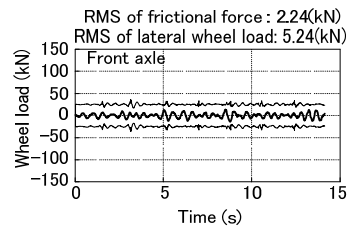


Fig.2 RMS value of seismic response of a viaduct.



(a) Vehicle moving on bridge (v=60km/h)



(b) Vehicle moving on road (v=60km/h)

Fig.3 Maximum frictional force and lateral wheel load of a vehicle.

パン化による橋梁のたわみ量の増大およびゴム支承の採用による振動特性の変化が懸念される。

モノレール高架橋の現行耐震設計においては、鉄道構造物設計標準を準用して車両質

量を上部構造質量に加算する簡易な取り扱いが採られている。しかし、モノレール構造の特徴として振動系である車両の案内輪・安定輪が軌道桁を挟み込んでおり一体となっていることから、付加質量としての取り扱いが妥当であるとは言い難く、モノレール車両を振動系として考慮し、地震時に橋梁と車両がどのような相互作用を示すかを検討する必要がある。

本研究では車両載荷時のモノレール PC 高架橋の地震時挙動を明らかにするため、モノレール PC 高架橋を 3 次元有限要素として、跨座型モノレール車両を実際の挙動を再現できるように 3 次元 15 自由度振動系としてモデル化し、中小規模地震時における橋梁—車両連成系の地震時応答解析を行う。また、耐震性能 1 の落橋に対する安全性の観点から支承部に着目した耐震性能評価を行う。

解析対象橋梁は桁長 22m の標準 PC 桁 (Conventional type bridge) および桁長 28m の合理化 PC 桁 (Advanced type bridge) であり、この二つの橋梁を 3 径間の 3 次元有限要素モデルとしてモデル化する (Figs.4 & 5 参照)。また、支承部に 2 重節点を考慮しており、鋼製支承およびゴム製支承の特性を表現する。橋脚高さは 10.6m であり、橋脚下端には地盤ばねを考慮している。

支承の耐震性能について、Fig.6 に示すように、22m 標準桁鋼支承の場合、最大せん断力は設計値を超える場合がある。しかし、設計値を超えるのは一時的なものであり、鋼支承の破壊形態や設計値の破壊に対する余裕度などを検討する必要がある。また、Fig.7 から分かるように、鋼支承の場合、モノレール PC 高架橋の地震時のせん断応答に対して、車両はダンパーとして働くことが確認できた。一方、ゴム支承を採用する場合、車両の影響により軌道桁の応答が大きくなるという逆の傾向が見られた。これにより、モノレール車両を付加質量として扱う現行耐震設計は、鋼支承の場合においては安全側評価であるが、ゴム支承の場合においては必ずしもそうではなく、今後さらに検討する必要があると言える。

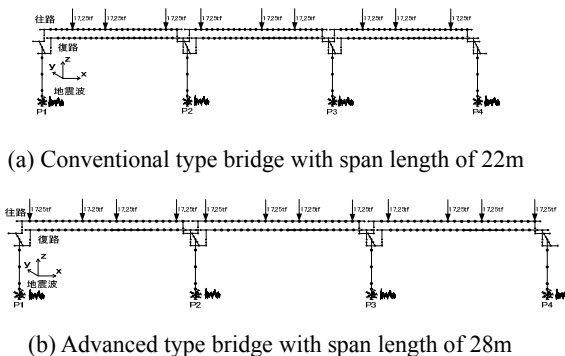


Fig.4 FE model considering train as additional mass: Case-2.

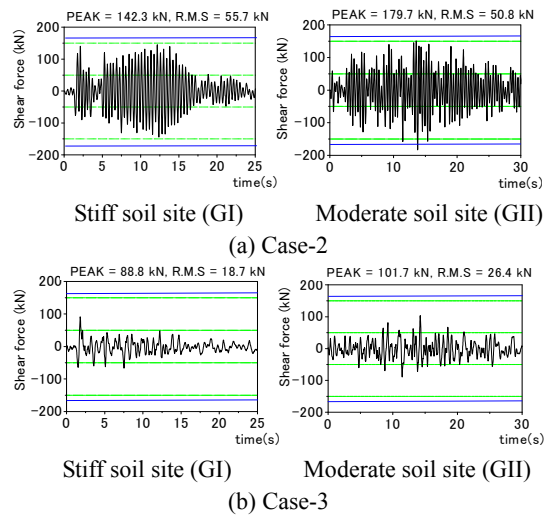
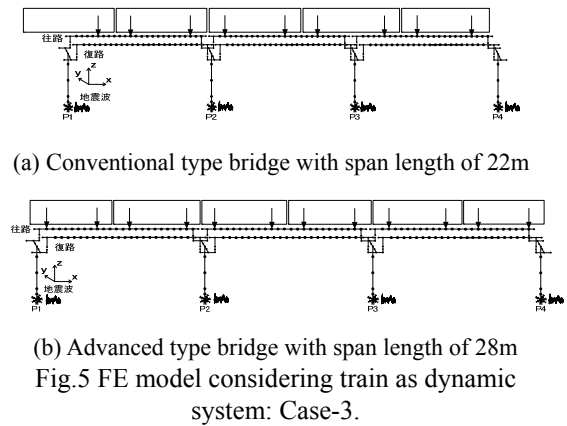


Fig.6 Shear force on steel bearing of conventional type bridge.

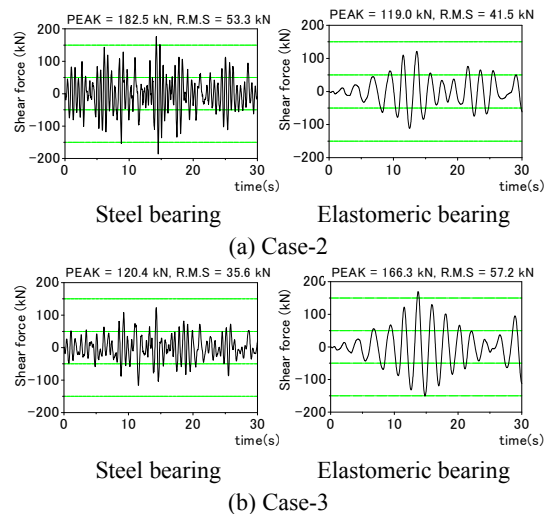


Fig.7 Shear force at support of advanced type bridge on moderate soil site (GII).

(3) 鉄道高架橋地震応答における列車荷重の動的影響評価

鉄道高架橋における現行耐震設計において、橋梁と列車との相互作用の複雑さから、列車荷重を従たる変動荷重として定義している。しかし、実際に列車は非常に複雑な振動系であり、さらに検討する必要がある。本研究では、構築した解析手法を駆使し、列車荷重の有無や車両を付加質量と振動系として扱う場合に対し、正弦波および設計・観測地震波を用い、列車荷重の動的効果や地震動の周波数特性が高架橋の地震応答に及ぼす影響等を確認する。

対象とする橋梁は、高速鉄道における一般的な形式である鉄筋コンクリートのラーメン高架橋で、3ブロック計72mの高架橋について Fig. 8 に示すような三次元はり要素でモデル化する。列車荷重について、新幹線 300 系車両一両に対し、15 自由度質点-ばね-ダンパー振動系に理想化する (Fig. 9)。本研究で用いる正弦波は、対象振動数を橋梁の水平一次固有振動数や車両の固有振動数周辺で変化させ、振幅 A を 100 Gal に設定する。解析の際に、正弦波を水平の橋軸直角方向のみに作用させる。また、本解析に用いる入力地震動は、耐震設計標準で定められた Level 1 地震動の中から橋梁の地盤種別に対応したものを一波 (Level 1 ground motion), K-net による観測地震波から振幅が Level 1 地震動に近い、加速度応答スペクトル特性が異なる三波 (Ground motion 1~3) を選ぶ。

解析において以下の 4 ケースを設定する。
Case-1: 列車荷重を考慮せず、橋梁のみでの地震応答解析を行う；
Case-2: 列車荷重を停止位置における橋梁の付加質量とする。
Case-3: 列車荷重を橋梁上に静止する振動系とする。
Case-4: 車両を振動系とし、橋梁上を営業速度 270km/h で走行する。

① 正弦波による解析結果

地震動周波数特性が橋梁と車両連成系の地震応答に与える影響を確認するため、上記 4 ケースについて正弦波による結果を Fig. 10 に示す。Fig. 10 は正弦波の振動数 (横軸) に対し、橋梁中央点における水平方向の最大加速度応答 (縦軸) を示したものである。対象振動数は橋梁の水平一次固有振動数である 2.22Hz を含む 1.9~2.4Hz 間で変化させる。全体的に車両を振動系とする場合では、橋梁のみの場合の地震応答より小さく、車両がダンパーとして働く現象を確認できる。Fig. 10 での応答値は、2.16Hz あたりで Case-1 と Case-2、2.18Hz あたりで Case-2 と Case-4、2.20Hz あたりで Case-2 と Case-3 との大小関係が入れ代わっている。この現象から、列車荷重を付加質量として考慮する場合、ある周波数以上の領域に対し、橋梁のみ及び車両を振動系とする場合と比べ、橋梁の地震応答を過小に

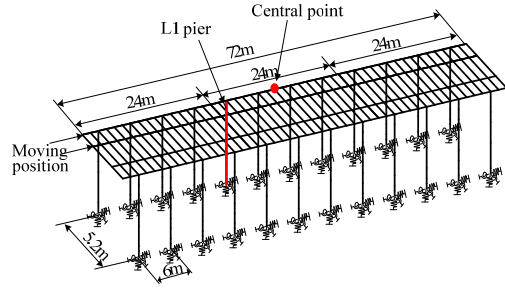


Fig. 8 Finite element model of the bridge

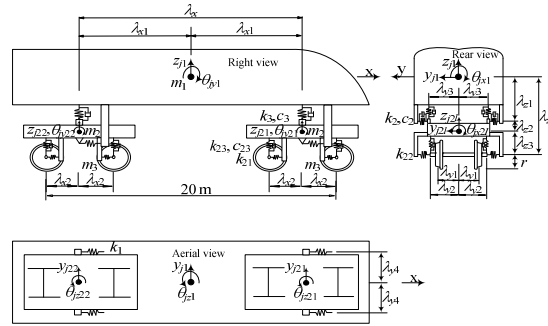


Fig. 9 15-DOF bullet train car model

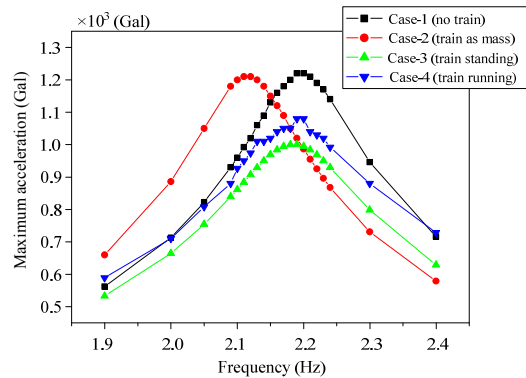


Fig. 10 Bridge responses under sine waves

評価する可能性が伺える。

② 地震波による地震加速度応答評価

設計および実測地震波による各解析ケースの橋梁水平加速度応答結果 (波形省略) を評価すると、地震波によって応答の大小が異なり、特に Ground motion 1 において比較的大きな値となっている。これは、Ground motion 1 の応答スペクトルが橋梁の水平一次固有周期である 0.455 秒付近で最も卓越している現象を反映している。そして正弦波の結果と同様に、全体的に車両が振動系とする場合の地震応答が、橋梁のみの場合より小さく、車両がダンパーとして働くことが分かる。

Case-2 と Case-3 と比較すると、MAX, RMS 値とも概ね付加質量の場合に大きいが、Ground motion 3 において、RMS 値が振動系とする場合に大きくなっているケースもある。また、Case-1 と Case-2 と比較すると、橋

梁のみの場合の応答が付加質量の場合より、大きくなっているケースがあり、列車荷重を付加質量と見なすことが必ずしも絶対に橋梁応答を安全側に評価する訳ではない。これは、正弦波解析による結果の傾向と一致する。一方、MAX値を見ると、Level 1 ground motion および Ground motion 1 において Case-4 で最も大きい値となっており、地震波の周波数特性のみならず、車両走行の影響も橋梁—車両連成系の地震応答に一定の影響を及ぼすことがわかる。

上記のように、解析による地震応答評価の結果、列車を単なる付加質量として考慮することは、地震動の特性によって橋梁地震応答を過大評価および過小評価の何れの可能性もあることがわかった。鉄道高架橋の耐震設計において列車荷重の動的影響が複雑であり、理論および解析手法の進歩によってさらに検討する必要性を示唆した。

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6件)

- ① 川谷充郎, 金哲佐 他2人, Seismic responses of a highway viaduct considering vehicles of design live load as dynamic system during moderate earthquakes, Structure and Infrastructure Engineering, 査読有, Vol.7, Nos.7-8, pp.523-534, 2011.
- ② 川谷充郎, 何興文 他2人, Numerical analysis on seismic response of Shinkansen bridge-train interaction system under moderate earthquakes, Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 査読有, Vol.10, pp.85-97, 2011.
- ③ 川谷充郎, 何興文 他1名, 鉄道高架橋地震応答における列車荷重の動的影響評価, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 17巻, pp.1-8, 2009.
- ④ 川谷充郎, 何興文 他2名, Dynamic response analysis of Shinkansen train-bridge interaction system under moderate earthquakes, Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems, 査読有, pp.3096-3103, 2009.
- ⑤ 川谷充郎, 金哲佐 他1名, Effect of traffic loads to seismic responses of highway viaducts under functional evaluation earthquakes, Safety, Reliability and Risk of Structures, Infrastructures and Engineering Systems, 査読有, pp.1191-1196, 2009.
- ⑥ 川谷充郎, 金哲佐 他2名, 橋梁—車両連成系を考慮した高架道路橋の地震応答解析, 土木学会論文集A, 査読有, Vol.64, No.4, pp.678-691, 2008.

[学会発表] (計8件)

- ① 川谷充郎, 何興文 他2名, 車両間連結の橋梁-列車連成系地震応答への影響, 第65回土木学会年次学術講演会, 2010年9月1-3日, 北海道大学
- ② 川谷充郎, 金哲佐 他2名, 支承挙動に着目した曲線桁橋の地震入力方向変化による動的応答特性, 第65回土木学会年次学術講演会, 2010年9月1-3日, 北海道大学
- ③ 川谷充郎, 何興文 他2名, Seismic response evaluation of Shinkansen Train-bridge interaction system under moderate earthquakes, The 4th International Symposium on Environmental Vibrations: Prediction, Monitoring, Mitigation and Evaluation (ISEV2009) 2009年10月28-30日, 北京交通大学(中国)
- ④ 川谷充郎, 何興文 他2名, 列車との相互作用を考慮した高架橋橋脚地震耐力評価, 第64回土木学会年次学術講演会, 2009年9月2-4日, 福岡大学
- ⑤ 川谷充郎, 何興文 他2名, 異種地盤における地震周波数特性の高架橋—列車連成系地震応答に対する影響, 平成21年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2009年5月23日, 神戸市立工業高等専門学校
- ⑥ 川谷充郎, 金哲佐 他2名, 地震波の周波数特性が大型車両載荷時の道路桁橋地震応答に及ぼす影響, 第63回土木学会年次学術講演会, 2008年9月10-12日, 東北大学
- ⑦ 川谷充郎, 何興文 他2名, 地震および地盤特性が高架橋—列車連成系の地震応答に及ぼす影響, 第63回土木学会年次学術講演会, 2008年9月10-12日, 東北大学
- ⑧ 川谷充郎, 何興文, 他2名, Influence of bullet train as dynamic system on seismic performance of Shinkansen viaducts, The Fourth International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 2008年7月13-17日, ソウル(韓国)

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 哲佐 (KIM CHUL-WOO)
京都大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：80379487

何 興文 (HE XINGWEN)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号：20454605
野村 泰稔 (NOMURA YASUTOSHI)
立命館大学・理工学部・助教
研究者番号：20372667