

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20360198

研究課題名(和文) 鋼トラス橋の冗長性・崩壊・振動解析と健全度モニタリング

研究課題名(英文) Structural redundancy/collapse analysis, dynamic analysis and structural health monitoring of steel truss bridges

研究代表者

山口 宏樹(YAMAGUCHI HIROKI)

埼玉大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：50134474

研究成果の概要(和文)：鋼トラス橋のリダンダンシー解析を行い、損傷すると崩壊の危険性の高い部材と、床版耐力や斜材結合条件が橋の安全性に与える影響を解明した。また、トラス橋の振動特性を全体・局所・連成の3モードに分類して解明するとともに、斜材の局所的損傷が連成モードの減衰や、局所モードの高次振動数群に顕著な変化をもたらすことを実橋レベルで検証して、鋼トラス橋の構造健全度評価における供用時振動計測や打撃試験の有用性を示した。

研究成果の概要(英文)：The fracture critical members were identified by conducting the structural redundancy analysis of steel truss bridges and the effects of load-carrying capacity of concrete deck as well as member joint were investigated. The dynamic characteristics of truss bridges, classified into the global, local and coupled modes, were also clarified in detail by the experimental/theoretical modal analyses. The feasibility of vibration-based health monitoring of steel truss bridges, based on the field measurement as well as the impulse hammer test, was finally discussed by showing the fact that the damping ratios of coupled modes and the group of higher natural frequencies in local modes can be changed in identifiable amount by having local damages in truss diagonal members.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	7,400,000	2,220,000	9,620,000
2009年度	3,900,000	1,170,000	5,070,000
2010年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

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：維持管理工学，鋼トラス橋，リダンダンシー，構造健全度，実験モード解析，理論モード解析，モード減衰，打撃試験

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 2007年8月1日に米国ミネアポリスで鋼トラス橋(ミシシッピ川橋)が崩壊、落橋した。時を同じくして6月から8月にかけて日本でも、木曾川橋、最上川橋、本荘大橋の3つの鋼トラス橋において、崩壊には至らなかったものの、斜材の破断や亀裂が発見された。

これらの事故で注目すべきは、(a) 同じ鋼トラス橋でありながら部材の破断により崩壊した場合とそうでない場合が併存すること、(b) 目視を主とした定期点検だけでは橋全体の崩壊の危険や部材の亀裂・破断を感知できなかったこと、である。したがって、構造的冗長性(リダンダンシー)が低い鋼トラス橋

の、崩壊過程も含めた力学挙動を精緻に知ること、ならびに信頼性が高く合理的な健全度モニタリング・評価手法を確立することが急務である。

(2) ミシシッピ川橋については老朽化に伴う疲労照査が橋の点検とともに行われ、前述の事故についても緊急調査が行われて、それぞれ技術報告としてまとめられている(引用文献1), 2)). また、特にトラス格点部における疲労挙動に関する研究は国内外を極めて多くの研究が行われてきた。しかし、事故原因に関する究明は十分ではなく、部材が破断した際の冗長性や崩壊過程も含めたトラス橋全体の力学挙動については、全くと言っていいほど研究が進んでいない。一方、供用時の振動計測を基にした健全度評価において必要不可欠な鋼トラス橋の振動特性についても、橋全体モードについては十分に理解されているものの、部材の局部振動モードや同一部材が周期的に配置されることの多いトラス橋での部材間内部共振など、詳細には解明されていない。トラス橋の振動特性や構造同定・評価に関する国内外の最新の研究(引用文献3-6))は大いに参照されるべきであるものの、部材レベルの損傷同定のための局部振動を扱ったものはほとんどない。

(3) 本研究グループは、橋梁を主たる対象として実験モード解析・理論モード解析・モード同定や力学的挙動解析・設計関連研究を進め、多くの研究実績を積み重ねてきた。特に最近では、構造健全度評価のための、常時微動計測に基づくモード同定の精緻化研究を精力的に進めている(引用文献7))。上述した鋼トラス橋の最近の事故以降、これらの研究成果を活用して、本研究の予備的検討も既に行っている。つまり、研究協力者の吉岡(社会人博士後期課程大学院生)の協力の下、研究代表者の山口は木曾川橋および最上川橋において、斜材補修前後の供用時微動計測・解析を行い、振動特性変化から構造健全度を評価することの可能性や問題点を明確にし、論文としてまとめる(引用文献8))とともに、2次元骨組モデルに対して弦材や斜材の破断を仮定したトラス橋の冗長性解析も実施して新たな知見を得ている。また、研究分担者の奥井は、鋼橋技術研究会に設置された鋼技研特別チームの主査として、木曾川橋のリダンダンシー解析・耐荷力解析から落橋に結び付く損傷部材評価を行いつつある。

#### 【引用文献】

1) Connell H.M. et al.: *Fatigue evaluation of the deck truss of Bridge 9340*, Technical Report MN/RC- 2001-10, Department of Civil Eng., Univ. of

Minnesota, 2001.

- 2) 国土交通省：米国ミネアポリス橋梁崩壊事故に関する技術調査報告，2007年10月。
- 3) Chiewanichakorn M. et al.: Dynamic and fatigue response of a truss bridge with fiber reinforced polymer deck, *Int. J. of Fatigue*, Vol.29, pp.1475-1489, 2007.
- 4) Bai Y. et al.: Modal parameter identification for a GFRP pedestrian bridge, *Composite Structures*, Vol.82, pp.90-100, 2008 (available online 2006).
- 5) 金治英貞，鈴木直人：長大カンチレバートラス橋の地震応答に関する観測結果と解析的検証，*構造工学論文集*，土木学会，Vol.53A, pp.277-286, 2007.
- 6) 古川愛子，大塚久哲，梅林福太郎：未知の加振力によるフーリエ振幅比を利用した損傷同定手法の実橋梁による検証，*構造工学論文集*，土木学会，Vol.53A, pp.258-267, 2007.
- 7) 伊藤信・山口宏樹：構造健全度評価のためのRD・ERA法による減衰同定の精緻化，*土木学会第62回年次学術講演会講演概要集*，I-601, pp.1197-1198, 2007.
- 8) 吉岡勉，原田政彦，山口宏樹，伊藤信：斜材の実損傷による鋼トラス橋の振動特性変化に関する一検討，*構造工学論文集*，土木学会，Vol.54A, pp.199-208, 2008.

## 2. 研究の目的

(1) 多様な形式の鋼トラス橋について、その構造冗長性や崩壊過程も含めた力学挙動、部材レベルの局所モードや部材間内部共振を含めた振動特性を解明すると同時に、鋼トラス橋の構造健全度を供用中の常時微動モニタリングによって評価する方法論を展開する。具体的な研究目的は以下の通りである。

① 健全度評価を目的として、鋼トラス橋の力学挙動・振動挙動を解明するための解析モデルを確立すること。

② 鋼トラス橋について、弦材や斜材などが破断(局所破壊)した際の橋全体の構造冗長性を解明するとともに、鋼トラス橋全体の崩壊過程を含めた力学挙動を解析によって解明すること。

③ 橋の全体振動モード、部材の局所モード、部材間の内部共振など、多様な形式の鋼トラス橋の振動特性を解析ならびに実橋試験によって解明するとともに、車両走行時の振動の現れ方を実橋供用時微動計測ならびに数値シミュレーションによって解明すること。

④ 振動センサーの最適配置やモード同定・損傷同定の精緻化について研究を進めた上で、鋼トラス橋の全体構造および部分構造の健全度評価を行うための、供用時微動計

測・振動解析併用ハイブリッド法に基づくモニタリング手法を提案すること。

(2) 2007年夏の国内外・鋼トラス橋の事故発生以降、多くの構造工学分野の研究者はその原因究明と今後の維持管理手法の確立のための研究に着手した。このような状況にあって本研究は、本研究グループが長年にわたって取り組んできた、橋梁を主たる対象とした実験・理論モード解析・同定や力学的挙動解析に関する研究の成果を活用し、静的・動的両局面からこの難題に取り組もうとする、極めてチャレンジングなものである。特に、鋼トラス橋の全体構造と部分構造の挙動を明確に区別し、構造冗長性や崩壊過程を含めた静的力学挙動や、全体・局所モードや内部共振を含めた動的力学挙動の解明結果を踏まえて、より信頼性の高い健全度モニタリング・評価システムを、供用時微動計測・振動解析併用ハイブリッド手法を基に提案しようとする試みは独創的である。なお、研究目的達成のために、多くの精度の良い供用時微動計測データの収集・整理を継続して行うことも本研究の特色の一つである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 鋼トラス橋の冗長性・崩壊挙動の解明

① 鋼トラス橋の静的力学挙動解明のための解析モデルの確立：木曾川橋等を対象として、2次元および3次元有限要素解析を行い、トラス橋の支持条件、格点部の接合条件、主構各部材のモデル化、床版のモデル化が線形静力学挙動にどのように影響するかを解明し、鋼トラス橋の解析モデルのあり方に関して結論を得る。

② 弦材や斜材などが破断した際の鋼トラス橋全体の冗長性解析：木曾川橋等を対象として、上弦材、下弦材、斜材の局部破壊を仮定し、死荷重+活荷重に対する線形解析を実施して、鋼トラス橋全体の構造冗長性を定量的に解明する。基本的には3次元解析を主とするものの、多様な形式の鋼トラス橋への適用も加味して、2次元モデルによる簡易解析の精度についても検討を行う。

③ 鋼トラス橋全体の崩壊過程を含めた耐荷力解析：部材の損傷進展、破断の連鎖などによる橋全体の崩壊挙動と耐荷力を把握するため、鋼トラス橋の3次元解析モデルに鋼部材およびRC床版の非線形性を加味した複合非線形性FEM解析を行う。

#### (2) 鋼トラス橋の全体・局部振動特性の解明

① 鋼トラス橋の振動特性解明のための解析モデルの確立：最上川橋等を対象として、2次元および3次元有限要素解析を行い、トラス橋の支持条件、格点部の接合条件、主構

各部材のモデル化、床版のモデル化が固有振動特性にどのように影響するかを解明し、鋼トラス橋の振動解析モデルのあり方に関して結論を得る。

② 鋼トラス橋の全体・局部振動を含めた固有振動解析：最上川橋を対象として、鋼トラス橋の3次元解析モデルについて固有振動解析を行い、全体モード、部材の局所モード、および部材間の内部共振連成など、鋼トラス橋の固有振動特性について詳細に解明する。また、斜材の損傷や補強をモデル化した固有振動解析も実施して、局部損傷がもたらす固有振動特性の変化についても定量的に解明する。

③ 鋼トラス橋の供用時微動計測とモード同定：最上川橋等において実測した供用時微動データに対してERA+RD法を適用し、その精度を確認しつつモード同定を行って、鋼トラス橋の振動特性を実験的に解明する。

④ 鋼トラス橋の供用時交通振動シミュレーション等の検討：最上川橋を対象として、車両走行を模擬したシミュレーション等の解析を行い、供用時交通振動としてトラス橋の全体振動および部材の局部振動がどのように発生するかを考察するとともに、解析法を確立する。

#### (3) 鋼トラス橋の健全度評価のためのモニタリング手法の提案

① 供用時微動計測のための最適センサー配置に関する検討：鋼トラス橋の振動特性研究の成果を勘案して、振動センサーの種類と数、および最適配置について検討を行う。

② 供用時微動計測データからのモード同定・損傷同定の精緻化検討：最上川橋等において実測した供用時微動データに対して、高精度モード同定法ERAを、相関関数法、RD法とともに適用し、時不変系として同定したモード減衰値の安定性について詳細に検討する。また、微動データの非定常性を考慮し、時間的に変動するモード同定をwavelet解析によって行い、同定値の安定性、統計的精度、および時間変動性につき検討して、モード同定の精緻化に向けた基礎データを得る。

③ 供用時微動計測・振動解析併用ハイブリッド法による健全度評価：供用時微動計測に基づく健全度モニタリング手法と振動解析手法を、モデルアップデーティングの概念を基に結合するハイブリッド法を検討する。また、研究成果を総合して、鋼トラス橋の、より信頼性の高い健全度モニタリング・評価システムを提案、開発する。

### 4. 研究成果

(1) 鋼トラス橋の有限要素解析を行い、支持条件、格点部の接合条件、主構各部材・床版

のモデル化が力学挙動や固有振動特性にどのように影響するかを解明した。

(2) 上弦材, 下弦材, 斜材の破断を仮定し, 死荷重+活荷重に対する線形解析を実施して, 鋼トラス橋全体のリダンダンシーを定量的に解明した。また, リダンダンシー評価の精度を高めるため, 線形有限要素解析および非線形有限要素解析を行って比較検討するとともに, トラス格点部でのガセットプレートの板厚照査法とその力学挙動のモデル化の検討, さらに床版損傷の影響を考慮したリダンダンシー評価法の検討を行って有用な知見を得た。

(3) 鋼トラス橋である最上川橋を対象として固有振動解析を行い, 全体モード, 部材の局所モード, および部材間の内部共振連成などを詳細に解明するとともに, 部材補強を仮定した固有振動解析も実施して, 局部剛性変化がもたらす固有振動特性の変化についても定量的に解明した。なお, これらの特性については, 実橋の振動計測に基づく実験モード解析によっても確認するとともに, 局所モード連成を伴う橋全体モードの振動特性変化から部材レベルの局所的損傷を捉えた。さらに, 車両走行を模擬したシミュレーションの代わりに車両走行に関する刺激係数解析を行い, 供用時の交通振動によって鋼トラス橋に生ずる振動モード特性を解明した。図1に最上川橋の3種の振動モードを, 図2に固有振動数分布と斜材補強が及ぼす影響を示す。

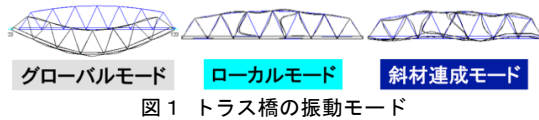


図1 トラス橋の振動モード

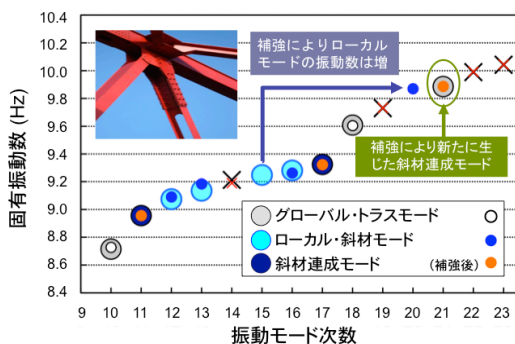


図2 トラス橋の振動数分布と局所的構造変化の影響

(4) 最上川橋において実測した供用時微動データに対して, 高精度モード同定法ERAを, 相関関数法, RD法とともに適用し, 時不変系として同定したモード減衰値の安定性について Stabilization Diagram を求めて詳細に検討した。その上で, 最上川橋を対象とした実験モード解析 (供用時微動計測からのモ

ード同定) および理論モード解析 (有限要素法による固有振動解析) のさらなる精緻化を試み, 特に斜材の内部共振連成の定量的評価と健全度評価への適用検討を行った。その結果, 局所的な疲労亀裂が連成モードの減衰に顕著な変化をもたらし得ることを実橋レベルで検証でき, 鋼トラス橋の構造健全度評価での有用性を示すことができた。理論モード解析と実験モード解析とを系統立てて併用する, モニタリングデータをいかに判断するかの方法論は, 多数の構造部材を有する橋梁の構造健全度評価法として有用であると言える。なお, 図3に最上川橋での斜材亀裂がもたらす斜材連成モードの変化と対応するモード減衰比の増大の状況を示す。

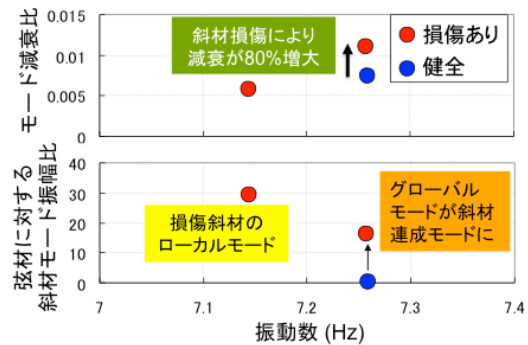


図3 斜材亀裂による振動数の変化と減衰比の増大

(5) 最上川橋の供用時微動計測, およびインパルスハンマーによる斜材打撃試験を行って, トラス橋の振動特性研究の成果を睨みつつ, 振動センサーの種類と数, 最適配置について検討した。インパルスハンマーによる斜材打撃試験では, その打撃試験データを詳細に分析した結果, 斜材の局所モードに対応する高次固有振動数を群として捉え, その振動数群の変化の平均値を指標として用いることによって斜材損傷が定量的に同定できることが明らかとなった。図4に, 一例として, 最上川橋での斜材腐食による高次振動数群の変化の状況をスペクトル図として示す。

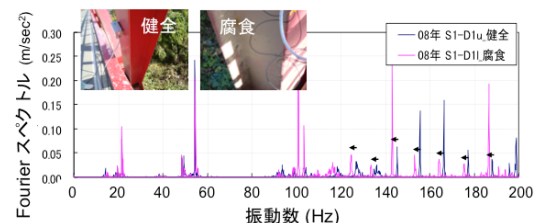


図4 斜材腐食による高次振動数群の変化

## 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4件)

- 1) 吉岡勉, 伊藤信, 山口宏樹, 松本泰尚: 鋼トラス橋の斜材振動連成とモード減衰変化を利用した構造健全度評価, 土木学会論文集 A, 査読有り, Vol.66, No.3, pp.516-534, 2010.
- 2) Yoshioka T., Yamaguchi H., Matsumoto Y.: Structural health monitoring of steel truss bridges based on modal damping changes in local and global modes, Proc. of 5th World Conf. on Structural Control and Monitoring, 査読有り, CD, No.167, 2010.
- 3) 吉岡勉, 山口宏樹, 伊藤信, 原田政彦: 鋼トラス橋の振動特性の同定と斜材損傷が及ぼす減衰性能への影響, 構造工学論文集, 査読有り, Vol.55A, 295-305, 2009.
- 4) 永谷秀樹, 明石直光, 松田岳憲, 安田昌宏, 石井博典, 宮森雅之, 小幡泰弘, 平山博, 奥井義昭: 我国の鋼トラス橋を対象としたリダンダンシー解析の検討, 土木学会論文集 A, 査読有り, Vol.65, No.2, pp.410-425, 2009.

[学会発表] (計 9 件)

- 1) Yoshioka T., Takahashi M., Yamaguchi H., Matsumoto Y.: Damage assessment of truss diagonal members based on frequency changes in local higher modes, The 12th EASEC, 2011 年 1 月 26~28 日, Hong Kong (China).
- 2) 吉岡勉, 山口宏樹, 高橋眞, 松本泰尚: 打撃試験によるトラス斜材の振動数変化の検出と FEM 解析による分析, 土木学会第 65 回年次学術講演会, 2010 年 9 月 1~3 日, 札幌 (北海道大学).
- 3) Matsumoto Y., Yamaguchi H., Yoshioka T.: A field investigation of vibration-based structural health monitoring in a steel truss bridge, IABSE-JSCE JC on Advances in Bridge Eng. II, 2010 年 8 月 8~10 日, Dhaka (Bangladesh).
- 4) Takahashi M., Yoshioka T., Yamaguchi H. and Prasanna D.A.: SHM of diagonal members in truss bridge by hammer tests, Int. Symposium on Engineering, Energy, & Environment 2009, 2009 年 11 月 26~27 日, Rayong, Thailand.
- 5) 伊藤信, 吉岡勉, 山口宏樹, 松本泰尚: 鋼トラス橋の斜材連成振動とモード減衰変化に基づく構造健全度評価, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 2009 年 9 月 2~4 日, 福岡 (福岡大学).
- 6) 高橋眞, 吉岡勉, 山口宏樹, 松本泰尚, 伊藤信: 局所モードを利用したトラス斜材の健全度評価に関する検討, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 2009 年 9 月 2~4 日, 福岡 (福岡大学).

- 7) 吉岡勉, 山口宏樹, 伊藤信, 新井伸博: 斜材の亀裂損傷と当て板補強が鋼トラス橋の振動特性に与える影響, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008 年 9 月 10~12 日, 仙台 (東北大学).
- 8) 伊藤信, 山口宏樹, 鈴木彬大, 吉岡勉: 合理的な維持管理を目的とした Model Updating 法の実橋梁への適用, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008 年 9 月 10~12 日, 仙台 (東北大学).
- 9) 和泉彰, 山口宏樹, 伊藤信, 吉岡勉, 松本泰尚: 橋梁の供用時振動計測に基づくモード同定と通過交通の振動特性値への影響, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 2008 年 9 月 10~12 日, 仙台 (東北大学).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

山口 宏樹 (YAMAGUCHI HIROKI)  
 埼玉大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号: 5 0 1 3 4 4 7 4

### (2) 研究分担者

奥井 義昭 (OKUI YOSHIKI)  
 埼玉大学・大学院理工学研究科・教授  
 研究者番号: 4 0 2 1 4 0 5 1  
 松本 泰尚 (MATSUMOTO YASUNAO)  
 埼玉大学・大学院理工学研究科・准教授  
 研究者番号: 9 0 3 2 2 0 2 3

### (3) 連携研究者

なし

### (4) 研究協力者

吉岡 勉 (YOSHIOKA TSUTOMU)  
 大日本コンサルタント株式会社・保全エンジニアリング研究所・係長  
 伊藤 信 (ITO SHIN)  
 埼玉大学・大学院理工学研究科・博士前期課程学生