

平成 30 年 5 月 10 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289145

研究課題名(和文) 構造システムにおける不確定・不連続部に着目した高架橋の地震時応答とその改善策

研究課題名(英文) Improvement of seismic response of bridges focused on uncertainty / discontinuity in structural system

研究代表者

高橋 良和 (TAKAHASHI, Yoshikazu)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：10283623

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,200,000円

研究成果の概要(和文)：2011年東北地方太平洋沖地震・2016年3月に熊本地震により、多くの橋梁において構造境界・接続部における被害が発生、一部の橋梁が落橋するなどの甚大な被害が発生した。構造境界・接続部が構造物の地震応答に及ぼす影響の把握とその改善策を検討することを目的に、免震支承の2方向挙動の把握、落橋防止システムの設計法の改良を提案するとともに、不確定性が高い地震作用について、狭帯域入力卓越振動数成分を変化させることによる多自由度系の応答改善効果を不規則振動論による構造全体系応答の評価やポストピーク挙動を改善させるRC橋脚構造の開発に関する研究を実施した。

研究成果の概要(英文)：Due to 2011 Great East Japan Earthquake and 2016 Kumamoto Earthquake, many bridges suffered serious damages at structural boundaries and connections. In order to evaluate seismic response of bridges focused on discontinuity in structural system, shake table tests of seismic isolators in 2D were conducted to make rational numerical model, and improvement of design of collapse prevention device in bridge was proposed. And in order to evaluate seismic response of bridge focused on uncertainty, dynamic response of multi-degree-of-freedom systems was evaluated by changing the predominant frequency component of narrow band input for seismic action with high uncertainty by random vibration theory. Furthermore, new techniques were proposed to improve the post-peak behavior of reinforced concrete structure.

研究分野：耐震工学

キーワード：不連続境界 不確定 地震応答 耐震構造

1. 研究開始当初の背景

大地震後の供用も求められる社会基盤施設の安全性は、想定した設計作用により照査されるが、2011年東北地方太平洋沖地震では、地震作用の不確定性の大きさが改めて浮き彫りにされた。本地震では、道路高架橋におけるゴム支承や新幹線高架橋のRC柱などに大きな被害が発生したが、注目すべきことは、その被害は連続する構造の境界・接続部に集中していることであった。地震作用の不確定性、また構造境界・接続部が構造全体の地震応答に及ぼす影響、これらを踏まえた構造設計の改善策を検討することが求められていた。

2. 研究の目的

2011年東北地方太平洋沖地震における高架橋被害や地震動の特徴の整理、また構造境界・接続部に関する載荷実験を核に研究を進めることが当初の目的であったが、2016年3月に熊本地震が発生し、多くの橋梁において構造境界・接続部における被害が発生、一部の橋梁が落橋するなどの甚大な被害が発生したため、特に2016年熊本地震の被害メカニズムを分析し、構造境界・接続部が構造物の地震応答に及ぼす影響の把握とその改善策を検討することを目的とした。

また、不確定性が高い地震作用について、構造全体系の地震応答、また構造部材の改良について検討し、地震作用の不確定性を前提とした構造応答の改善策を提案することも目的としている。

3. 研究の方法

(1) 構造境界・接続部に関する検討

・支承について、免震支承の二方向挙動を検討するために振動台実験を実施するとともに、地震時に被害事例が多い金属支承について、約40年供用された支承の載荷実験による性能劣化状況を把握する。

・落橋防止システムについて、熊本地震による被害事例を分析することにより、横変位拘束構造との衝突が地震応答に及ぼす影響について検討するとともに、多くの落橋防止システムの損傷を低減するための設計改善策について検討する。

(2) 不確定性の高い地震作用に対する構造応答の改善策

・全体系応答を対象に、構造特性を敢えて不均質にすることによる応答改善効果について、理論解析および数値シミュレーションにより評価する。

・設計想定を上回る変形応答が発生したとしても、急激に性能が劣化しないRC橋脚の開発を行う。

4. 研究成果

(1) 構造境界・接続部に関する検討

・曲線橋の構造境界においては、桁が橋軸・橋軸直角方向の二次元的に応答するため、既

存の一次元解析モデルを二方向に設定することで適切に評価することができない。そこで、滑り型免震支承を対象に、設計自由度を高めるため複数の摩擦面を有する支承を開発するとともに、二方向復元力メカニズムについて、振動台実験による2方向加振実験を行い、支承全体、摩擦支承部、ゴムバッファそれぞれの復元力を計測、ベクトル化することでその特性を検討した。摩擦支承部は支承の変形方向と逆方向に摩擦力を発揮し、ゴムバッファは原点からの距離に応じた復元力を原点方向に発揮する。そして、そのベクトルの組み合わせとして、支承全体の復元力が表現できる。履歴を有する免震支承は、支承全体の復元力ベクトルが原点を向かない(線形ではない)が、滑り型免震支承はゴム系支承に比べて単純明快なメカニズムで説明でき、摩擦支承部を二次元拡張完全弾塑性バネ、ゴムバッファを線形バネとする並列バネモデルによって、その水平二方向変形挙動の特徴を再現できることを確認した。

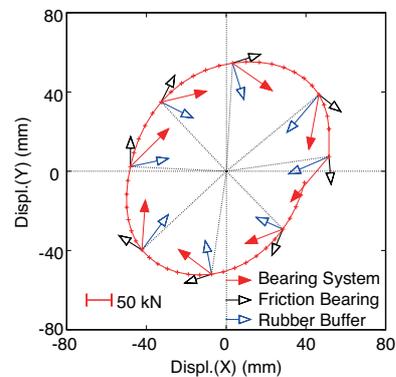
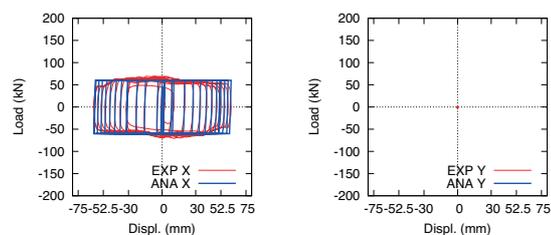
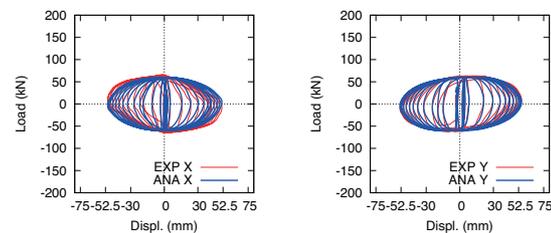


図1：滑り型免震支承の復元力ベクトル図



(a) 一方向載荷 (X軸)



(b) 円載荷

図2：振動台実験結果と開発したモデルによる再現解析との比較

・2016年熊本地震により落橋した高速道路跨道橋は、橋梁の不連続部である支承部が破壊し、さらに構造境界部である落橋防止システムも損傷、2度目の震度7の地震により落橋

した。この跨道橋を対象に、前震、本震観測地震動を用いた地震応答解析を行い、横変位拘束構造に作用する衝突力の概略評価を行った。その結果、前震では設計水平耐力に相当する大きな衝突力は発生せず、本震では設計水平耐力を大きく超え、実曲げ耐力相当の衝突力が発生する可能性があることを明らかにした。さらに被災状況を踏まえ、横変位拘束構造の設計に関する改善点・留意点を整理した。横変位拘束構造を最外縁支承部より外側に配置しなければならない場合、従来考慮されていなかった横変位拘束構造の縁端距離を設定・確保する提案を行った。

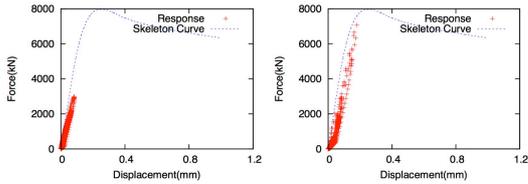


図3：熊本地震本震記録を入力した解析における横変位拘束構造の応答

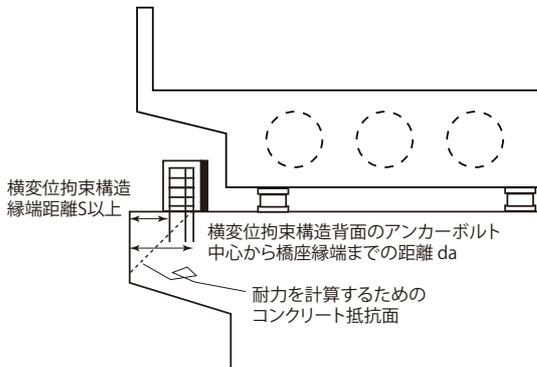


図4：横変位拘束構造に対する設計改善策

(2) 不確定性の高い地震作用に対する構造応答の改善策

・構造特性を敢えて不均質にすることによる応答改善効果を、不規則振動論に基づく理論解析および非線形数値シミュレーションにより評価した。単純桁が連続する桁橋を想定した等価一自由度系が等しい構造システムを設定し、構造特性が均質・不均質なモデルに対し、狭帯域入力卓越振動数成分を変化させることによる多自由度系の応答改善効果を不規則振動論により評価し、構造特性を不均質とすることで、均質モデルではみられない高次モードの卓越がみられ、各モードの寄与が分配されることにより、均質モデルに比べ平均応答レベルが小さくなる場合があることを示した。さらに動的信頼性解析に基づき、狭帯域スペクトル特性を有する定常入力の卓越振動数および地震動強度をパラメータとした破壊確率を求めた結果、不均質モデルにおいて、構造物の最大破壊確率の低下および、地震動の卓越振動数の変化に対して鈍感となること確認された。

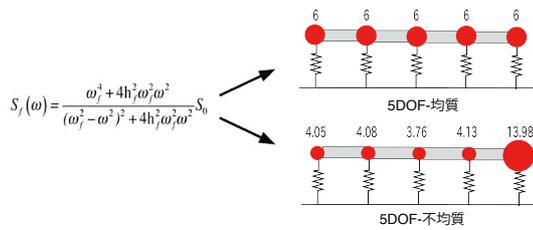


図5：不確定性を表すための入力均質・不均質振動モデル（5自由度）

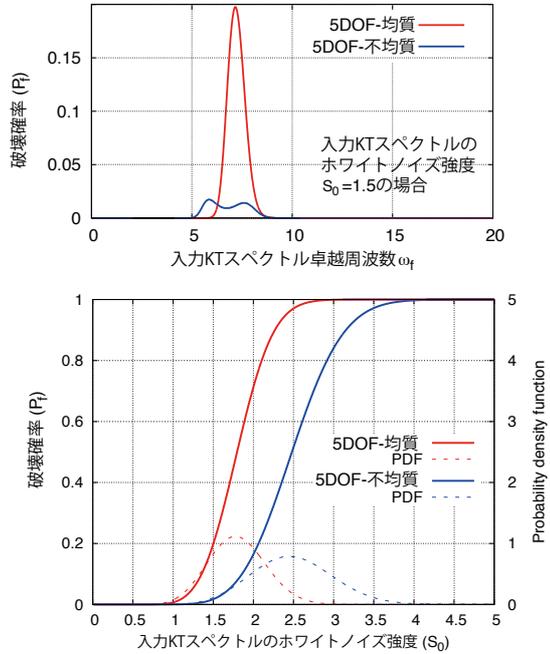


図6：均質モデルと不均質モデルに対する破壊確率解析

・RC橋脚のポストピーク挙動を改善することを目的に、主鉄筋の座屈抵抗特性に着目し、従来の座屈抵抗特性である帯鉄筋、かぶりコンクリートに加えて、新たにヘッド付きフックによる座屈抵抗特性をRC柱に導入し、積極的に座屈抵抗特性を高める効果を正負交番載荷実験により検討した。座屈抵抗特性を変化させることで、耐震設計上の性能は同一であるものの、設計上の想定を越える変形領域において、ゆるやかに荷重を低下させることができることを明らかとした。

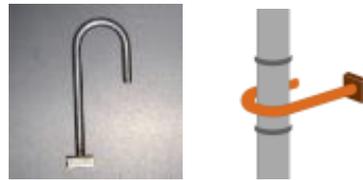


図7：ヘッド付きフックと配筋状態

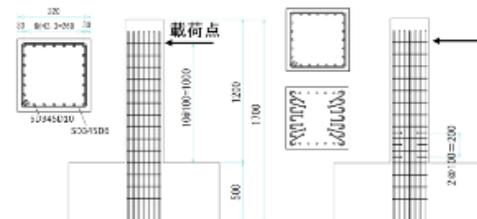


図8：試験体とフックの配筋

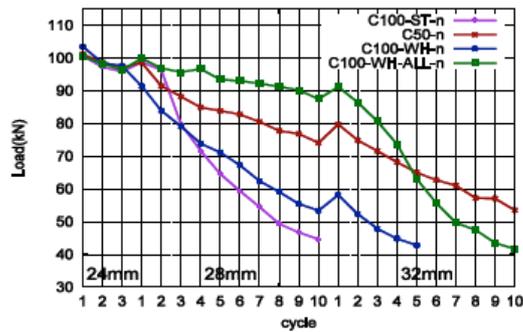


図 9 : 最大荷重の推移 (28mm 以上が設計想定以上の変位)



図 10 : 軸方向鉄筋はらみ出し形状の違い

・橋梁の落橋対策検討として、全体構造の改良による対策を検討された事例として、爆撃作用を踏まえた構造開発事例である耐弾橋梁について検討した。耐弾橋梁の開発においては、内的不静定・外的不静定・吊構造などの異なる対策を組み合わせしており、現在のロバスト性における多様性のある対策の組み合わせを重視していることを明らかにした。



Fig. 31

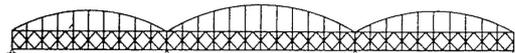


Fig. 32



Fig. 33

図 11 : 第三種耐弾構造の例



図 12 : 第三種耐弾構造である鴨緑江橋梁 (左が耐弾構造, 右は従来型単純トラス橋)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 13 件)

- ① 高橋良和・日高拳, 不確定性の高い地震作用に対する構造技術戦略としての鈍構造の提案とその適用事例に関する一考察, 土木学会論文集 A1, Vol. 70, No. 4, pp. I_535-I544, 2014.
- ② 佐々木義志, 高橋良和, 動的相互作用評価における遠心力載荷装置を用いたハイブリッド実験の適用性向上に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp. 163-173, 2015.
- ③ 狩野淳一, 秋山充良, 吉田郁政, 点検・検査情報を活用した既存 RC 構造物の耐久信頼性照査に用いる部分係数, 構造工学論文集, Vol. 61A, pp. 81-90, 2015.
- ④ 党紀, 東出知大, 五十嵐晃, 足立幸郎, 林訓裕, ゴム支承 (LRB) の経年劣化が橋梁構造の耐震性能に及ぼす影響に関する解析的研究, 土木学会論文集 A1, Vol. 71, No. 4, pp. I_713-I_724, 2015.
- ⑤ 高橋良和・小林望, 縮小 RC 橋脚模型 16 体の一斉震動実験に基づく地震応答特性の定量的評価, 土木学会論文集, Vol. 72, pp. 176-191, 2016.
- ⑥ 高橋良和, 小貫真広, 合田裕一・配野英朗・田中健司・小泉貴宏・杉山洋, 複数の摩擦面を有する滑り型免震支承の開発と水平二方向応答特性, 構造工学論文集, Vol. 62A, pp. 374-383, 2016.
- ⑦ 高橋良和・秋山充良・片岡正次郎・本田利器, 国内外の道路橋の設計指針にみられる「危機耐性」の分析, 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 4, pp. I_821-I_830, 2016.
- ⑧ 本田利器, 秋山充良, 片岡正次郎, 高橋良和, 野津厚, 室野剛隆, 「危機耐性」を考慮した耐震設計体系, 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 4, pp. I_459-I_472, 2016.
- ⑨ 井上和真, 渡辺和明, 五十嵐晃・畑明仁, 強震動の観測記録の水平 2 方向特性の分析と水平 2 方向応答スペクトルに適合する入力地震動の作成法の提案, 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 4, pp. I_555-I_568, 2016.
- ⑩ 党紀・蛭沢佑紀・五十嵐晃, 水平 2 方向地震動を受ける免震橋の応答特性に関する漸増動的解析 (IDA), 土木学会論文集 A1, Vol. 72, No. 4, pp. I_719-I_732, 2016.
- ⑪ Akiyama, M., Frangopol, D. M., Takenaka, K., Reliability-based durability design and service life assessment of reinforced concrete deck slab of jetty structures, Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 13,

pp. 468-477, 2017.

- ⑫ 植村佳大, 高橋良和, 軸方向鉄筋の節の一部を高くすることによる RC 柱の荷重低下改善効果の検討, 土木学会論文集 A1, Vol. 73, No. 4, pp. I_60-I_73, 2017.
- ⑬ 高橋良和, 2016 年熊本地震による橋梁被害と前震後の調査を踏まえた被害メカニズム推定, 土木学会論文集 A1, Vol. 73, No. 4, pp. I_225-I_235, 2017.

[学会発表] (計 4 件)

- ① 藤田亮一, 2016 年東北地方太平洋沖地震により被災した既設免震橋の損傷要因分析, 第 35 回地震工学研究発表会, 2015.
- ② Nozu, A, Seismic design method to consider “Anti-catastrophe” concept - A study for the draft of design code, 16th World Conference on Earthquake Engineering, 2017.
- ③ 高橋良和, 戦時下における橋梁研究文献調査から読み取る危機耐性, 第 20 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム, 2017.
- ④ 高橋良和, 2016 年熊本地震による横変位拘束構造の損傷メカニズムの推定, 第 20 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム, 2017.

[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

<http://yt.kuciv.kyoto-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 良和 (TAKAHASHI, Yoshikazu)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号: 10283623

(2) 研究分担者

秋山 充良 (AKIYAMA, Mitsuyoshi)

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号: 00302191

五十嵐 晃 (IGARASHI, Akira)

京都大学・防災研究所・教授

研究者番号: 80263101

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし