

10. 維持管理

とりまとめ：穴見健吾（芝浦工業大学）

論文題目：“車両応答の時間周波数解析に基づく橋梁の損傷検知法”

著者：山本亨輔・大島義信・金哲佑・杉浦邦征
掲載：Vol. 57A, pp. 637-645, 2011年3月

◆討議 [宮下剛（長岡技術科学大学）]

- ①想定している損傷はどのようなものでしょうか？
②提案手法では橋梁端部の損傷検出が難しいとの話ですが、実橋梁では端部の損傷が多くみられます。端部の損傷検出に向けて本手法を適用する場合どのようにすれば良いか、何か方法があれば教えてください
③損傷が生じるとウェブレットのパワーが表れているが、この物理的意味はどのようなもののでしょうか？

◆回答：①RC桁の剥落やひび割れなど桁中央部に発生する損傷を想定しています。質量の変化を伴う局所的損傷であり、かつ、桁中央部に生じている必要があります。

- ②今後の検討課題となっています。
③厳密な表現ではありませんが、損傷によるモード形状曲率の変化を捉えていることに相当します。

論文題目：“車両応答から推定した橋梁変位に基づく橋梁の損傷同定法”

著者：大島義信・山本亨輔・杉浦邦征
掲載：Vol. 57A, pp. 646-654, 2011年3月

◆討議 [伊藤義人（名古屋大学）]

路面凹凸自体を走行しながら精度よく測定する手法が昔から開発されているが、その手法と組み合わせることにより路面凹凸の影響を除くということは無効でしょうか。もし有効ならば今回ご提案の手法がどの程度実損傷を同定できるかを明らかにすることができるのではないのでしょうか？

◆回答：車両走行位置に厳密に沿った箇所での路面凹凸が高精度で測定されるならば、直接的に橋梁変位が求められることとなりますので、その場合は有効と考えられます。さらに、求めた橋梁変位から損傷を同定することも可能と思われるので、ご指摘の通り提案手法の性能を評価することが可能と思われます。ただし、提案手法は路面凹凸が直接測定できない状況を想定して推定理論を構築していますので、その部分に関する検証はできないと思います。また、車両に入力される路面凹凸の変位は、車両走行位置のずれなどにより、必ずしも路面プロファイラーなどで測定

した路面凹凸と一致しないため、現実的には難しいと思います。このような状況を考え、路面凹凸をランダムな入力として推定理論を構築しています。また提案手法全体の有効性については、今後実測を含めて検証する必要があると考えています。

論文題目：“橋梁ヘルスマニタリングシステムのための新しい損傷検知手法の開発”

著者：宮本文穂・矢部明人・工藤靖之
掲載：Vol. 57A, pp. 655-668, 2011年3月

◆討議 [大島義信（京都大学）]

ご提案では時間周波数の領域を分割して、それぞれの減衰を求めています。周波数によって減衰の推定精度が異なると思います。この精度の異なるものを特徴ベクトルの成分とされていると思いますが、精度に差のあることを何か考慮されていますか？

◆回答：提案のシステムでは、減衰の推定精度（ばらつき）も含め、時間-周波数空間上の各分割領域における特徴量がそもそも統計的ばらつきを有することを前提としており、そのばらつきということを手逆にとり、そのばらつき具合をモデル化するところに方法論的なユニークさがあると考えております。ご指摘の通り、既往の研究において、減衰という構造パラメータは時間-周波数において計測上もばらつきがあり、かつ推定する際にも相応のばらつきを有するパラメータであるため、精度の観点から、これまで損傷検知などには向かないパラメータと考えられておりましたが、計測上のばらつき方、推定上のばらつき方に統計的特徴が存在すればそれは1つの確率モデルで表現できると仮定し、1つの方法論として成り立つことを基礎的な実験的な確認と検討を行った次第であります。

◆討議 [金哲佑（京都大学）]

中小スパン橋梁の交通振動の場合、車両の減衰の影響を考慮する必要があり、その点からサンプル数が重要と思われませんが、その点についてご意見を聞かせてください。

◆回答：提案のシステムでは、減衰を特徴量として扱っておりますがご指摘の通り車両が橋梁の振動を減衰するような挙動についても言及する必要があります。本論文では1つの方法論としてインパクトハンマー実験においては一定の統計モデル上の差異を確認することができましたが、台車走行によるデータにおいては差異を明確にすることは難

しい結果となっております。インパクトハンマーにしる、台車を使った実験にしる、サンプル数に対してどのような傾向が定量的に言えるかまでは言及できておりません。その点においては今後の実用化を想定し、検討が必要であろうと考えております。

論文題目：“定期点検結果に基づく関西地区の高速道路鋼橋の耐久性評価とLCCの試算”

著者：平野毅志・西山晶造・東野忠雄・縦山好幸・岩崎雅紀

掲載：Vol. 57A, pp. 681-690, 2011年3月

◆討議 [宮下剛 (長岡技術科学大学)]

論文中の図-17で評価点のばらつきが大きいにも関わらず、直線近似を行うことに問題はないのでしょうか？

◆回答：ご指摘の件、以下のとおりです。一般に、劣化曲線は右肩上がりの曲線（指数関数等）で表されることが多く、本論文でも図-9等では対数関数で曲線近似を実施しています。ご指摘の図-17については、構造形式別の差をわかりやすく説明するためにのみ図示の近似直線を示しています。当然、事前検討では各種近似曲線を試行（試算）しておりますが、同一の累計断面大型車交通量上に多数の評価点 R_{lav} (平均値) が存在するため、対数関数等では各図の差がわかりずらくなったため、近似曲線を掲載しました。

◆討議 [金哲佑 (京都大学)]

今回のような評価や試算を意志決定にどのように使っているのでしょうか

◆回答：ご指摘の件、本論文の内容は、BMS構築を目標に研究開発を進めている各種検討の一つとして位置づけられており、点検データベース及びそれに基づく評価点算出システムのデータを利用したLCC試算システムの構築を目的としています。現時点では、実務に運用されるには至っておらず、P5右上9行目から記載している橋梁担当技術者による現地損傷状況調査の基礎資料作成等に試行されているレベルにあります。

論文題目：“効果的な桁洗浄に向けた鋼橋の腐食環境調査と考察”

著者：永田和寿・伊藤弘太・山田仁・小畑誠・宮本重信

掲載：Vol. 57A, pp. 691-702, 2011年3月

◆討議 [貝沼重信 (九州大学)]

腐食環境の年変動をACMセンサ出力による日平均電気量で評価されているのでしょうか？

◆回答：ACMセンサから海塩付着量や腐食速さの評価を行う際には1日平均電気量が用いられますが、本研究では論文中に記載のとおり10分ごとにACMセンサから得られる腐食電流量によって効果的に桁洗浄を行うための結露に関する検討を行っており、1日平均電気量では評価を行っておりません。また、論文中に記載のとおり計測期間は約1年半であり、腐食環境の年変動についての考察は行っておりません。

論文題目：“局部座屈を簡易に考慮するファイバーモデルを用いた橋梁全体系解析に関する基礎的検討”

著者：杉岡弘一・松本茂・大石秀雄・金治英貞・馬越一也・長井正嗣

掲載：Vol. 57A, pp. 703-714, 2011年3月

◆討議 [田辺篤史 (日建設計エンジニアリング)]

材料特性の圧縮側強度を低下させる際に、軟化域をもうけずに完全弾塑性体としたのはなぜでしょうか。

◆回答：本論文では、圧縮強度低下を評価するため、材料構成則に軟化域を設けるかわりに、座屈強度を圧縮側降伏点とした完全弾塑性バイリニアの材料構成則を用いた有限変位解析によって考慮するものとししました。この手法の選択は、橋梁全体系へ組み込んだ際に収束性を優位にする（材料特性へ軟化域を考慮するための負勾配は収束性を低下させてしまう）ことも加味しています。

本手法の妥当性については、ファイバーモデルに局部座屈強度を設定した応力ひずみ関係の降伏点を考慮し、全体座屈強度を有限変位解析によって考慮することにより、本解析手法における中心軸圧縮柱の連成座屈強度は、シェル解析とよい相関を持つことを確認しております（本論文2.2.3節）。細長比が小さく幅厚比が比較的大きい場合の荷重低下域には、局部座屈の進展がファイバーモデルでは評価できていないため荷重変位曲線に差が出ています（本論文図-8(a) No. 5）。しかし、最大荷重をシェルモデルよりも小さく見積もっていることから、安全側の評価を与えると考えました。

◆討議 [貝沼重信 (九州大学)]

腐食による部材板厚減少に伴い、溶接残留応力も変化・再配分すると思われませんが、それをどのようにモデル化すれば良いかお考えがあれば教えてください

◆回答：実際の現象は、ご指摘の通り、経年腐食による部材板厚減少に伴い、製作時の溶接残留応力は変化していくと考えられます。しかし、その定量的な評価は容易ではなく、設定諸量に不確実な点が多いため、本解析では考慮しないものとししました。本解析での残留応力は初期応力として設定しており、解析中の残留応力は不変となっております

す。また、部材板厚減少に伴う剛性低下は評価されていますので、構造系が変化することによる応力再分配は考慮されています。残留応力の変化に対するモデル化については、今後の課題と考えております。

論文題目：“鋼桁腹板の合理的な補修・補強方法の確立に向けたFRP接着鋼板の一軸圧縮試験”

著者：奥山雄介・宮下剛・緒方辰男・藤野和雄
・大垣賀津雄・秀熊佑哉・堀本歴・長井正嗣
掲載：Vol. 57A, pp. 735-746, 2011年3月

◆討議 [野阪克義 (立命館大学)]

圧縮部材の変形は半波長だけではなく、波形が変わるとはく離に対して危険側となる可能性もあるが、その点については検討されていますか？

◆回答：本実験では、鋼桁端部腹板パネルの終局時を想定し、鋼板の面外方向の大変形に対して、CFRPとパテ材の変形能や、剥離特性の基礎評価を目的としました。そのため、対象とする座屈波形として、正弦波の半波長のモードで十分であると考えます。しかし、曲げを受ける鋼桁の上フランジなどでは、ご指摘のように、初期変形量に依存して半波長以外のモードが励起される可能性があります。ここでは、CFRP端部での曲率が大きくなり、CFRPが剥離しやすくなる状況が考えられます。本論文では、この点に対する検討は行っておりません。実構造物への適用に当たり、重要な指摘事項と考えます。今後の課題として取り組ませて頂きます。

◆討議 [小林朗 (新日鉄マテリアルズ)]

低弾性シートの剥離防止効果の検討は、その外側に接着する高弾性FRPシートの剛性を等しくして行うべきではないか？

◆回答：本文では、1層目と2層目に高弾性型炭素繊維シート（以下、CEと記す）を貼り付けたケースと1層目に低弾性である高強度ポリエチレン（以下、Pと記す）を貼り付け、2層目をCEとしたケースの実験結果を比較して、FRPが剥離するまでの後者の変形能が大きいことから、Pがはく離を防止する効果を有するとしました。ご指摘のように、両ケースでは、FRPシートによる補強量が異なっており、パテ材を使用したにも関わらず、CEを2層貼り付けたケースでは端部から剥離が発生しています。そのため、1層目をP、2層目と3層目をCEとしたケースの実験を実施して、低弾性FRPシートの剥離防止効果を検討する必要があると考えます。

論文題目：“腐食した鋼板の鋼板接着による性能回復”

著者：森下太陽・藤井堅・森田和也・堀井久一・中村秀治
掲載：Vol. 57A, pp. 747-755, 2011年3月

◆討議 [伊藤義人 (名古屋大学)]

母材強度までどの事例も達していないようですが補修法としては使えないということでしょうか？また、伸び性能が著しく低下するようですので耐震部材としても使えないようにも見えます。

◆回答：まず、本接着補修法が母材強度まで達しなかったことが補修法として使用できないとお考えですが、当て板の板厚や接着面積をうまく選択すれば母材の強度（全強）まで強度を上げることは可能と考えます。しかしながら、実際の構造物の維持管理においては、当初設計での母材の全強を保証するような補修でなくても、例えば設計荷重を満たすような補修でも十分な場合も多いと考えられます。また、このような考えに基づけば、腐食して減肉した区間全体を接着補修するのではなく、減肉の激しい箇所に注目して部分的な補修により設計荷重に耐えるような補修設計が可能だと思います。したがって、維持管理においては、その補修設計方針を明確にすることにより全強まで性能を回復させなくても十分な対応が可能と考えております。

◆討議 [岩崎雅紀 (株ワイ・シー・イー)]

実務上の評価式を提案することは考えているのでしょうか？

◆回答：将来的には、鋼板接着を用いた補修設計法を提案できればよいと考えております。そのためには補修効果の定量的な把握が不可欠と存じますので、今後基礎データを蓄積していく所存です。

論文題目：“高速列車通過時における著大輪重発生メカニズムと要因分析および鋼橋の疲労に関する研究”

著者：田辺篤史・関雅樹・松浦章夫
掲載：Vol. 57A, pp. 780-787, 2011年3月

◆討議 [穴見健吾 (芝浦工業大学)]

ご発表では継ぎ目による振動成分の影響は小さい（消えてしまう）ということでしたが、継ぎ目下で疲労が多く起きているなどの話も良く聞いたりします。このような実現象と今回の成果は一見矛盾しているように思えますが、ご説明頂けますでしょうか？

◆回答：一見矛盾している様にみえることの原因は、継ぎ目が間接的に鋼橋へと影響したためと思われます。本論で述べましたとおり、レール継ぎ目等で発生する高周波振動は、鋼橋本体にはほとんど影響を与えないと考えられます。しかしながら、レール締結装置やまくらぎ等の軌道構造物に対してはほとんど減衰することなく影響を与えうると考えられます。高周波振動によって軌道構造物にまくらぎ浮きなどの損傷が発生しますと、鋼橋本体へ影響を与えうると考えられます。低周波振動が発生することになり、疲労損傷が発生したことが想定されます。

◆討議 [伊藤義人 (名古屋大学)]

歪度と尖度の変化を物理的に説明できますか？シミュレーションで再現できますか？

◆回答：まず、尖度が小さくなることについては、道床の剛度変化とダンパーの影響と考えられます。無道床部である鋼橋上では縦桁が一定間隔の横桁で支えられており道床の剛度が周期的に変化します。よって、列車通行時にはレールが周期的に上下運動をすることになります。ここで列車速度の増加の影響について車両側からみればレールがより短い周期で上下することとほぼ等価です。上下変動の周期が短いと、ダンパーの影響で台車のばねが相対的に硬くなり、結果として通常走行時の輪重変動が大きくなるため尖度が小さくなったと考えられます。一方、有道床部では剛度の変化はないため、尖度の変化は起きなかったと考えられます。次に、歪度の変化については、輪重の抜けには下限値があるためと考えられます。レール継ぎ目等で著大輪重が作用した場合、最大値は静止輪重の倍以上になることがあります。一方、レール車輪間の吸着力はないため輪重はゼロ以下にはなりません。さらに車体のばねが輪重値の低下を防止する方向に作用します。このため、やや著大な輪重が発生すると輪重値には不均等が発生し、結果として歪度が大きくなったと思われます。

最後に、現象のシミュレーションについてですが、尖度が低下する現象のシミュレーションは可能と考えられます。道床の剛性変化による輪重変動は、著者らが行った鋼トラス橋上の列車走行シミュレーションでもみられており(参考文献1の図-18参照)、すでに再現できていると考えます。間接的な評価になりますが、参考文献1の図-22(a)を見ますと最大輪重が列車速度に依存して増加していることから推察できます。歪度の変化についてのシミュレーションについては、レール継ぎ目等での高周波の輪重変動発生再現が難しいですが、軌道分野での成果を活用すれば可能ではないかと想定します。

1) 田辺篤史, 関雅樹, 松浦章夫: 3次元動的解析を用いた鋼トラス橋梁における著大輪重の影響評価, 構造工学論文集, Vol. 56A, pp. 806-816, 2010. 3.

論文題目: “引張りを受ける腐食鋼材の延性き裂発生と伸びの予測”

著者: 藤原英之・後藤芳顕

掲載: Vol. 57A, pp. 788-801, 2011年3月

◆討議 [葛漢彬 (名城大学)]

ご提案の手法は、腐食した構造物へ適用するような場合でも、そのまま適用できるのでしょうか？

◆回答：提案する腐食表面形状の計測と三次元モデル化、切欠き丸鋼の引張り試験と解析に基づく延性き裂発生基準の同定、構造モデルの解析結果から延性き裂発生を予測するという一連の手法はそのまま適用可能と考えます。解析と延性き裂発生判定手法については十分実用範囲にあると考えます。しかし、腐食部材の表面形状計測法については、本論文で示した延性き裂発生および伸びの予測精度が測定ピッチ約0.5mm、測定誤差約0.05mmの計測データを前提としているため、不可能ではありませんがコストなどの問題で一般に適用するのは現状では難しいと考えます。ただし、高精度の3Dレーザースキャンやステレオ画像解析など、計測技術の進展はめざましいので、近い将来このような計測が低コストで可能になることも十分考えられます。なお、この測定ピッチと測定誤差をどれだけ緩和できるかという点については今後検討する余地があります。

論文題目: “AFRP シート緊張接着によるRC 梁の曲げ補強効果および破壊形式予測法に関する実験的研究”

著者: 岸徳光・三上浩・栗橋祐介・A. M. Ali

掲載: Vol. 57A, pp. 812-821, 2011年3月

◆討議 [中村一史 (首都大学東京)]

AFRPシートの定着長さの決定方法と定着位置の設定の考え方について教えてください(定着位置については、例えば定着端をスパン中央にすると剥離しやすくなると思いますのでどのあたりで定着するのがよいのでしょうか?)

◆回答: AFRP シート緊張接着工法では、AFRP シートを緊張した状態で補強対象部材に接着し、接着剤が十分に硬化した後、緊張力を解放してプレストレスを導入します。このとき、AFRP シートの両端部には大きな付着応力が生じます。従いまして、定着位置はシートの両端部近傍と考えております。また、定着長さは、過去の要素実験結果を参考にし、付着応力の発生範囲に多少の割増率を考慮して40 cm程度と考えておりますが、この点については導入緊張力や使用材料によって変化してくるものと考えております。