

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25249062

研究課題名(和文)地震のリスクマネジメントのための事前対応・事後対応に向けた構造モニタリングの展開

研究課題名(英文) Development of vibration monitoring of bridges for before- and after-earthquake disasters

研究代表者

藤野 陽三 (FUJINO, YOZO)

横浜国立大学・先端科学高等研究院・教授

研究者番号：20111560

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 30,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は地震などのモニタリングを活用して、われわれの設計のみならず地震後の災害対応等に役立てようとするものです。横浜ベイブリッジの2011年3月11日の大地震の記録の解析や高速鉄道の高架橋の振動測定などを行い、有用な結果を得ると共にモニタリングデータからの被害判定をリアルタイムに行う手法の研究も行いました。

研究成果の概要(英文)：Usefulness of monitoring of bridges is demonstrated through a few examples. The first one is a detailed response analysis of Yokohama Bay Bridge under 2011.3.11 main shock and aftershocks. It was found that the pounding took place between the wind shoe and the girder. An analytical model that explains the pounding quantitatively was constructed and using that model, the seismic response was simulated. The result indicated that the pounding may break the wind shoe if the seismic excitation is of L2 ground motion level. The second one is the detailed response analysis of dynamic response monitoring of PRC girders or even larger high-speed train viaducts of Hokuriku Line. The cause of large vibration under train passage was clarified and its remedies were suggested. Real-time identification techniques of earthquake-induced damage to RC bridge piers using dynamic responses was also investigated.

研究分野：構造工学

キーワード：モニタリング 構造同定 損傷同定 非線形応答解析 橋梁 高架橋

1. 研究開始当初の背景

この10年のモニタリングの技術の進展は目覚しく世界的にも構造ヘルスマニタリングが一分野として確立しつつある。その一方、モニタリングには初期投資費用がかかり、効果がすぐ見えないという問題があり、普及しない現状にあった。構造物の劣化を対象にすると、きわめてスローな局所的な現象であるのでなかなかモニタリングによって有用な情報が出てこない。一方、地震などの災害は突如襲ってくるのでモニタリングは欠かせない。本研究では、地震に対するモニタリングの有用性を示す目的で、モニタリングから得られたデータから耐震補強などの事前対応や地震後の事後対応に有用な結果を得られることを示し、モニタリングの価値を向上させるところにある。

2. 研究の目的

構造ヘルスマニタリングの分野の研究が世界的に非常に活発な状況にある。一方わが国ではなかなか実際モニタリングが普及しないという現状がある。このような中でモニタリングを発展させるためにはわが国のリスクの中で一番重要である地震を対象にし、地震に対する事前の準備、あるいは地震が起きた後の事後に対する迅速な対応に役立たせるモニタリング技術の展開を本研究では対象とする。具体的にモニタリングデータが様々な判断に極めて有用であることを示すことを研究の主軸とする。

3. 研究の方法

わが国では既に地震計が設置されている橋梁がある。そこでの地震モニタリングのデータを取得し、その分析からモニタリングの有用性、特に耐震補強などへの有用性を示す。モニタリングがついていない橋梁についてはテンポラリーなモニタリング装置を設置し、そこでは地震は滅多にこないのに、地震以外の荷重に対する応答データを取得し、モニタリングデータの有効性を示す。また実際にモニタリング応答データから損傷の有無をリアルタイムに判定するアルゴリズムを開発し、地震後のリスクマネジメントに生かす道を考える。

4. 研究成果

(1)2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の本震ならびに20を超える余震における横浜ベイブリッジの地震応答モニタリングシステムの応答記録を入手した。この記録を入手できたのは本研究グループのみである。地

震センサーの数はほぼ80方位である。本震ならびに最大余震の応答の一部の記録にはパルス状の応答があり、その記録を分析したところ、主塔のウィンドシューと主桁のストッパーとの間の衝突であることが判明した。この衝突により見かけ上の固有周期が短くなっている現象が認められた。横浜ベイブリッジの衝突が生じた場所を視察し、衝突痕跡があることを確認した。このような衝突が地震記録上観測されたのは初めてであり、大きな地震では衝突(pounding)が発生することが確認され、安全性の検討にあたっては、衝突を考慮することの必要性が明らかになった。

(2)この衝突現象を説明できる横浜ベイブリッジの立体骨組みモデルを構築し、衝突パラメータを調整することにより、衝突による固有周期の低下などを説明することができた。今回の311本震は道路橋支保書L1レベルの入力である。L2レベルの地振動でどのような応答を示すかを前述の衝突を考慮した非線形立体モデルによりシミュレーションした。その結果、L2レベルの地震ではウィンドシューの破損の可能性が無視できないことが示唆された。ウィンドシュー、もしくはストッパーの破損が生じると主桁が主塔に衝突することになり、橋全体の崩壊につながる。ここでの結果は更なる耐震補強の必要性を検討する資料として極めて有用となる。

(3)横浜ベイブリッジのエンドリンクの地震時挙動を応答データから解析した。小中の地震ではエンドリンクと桁が剛結状態で端橋脚に大きな曲げモーメントが作用することが懸念されそのためのフェールセーフ耐震補強を10年前に実施していた。今回の本震での応答データの分析から橋軸方向の応答ではエンドリンクがヒンジとして機能していることを明らかにすることができた。

(4)以上二つの分析は地震モニタリングの有効性を大いに示すものである。

(5)東北新幹線仙台付近の高架橋において応答モニタリングを実施し高架橋の構造特性を把握することができた。

(6)地震を対象としていないが北陸新幹線高架橋のPRC桁の列車走行による振動が問題となり、構造補強が必要とされている。モニタリングの有用性を示すには絶好の題材と判断し、10を超えるPRC桁の列車走行による動的モニタリングを実施した。その応答記録から固有振動数の振幅依存性、経年変化、気温との関係を明らかにし、大振幅が非線形的ではあるが共振に近い現象であることを明らかにした。またこの振動を抑えるための方策についても検討を行い、モニタリングから有用な情報が得られることを明らかにし

た。

(6)地震応答記録からリアルタイム的に損傷の有無を検知することは連続モニタリングの価値を非常に高めるものである。本研究では多数の橋脚柱の小型模型振動実験記録を用いて損傷の発生と地震応答記録との関連性について研究を行った。損傷が発生しその影響が表れていると予想される柱上部の加速度波形のウェーブレット変換から特異点を検出した。この特異点が発見された時刻について、主鉄筋ひずみ、柱上部の変位、ビデオによる映像を用いて検討を行った。その結果、特異点検出時刻の多くは鉄筋降伏やクラックが発生した時刻を捉えられたと考えられる。すべての特異点が損傷の影響であるとは言えないが、損傷が発生した加振ケースの加速度波形からはすべて特異点が発見され、損傷検知の可能性が示された。その後、Lipschitz-Holder 指数を用いて損傷判定をおこなった結果、応答波形からのリアルタイム損傷検知がより精度高く行えることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 16 件)

水谷 司, 飯島 怜, 武田 智信, 築嶋 大輔, 佐々木 崇人: 新幹線高架橋上の電車線柱の連成系地震応答解析および TMD による震動制御, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学) Vol. 72, No. 4 p. I_604-I_618 (2016) [査読有]

中須賀 淳貴, 水谷 司, 山本 悠人, 内田 雅人, 蘇 迪, 長山 智則, 藤野 陽三: 新幹線高架橋 PRC 桁の大振幅振動メカニズムの解明と構造特性の長期トレンドの分析, 構造工学論文集, A, A62, 42-49, 2016-03 [査読有]

水谷 司, 肥田 隆宏: 支配的 Lipschitz-Hölder 指数の推定による RC 橋脚の加速度応答波形からのリアルタイム損傷検知, 構造工学論文集 A, Vol. 61A (2015) [査読有]

肥田隆宏, 水谷司, 高橋良和, 藤野陽三: RC 柱の非線形地震応答波形からのウェーブレット変換を用いた簡易な損傷検知手法の検討, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol.70, No.2, pp.I_937-I_945, 2015 [査読有]

Yozo Fujino and Dionysius M. Siringoringo: A Conceptual Review of Pedestrian-Induced Lateral Vibration and Crowd Synchronization Problem

on Footbridges, Journal of Bridge Engineering ASCE, 2015, (in press), (DOI:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0000822.) [査読有]

Dionysius M. Siringoringo and Yozo Fujino: Long term seismic monitoring of base isolated building with emphasis on serviceability assessment, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2015,44(4), 637-655,(DOI: 10.1002/eqe.2538) [査読有]

Dionysius M. Siringoringo and Yozo Fujino: Seismic response analyses of an asymmetric base isolated building during the 2011 Great East Japan (Tohoku) Earthquake, Structural Control and Health Monitoring, 2015, 22(1), pp71-90, (DOI: 10.1002/stc.1661) [査読有]

武田智信, 長山智則, 水谷司, 藤野陽三: 三次元動的解析による曲線高架橋に特徴的な地震応答の分析, 鋼構造年次論文報告集 JSSC, Vol.22, pp.175-182, 2014.11 [査読有]

蘇迪, 嶋田優樹, 三輪陽彦, 藤野陽三, 長山智則, 水谷司: 交通荷重下の鋼桁橋の応答計測と局部応力の評価, 土木学会構造工学論文集, Vol.60A, pp.205-213, 2014. [査読有]

西川貴文, 紺野克昭, 藤野陽三, 中山雅哉: 高層免震建物における既設ネットワークを利用した高密度振動観測システムとデータの利活用, 日本地震工学会論文集, Vol.14, No.2, pp.1-15, 2014. (DOI: 10.5610/jaee.14.2_1) [査読有]

Brian M. Phillips, Shuta Takada, B.F.Spencer, Jr and Yozo Fujino: Feedforward actuator controller development using the backward-difference method for real-time hybrid simulation, Smart Structures and Systems, Vol.13, No.6, pp.1081-1103, 2014. (DOI:10.12989/sss.2014.14.6.1081) 国際共著 [査読有]

Dionysius M. Siringoringo, Yozo Fujino, Kenji Namikawa: Seismic Response Analyses of the Yokohama Bay Cable-Stayed Bridge in the 2011 Great East Japan Earthquake. Journal of Bridge Engineering ASCE, 19(8),

2014,8,A4014006-1-A4014006-17.
(DOI:10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.00
00508) [査読有]

高本剛太郎, 水谷司, 藤野陽三, シリン
ゴリンゴディオンシウス: 東北地方太平
洋沖地震においてみられた横浜ベイブリ
ッジの主塔主桁間の衝突とその再現によ
る動的特性の解明, 土木学会構造工学論
文集, Vol.60A, pp.242-248, 2014 .
[査読有]

Armen Derkevorkian, Sami F. Masri,
Yozo Fujino and Dionysius M.
Siringoringo: Development and
validation of nonlinear computational
models of dispersed structures under
strong earthquake excitation,
Earthquake Engineering & Structural
Dynamics, Vol.43, No.7, pp.1089-1105,
2014. (DOI: 10.1002/eqe.2389)国際共著
[査読有]

Yozo Fujino, Dionysius M. Siringoringo
Vibration Mechanisms and Controls of
Long-span Bridges: A Review
J. Structural Engineering
International, IABSE 2013, 23(3),
248-268 [査読有]

藤野陽三: 安全なインフラに向けての維
持管理と SIP での取り組み, 計測と制御
第 55 巻第 2 号 2016 年 2 月号 pp117-122
[査読有]

[学会発表] (計 14 件)

Yozo Fujino : Infrastructure in Japan
and a new R&D program
Infrastructure maintenance,
renovation and management, Wireless
Sensor Network for Civil
Infrastructure Monitoring, 29th & 30th
June, 2015, Cambridge University UK

Dionysius M Siringoringo, Yozo Fujino.
"Lessons Learned from Seismic
Monitoring of Yokohama-Bay
Cable-Stayed Bridge", In Proc.7th
Structural Health Monitoring and
Intelligent Infrastructure (SHMII)
Conference, Torino, Italy, 2015, CD
ROM.

Dionysius M Siringoringo, Gotaro
Takamoto, Yozo Fujino. Analysis of
Tower-Girder Transfer Pounding on

the Yokohama-Bay Cable-Stayed
Bridge during 2011 Great East Japan
Earthquake, IABSE Symposium
Report,104,2015,1-8
(DOI:10.2749/222137815815776078)

Dionysius M Siringoringo, Yozo Fujino.
Long-term seismic monitoring of an
instrumented base-isolated building:
Observation and structural analysis,
IABSE Symposium Report 2014,
IABSE Madrid Symposium:
Engineering for Progress, Nature and
People, pp. 2860-2867(8),

Yozo Fujino and Dionysius M
Siringoringo: REVISITING THE
PEDESTRIAN-INDUCED LATERAL
VIBRATION OF FOOTBRIDGES AND
CROWD SYNCHRONIZATION
PROBLEM, 第 5 回 Footbridge 世界会議
2014, 5th Int. Conf. on Footbridges,
CD-ROM, London, 2014 7 月,招待講演

Yozo Fujino : A national research
project " infrastructure maintenance,
renovation and management" in Japan,
第 10 回 ANCRiSST, Taipei 招待講演
2013 CD-ROM

Yozo Fujino : Reforming Civil
Engineering - my personal experience
and view - International Forum on
Civil Engineering Reform, October 11
and 12, 2014 ,at South East Univ. 東南
大学 招待講演,CD-ROM

Yozo Fujino : Roles of Civil Engineering
and Civil Engineers for the next
generation- preparing the unexpected
-10 lessons, Forum on Future of Civil
Engineering, 同济大学,上海,2014 年 11
月, 招待講演 CD-ROM

Dionysius M. Siringoringo, Yozo Fujino.
Long -term Seismic Monitoring of an
Instrumented Base-Isolated Building:
Observation and Structural Analysis. ,
Proceeding of IABSE Symposium (Vol.
102, No. 8, pp. 2860-2867), Madrid,
Spain, Sept 2014. CD-ROM 招待講演

藤野陽三: インフラセンシング/モニタリ
ングとそのマネジメントへの利用, 平成
26 年電気学会 センサ・マイクロマシン
部門総合研究会 2014 年 5 月, 招待講演
CD-ROM

藤野陽三: 社会インフラのマネジメントとセンサーへの期待, 自動制御計測学会 SICE 講演会, 2014 年 9 月, 招待講演 CD-ROM

Yozo Fujino and Dionysius M. Siringoringo: Lessons learned from structural monitoring of long-span bridges and a tall base-isolated building (Keynote lecture), 6th Structural Health Monitoring Intelligent Infrastructure Conference, Hong Kong, December 2013. CD-ROM

Yozo Fujino and Dionysius M. Siringoringo, Long-span Bridges Vibration, Control, Seismic Retrofit and Monitoring - Recent Studies and Lessons Learned, Proc. of 6th Civil Engineering Conference in Asia Region (CECAR), Jakarta, Indonesia, 2013. 招待講演, CD-ROM

Yozo Fujino and Dionysius M. Siringoringo, Seismic Performance of Asymmetric Base-Isolated Building, Proc. of Structural Engineering Mechanics Conference (SEMC-2013), Cape Town, South Africa. 招待講演 CD-ROM

〔図書〕(計 2 件)

藤野陽三, 曾我健一(編著) 地盤工学とリスク共生, 235 ページ, 鹿島出版会 2016 年 6 月刊

藤野陽三(編著, 編集代表) センシング情報社会基盤 土木学会構造工学シリーズ 24, 298 ページ, 2015 年 3 月刊, 土木学会

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤野 陽三 (FUJINO, Yozo)
横浜国立大学・先端科学高等研究院・教授
研究者番号: 20111560

(2) 研究分担者

水谷 司 (MIZUTANI, Tsukasa)
東京大学・工学系研究科・助教
研究者番号: 10636632