

機関番号：12608

研究種目：基盤研究 (S)

研究期間：2006 ～ 2010

課題番号：18106010

研究課題名 (和文) 重度の疲労損傷を受けた鋼橋の機能回復・機能向上を目的とする橋梁再生工学の確立

研究課題名 (英文) Retrofit Engineering on Seriously Fatigue Damaged Steel Bridges

研究代表者 三木 千壽 (MIKI CHITOSHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：20016645

研究成果の概要 (和文)：

重度の疲労損傷を受けた鋼橋に対する、点検、診断、措置からなる一連のリハビリテーション技術の確立を目的とし、高精度で定量的な超音波探傷システムの開発、損傷原因の同定法、古い鋼材の性能を評価法、構造的な補修補強方法、疲労強度改善方法などの要素技術を明らかにするとともに、補修補強事例のデータベースおよびコンサルテーションシステムをウェブ上に構築した。

研究成果の概要 (英文)：

Aiming to establish retrofit engineering on seriously fatigue damaged steel bridges, quantitative and accurate ultrasonic inspection systems, cause identification methods for fatigue damage, evaluation methods for structural performance of old steels and welded joints, structural strengthening methods and fatigue improving of welded joints were studied. A database on repairing of steel structures and a consultation system for bridge rehabilitation were established on the web.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006 年度	20, 000, 000	6, 000, 000	26, 000, 000
2007 年度	13, 300, 000	3, 990, 000	17, 290, 000
2008 年度	13, 300, 000	3, 990, 000	17, 290, 000
2009 年度	13, 300, 000	3, 990, 000	17, 290, 000
2010 年度	13, 400, 000	4, 020, 000	17, 420, 000
総計	73, 300, 000	21, 990, 000	95, 290, 000

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工

キーワード：鋼橋, 疲労損傷, 非破壊検査, モニタリング, データベース

## 1. 研究開始当初の背景

近年、首都高速道路、東名高速道路、東海道新幹線などの苛酷な交通環境にさらされている多くの鋼橋あるいは鋼製橋脚に疲労亀裂が数多く検出されている。その中には疲労亀裂が板厚方向に貫通し、かなりの長さまで進展しているような重度の疲労損傷事例もかなりの数に達している。本研究はそのよ

うな放置すれば極めて早い時期に脆性破壊のような不安定破壊に移行し、構造物全体の崩壊や供用停止の事態に直面するような重度の疲労損傷を対象とし、機能回復、機能向上を実現するための技術の実現を目指すものである。

ここでは最先端の研究成果と最新の技術を集結統合して、重度の疲労損傷重度を受け

た鋼橋に対して実際の機能回復・機能向上対策を施すために必要な、検査、診断、補修補強設計、施工、モニタリングの統合的技術を確立する。

## 2. 研究の目的

本研究では、点検、診断、補修・補強設計、施工、モニタリングに分けて、それぞれにハード面、ソフト面での最先端技術を結集して統合した技術を確立する。

ハード面では超音波の利用、光ファイバー網、低温相変態材料などの先端的な技術を結集しての新しい道具づくりを中心にする。損傷度の定量的な評価に不可欠な非破壊検査技術についても超音波フェーズドアレイを適用し、その精度の向上を図る。

ソフト面では技術者に必要な情報を的確に提供できるデータベースの構築、診断に必要な多くの関連データを分りやすく示すコンサルテーションシステムとそれを支援する画像化技術などを研究する。

## 3. 研究の方法

以下、11項目を実施することにより、研究を完結する。

- (1) 鋼橋における疲労損傷と補修・補強方法の調査と整理およびそのデータベース化
- (2) 内在欠陥、内在亀裂の非破壊検査の精度向上
- (3) 微小なサンプルからの材料特性の試験方法の確立
- (4) 欠陥および亀裂除去を目的としたマイクロ加工技術の開発
- (5) 補修補強シミュレーションシステムの開発
- (6) 補修補強計画のための原因特定
- (7) 補修補強におけるモニタリング
- (8) 実物大構造モデルによる実証実験
- (9) 補修補強の実構造物への適用性の検討
- (10) 遠隔診断システム及び補修補強工事に対する遠隔アドバイシステム構築
- (11) ファイバーセンサーを組み込んだ自己診断システムの開発

## 4. 研究成果

[点検]

- (1) 疲労損傷と補修・補強事例データベース  
疲労問題に携わる研究者・技術者が自分自身に自由にデータベースへアクセスし、補修事例の追加および編集ができるように、PukiWiki をプラットフォームとして適用したデータベースを構築した。このデータベースには海外の事例を112例、国内の事例を20例が掲載されており、今後多くの利用と、さらなる内容の増加が期待される。

### (2) 非破壊検査

- 1) 超音波探傷のための波動解析手法の高度化

鋼材内のきずを探傷するための超音波探傷においては、FEMシミュレーションを実施して波動伝播の特性を把握することが重要である。このシミュレーションの高精度化を図るため、Orthogonal FEM (OFEM) を提案した。OFEMは従来のFEMと比較すると、波動伝播距離が長い場合に精度が高いことが示唆され、今後のFEMシミュレーションにはこの手法を適用することが解析の高精度化につながる事が明らかとなった。

### 2) 超音波探傷によるきずの画像化とその高精度化

複雑な形状を持つ鋼材内のきず、き裂、および欠陥は超音波探傷を用いる場合、フェーズドアレイに代表される多振動子による計測が有効である。多振動子による計測は画像化を経て、点検者の利用しやすいデータとなる。ここでは実体波とガイド波を用いた線形逆散乱解析法を提案した。実験および数値シミュレーションの結果、実体波を用いた手法では開口合成法よりも精度の良い画像化が可能となった。一方ガイド波を用いた手法では、2次元SH板波の反射係数を用いることによって板の減肉部の形状を再現することが出来た。

### 3) 隅角部未溶着部の非破壊検査

鋼製橋脚隅角部には板組の組成に起因する未溶着部が存在し、ここを基点とした疲労き裂が発生している。非破壊検査としては検出の難しい欠陥である。隅角部の板組にはWWタイプ、WFタイプ、FFタイプなどがある。各板組に適した探傷方法を提案した。

探傷のプロセスはまず、板組タイプの判別および板厚の把握を実施する。次に二次元未溶着部の探傷を行い、ビード幅の計測をしたうえで、三次元未溶着部に関する未溶着部側面形状の推定を行う。最後に板組タイプ毎に適する探傷を行う。WWタイプの場合は柱側未溶着部の探傷、WFタイプの場合は柱側未溶着部の探傷を行い、さらに梁側の未溶着部の探傷を行う。FFタイプでは梁側未溶着部の探傷を行った後に面状未溶着部の探傷を実施する。このプロセスを経て最終的な欠陥の画像化を完了する。

この手法を実際の隅角部の板組と同様の試験体に対して適用し、その妥当性を示した。  
[診断]

### (3) 自動車重量の自動測定

#### 1) Weigh-In-Motionの少数センサ化

影響線長の長い横リブフランジのひずみ波形をWavelet変換した波形から、車軸数、車軸間隔を取得することが可能となった。これによって車両速度、車軸位置を精度よく分析することが可能となり、さらに予め用意しておく車両辞書ファイルを用いれば、各車線最小1チャンネルで、高精度に、車両軸重、車両総重量を分析可能なシステムを開発し

た。車両辞書ファイルを用いない場合でも、縦リブにおけるひずみ波形をデータとして用いれば、各車線 2 チャンネルで Weigh-in-Motion を行うことが可能である。

2) 画像処理を適用した低速走行時の Weigh-In-Motion 手法の構築

従来の Weigh-In-Motion 手法は車両が 30km/h 以下で走行している場合に、車軸数、車軸間隔、走行位置の取得することが困難であった。本手法では、画像処理技術を応用して、低速走行時の車両判別と走行位置の同定を行い、車軸数、車軸間隔、走行位置の取得を可能にした。まず画像は道路全体を見渡せる位置に設置したビデオカメラから取得し、これを白黒の二値画像に変換する。次に予め用意した車両辞書ファイルと二値画像の類似性を内積の公式から判断する。最後に判別された車両の軸情報と、動画から得られる走行位置情報を用いて車両重量を算出した。

[診断]

(4) WSN を用いた変位誘起疲労の局部応力発生メカニズムの同定

変位誘起型疲労に対して、その原因となる挙動を特定することが重要である。これは補修や補強を検討するうえで、最も必要な情報となる。従来のひずみゲージや変位系を用いての測定と FEM 解析との組み合わせによる手法では、測定や解析に要するコストが大規模となる。

これを鑑みて、ワイヤレスセンサによる疲労の原因となる挙動把握を行った。測定周波数 100Hz に設定し、ベースステーションと各センサノードをスター型通信網で接続するネットワークを構築した。これにより、加速度ベクトルから橋梁の挙動の把握することが可能となった。また、加速度を変位に積分する手法を提案し、変位挙動を明らかにすることが出来た。変位挙動の妥当性は FEM シミュレーションにより確認された。

(5) 材料特性

1) 鋼小片による材料特性評価手法の構築

疲労損傷が生じた場合、その原因を把握し、余寿命評価などに基づいた補修・補強法の検討が重要である。その検討にあたり、機械的性質や化学成分といった鋼材の基本的情報が必要となる。そこで経年橋梁を対象にストップホールの鋼小片を用いて機械的性質を測定することを目的とした試験体製作手法の検討を実施した。

対象とした鋼材は昭和初期に日本の橋梁メーカーで製作されたプレートガーダー橋の横桁ウェブから切り出した古材 1 と、それと同時期にアメリカで製作された鋼トラス橋の現在から切り出した古材である。これらと現行の SM490 材を用いて、適切な評価をするための試験片を検討した。

電子ビーム溶接 (EBW) を適用したシャルピー

一衝撃試験片の製作案のうち、EBW の中心間隔を 13mm とした場合に通常のシャルピー衝撃試験片と同等の吸収エネルギー値を得ることが確認された。すなわち  $\phi 24.5\text{mm}$  以上のストップホールから製作した試験片の場合 EBW の中心間隔を 13mm とすれば、その評価が可能であることが示された。

2) 板厚方向特性の低い鋼材の溶接部の強度特性

1960 年代～70 年代の鋼橋から多くの疲労損傷が発見されており、そこで使われている鋼材は、今の鋼材からは想像もできないほどに硫黄量などの非金属介在物量が多く含有している。この鋼材の基本的性質を把握することは重要である。ここではこのような鋼橋から低い  $\phi z$  の鋼材を採取し、製作した荷重伝達型十字溶接継手試験体を用いて、引張試験及び疲労試験を行い、低い板厚方向絞り値を有する十字溶接継手部の強度特性及び破壊特性を明らかにした。

静的引張強度特性では  $\phi z$  ランクにかかわらず降伏強度を満足するが、 $\phi z$  低ランクの場合、降伏後に急激に破断することが判明した。静的破壊特性では  $\phi z$  ランクにかかわらず絞り及び伸びはみられず、一般的な延性破面形態がみられないことが判明した。疲労強度特性は  $\phi z$  が低いほど疲労強度が低く、特に  $\phi z$  低ランクの疲労強度は著しく低いことが明らかとなった。また、溶接熱影響による疲労強度の差はみられなかった。疲労破壊特性に関しては、円孔を材料中央に設けた場合、 $\phi z$  のランクにかかわらず凹凸の大きい破面が確認された。一方円孔を HAZ に設けた場合、 $\phi z$  のランクにかかわらず凹凸が小さい破面が見られた。十字溶接継手では全て溶接止端での破壊を示した。また、荷重偏心載荷の場合、 $\phi z$  で亀裂進展形状に違いが確認された。

【補修・補強】

(6) 疲労亀裂のストップホールおよびボルト添接による補修・補強

ストップホールを明ける、ストップホールに高力ボルトを締めつける、高力ボルトにより損傷部を添接するなどは、橋梁の補修・補強工事において一般的に適用されている。しかし、その効果については用いた試験体の寸法に強く依存することが、研究代表者らの過去の研究で明らかにされている。ここでは実大の桁モデルを用いて、疲労亀裂を発生させ、そこに上記のような補修・補強対策を実施し、その効果を検証している。ストップホールによる補修は小型の試験片の結果として示されているよりもかなり落ちること、そこに締め付けた高力ボルトが疲労破壊すること、添接補強を行う場合の効率の良いボルトの配置などが明らかにされた。

(7) 低温相変態溶接材料による補修・補強

疲労損傷の箇所によってはストップホールやボルト添接のような補修・補強が困難になることがある。そのような場合は、例えば指針類では補修・補強への適用は好ましくないとされている溶接を用いざるを得ないこともある。低温相変態溶接材料は溶接金属の冷却過程において、低い温度で変態し、室温の近傍まで膨張する性質を有する新材料である。この溶接材料を用いることにより溶接部に圧縮残留応力を導入することが可能であり、疲労強度の改善につながる。この溶接材料を疲労損傷部の補修に適用した場合の効果について、実大の桁試験体により確認した。補修溶接部の疲労強度はその溶接継手のディテールに依存すること、多層溶接となる場合には再熱の効果に注意が必要なことなどが明らかにされた。

#### (8) ピーニング処理による疲労強度改善

現場の適用性を考えて、簡便なピーニングにより溶接継手部の疲労強度を改善する方法を提案する。ここで用いるピーニング処理は100Vの電源で駆動する装置および携帯用の小型コンプレッサーで施工可能である。前処理として小型のバグラインダーによる溶接止端部のクリーニング処理を行い、その後ピーニング処理を行う。ピーニング処理の条件と圧縮残留応力の導入される深さとの関係、疲労強度の改善効果などが明らかにされた。このような簡便な処理により、鋼道路橋疲労設計指針におけるD等級の設計曲線を満たすような疲労性能を発揮することが明らかになり、溶接による補修や補強に対する後処理として優れていることを明らかにした。

#### (9) 応力改善を目的とした補強部材の取り付け対策

垂直補剛材上端部近傍の疲労損傷は、最も発生数の多いモードである。これに対して、上端部を切り欠いてギャップを設けるといった提案がなされ、一部適用されている。この構造変更は桁の耐荷力を大幅に落とすとともに、疲労的にも新たな弱点を作ることになる。ここではU断面の小型部材を垂直補剛材上端部に取り付けすることを提案している。

FEM解析により、7パターン載荷位置を想定し、ダブルタイヤを垂直補剛材直上周囲に載荷した。対象箇所に生じる最大主応力から最小主応力を差し引いた応力レンジで評価し、U字断面取付部材の有効性を示した。

[コンサルテーションシステム]

#### (10) 道路構造物の健全度管理システムの構築

本研究の研究成果を集大成した道路構造物の健全度管理システムを構築した。このシステムは、急速に整備の進んでいるリダンダンシーに富んだ大容量光ファイバ通信網などのネットワーク環境を活用しての、各種セ

ンサを用いたリアルタイムモニタリング技術、リアルタイム画像処理等、を含むものである。そこには、ここで開発した新規個別要素技術として、Weigh-In-Motionの小数センサ化、画像処理を適用した低速走行時のWeigh-In-Motion手法を含んでおり、点検情報をデータベース化したうえでコンサルテーションシステムと称するウェブアクセス可能な情報管理システムを構築している。

#### (11) ウェブアクセス可能なコンサルテーションシステムの構築

橋梁の点検履歴などの情報を一括管理し、現場や管理者所在地などから容易にインターネット経由で点検結果を参照するほか、適切な補修補強対策を検索し、モニタリングシステムからの分析データと連動し原因究明を図ることができるシステムを構築した。このシステムは点検者と道路管理者と研究者のそれぞれが有する情報を共有し、一元化を図るものである。

システムのソースはNational InstrumentsのLabVIEWを用いた。LabVIEWはインターフェースの構築がしやすいこと、また、プログラムソースを引き継ぎも他プログラム言語と比較して、実施しやすいことから適用した。構築したプログラムはデータベース化されている損傷分類や件数との比較、Weigh-In-Motionシステムとの連動が可能となった。今後の橋梁ネットワークの維持管理の効率化が期待できる。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計14件)

- ① 三木千壽、町田文孝、伊藤博章、ガセツト継手部の疲労き裂のストップホールによる補修および応力改善対策、土木学会論文集A1、Vol.67、No.2、2011、査読有
- ② 佐々木修平、市村強、堀宗朗、Lalith Maddegadara、不連続直交基底を用いた陽的有限要素波動場解析による超音波探傷に関する研究、第60回理論応用力講演会、Vol.60、OS05-05、2011、査読無
- ③ 下里哲弘、三木千壽、時田英夫、町田文孝、柳沼安俊、小野秀一、大型疲労試験体を用いた既設鋼製橋脚隅角部の疲労強度評価と疲労強度向上法の提案、土木学会論文集A、Vol.66、No.3、pp.406-419、

- 2010、査読有
- ④ 白旗弘実、三木千壽、複雑な板組内部の三次元溶接欠陥の超音波探傷試験、土木学会論文集 A、Vol.66、pp.286-296、2010、査読有
- ⑤ 中畑和之、上甲智史、廣瀬壮一、全波形サンプリング処理 (FSAP) 方式を用いた逆散乱イメージング法による欠陥の超音波画像化、応用力学論文集、Vol.13、pp.89-97、2010、査読有
- ⑥ 三木千壽、山口浩、判治剛、田辺篤史、無線センサネットワークによる鋼橋部材の疲労損傷原因の特定の試み、構造工学論文集、Vol.56A、pp.671-679、2010、査読有
- ⑦ 三木千壽、大西良平、窪田拓実、判治剛、超音波端部エコー放射特性の検討および端部エコー法による溶接残留応力場におけるき裂開閉口の特定、土木学会論文集 A、Vol.66、No.2、pp.219-228、2010、査読有
- ⑧ 三木千壽、徳永皓平、判治剛、鋼橋に生じた疲労損傷に対する低変態温度溶接材料による溶接補修の試み、土木学会論文集 A、Vol.66、No.4、pp.836-849、2010、査読有
- ⑨ Chitoshi Miki、Keigo Suzuki、Kiyoshi Ono、Takeshi HANJI、Development of New Database of Fatigue Damage and Repairing Cases by Using Editor-Friendly Platform、International Institute of Welding、XIII-2332-10、2010、査読なし
- ⑩ 平林雅也、三木千壽、田辺篤史、白旗弘実、マルチフェイズドアレイ探触子を用いた高精度超音波探傷試験、土木学会論文集 A、Vol.64 No.1、pp.71-81、2008、査読有
- ⑪ 坂柳皓文、佐々木栄一、チャンペン・テイーラポン、鈴木啓悟、石川裕治、山田均、勝地弘、影響線長の長いひずみ波形からの車軸位置情報の抽出と応用、構造工学論文集、Vol.54A pp.582-589、2008、査読有
- ⑫ 鈴木啓悟、佐々木栄一、三木千壽、山田均、高岡愛、宮崎早苗、交通状況の自動判別機能を組み込んだ低速車自動車両重量分析システム、応用力学論文集、Vol.11、pp.997-1004、2008、査読有
- ⑬ Chitoshi Miki、Kiyoshi Ono、Reform of “Database of Repair Cases for Fatigue Failure” on Web Site、XIII-2230-08、2008、査読なし
- ⑭ 三木千壽、白旗弘実、山口亮太、木下幸治、柳沼安俊、タンデム超音波探傷による K 開先溶接部の品質管理と疲労き裂検出、土木学会論文集 A、Vol. 63、No.4、pp.628-638、2007、査読有
- [学会発表] (計 7 件)
- ① Masayuki Tai、Chitoshi Miki、Keigo Suzuki、Mechanism of Fatigue Strength Improvement by Applying Peening Treatment、EASEC、2011.1.25、Hong Kong
- ② 鈴木啓悟、三木千壽、小野潔、船戸啓二、垂直補剛材上端部にウェブギャップを有する鋼箱桁橋の疲労強度と耐荷力の検討、第 65 回土木学会年次学術講演会、2010.9.2、北海道大学
- ③ Masayuki Tai、Chitoshi Miki、Fatigue Strength Evaluation of Improved Out-of-Plane Gusset Details under Constant and Variable Amplitude Loading、The 10th Japan-Korea Joint Symposium on Steel Bridges、2009.8.19、Nagasaki University

- ④ Hiroshi Yamaguchi、Chitoshi Miki、Atsushi Tanabe、Takeshi Hanji、Structural Behavior Causing Fatigue Damage by Applying Wireless Sensor Network、The 10th Japan-Korea Joint Symposium on Steel Bridges、2009.8.19、Nagasaki University
- ⑤ 許田千晶、下里哲弘、有住康則、三木千壽、1960~1970 年代の鋼材で構成された十字溶接継手の板厚方向強度特性、第 64 回土木学会年次学術講演会、2009.9.4、福岡大学
- ⑥ 白旗弘実、三木千壽：複雑な板組を有する三溶接線交差部の超音波非破壊検査、第 64 回土木学会年次学術講演会、2009.9.4、福岡大学
- ⑦ 廣瀬壯一、酒井綾子、小倉幸夫、高橋雅和、疲労き裂を透過した非線形超音波の挙動について、土木学会第 64 回年次学術講演会、2009.9.2、福岡大学

〔図書〕（計 2 件）

- ① 三木千壽、朝倉書店、鋼橋の疲労と破壊の制御、2011 年近刊、ページ数未定
- ② 三木千壽、NHK 出版、文明の礎を壊さないために、2011 年近刊、ページ数未定

〔産業財産権〕

○出願状況（計 2 件）  
現在出願中の事項はなし。

○取得状況（計 2 件）  
名称：橋梁通過車両の車重計測システム、橋梁通過車両の計測方法、およびコンピュータプログラム  
発明者：三木千壽、鈴木啓悟、佐々木栄一、若松早苗、石川裕治、和泉公比呂、伊東昇、  
権利者：東京工業大学、横浜国立大学、(株) エヌ・ティ・ティ・データ、首都高速道路(株)  
種類：特許  
番号：特開 2010-197249  
取得年月日：2004 年 9 月 17 日  
国内外の別：国内

名称：橋梁監視装置および橋梁監視方法ならびにプログラム  
発明者：石川裕治、若松早苗、三木千壽、佐々

木栄一

権利者：東京工業大学、(株) エヌ・ティ・ティ・データ  
種類：特許  
番号：4609892  
出願年月日：2005 年 10 月 28 日  
国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等  
・データベースのサイト  
<http://www.ttes.co.jp/wiki>  
ユーザ名：editor  
パスワード：editorpass

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三木 千壽 (MIKI CHITOSHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：20016645

(2) 研究分担者

廣瀬 壯一 (HIROSE SOICHI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授  
研究者番号：00156712

小野 潔 (ONO KIYOSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号：60324802

白旗 弘実 (SHIRAHATA HIROMI)

東京都市大学・工学部・准教授  
研究者番号：40298013

穴見 健吾 (ANAMI KENGO)

芝浦工業大学・工学部・准教授  
研究者番号：30272678

佐々木 栄一 (SASAKI EIICHI)

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授  
研究者番号：40311659

下里 哲弘 (SHIMOZATO TETSUHIRO)

琉球大学・工学部・准教授  
研究者番号：00156712

市村 強 (ICHIMURA TSUYOSHI)

東京大学・地震研究所・准教授  
研究者番号：20333833

鈴木 啓悟 (SUZUKI KEIGO)

東京工業大学・大学院理工学研究科・助教  
研究者番号：40546339