

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

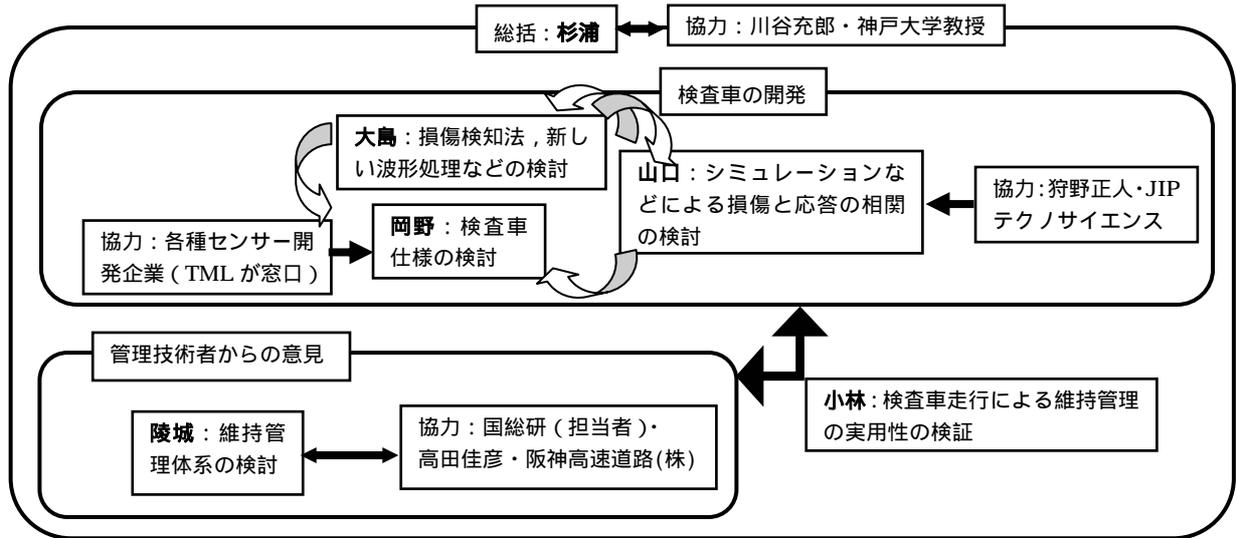
【研究終了報告書】

研究代表者	氏名(ふりがな)		所属		役職
	杉浦邦征(すぎうらくにとも)		京都大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻		教授
研究テーマ	名称	多機能検査車走行による道路構造物の健全性評価			
	政策領域	[主領域] 政策領域8： 道路資産の保全	公募 タイプ	タイプ：技術的課題の画期的な解決を目指す研究(技術ブレイクスルー型)	
		[副領域]			
研究経費(単位:万円)	平成17年度	平成18年度	平成19年度	総合計	
端数切り捨て。	2,997	2,874	1,800	7,671	
研究者氏名 (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)					
氏名		所属・役職(平成20年3月31日現在)			
小林義和		(株)ニチゾウテック・技術コンサルティング本部・部長			
岡野晴樹		(株)東京測器研究所桐生工場・工場長			
陵城成樹		(財)海洋架橋・橋梁調査会・調査部・構造課長			
山口隆司		大阪市立大学大学院・工学研究科・都市系専攻・准教授			
大島義信		京都大学大学院・工学研究科・都市環境工学専攻・助教			
研究の目的・目標 (提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)					
道路構造物の現状性能の評価を効率的に行うため、道路構造物の中でも橋梁を対象に、通常走行しながら、橋梁・車両の各種連成応答値を計測・評価し、橋梁の健全度を判断する技術システムの開発可能性を提示する。特に、加振機能と高精度な計測機能を有する多機能検査車両としての要求性能を明らかにする。					

これまでの研究経過・目的の達成状況

(研究の進捗や目的の達成状況、各研究者の役割・責任分担、本研究への貢献等(外注を実施している場合は、その役割等も含めて)について、必要に応じて組織図や図表等を用いながら、具体的かつ明確に記入下さい。)

平成18年度から当初の研究組織に数名の協力者(学・民・官)を追加し、現場での問題点を踏まえ、学際的な技術動向も踏まえ、実用化を実現可能な体制とした。



中間評価で指摘を受けた事項への対応状況

(中間評価における指摘事項を記載するとともに、その対応状況を簡潔に記入下さい。)

中間評価における主な指摘事項に対する対応は、下記のとおりであった。

指摘事項1) 時速60km程度の走行での検査技術の実現、および検査車のイメージを明確にした研究計画を再提出していただきたい。

車両走行による応答を利用した検査技術を基幹技術とする研究開発に修正し、開発目標を明確にした。

指摘事項2) 計測しようとするデータ(物理量)、そのデータに基づく健全性評価技術について明確にしていただきたい。

車両走行による応答(車軸の加速度, 変位, 車軸力, 車体の加速度, 変位)に着目し, これらの応答成分から橋梁の振動成分を抽出し, 振動特性の変化により健全性を評価する手法を具体化する。

指摘事項3) 新設時の設計情報を組み合わせた評価技術、あるいは新設時の初期データがない状態で健全性を評価する方法について、検討が必要と思われる。

提案技術による維持管理手法を提案した。橋梁管理体系の中での提案技術の位置付けを明確にし、点検履歴における相対評価により健全度を評価する。また、実車レベルでの実験を通じ、提案技術の可能性を提示する。検査車の要求性能を、スクリーニングといった一次検査としての性能に設定した。

研究成果

(本研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

各年度における主な知見・成果は、下記のとおりである。

【平成17年度】

1)各損傷過程におけるRC床版の固有振動数変化に対して、繰り返し輪荷重を受けるRC床版モデルの固有振動数の経時変化を検証し、特に、高次の振動数の低下が、顕著に観察された(下図参照)。またRC床版モデルに対する直接打撃試験より打撃力の作用特性を検証し、人工損傷により打撃力の長波化が観察された。ただし、一方で、低周波騒音計による計測で床版振動の検出が可能な場合は、比較的静穏な環境下であった。走行中の検査車からの計測を想定した実験では、風切り音やエンジン音に見立てたブローアによる風によって、床版振動に起因する空気振動の成分が、相対的に強度低下することが明らかになった。

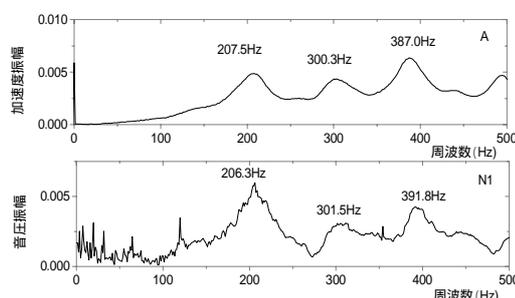
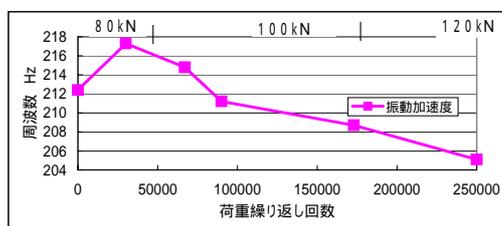


図1 繰り返し荷重によるRC床版の振動数変化

図2 加速度・音圧波形による固有振動数評価

2)打撃音からのRC床版固有振動数の検出各種RC床版に対する打撃試験において、床版加速度の周波数分析と打撃音の音圧波形の周波数分析を比較した結果、音圧波形計測により床版の固有振動数を検出できた(右図参照)。なお、打撃音は、走行しながら収録可能であり、非接触型(非設置型)の検知技術として有効である。しかし、舗装面を有する床版の反発力による健全性の評価については、コンクリート上の打撃点にゴムプレート、金属プレート等を引き、打撃力の波長に対する表層の影響を調べた所、柔らかい表層によって長波化することが明らかになった。したがって舗装下のRC床版を評価するためには、表層に依存しないよう下層の構造本体に到達する打撃力を確保する必要がある。

3) 構造物の線形幾何形状ならびに橋梁振動性状の変化の検討では、構造物の平面線形の計測が、慣性運動計測とGPSシステムとのハイブリッド化で地震後などの線形確認は可能であることがわかった。また、車両走行下の動的たわみは、橋梁主桁の損傷評価に有効である。ただし、供用下での橋梁のたわみ量を勘案すると、鉛直方向の計測精度の向上が不可欠である。現在、国土地理院などで開発中の高精度な測位システムとの併用を検討する必要がある。

【平成18年度】

1)損傷評価手法の検討として、走行する車両の応答値から、橋梁の振動成分を抽出するアルゴリズムを開発し、橋梁の振動成分と損傷との関連性に基づき、振動特性による損傷評価手法を確立した。特に、土木研究所の試験橋梁において、起振状態にある起振機を車両上に配置した起振車両を橋梁上を走行させ対象橋梁を加振し、起振車両の後を追尾する計測車両にて車両応答の計測を行い、橋梁振動の卓越振動数が検知できることを確認した。橋梁振動の加速度振幅が20gal程度

研究成果(つづき)

以上であれば、走行中の計測車両のバネ上加速度、バネ下加速度、鉛直方向軸重のいずれでも橋梁振動と同じ卓越振動数(5Hz程度まで)が検知できる。ただし、十分な波形分解能を確保するためには、20km/hの速度に制限する必要がある場合もあった。一方、土木研究所の試験橋梁をモデル橋梁として、橋梁全体を細部まで再現した有限要素モデルを用いて固有振動解析を行い、各種模擬損傷と固有振動数の変化を定量的に把握した。10%程度の振動数変化の特定は本手法でも可能であるが、この振動数変化では、支承の機能異常などは十分検知可能である。それ以外の損傷としては、(i)桁端に腐食損傷がある場合、低次振動数および高次振動数の変化では、それぞれ90%程度、60%程度の損傷レベルに対応する；(ii)支間中央にき裂損傷がある場合、90%程度の損傷レベル(桁1本のみ)に対応するが、すべての桁に同等の損傷を仮定すれば、20%程度の損傷レベルに対応する等の点がわかった。

2) 走行する車両の衝撃応答値から、路面、床版、支承、伸縮装置の健全度を評価することを目的に、その応答値評価のアルゴリズムを検討し、衝撃応答特性による損傷評価手法を検証した。ここでは、6径間連続橋(ノージョイント化橋梁)2連を走行した時の車両バネ下応答加速度の実効値の時刻歴から、(i)伸縮装置を通過する時、加速度実効値が大きくなる；(ii)ノージョイント化された橋脚上を通過する時、橋梁一般部を走行する時と比較して加速度実効値が大きくなる等の点が明らかになった。したがって、走行車両の速度と車両バネ下加速度応答の実効値の最大値との関係から、例えば、正の相関では、路面段差・鉛直支持機能異常など、負の相関では、路面凹凸といった橋梁の高速概略点検の可能性が伺えた。

3) 管理手法の提案および現行維持管理体制との対比として、検査車両の走行により評価する振動特性変化を一次スクリーニング項目と設定し、異常が認められた橋梁に対して更なる詳細点検を行うといった管理手法を、現行の体制と対比しながらコスト比較、適性・役割分担、適用限界などを整理した。単位広さ当たりの積算が一般であるが、橋梁点検費用は、橋長、橋梁の現場架設状況や点検方法(点検足場、リフト車、船、はしご)によって大きく変わり、概略は、約1000~2000円/m²(この費用には第三者被害対策も含む)であり、車両走行による変状スクリーニングの合理性・経済性は高いと判断した。

【平成19年度】

橋梁上を通過する車両の振動応答から橋梁の振動成分を効率よく抽出する手法として、車両のシステム状態モデルによる独立成分分析の適用を行い、実橋梁での車両走行実験の結果に基づきその適用性を検討した。ここでは、橋梁振動と路面プロファイルの独立性は低く、両者を完全に分離することができなかつたが、混合された信号のスペクトルに着目することで、橋梁の振動成分を抽出できる可能性があることが分かった。また、車両振動に含まれる橋梁の振動成分を抽出するためには、橋梁と車両が十分連成状態にあることが必要と分かった。

一方、常時微動計測により、縦桁および横桁の挿入による補強やゴム支承への変更のような補強工事の過程によって、橋梁の固有振動数が変化することを確認した。本研究で用いた対象橋梁については、縦桁および横桁を挿入し補強すると、補強前と比べて、橋梁の固有振動数が5%以上の増加した。また、ゴム支承に換えることで固有振動数が17%以上減少した。実使用状態においても、車両応答からこれらの変動をかなりの確率で検知可能であることが分かった。

研究成果の発表状況

(本研究の成果について、これまでに発表した代表的な論文、著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)、国際会議、学会等における発表状況を記入下さい。なお、学術誌へ投稿中の論文については、掲載が決定しているものに限ります。)

大島義信・小林義和・山口隆司・杉浦邦征：独立成分分析による橋梁振動のブラインド逆畳み込み同定，応用力学論文集，Vol.11，土木学会，2008.8（印刷中）。

北垣啓，山口隆司，北田俊行，杉浦邦征，大島義信，橋本国太郎：補強工事による鋼鈹桁橋の振動特性に関する研究，土木学会第63回年次学術講演会，I-035，2008（印刷中）。

Y.Oshima, T.Yamaguchi, Y.Kobayashi and K.Sugiura: Eigenfrequency estimation for bridges using the response of a passing vehicle with excitation system, Bridge Maintenance, Safety, Management, Health Monitoring and Informatics, IABMAS2008, pp.3030-3037, 2008.7.

北垣啓，山口隆司，北田俊行，杉浦邦征，狩野正人：走行車輛の応答による橋梁の損傷同定に関する解析的研究，鋼構造年次論文報告集，第15巻，(社)日本鋼構造協会，pp.585-590，2007.11.

金光 嘉久，大島 義信，杉浦 邦征：時間 - 周波数解析を用いた損傷検知手法に関する基礎的研究，第61回土木学会年次学術講演会，土木学会，1329-1330，2006.9.

研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

特に無し

研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

本研究で提案したシステムの試験運用の実施中には、検査車が最適に配置・運用される監視センサーと位置付けられるので、車両走行に支障があると想定される劣化レベルを定義し、その損傷限界評価基準の設定が、将来の維持管理体制の確立に向けて極めて重要である。そこで、下記の4点において技術の高度化をさらに推し進める必要がある。

アーチ橋，トラス橋，床板橋の振動性状（既存事例の収集を含む）の把握とデータベース化
異常と判定するための振動数変化の閾値の検討

車両 - 橋梁の連成振動シミュレーションの精度向上と実時間実行

ワイヤレスセンサ，走行時計測（車両軸重）との統合による総合的点検診断システムの構築
特に，対象が，多様な構造形式・構造部位であるばかりでなく，橋梁の固有振動数は，気温などの気象条件により敏感に影響を受けるため，損傷による固有振動数変化の有無を判断するには，季節変動を加味し統計的に有意な変化の有無を見出す必要がある。本研究では，1ヶ月間の固有振動数の変動を計測し，約20%の変動幅を示したが，年間を通した大きな変動幅を特定する必要がある。その上で，本研究で提案した『固有振動数の変動を確率変動として捉えた，季節調整モデルによりトレンドを推計する手法』の有効性を実証し，異常と判断する振動数の閾値の精度向上を目指すべきである。

研究成果の道路行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

社会インフラを含め，製品・建造物の劣化診断・寿命管理技術としては， 施設・設備の劣化損傷を非破壊で計測診断できるためのセンサーとデータ処理技術， 対象とする損傷の劣化モデルの構築， 損傷限界評価モデルの整備， 供用時の作用外力（偶発的な荷重も含む）などを考慮した余寿命の評価， 損傷の兆候の常時監視， その検知のためのセンサーの最適配置法， データ通信と処理技術の効率化， これらを統合したシステムの確立であることが望まれる。

本研究では，これらの中で，橋梁の通常の使用条件下で，特に特殊なセンサー・機器を用いることなく， を実現できるところまで提示した。 を行うことはできないが，非常に簡易な手法として（ は不要）， をある程度の周期的な点検で実現できると考える。現行の維持管理体制を効率的に改善するには，新たな視点でシステムを再構築（現地応答計測・現地診断のためのハイブリッド化）する必要があるが，これを実現すれば に近づくことができる。

自己評価

(研究目的の達成度、研究成果、今後の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値についての自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。)

橋梁の機能異常の有無の判定を効率的に行うため、通常走行しながら、橋梁・車両の各種連成応答値を計測・評価し、橋梁の健全度を判断する技術システムについて検討してきた。現在、情報ネットワークを駆使した遠隔モニタリングに関する取り組みが、積極的に進められているが、その合理化の一手法として、入力と応答が直接関連付けられるシステムとして、加振機能と高精度な計測機能を有する多機能検査車両による異常検知手法を提案し、その有効性を示し、技術的な貢献は高いと考える。

しかし、床構造、支持構造等の損傷は、橋面上での物理量により特定しやすいものの、一方で、桁構造の局所的な損傷は、橋梁が一般的にリダンダントな構造形式であるがため、橋面上で計測可能な物理量として発現し難いことを再認識した。現有のワイヤレスセンシング技術を活用した橋面上を走行する計測車両とのハイブリッドシステムまで拡張できなかった点を反省する。

また、加振機能を有する検査車による動的計測にとらわれず、近接目視による判断をより信頼ある判断に高められるヒューズ的な損傷検知センサ(き裂検知光センサなど)の適用についても、現地での計測の効率化と言った視点で検証が不足していた。