

J-BEC

レポート

2020 Vol. 16



一般財団法人 橋梁調査会
Japan Bridge Engineering Center

目 次

巻頭言

橋梁調査会 橋梁診断アドバイザー
国際圧入学会 専務理事
日下部 治

「道路点検士」資格制度の事業状況 01

新技術導入促進機関、点検支援技術について 05

助成研究

- ・ 強風時の車両走行安全性検討のためのトラス桁橋上の横風特性 09
- ・ 橋梁点検における AI 活用に向けて 15
- ・ 設計の想定を超える地震作用に対する橋梁全体系の崩壊挙動の解析 22
- ・ 道路橋床版疲労シミュレーションに向けた RC 床版疲労解析における
パネル床版と実橋床版との等価解析条件の検討 30
- ・ 日本での就労を希望するベトナム人橋梁技術者の
意識および資質に関する調査研究 37

海外調査報告

- ・ 第 36 回国際橋梁会議 (IBC2019) の聴講参加と
ワシントン D.C.、ニューヨークでの橋梁現地調査報告 43
- ・ fib シンポジウム 2019 (クラブ) 参加と
ポーランド・チェコ・ドイツにおける橋梁視察報告 47

トピック

- ・ 国土交通行政関係功労者表彰の受賞について 52
- ・ 橋梁技術に関する研究開発助成について 53
- ・ 建設技術フェア等の参加報告 54

都市と橋

四万十川橋 55

豪雨災害と橋梁基礎の点検・維持管理



橋梁調査会 橋梁診断アドバイザー
国際圧入学会 専務理事

日下部 治

1. まえがき

近時、豪雨災害が世界各地で多発している。毎週のように河川の氾濫、堤防の決壊による甚大な被害が報道され、橋梁の被害事例も少なくない。2020年7月17日付けの産経新聞によれば、今回の九州豪雨で道路・鉄道橋の少なくとも20か所が流出したと報道されている。2019年10月の台風19号による多摩川に架かる日野橋の橋脚部が洗堀によって沈下が生じ、応急復旧が完了したとの報道がされたのは発災7か月後の2020年5月であった。豪雨災害による河川橋梁基礎の被災は、大規模で長期間の復旧工事が必要となる場合が多い。

橋梁の橋脚部あるいは橋台部が流水によって洗堀あるいは浸食される橋脚・橋台の沈下・傾斜の被災は古くから認識され、主に河川工学分野の研究者によって水理学的検討が行われて来た。洗堀現象は水理学と地盤工学との複合的な境界領域の課題であり、近年国際的規模で地盤工学からの研究努力も開始されている。国際地盤工学会の技術委員会TC213「Scour and Erosion」は、2年に一度国際会議を開催し世界各地の橋梁の洗堀事例が報告されている。

2. 支持力問題としてみた洗堀現象

洗堀による沈下・傾斜の現象を、被災事例の多い砂礫地盤に建設された直接基礎の支持力問題として単純化して考えてみよう。浅い帯基礎の鉛直支持力は、底面支持力と根入れ部の周面摩擦力の和で表現される。底面支持力は2つの項からなり最初の項は、基礎幅に比例し、2番目の項は根入れ深さに比例する。洗堀されても必要な支持力を確保するために、河川橋梁の通常設計では付加的な根入れ深さが考慮される。観測事例によれば洗堀最大深さは基礎幅の1.5～2.0倍程度である。

洗堀により根入れ深さがゼロまで減少すると、底面支持力は第二項が消滅し、第一項のみになる。第一項は基礎幅に比例していることから基礎端部での支持力は極めて小さくなり、沈下するとともに傾斜しやすい状態になる。洗堀により根入れ深さが減少すると、底面支持力とともに根入れ部の周面摩擦力も減少する。この根入れ部の周面摩擦力は根入れ長の2乗に比例するので、洗堀深さが増大すると周面抵抗は急激に減少する。同時に、流水圧に抵抗していた受働土圧も失われ、基礎は傾斜・転倒しやすくなる。洗堀の進行につれて、基礎の荷重一沈下挙動は、いわば深い基礎から浅い基礎への挙動へと移行し、基礎底面下の地盤の破壊形態も拘束塑性流れから非拘束塑性流れへと変化するので、荷重一沈下挙動はピーク後に軟化傾向を示す場合もある。このよう

に洗堀によって根入れ部を失うことは、基礎の支持力の面からみて極めて怖い現象である。特に根入れ部の浅い直接基礎は脆弱である。

3. 橋梁下部工の点検と維持管理

道路橋定期点検要領では、下部構造の定期点検時の主な着目箇所として橋台、橋脚の項とともに洗堀が挙げられている。平成31年度の定期点検要領の改定時には、橋梁基礎の洗堀問題の重要性に鑑み「水中部の状態把握に関する参考資料」が加わり、内容が充実された。本参考資料には、現在までの橋梁基礎の洗堀に関する知見が集約されている。

定期点検は、直接目視に加えて、非破壊検査、試掘などの詳細な調査の実施を考慮すると渇水期に実施するのが現実的ではあるが、近時の豪雨災害の頻度を考えるとき、再度の豪雨時や地震時などに備えて、洪水後の緊急点検や継続的な挙動観察も必要となろう。「参考資料」にも記載されている通り、近年では水中カメラの活用やソナーによる3次元計測技術も使える環境になってきている。

被災事例は古い橋梁に多いとの指摘がある。日野橋は、94年前の1926年の建設であった。古い橋梁の場合、(1) 河川管理施設構造令制定前に設計・建設された橋梁基礎は洗堀対策が十分でない、(2) 設計図書、図面、補修履歴の資料が保存されていない、(3) 河道、河床が変動している、など古い橋梁では点検実務上の困難さが多い。

健全性の診断における判定区分で、早期措置、緊急措置と診断された場合、どのような復旧補修また可能な限りの補強対策が可能か? 当該橋梁の重要度、復旧完了までの時間的制約、橋梁下の狭隘でかつ空頭制限が厳しい施工環境など施工上の制約条件は多い。日野橋のように沈下した橋脚を撤去し径間の長い桁をかけ、隣接する橋脚の補強工事等の事例では7か月を要した。予防保全段階において、洗堀防止対策とともに耐震補強を兼ねた橋脚基礎の補修・補強対策を計画的に実施することも選択肢の一つとなろう。

4. おわりに

近時の地球温暖化の加速的進行を考えると、今後とも豪雨災害発生の頻度は減少するより増加すると考えるのが自然である。豪雨災害の度に、橋梁基礎の洗堀問題が繰り返し発生することも想定される。河川橋梁の維持管理は、「気候変動を踏まえた治水計画の在り方（令和元年10月、気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会）」と密接に連携して議論される必要があるであろう。

「道路点検士」資格制度の事業状況

企画部 技術研修室長 皿井 聖

1. はじめに

我が国の道路橋は、急速な老朽化に伴い劣化損傷が急速に進展しています。従来に増して道路橋の点検技術者が必要とされています。

道路橋の点検技術者の技術力向上と育成を目的として橋梁調査会では平成26年4月より「道路橋点検士」の資格を創設し、平成27年1月に国土交通省の民間登録資格に登録され、令和2年2月に更新されました。また、「道路橋点検士補」は平成27年11月に創設されました。

2. 国土交通省登録技術者資格制度の背景

我が国の道路橋は、高度経済成長期（1955年～1974年）に集中的に建設され、日本の社会経済文化の発展に寄与してきました。しかし、図-1に示すように、それらの道路橋は急速に高齢化し、それに伴う劣化損傷も急速に進展していく可能性があります。これらの老朽化した社会資本ストックの維持管理・更新、技術者の減少及び社会資本の品質の確保等が課題となっています。これらに的確に対応するためには、その担い手を育成し、将来にわたり確保することが求められています。

また、平成24年12月に発生した笹子トンネル事故を契機として道路構造物の維持管理の重要性が認

識されました。

これらの要請に応えるため、「公共工事の品質確保の促進に関する法律（品確法）」において、公共工事に関する調査（点検及び診断を含む。）及び設計の品質確保の観点から、必要な知識・技術を有する者の資格を国土交通大臣が評価・登録することによって、品質確保と技術者の育成及び活用の促進を図る新たな制度が平成26年11月に創設されました。

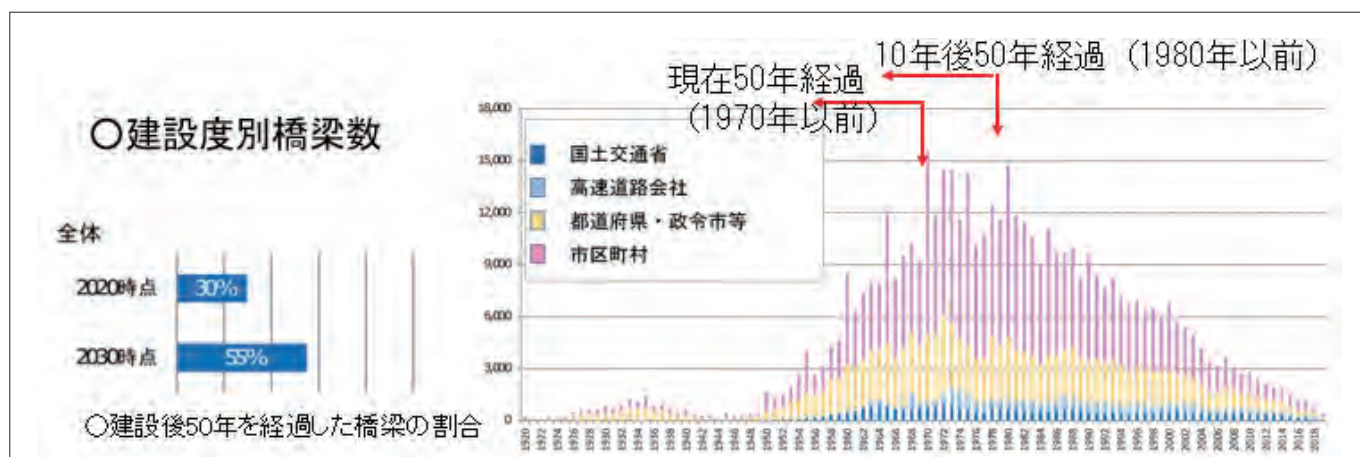
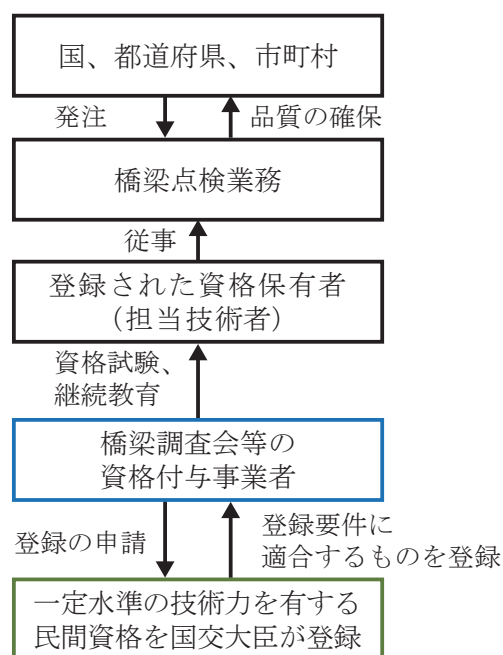


図-1

これにより、登録資格保有者の社会的な地位の向上や活躍の機会拡大が期待されています。

当調査会では、「道路橋点検士」資格を国土交通省に申請し、施設分野として橋梁（鋼橋及びコンクリート橋）業務分野として点検において、平成27年1月に登録されました。また、「道路橋点検士補」は、平成28年2月に登録されました。

「道路橋点検士」の資格については、令和2年2月に更新されました。また、「道路橋点検士補」は、今年度の更新を予定しております。

3. 道路橋点検士技術研修会

1) 経緯

道路橋点検士技術研修会は平成6年に（財）道路保全センターが主催した橋梁点検技術研修会が始まります。平成16年の橋梁調査会への引き継ぎを経て、資格制度に合わせ名称を道路橋点検技術研修会としました。令和元年度末まで延べ109回を開催しました。

これまでに、講義及び現地実習の受講並びに修了試験に合格した延べ約15,000名の道路橋点検技術者を養成してきました。

2) 研修内容

- ・ 橋梁の維持管理に関する基調講演（大学教授による講義）
- ・ 国の「橋梁定期点検要領（H31年3月）」の解説を中心に橋梁点検技術（点検要領、損傷評価基準、記録様式記入方法、対策区分の判定要領等）に特化した講義
- ・ 鋼橋及びコンクリート橋の点検方法の講義
- ・ 鋼橋及びコンクリート橋の補修・補強方法の講義（写真-1）
- ・ 実橋（掘切橋）の記録様式作成等の現地実習（写真-2）

3) 試験

現地実習結果の整理、橋梁構造の基本知識及び研修内容に関する試験を実施します。

橋梁構造の基本知識及び研修内容に関する試験は以下の内容となっています。

- ①道路橋の維持管理の心構え、②道路橋の維持管理に関する法令、③橋梁定期点検の考え方、④橋梁の基本構造、⑤橋梁の損傷、⑥点検の安全管理、⑦

橋梁の設計・施工、⑧計測機器・非破壊試験機器

橋梁定期点検要領に基づく記録様式の作成は以下のものです。

- ・ 記録様式（その9）（その11）（その12）（その13）

4) 研修期間

3日間

5) 研修修了者

平成27年～29年の間は年間1,000名以上の修了者がいましたが、平成30年、令和元年は少し減少傾向です。令和2年は新型コロナウイルス感染症の影響により研修会が開催されていません。

令和元年度までの修了者の合計は約15,000名となります。図-2に研修会修了者数の推移を示します。



写真-1



写真-2

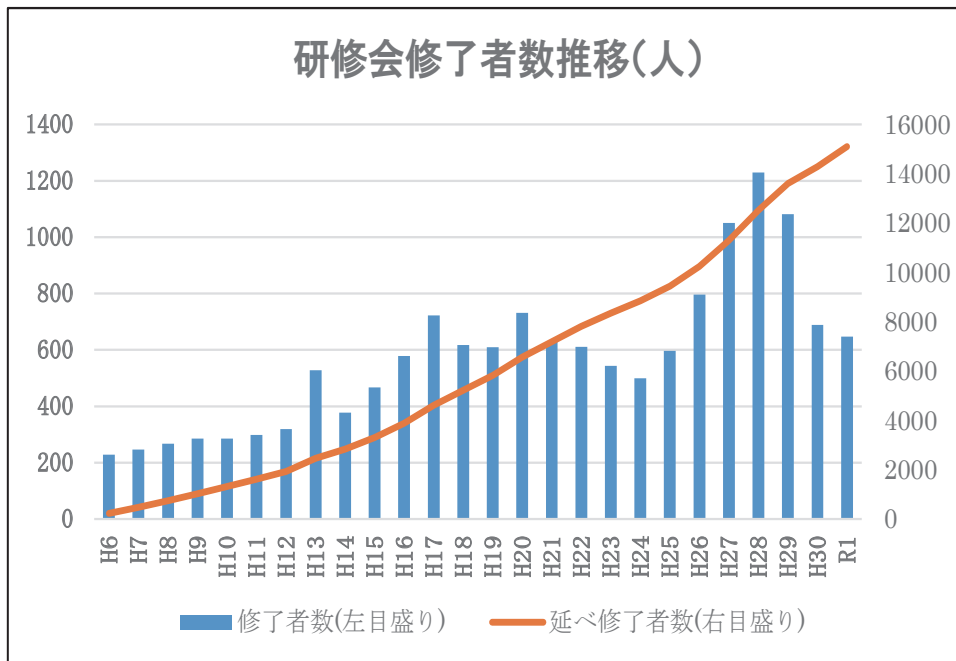


図-2

4. 道路橋点検士および道路橋点検士補の審査登録

道路橋点検士の登録申し込みは、平成26年4月から開始され、平成26年度は約3,000人の登録がありました。平成27年度～29年度は毎年1,000人程度の登録がありました。その後、少し減少傾向にあり、平成30年度は約900人、令和元年度は約700人の登録がありました。令和2年度は研修会が開催されないこともあり、8月までに約180人となっており、延べ登録者数は約7,700人となっています。

図-3に年度別登録者と登録者の状況を示します。

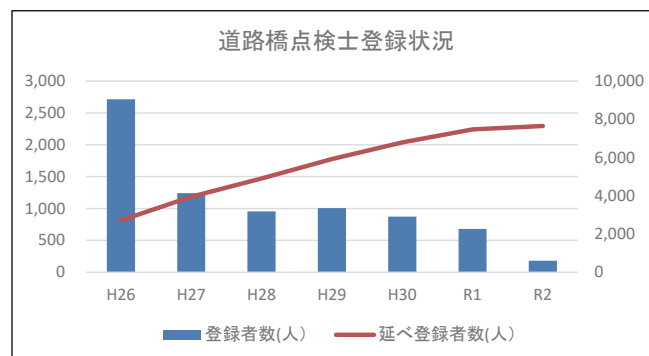


図-3

道路橋点検士補の登録申し込みは、平成27年11月から開始され、平成27年度は約300人の登録がありました。平成28年度、29年度も同程度の登録がありました。その後、少し減少傾向にあり、平成30年度は約200人、令和元年度は約130人の登録がありました。令和2年度は8月時点で約20人となっており、延べ登録者数は1,200人となっています。

図-4に年度別登録者と登録者の状況を示します。

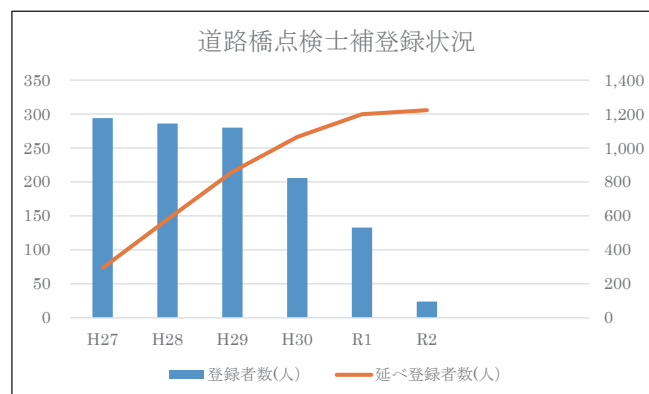


図-4

5. 道路橋点検士補検定試験

道路橋点検士補検定試験は、道路橋点検士資格を他の機関の研修者にも与え道路橋点検士技術者を育成することを目的として、平成28年から実施しています。

対象となる研修は研修内容が調査会の実施している道路橋点検士技術研修会と同等であることを道路橋点検士委員会で認められることが必要です。

現在認められている研修は「道路橋メンテナン技

術講習（主催（一財）全国建設研修センター、（一社）建設コンサルタント協会）」及び「道路構造物管理実務者研修（橋梁初級Ⅰ）（国土交通省 北海道開発局、各地方整備局、沖縄総合事務局）」の研修となっています。

これらの研修等で行われる試験の合格者又は達成

度の高い者に対し道路橋点検士補検定試験の受験が認められることとなります。ただし、受験にあたっては調査会が実施している研修の受講条件である学歴に応じた橋梁に関する業務経歴を有することが必要です。

この検定試験の合格者は道路橋点検士補の登録ができるとともに、所定の定期点検の業務経歴があれば道路橋点検士の登録申請が可能です。

これまで、平成28年度は78名、平成29年度は49名、令和元年度は4名が受験されています。

6. 道路橋点検士更新講習会

道路橋点検士等に登録した者は4年毎に更新講習会を受講し資格を継続する制度になっています。道路橋点検士更新講習会は、道路橋点検の技術の向上や点検結果の精度、信頼性を確保するとともに最新の道路橋の維持管理政策や新たな技術の習得を目的として実施しています。

平成29年度から道路橋点検士更新講習会を全国6都市で開催しました。

令和元年度末までに点検士が約3,400人点検士補が約130人の方が更新登録を済ませております。

令和2年度道路橋点検士更新講習会は、新型コロナウイルス感染症拡大の防止を図るため、従来の会場方式か自己学習方式に変更して行うこととしました。

この自己学習方式は、申込者に「テキスト及び講義動画（DVD）等を送付」し、受講後、当調査会からの「講義内容に関する質問」に答えていただく方式にいたします。

今後、毎年実施する事業であり、点検要領の変更や社会的要求の変化に対応できる技術を伝える場にもなるため講義内容の検討も重要であると考えています。

7. おわりに

我が国の道路橋約72万橋をしっかりと点検することが重要です。道路橋の安全を確保するためには近接目視による損傷状況の把握と評価がまず必要となります。それらの技術を有する者が「道路橋点検士」であります。道路橋点検の義務化に伴い、その要員である技術者を確保するとともに点検業務の品質確保が求められています。現場の第一線で道路橋の維持管理に携わっている「道路橋点検士」の皆様方が全国で活躍され、道路橋の安全確保および長寿命化に貢献されることを期待しております。

新技術導入促進機関、点検支援技術について

企画課長代理
企画課長代理

大黒屋 信英
石井 豊

1. はじめに

高度経済成長期に建設した道路橋の老朽化が急速に進むことが懸念されている。2020年9月に公表された道路メンテナンス年報（文献1）によれば、2020年3月末において全国では、約73万橋の橋梁が管理されており、そのうち92%にあたる約66万橋は地方公共団体が管理する橋梁である。建設後50年を経過した橋梁の割合は、2020年時点で約30%、10年後の2030年時点では約55%に急増する。1巡目（2014～2019年度）に健全性の診断でⅢおよびⅣと判定された橋梁のうち、修繕等に着手した橋梁は国土交通省の80%に対し、地方公共団体では47%にすぎない。また、市区町村における橋梁管理に携わる土木技術者は5人以下が大半を占めている。地方公共団体の委託点検による点検のうち国主催の研修受講歴が無く、資格も保有していない技術者が点検を実施した橋梁が40%にのぼる。道路管理者、民間ともに技術者不足が浮き彫りとなっている。

そうした中で、供用中の橋梁に深刻な損傷が顕在化し、部材の破断や落橋などの事故が国内外で相次いで発生するようになった。国内では鋼トラス橋の木曾川大橋、本荘大橋でのトラス部材の破断（2007年）やPC箱桁橋の妙高大橋でのPC鋼材の破断事故（2009年）が発生した。海外では、イタリアのモランディ橋崩落事故（2018年）や台湾の南方澳跨港大橋崩落事故（2019年）が記憶に新しい。

以上のような社会インフラ施設の老朽化や技術者不足を背景に定期点検の更なる効率化・合理化に向け、国土交通省は2019年2月の定期点検要領の見直しに合わせて、参考資料として「新技術利用のガイドライン（案）」および「点検支援技術 性能カタログ（案）」を公表した。2020年6月には性能カタログ（案）を更新し、これまでの分類に加え、計測・モニタリング技術とデータ収集・通信技術の分類を追加公表した。

2. 導入促進機関について

近年、様々な分野において新技術が開発されており、その進歩は著しいものがある。さらに生産性の向上や働き方改革等の課題への対応として期待されている。しかしながら各基準類は性能規定化されているものの、求められている性能の確認方法が明示されていなかったり、従来技術との比較検討に手間がかかったりする等して新技術の活用が進んでいない状況にある。

このような状況の中、新技術の活用を推進するために、技術基準類の検討や技術の実証を行うための第三者機関が国土交通白書から公募された。橋梁調査会として、この公募に応募し第三者機関として選定された。2020年度は、①橋梁の点検支援技術、②軽量で耐久性に優れた歩道橋の床版技術、2つのテーマについて導入促進機関としての業務委託を受けた。

今後、導入促進機関として国土交通省と連携し新技術の活用に必要な技術基準類の検討や技術の実証等に取り込んでいく。

3. これまでの点検支援技術について

3.1 これまでの経緯

国土交通省では平成26年度から平成30年度までの5年間において、点検支援技術の開発・導入に係る現場検証等を実施し、画像計測技術について審議と評価を橋梁維持管理部会（部会長：藤野陽三教授）にて進めてきた。平成29年度には、NETIS（新技術システム）テーマ設定型により、うき・はく離を検出する技術の評価がなされた。その評価結果を受け、平成30年度には画像計測技術（橋梁とトンネル）と非破壊検査技術（橋梁）について、性能カタログが公表された。性能カタログとは、国が定めた標準項目に対する性能値を開発者に求め、開発者から提出されたものをカタログ形式でとりまとめたものである。

令和元年度には、国土交通省から新たに「計測・モニタリング技術」について、「ニーズ型（ニーズを提示し、技術を公募する）」と「シーズマッチング型（テーマを指定せず、要素技術をもとめるもの）」の2テーマについて公募が実施された。一方で、既に性能カタログとして公表されている画像計測技術と非破壊検査技術については、随時受付という形で新しい点検支援技術の募集を実施した。応募された技術は、標準試験体による試験を行い、応募技術の原理を確認するとともに、実構造物を対象に応募技術の動作確認を実施した。

令和2年6月には、技術検証（試験）を実施した応募技術を画像計測技術（橋梁・トンネル）、非破壊検査技術（橋梁・トンネル）、計測・モニタリング技術（橋梁・トンネル）、データ収集・通信技術に分け、性能カタログとして、公表された。点検支援技術の経緯を図1に示す。

3.2 点検支援技術の分類

公募技術は、計測原理や検出項目が多岐にわたっており、計測原理や検出項目を整理し、検出項目ごとに性能カタログを「画像計測技術」、「非破壊検査技術」、「計測・モニタリング技術」、「データ収集・通信技術」に分けた。

点検対象構造物の画像を撮影又は計測する技術、画像を処理し調書作成を支援する技術を画像計測技術とした。画像計測技術の多くは、画像からひびわれを検出する技術が主であり、腐食や斜材の変状を検出するような技術も一部ある。また、画像からひびわれを自動で検出し、評価区分を行うようなソフトウェア技術もある。

点検対象構造物の変状を外部から非破壊検査により計測する技術を非破壊検査技術とした。非破壊検査技術には、打音機構が装着されている技術を使用

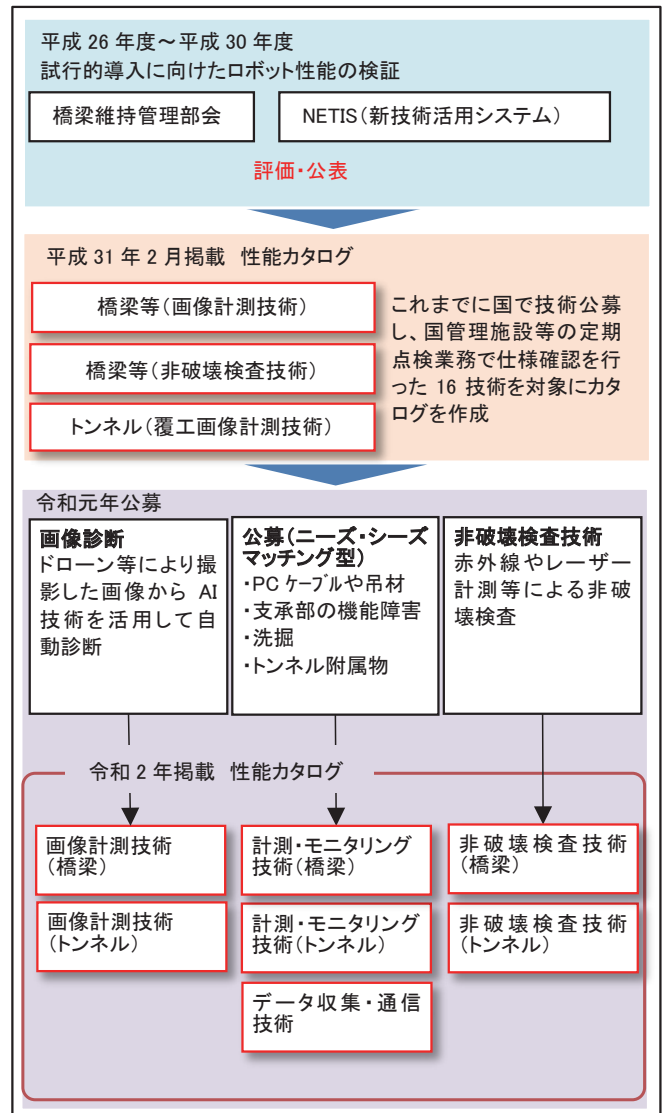


図-1 点検支援技術経緯



写真-1 画像計測技術（ドローン）

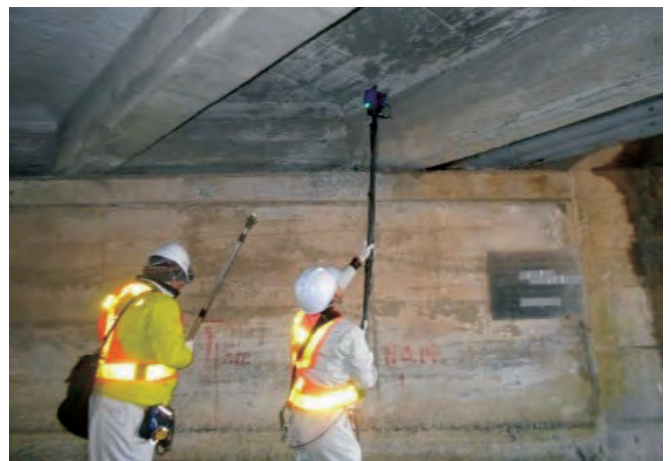


写真-2 非破壊検査技術（ポール打検器）

し、うきの検出が可能な新技術や電磁気により鋼部材の亀裂を検出するような技術がある。

点検対象構造物をセンシングまたはモニタリングする技術を計測・モニタリング技術とする。計測・モニタリング技術は、26損傷を検出するというよりは、計測原理（画像、加速度等）によって、検出項目（変位量や振動特性等）を算出し、部材や橋梁への損傷を把握するものである。計測・モニタリング技術の例としては、支承部にセンサーを設置または支承部が視認できる範囲にカメラ等を設置し、支承部の変位量を計測する技術や桁端部の異常を捉える技術、PC鋼材にセンサーを設置し、張力を測定する技術、振動特性による洗掘のモニタリング技術等がある。

データ収集・通信技術は、点検対象構造物に設置したセンサー等により計測したデータを収集し、通信技術によりデータを転送する技術とした。データ収集・通信技術に関しては、何かを計測するわけではなく、計測したデータを無線などで転送するような技術である。表1に各性能カタログの概要及び、公表となっている技術数を記載する。



写真-3 計測・モニタリング技術技術（振動数計測）



写真-4 データ収集・通信技術

表-1 性能カタログ概要

カタログ種類	検出項目	技術数
画像計測技術	点検対象構造物の画像を撮影又は計測する技術、画像を処理し調書作成を支援する技術	腐食・斜材の変状 2技術
		ひびわれ 22技術
非破壊検査技術	点検対象構造物の変状を外部から非破壊検査により計測する技術	腐食 1技術
		亀裂 1技術
		うき 7技術
		漏水・滞水 1技術
		塩化物イオン濃度 1技術
計測・モニタリング技術	点検対象構造物をセンシング又はモニタリングする技術	変位 支承部の機能障害 6技術
		疲労損傷度 1技術
		活荷重たわみ 2技技
		遊間の異常 1技術
		張力 PCケーブル・吊材 3技術
		反力 支承部の機能障害 1技術
		振動特性 洗掘 3技術
		剛性評価 4技術
電位 鉄筋腐食 1技術		
3次元座標 洗掘 3技術		
データ収集・通信技術	点検対象構造物に設置したセンサー等により計測したデータを収集し、通信技術によりデータを転送する技術	データ収集・通信 3技術

3.3. 橋梁調査会としての関わりについて

橋梁調査会としては、点検支援技術の技術検証（試験）の運営及び、技術検証の結果を踏まえ性能カタログの作成補助を行った。技術検証は、「フェーズ1」で開発者から提出されるカタログ素案を元に標準試験の方法を検討した。例えば、平成31年度から掲載されている画像計測技術については、昨年度同様の模擬ひびわれ供試体を使用し、最小ひびわれ幅及び計測精度の検証方法とした。計測・モニタリングのうち、PCケーブルのモニタリング技術については、引張試験機に検証用のひずみゲージを設置し、張力およびひずみを計測する。新技術と検証用の測定値の比較を行い、計測精度の検証方法とした。

「フェーズ2」では、検討した標準供試体や検証方法を用いた試験の現場運営を行い、その結果を基に性能カタログ（案）作成の補助を行った。

「フェーズ3」では、実橋梁において、現場運営を実施し、技術の動作確認を行った。

技術検証の流れを図2に示す。

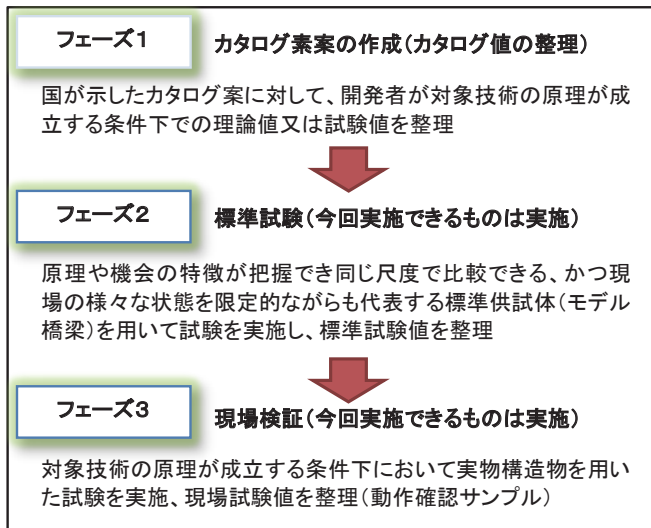


図-2 技術検証（試験）の流れ

4. 今後の展開

今年度（令和2年度）は、導入促進機関として、応募された新たな技術を対象に現場検証を踏まえ、性能カタログの公表へ向け動いている。

参考文献

- 1) 道路メンテナンス年報：令和2年9月 国土交通省
- 2) 新技術利用のガイドライン（案）：平成31年2月 国土交通省
- 3) 点検支援技術 性能カタログ（案）：令和2年6月時点 国土交通省



写真-6 フェーズ2 (PC鋼材張力測定)



写真-5 フェーズ2 (ひびわれ供試体)



写真-7 フェーズ3 (画像計測技術)

強風時の車両走行安全性検討のための トラス桁橋上の横風特性

東京理科大学 理工学部土木工学科（研究当時 横浜国立大学） 助教 金 惠英
横浜国立大学 都市イノベーション研究院 教授 勝地 弘

1. はじめに

海上橋や高架橋では横風の影響を受けやすいため、車両の強風時走行安全性が重要な問題になる。海上橋の多い本州四国連絡橋では、過去の調査研究に基づき、10分間平均風速が15m/s以上で通常の1/2程度の最高速度への速度規制と二輪車の通行止め、同25m/s以上で全面通行止めの運用が行われている^{1)~5)}。しかしながら、この規制は、橋梁上の車両に作用する空気力による安定解析によるものではなく、管理者が車両の走行状況を見ながら経験的に行っている状況にある。実際、2018年台風20号、21号では43件の横転事故（図1）が報告されており、安全性の確保が重要な課題となっている。一方で、海峡部橋梁の場合には代替路線が無いために、車両走行の安全性を確保した上で、出来る限り通行止め時間を少なくすることが望まれる。車両の横転や横滑りは、橋桁と車両の断面形状による流れの変化の相互作用によるものであるため、橋梁上の車両を対象に流れ場をシミュレーションする必要がある。

本研究では、日本の長大橋に多いトラス桁を対象に車両の横風安定性について検討を行う。トラス桁の場合には、CFD（数値流体解析）による流れ解析は十分な実績がなく精度確保に困難が予想されることから、本研究では、風洞実験を用いる。車両の種類は、以前の箱桁-車両の数値流体解析と車両安定解析⁷⁾の経験から、不安定になりやすい中型の空荷の

トラック（荷台のタイプ：バン）を対象とする。風洞実験により、主流方向のトラス桁上の9か所の横風特性を、車線ごとの車両表面の圧力計測から各車線での車両にかかる空気力を考察する。さらに、PIV可視化実験を行うことで、橋桁からの剥離したせん断流が車両に及ぼす状況などを確認する。本研究では、走行車線の違いによる橋梁上の横風特性を風洞実験により調査し、今後のより精緻な走行安全性検討の基礎資料を得ることを目的とした。

2. 実験概要

風洞実験は、本州四国連絡橋の瀬戸中央自動車道（瀬戸大橋）の最も四国よりに位置する南備讃瀬戸大橋の1/80模型（図2.1）を使用した。この橋は吊り橋であるが、メインケーブルと接続しているハンガーロープの部分を除いたトラス構造の部分再現した模型となっている。2本のケーブルによる3径間連続補剛トラス吊橋である。主横トラスの断面図は図2.2の通りである。幅員3.625mの4車線道路で片側車線の両脇にそれぞれグレーチングがあり、中央分離帯高さ0.8m、路肩防護策（高欄）高さ1.1mという構造となっている。

計測位置は、図2.2で示したようにグレーチング、車線1、車線2、中央分離帯、車線3、車線4、グレーチング、高欄の9か所にした。その際に、最も風上側の車線を車線1とし、そこから風下側に向かって2、3、4とした。

鉛直方向に関しては、道路面を0mとし、そこから



図-1 台風21号による「瀬戸大橋」横転事故⁶⁾

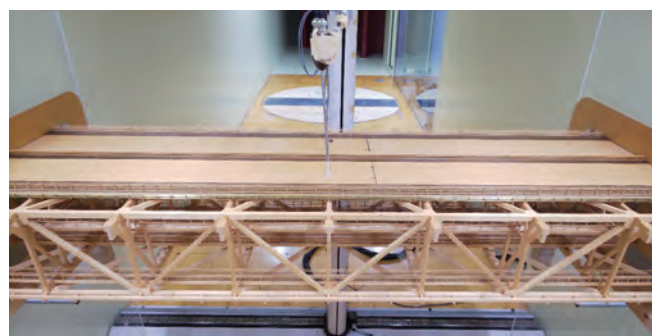


図-2.1 南備讃瀬戸大橋主横トラス

0.4m刻みに13か所5.2m地点まで計測した。これは車高が3.78mの中型空荷トラックを想定したためである。なお、高欄部やグレーチング部はその高さの分を考慮し、熱線風速計が模型と交錯しない点から5.2m地点まで計測を行った。また、この鉛直方向の計測を行うにあたり、トラス橋（本州四国連絡橋）は中央分離帯が高欄に比べ高い構造になっており、中央分離帯から高欄にかけて横断勾配2%のなだらかな傾斜となっているため、中央分離帯の道路面を原点として計算を行い、勾配を考慮した地点にて計測を行った。気流は、一様流および格子乱流 ($I_u = 11.5\%$ 、 $I_w = 9.6\%$) の2種類で、風速は約10m/sとした。

3. 実験結果

3.1 橋梁上の横風特性⁸⁾

一様流中のトラス桁橋面上の風速分布（接近流との風速比）を図3.1 (a) に、主流乱れ強さの分布を図3.1 (b) 示す。風速比1の境界が剥離せん断層に相当すると考えられるが、上流側の桁端、防護柵から剥離した流れが厚みを増しながら下流に流れていることがわかる。また、主流乱れ強さも剥離せん断層内では、10%以上となり、路面近くでは40%以上となっている。横転の起こり易い車高の大きいトラックでは、風上車線ではより強い風速が作用するが、風下車線では剥離せん断層内となり風速は50%程度に低減する。ただし、主流乱れ強さは、風下車線では30~50%とかなり大きくなり、変動風、変動空気が増大することがわかる。

3.2 橋梁上車両表面の風圧分布

図3.2のように圧力模型を備えた中型空荷トラック模型をトラス橋に置き、車両の圧力計測を行った。車両の模型は図3.3 (a) に示す実際に横転になったトラック (図1) を対象にした。圧力模型には図3.3 (b) のように30本のチューブが接続されている。圧力模型の側面は、風上側つまり正面側面をA面、上面をB面、風下側つまり向こう側面をC面、底面をD面とした。チューブはA面に8個、B面に7個、C面に8個、D面に7個つないであり、そこから車両にかかる圧力を計測する。模型のサイズは、縦32.5cm、横30cm、幅29.5cmであり、これはトラック模型の荷台の部分に設置するため積み荷と同じサイズに設計してある。

図3.4に各車線ごとの圧力係数分布を示す。車線1の風上側の風圧係数 C_{p1} はチューブ3で $C_p=1$ つまり淀み

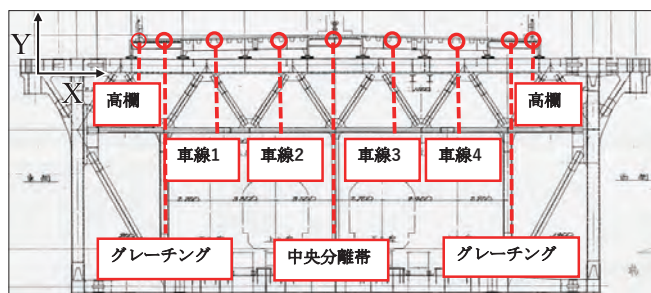
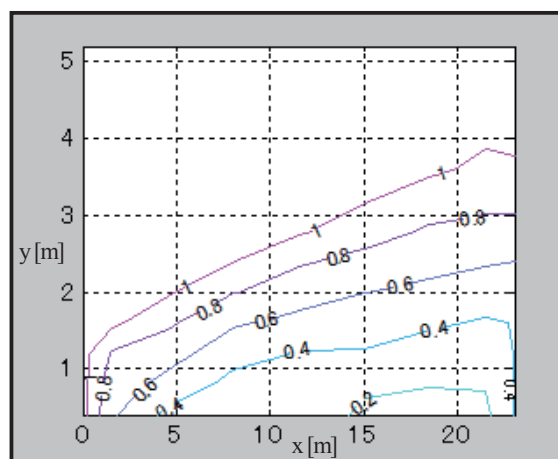
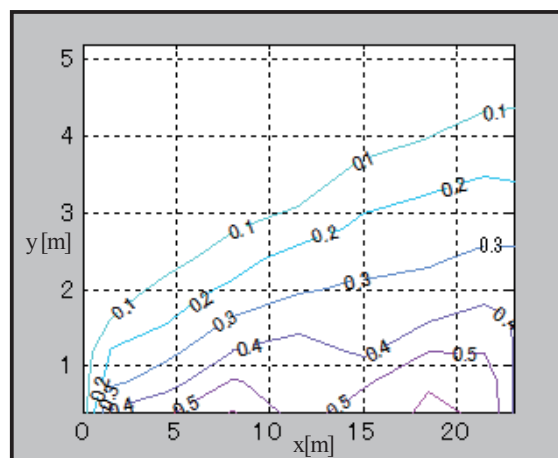


図-2.2 トラス橋断面



(a) 主流方向のトラス桁上の風速比分布



(b) 主流方向のトラス桁上の風速比分布

図-3.1 トラス桁上の横風特性

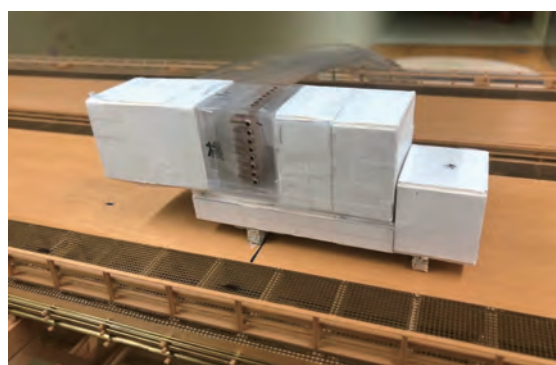
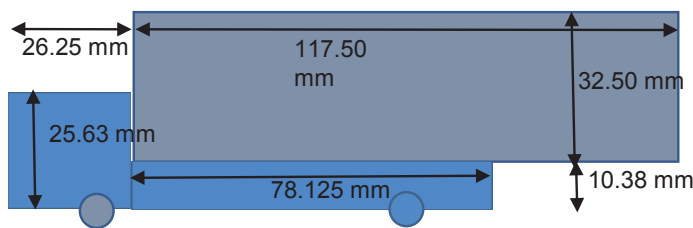
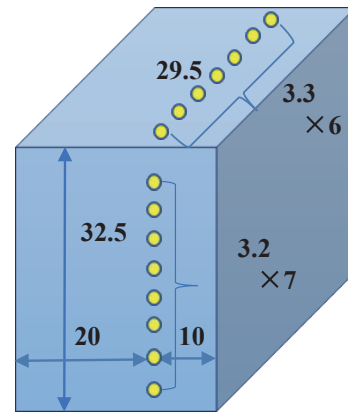


図-3.2 車両模型写真（前方面測定時）



(a) 車両モデル (1/80 scale)



(b) 圧力模型

図-3.3 車両モデルおよび圧力模型

点となっている。これは実寸トラック高さ2092 mmに相当する。真ん中やや上よりである。重心より高い位置にあたる。上面、風下側、底面は負圧であることから乱れの中であることがわかる。底面が最も負圧になっているが、これは底面高さが1180mmであり、高欄高さ1104mmとほぼ同じ高さであるため高欄の影響を大きく受けたことが原因である。Cpの標準偏差をみてもわかるように、風上側ではほとんど乱れなし、上面、風下側は負圧なので乱れが小さいのに対して底面では乱れが大きくなっていることがわかる。

車線2ではチューブ4~5が淀み点であると考えられるが、Cpの標準偏差よりチューブ5で標準偏差が0に近いのでチューブ5が淀み点であるとわかる。これは実寸にして高さ2604mmである。標準偏差は高欄の乱れの影響を受け、チューブ1~3で大きくなっている。車線1同様、上面、風下側は負圧なので乱れが小さいのに対して底面では乱れが大きくなっていることがわかる。

車線3では淀み点がないことがうかがえる。チューブ6~7で淀み点があることも考えられるが、淀み点では風速0m/sで安定するためCpの標準偏差は小さい。車線1,2を見てもわかる通り標準偏差は0.01程である。しかしチューブ6~7では標準偏差が0.07を超える値となっており、チューブ8ではさらに小さくなっていることも考えると淀み点がないと考察できる。標準偏差はチューブ1~5、実寸高さにして~2348mmで0.1以上と大きくなっている。上面では車線1,2とは大きく違う結果となっている。上面最も風上側のチューブ9が最大値で0.19となっており大きく乱れていることがわかる。風下側になるにつれ減少しているものの、チューブ15でも0.07と車線1,2の最大値を超える

値となっている。淀み点がなかったことから大きく乱れが発生していることがわかる。

車線4では車線4同様淀み点がない。車線3でなかったので妥当な結果である。標準偏差は風上側全点で0.1以上、上面は車線3と同じ変化であるが最大値が0.21 (チューブ9)、最小値が0.09と車線3に比べ大きい値となっている。

以上の結果を側面ごとにまとめると、風上側では車線3,4では淀み点がないがどの車線でもCpが唯一正圧で圧力値は高い値を示している。乱れは車線1ではないが、車線2以降は大きい値を示しており、車線2→4で最大値がチューブ1→2→5と高い点へと移動している。高欄、中央分離帯の剥離が拡大していることがわかる。

上面では負圧であるので乱れの中、1→4で負圧が少しずつ増していることがわかる。乱れは車線1,2では小さいが、車線3,4では大きくなっており、標準偏差の最大値をこの上面で計測している。

風下側では乱れの中で圧力は負圧であるが車線ごとの差はなく値も最も小さい。乱れも車線1,2は同じ挙動、車線3,4でやや大きくなるが値は小さい。底面は高欄、中央分離帯の影響で負圧が最大となっており、高欄と中央分離帯のすぐ後ろになり影響を受けやすい車線1,3でCp=-1と大きい値を示している。乱れは車線1→4で徐々に大きくなっており、車線2~4で同じ挙動を示しているが値自体は最も大きい車線4で0.08と上面の乱れと比べると小さい。全体的に、圧力値は車線1が最大で、圧力のみで考えると車線1が最も危険性が高い。車線2も正圧は同じだが負圧が若干小さい。しかし危険性が高いことは同じである。乱れは車線4が最も大きい。乱れの観点からすると車線4が最も危険であることがわかる。

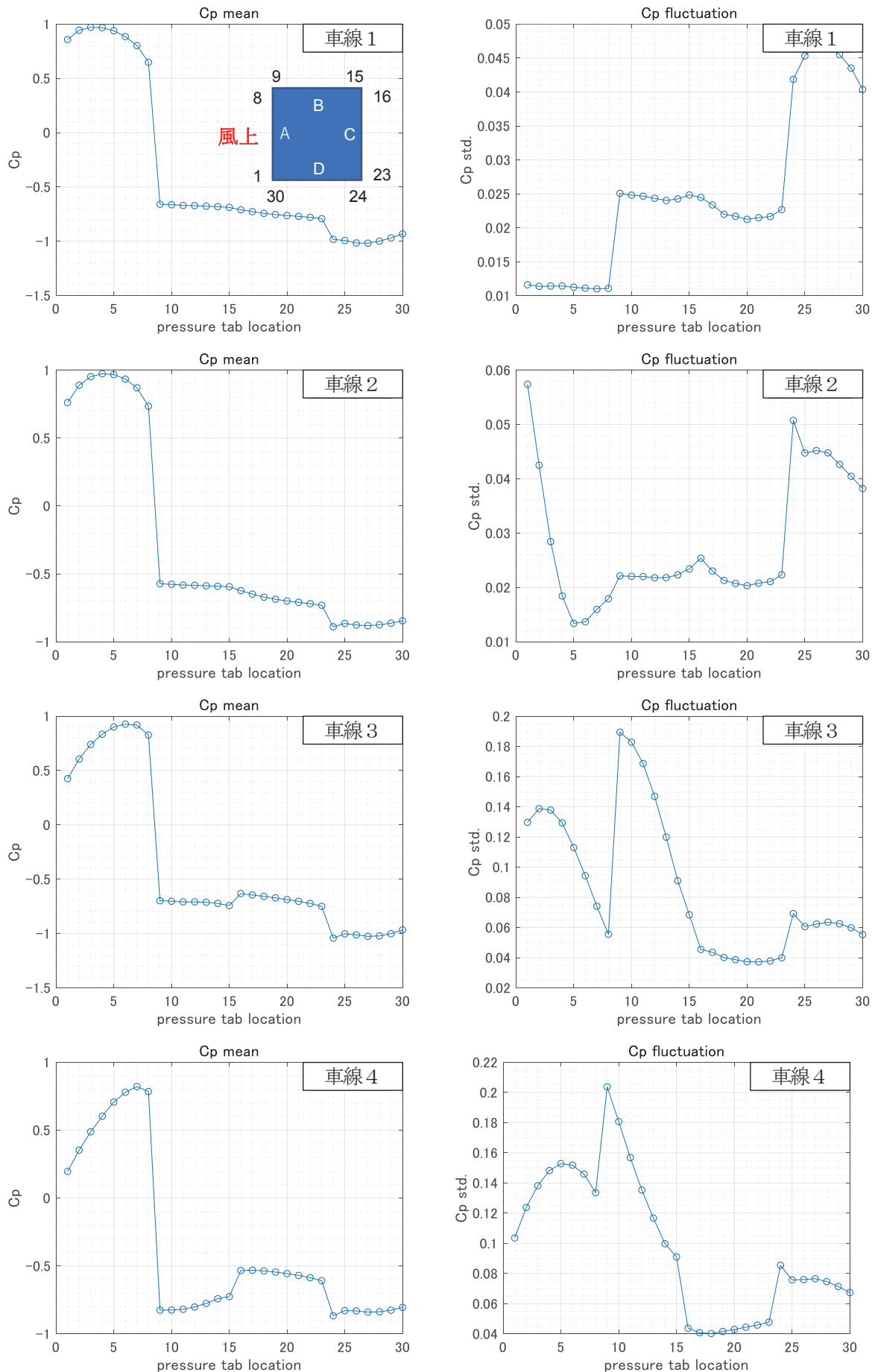


図-3.4 トラス橋の風圧係数Cp (左)・風圧係数の標準偏差 (右)

3.3 PIV可視化実験

車両模型は圧力模型を除いて作り直し、可視化でのレーザーに備えて黒塗りしたものを使用し、図3.5のようにPIV可視化実験を行った。

図3.6と3.7に各車線の流線図と速度分布を示す。どの車線でも高欄部から剥離したせん断流が車両の側面に衝突していることが確認できる。車線1では高欄からの流れが剥離するのが確認できるが、車両

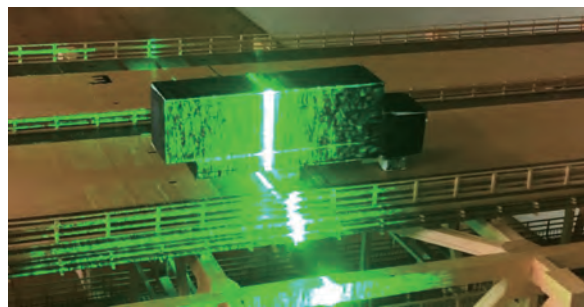
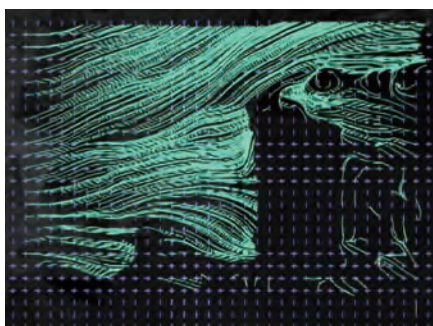
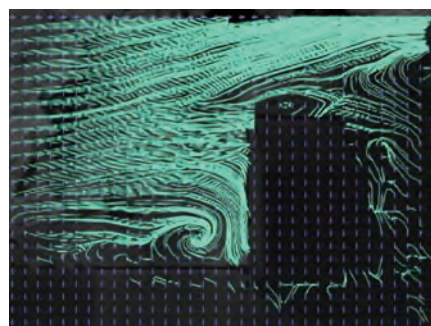


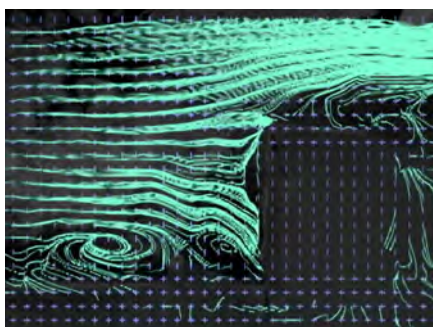
図-3.5 PIV車両模型



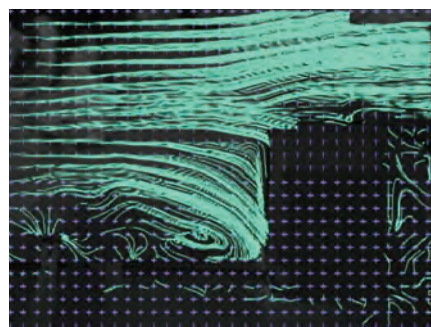
(a) 車線1



(b) 車線2

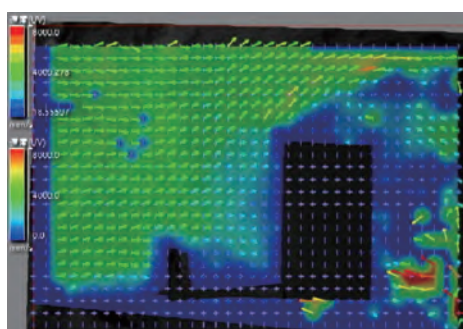


(c) 車線3

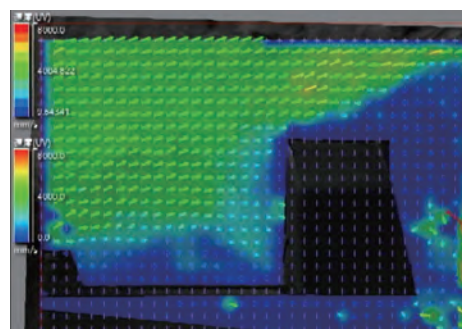


(d) 車線4

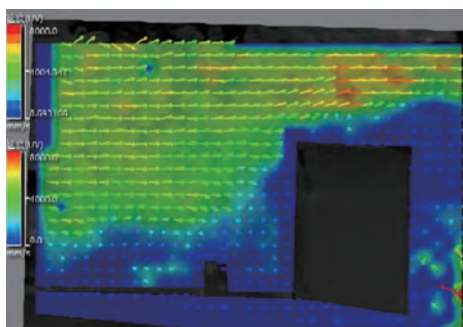
図-3.6 各車線ごとの流線図



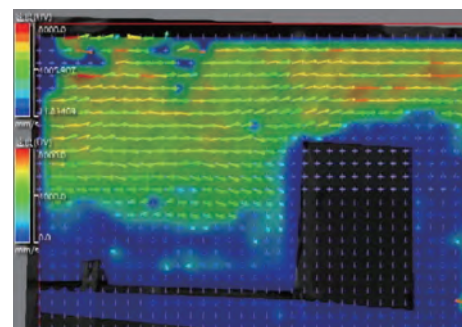
(a) 車線1



(b) 車線2



(c) 車線3



(d) 車線4

図-3.7 各車線ごとの速度分布とベクトル

の前方にそれほど乱れが生じていないことがわかる。車両上面では乱れが発生している。それに対して、車線2, 3, 4では、どちらの車線でも高欄部からの剥離せん断流の影響で、車両の前方が乱れているのが確認できる。この結果は、前章の車両表面圧力測定の結果と一致している。

4. まとめ

トラス桁橋を対象に、橋梁上の横風特性を風洞実験により調査した。得られた結論を以下に示す。

- 1) 主流方向のトラス桁上の風速特性を分析した結果、風上方の桁端部高欄から剥離したせん断流の影響で各車線ごとに異なる横風特性を持つのが確認できた。風上車線では横風風速が高く、風下車線では横風風速は低減するものの乱れ強さが増大する。
- 2) 橋梁上の各車線に車両を置き、車両表面圧力を計測し、車両表面の圧力分布から車両にかかる空気力および変動空気力に関して分析を行った。その結果、風上車線では空気力の作用が大きい反面、風下車線では変動空気力の作用が大きくなっている。
- 3) PIV可視化実験を通して、橋梁上の車両まわりの流れ場を観察した。全車線で車両まわりの流れは、風上側の高欄部からの剥離したせん断流の影響を強く受けていることが分かった。車両圧力測定実験と同様に風下側の車線位置で車両前方に乱れが増しているのが確認できた。

以上のことから、横風に対する車両の安全性を検討する際には、接近流条件の考慮が重要である。また、橋梁上の車両にかかる空気力を検討する際には、橋梁 - 車両の複合モデル周りの流れ場を再現する必要がある。

謝辞

本研究の一部は、一般財団法人橋梁調査会の橋梁技術に関する研究開発助成の補助を受けて実施したものです。また、風洞実験とデータのまとめにおいて、当時横浜国立大学の4年生松岡弘真くんにご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 楠原栄樹：自動車走行と強風規制（長大橋梁の事例）、日本風工学会誌、第40巻、第1号（通号第142号）、pp.4-9、2015.1.
- 2) 鈴木 幹啓：本州四国連絡橋の強風に対する交通安全対策、高速道路と自動車、第38巻、第10号、pp.27-30、1995.10.
- 3) 河島恒、原崎郁夫：本州四国連絡橋と横風、自動車技術、Vol.32, No.4, pp.318-327, 1978.
- 4) 榎場重正、小泉徹、長久太郎：横風・突風が高速走行自動車に及ぼす影響について、土木学会論文報告書、第270号、pp.109-119、1978.2.
- 5) 田島照義：海上橋梁における横風による自動車走行性への影響、本四技報、Vol 18, No.71, pp. 9-18, 1994.7.
- 6) JB本四高速：JB本四高速、本州四国連絡道路の車両横転事例
- 7) 武藤秀人、金恵英、藤野陽三ほか：東京湾アクアライン橋梁部における車両の強風時安定性に関する数値シミュレーション、第74回年次学術講演会講演概要集、I-287、2019.
- 8) 勝地 弘、金恵英ほか：車両走行安全性検討のためのトラス桁と箱桁橋梁上の横風特性の計測、第75回年次学術講演会講演概要集、I-238、2020.

橋梁点検におけるAI活用に向けて

筑波大学 システム情報系 准教授 西尾 真由子

1. はじめに

わが国では、国内にある約70万の全橋梁（橋長2m以上）で、少なくとも5年に1度の頻度で基本的に目視による点検を実施し、その結果に基づいて対策を講じながら運用することになっている。2014年に国道橋梁に対する「橋梁定期点検要領¹⁾」一般道橋梁への技術的助言である「道路橋定期点検要領²⁾」が設定されたが、これらの要領では、まず橋梁の全ての部材について近接目視、またはそれと同等の手段で損傷度の診断を行うこととされている。そしてその診断結果に基づいて、補修・補強の実施、定期／常時監視、通行規制など必要な対策を講ずる。また、部材の損傷度診断結果を踏まえて橋梁ごとに総合的な健全性を診断し、道路管理者が保有する橋梁全体の状況を把握することがもめられている。

図-1には、この橋梁点検の一連の流れを「橋梁定期点検要領¹⁾」に基づいてまとめた。国道以外の道路橋においても、概ねこれと同様の流れでの点検体制が敷かれている。この流れの中では数多くの「判定」「診断」が必要となることがわかるが、近接目視による部材の状態把握・損傷度診断が、その後の対応・対策の決定や橋梁健全度の評価に重要な役割を担っている。しかし、点検者が実際に現場に赴き適宜足場や作業車などを用いて近接目視を行うのは財政的な負担が大きい。今後は適切に損傷状態を判断できる技術者の不足も考えられ、70万もの橋梁でこの体制を継続していくことは難しいと考える。一方、近年ではビッグデータやAI・機械学習に関わる技術が社会的に注目されており、さまざまな分野でその活用を考えられる状況になっている。筆者らは、持続可能な橋梁点検体制の構築にもこのAI技術を活用すべきと考えており、検討を続けている。2019年には定期点検要領の改訂が行われ^{3),4)}、部材の状態把握や橋梁健全度の評価において、新技術の導入も含めて柔軟な判断方法の適用が可能となった。適切などころで、AI・機械学習の活用を検討することには意義があると考えている。

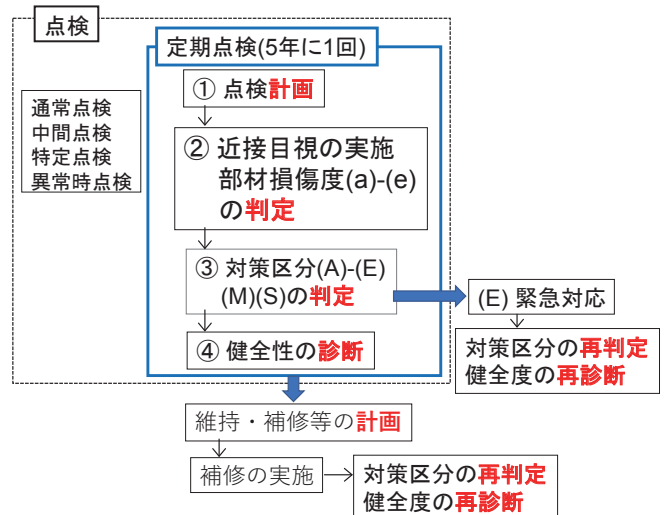


図-1 橋梁定期点検の流れにおける「判断」

2. AI・機械学習について

「AI」はArtificial Intelligence すなわち「人工知能」であるが、近年話題となっているAIは、特に機械学習の一つである「深層学習（ディープラーニング）」を指している。大量のデータ「ビッグデータ」をコンピュータで学習し、目的とする出力を「推論・予測・判断」するシステムを構築することを指していると、筆者は理解している。その留意点は、確率統計における回帰問題を確認することで大まかには理解することができるので、本研究で取り組んでいる橋梁点検でのAI活用を紹介するにあたり、特に関わる事項を数点ここに述べておくことにする。

「機械学習」は、知りたいことを「出力」その寄与因子を含むデータを「入力」として、その入出力関係を構築することである。ただし、例えばもし物理現象の応答を出力とするならば、因子となる入力について理論構築や実験・数値解析などから入出力関係を明らかにするが、機械学習で得る入出力関係には物理的根拠は全くなく、あくまで確率的な関係である。そして、その入出力関係を定めるのがデータである。例えば図-2 (a) のように、入力 x に対する出力 y についてデータ点がいくつか得られているとき、多項式など（すなわち「モデル」）での回帰

式 $y=f(x)$ を作ることであり、各項の係数をデータから求めることが「学習」である。最小二乗法などの確率的推論による学習方法で、基本的にデータとモデル代入値の残差に関する目的関数を最小とする回帰式を得る。得られる回帰式の良し悪しは、図-2 (b) に示すように、データ点の数と x 座標の配置（偏りや範囲）、そして計測誤差による y 方向のばらつき、すなわちデータの量と質によって決まる。機械学習は基本的に、データ範囲に対して内挿はできるが外挿はできないので、対象としたい入力 x の範囲で偏りなくデータをそろえることが必要となる。また、例にあげている多項式での回帰で次数に相当するモデルの選定も、回帰式の良し悪しに影響する。例えば図-2 (c) に示すように、高次多項式を用いることでデータへの回帰精度が高い式が得られても、新たなデータに対しては精度が得られない場合がある。これが「過学習」と呼ばれる状態で「汎化性能」の低いモデルとなっている。

意義のあるAIを構築するには、出力である「何が知りたいか」を明確にしたうえで、それに寄与する因子を偏りなく捉えているデータをできる限り多くの量で用意し、適切なモデルと学習方法がある程度の試行錯誤を経て選定することが必要である。近年、主にAIとして扱われる「深層学習」は、このモデル構造を複雑にして、画像など複雑でデータ量の大きい情報から入出力関係を構築することができる。ただし、モデル構造は多項式のように記述できるほど単純ではないために、構築された入出力関係において入力から出力を導く過程を理解することが難しく、基本的にはブラックボックスであることも確かである。

3. AIが担える橋梁点検での判断

目的とする出力に寄与する因子が入力データで捉えられていなければ、機械学習で入出力関係は構築できない。しかし、橋梁点検における出力である「判断」は、部材損傷度の診断や橋梁健全性の判断というように、明確な物理量や損傷の有無が出力ではなく、人が設定した判定基準のもとでの判定区分である。例えば橋梁定期点検要領²⁾では、図-1に示す部材の状態把握・損傷度診断において、定められた部材ごと、損傷種類ごとに損傷区分を判定することがもとめられている。その「付録-1²⁾」には例えば、鋼部材で「腐食」「き裂」コンクリート部材で「ひ

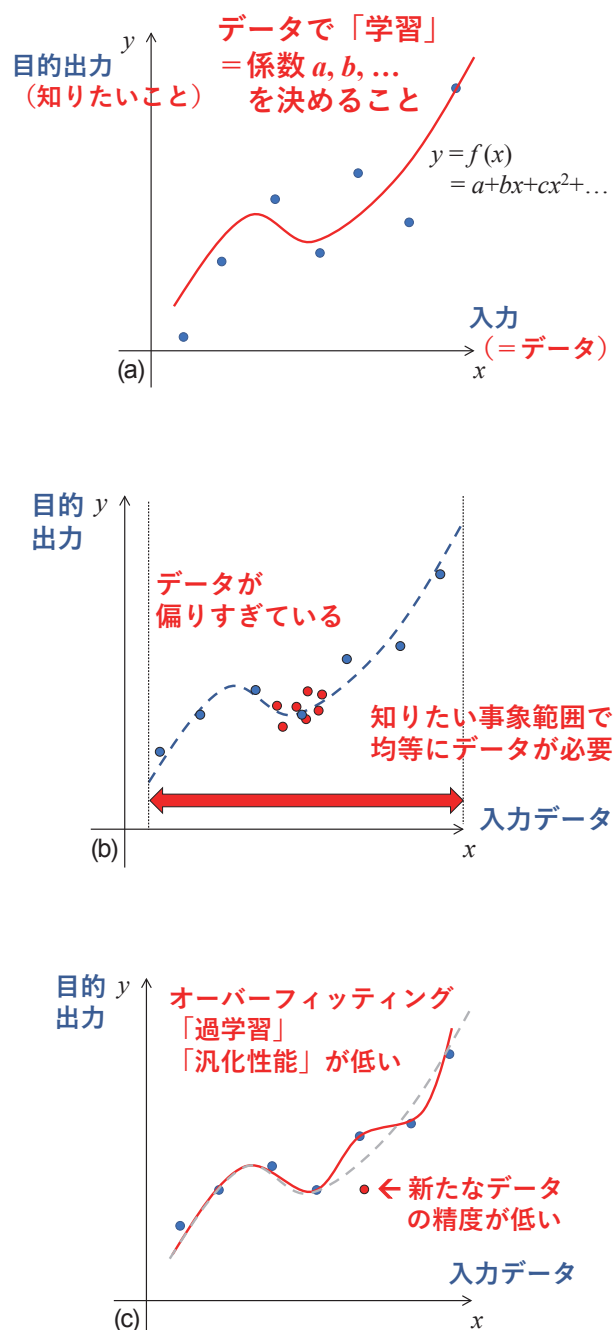


図-2 回帰式構築でみる機械学習の大まかなポイント

びわれ」「剥離・鉄筋露出」というように、各部材と損傷種類について区分「a-e」の判定基準が示されている。また参考資料として「橋梁損傷事例集^{5), 6)}」が国土技術政策総合研究所から発行されており、橋梁の損傷事例とその損傷区分判定が記されている。点検技術者はこの点検要領と参考資料等を踏まえ、現場での近接目視で損傷区分「a-e」を判定して記録する。地方公共団体が管理する橋梁の定期点検でも、国道と同様に近接目視で部材ごとの損傷度判定を実施しているところが多くある。

著者らは、このように「人が設定した基準に基づく人による判断を機械学習で代替できるか」という

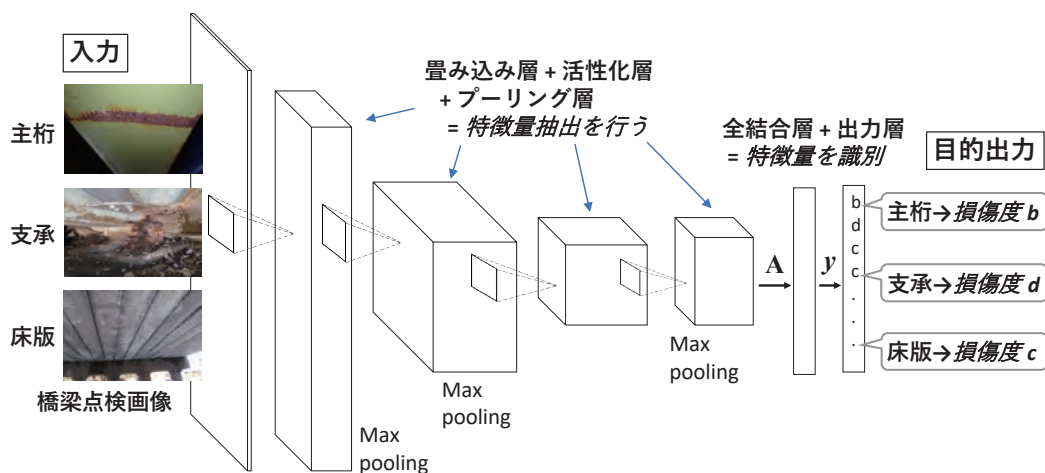


図-3 部材損傷度判定畳み込みニューラルネットワーク(CNN)

点に着目して、橋梁点検におけるAI活用を検討している。特に上に述べた近接目視による部材の状態把握を対象として、図-3に示すような、損傷部を含む部材画像を入力、部材損傷度「a-e」を出力とする深層学習ネットワークの構築に取り組んでいる。部材損傷度の判定は、現場での近接目視という特にコストの高い作業に基づくこと、また図-1の流れの中で上流の判断であり、その後の意思決定に関わることから、AI・機械学習技術の活用ができれば有意義である。

4. 部材損傷度判定深層学習ネットワークの構築

著者らは始めに、地方公共団体である横浜市の橋梁定期点検データを用いて、記録されている部材画像からその損傷度を判定する深層学習ネットワークの構築に取り組んだ⁷⁾。地方公共団体の中でも政令指定都市である横浜市は、一部の国道も含む1,712橋もの橋梁を管理している（H30.4.1時点）。定期点検への取組みは比較的早く、2004年に横浜市橋梁点検要領を設定し、この年から原則5年に1回の定期点検を実施してきている。検証で用いたのは「横浜市橋梁点検要領・第5版⁸⁾」に沿って実施された最近の点検データである。ここでは、各橋梁で基本的に全部材に対して近接目視を実施し、「損傷なし、損傷度(a), …, (e)」の6区分で、部材損傷度が判定されている。この区分設定は、橋梁定期点検要領²⁾の損傷度区分を参考としつつ損傷の有無を明確にするため、全く損傷の認められない場合に「損傷なし」、最も軽微な損傷を「(a)判定」、そして最も損傷が著しく安全確保の支障となる恐れがある場合に「(e)判定」とすることが定められている。損傷のない部材を(a)判

定に含めるか分けるかの違いで、損傷度(b) - (e)の区分は橋梁定期点検要領²⁾と同様である。点検調査は橋梁単位または径間単位に数種の様式で作成され、その様式の一つである損傷写真台帳には部材画像、部材名、損傷の種類、そして損傷度が記録されている。そして、この各部材に判定された損傷度に応じて詳細点検や補修・補強の実施を決定するフローを定めており、また部材損傷度をスコア化して橋梁健全性を指標化し記録している。検証では、点検台帳の中で損傷画像のデータ数が多く、橋梁の耐荷性能にも影響の大きい「主桁」「床版」そして「支承」を対象として、損傷度判定深層学習ネットワークを構築した。

画像に対する深層学習ネットワークのモデルとして多用されているのが「畳み込みニューラルネットワークConvolutional Neural Network（以下CNN）」である。CNNは、図-3に示すように、入力画像データを複数の演算の層に通して目的出力を得る。基本的な層構成は「畳み込み層」「活性化層」「プーリング層」「全結合層」からなり、これが第2項の回帰問題で例示した多項式にあたる。入力画像は数値化して、幅と高さ（行列）およびRGBカラーモデルの3次元データとして取り扱う。「畳み込み層」では、入力データに対して重みのフィルタ行列を一定の間隔で移動させながら適用し、それぞれの場所でフィルタの要素と入力の対応する要素を乗算してその和を格納する畳み込み演算と呼ばれる処理を行う。次に「活性化層」で入力信号の総和を出力信号に変換する活性化関数を適用する。「プーリング層」は、縦方向と横方向の空間を小さくするプーリング演算を行う層である。画像認識では主に「Maxプーリング」が使われる。

この3つの層は特徴抽出部と言われ、目的の判断に關与する画像の特徴を捉えているはずである。第2項で例示した多項式モデルでは、1次項、2次項、交互作用項というように、各因子の出力への影響の仕方が表されている点が、この特徴量抽出にあたる。「全結合層」では、画像データを1次元に展開し重み付き結合を計算する。適切なCNNは問題ごとに異なり、その構築では入出力関係が既知である学習データを用いて、重みなどのパラメータを推定する。誤差逆伝播法はCNN構築で多用される学習方法の一つで、出力層における誤差に関する損失関数を最小化するようにパラメータを推定する。

次に図-4に、本検証で用いた横浜市の橋梁定期点検における部材画像データの構成を示す。各部材で損傷度ごとにデータ数をまとめると、損傷度(b) - (c)にデータ数が偏っていることがわかる。これは管理橋梁の損傷状況を示しているともいえるが、一方で、損傷写真台帳の目的が発見した損傷の記録にあるため「損傷無し」「損傷度(a)」の記載は少なくなることで、そして「損傷度(e)」はそれに至る前に補修など対策を実施するため、数が少なくなることも偏りの原因と考えられる。これはデータ不均衡の問題とも呼ばれ、第2項でも述べた通り、入出力関係を適切に表すモデルすなわちCNNを構築できなくなる。そこで、この6区分「損傷なし、損傷度(a)、…、(e)」をそのまま出力するものとせず、図-4中に示すように「損傷なし、(a)、(b)」で「損傷度判定I」、「損傷度(c) - (e)」で「損傷度判定II」と、2区分で分類を行うものとした。横浜市の橋梁定期点検において、詳細点検の実施の有無が部材損傷度(b)と(c)で分かれることから、この(b)と(c)で判定区分を分けることは妥当と考えた。これによって、各分類区分でのデータ数を増やし、特に「主桁」と「床版」では、比較的均等に構成することができた。しかしまだデータ数は少ないため、元画像を回転・反転させてデータ数を増やす「データ拡張」を行った。そして、データが少ないほうの判定区分の数に合わせて、もう一方の区分のデータを無作為抽出で減らし、2つの分類区分でのデータ数を等しくした。なお、損傷写真台帳から取り出した元の画像データは画像ごとにサイズが異なっていたため、はじめに80×80 pixelに統一する処理も必要であった。このように、深層学習ネットワークを構築する前にデータの量や







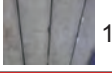
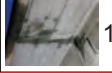







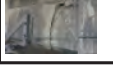
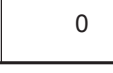
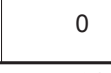
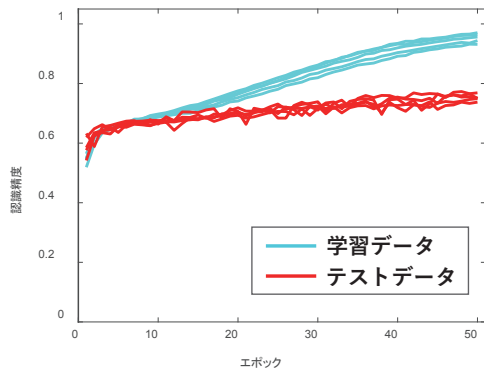
部材	主桁	床版	支承部
損傷なし	 24	 37	 161
a	 31	 136	 1
b	 1421	 1686	 35
c	 1062	 1761	 1032
d	 317	 305	 129
e	 5	 0	 0

図-4 画像データ数の分布とCNN判定区分

質に関する検討と、それに対応する適切な前処理が必要であり、適切な性能を有するAIを得るにはここが最も重要かつ手間のかかるプロセスともいえる。

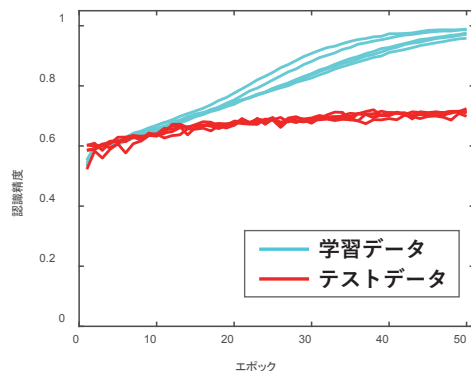
CNNの構築や検証はプログラム言語Pythonによって実施し、パラメータの推定計算には深層学習フレームワークの一つであるChainerを用いた。主桁と床版いずれの部材損傷度判定CNNも8層の畳み込み層と3層の全結合層で構成し、活性化関数はCNNで一般的に適用されるReLU関数、プーリング演算はMaxプーリング、出力層の活性化関数はソフトマックス関数とした。パラメータ推定での損失関数には交差エントロピー誤差を用いた。このように、画像分類のCNN構成にはある程度の定型があるが、問題に合わせていくつか選択が必要となる箇所がある。また正規化の有無や学習率の設定など、試行錯誤が必要な部分もある。

各部材のデータは4:1に分け、それぞれ学習データ、テストデータとして、学習データを用いてCNNを構築した。図-5と図-6に、主桁と床版それぞれについて構築したCNNの認識精度プロットと混同行列を示す。認識精度プロットでは、学習過程の推移と精度を検証できる。横軸のエポックは、用意した学習データを全て使って学習させる回数であり、エポック数が大きくなるにつれてその学習の繰り返し回数が増えてCNNの精度が上がっていく。いずれのCNNでも50エポック程度で学習精度が1.0すなわち100%に到達し、テストデータで70%程度の精度が得られた。混同行列は機械学習の性能を調べる際に用いるもので、図中に示すように4つの判定結果のパターンを True Positive (以下, TP), False Positive (以下, FP),



		目視点検	
		判定分類 I 損傷なし(a)(b)	判定分類 II 損傷度(c)-(e)
CNN	判定分類 I 損傷なし(a)(b)	TP= 1232	FP= 398
	判定分類 II 損傷度(c)-(e)	FN= 429	TN= 1263

図-5 「主桁」の精度プロット(左)と混同行列(右)



		目視点検	
		判定分類 I 損傷なし(a)(b)	判定分類 II 損傷度(c)-(e)
CNN	判定分類 I 損傷なし(a)(b)	TP= 1535	FP= 588
	判定分類 II 損傷度(c)-(e)	FN= 696	TN= 1643

図-6 「床版」の精度プロット(左)と混同行列(右)

False Negative (以下, FN), True Negative (以下, TN) として, テストデータで各判定を出力した画像数を示した. 全体の正答率は全データ数に対するTPとTNの比率いわゆる精度であり, 主桁で75%, 床版で71%となった. さらに, 実際は損傷があるのに損傷と捉えられていない, つまり過小評価の度合いを調べる指標が適合率 (Precision) で, TP+FPに対するTPの比率である. 構築したCNNでは主桁で76%, 床版で72%となり, いずれの部材でもCNNで「判定I」となった画像の4分の1程度が過小評価されたことになる.

5. AIの判定根拠と受容

第2項でも述べた通り部材損傷度判定は, 点検要領すなわち「人」が設定した判断基準に沿って, 技術者すなわち「人」が目視で判断する. この場合には, 例えば「ある部材が損傷度cと判定されたときに, 本当にcなのか」といった問いは成立しない. 精度などの指標で評価するCNNの機械学習としての「正しさ」と共に, この判断に関わる人, すなわち橋梁管理者や点検業務を実施する技術者などの「正しそう」という認識が得られて初めて, 構築したCNNは受容され, 使うことができるであろう. さらにこの受容には,

判定根拠の受容も含まれると考える. 機械学習はデータに示されている情報しか入力として扱えないため, 出力に寄与する因子に, 部材の重要度や周辺環境, 損傷への構造性能への影響度といった, 技術者が目視点検時に活用しているはずの専門的知識が直接入っていない. それならば少なくとも, 点検に関わる技術者からの「上手く判断できている」という認識が必要である. 先述したようにCNNは一般的に, 入力から出力を導く過程を理解することが難しく, その判定の根拠はブラックボックスである. しかし近年は, その判断根拠を調べる手法である「可視化技術」が活発に研究されており, 構築した部材損傷度判定CNNにもその1つを適用して, 判定根拠を検証し考察した⁹⁾.

著者らが適用した可視化技術は, 比較的近年に登場したGrad-CAM¹⁰⁾ という手法である. Grad-CAMでは, 入力画像に対して出力された各判定区分に関する勾配から, 最下層である畳み込み層の特徴抽出マップが判定結果に与える影響度を計算する. そして判定結果に正の影響を与えている画像ピクセルのみ活性化関数で値を出力し, 各入力画像のピクセル間での相対的な影響度を「ヒートマップ」と呼ばれるコ

ンター図で出力する。

著者らは、プログラムコード共有サイトのGitHubを利用し、公開されていたGrad-CAMのPythonコードをダウンロードして、元の文献¹⁰⁾で定式化を確認しながら、構築した部材損傷度判定CNNに実装した。さらに、人の判断根拠との比較を行うため、各画像に対してマーキング作業を行った。ここでは、土木工学を専攻する大学院生複数名により、部材損傷度判定に寄与する画像領域を手動で塗りつぶす作業を実施した。例えば、点検台帳にRC床版の「ひび割れ」に対する損傷度が判定されている画像に対して、その判断に寄与していると思われるひび割れ部を塗りつぶした。

得られたGrad-CAMヒートマップとマーキング画像を、元画像と共に並べたのが図-7である。ヒートマップは、赤に近いほど判定への影響度が大きかった箇所、逆に青となるほど小さい。図-7 (a) は点検での損傷度 (d) であった鋼主桁の腐食である。画像中央の錆が固まった箇所が該当する損傷部であり、中央の画像でも赤くマーキングしてある。一番右のヒートマップをみると、最も濃い赤が損傷部を示しており、CNNがこの部分を適切に重要視して損傷度の判定を出力したことを示している。図-7 (b) は、点検で鋼主桁の腐食として損傷度 (b) が判定され、台帳でそれに添付されていた画像である。かなり遠望の画像であり、拡大すればかろうじて損傷部がマーキング画像のように捉えられる。一方、CNNでは主桁ではなく最も手前のRC床版を捉えて判定を出力している。一方、図-7 (c) は鋼主桁とRC床版が写っている画像であるが、台帳に記録されていたのは鋼主桁の腐食で「損傷度 (c)」である。しかし床版にはひび割れがみられ、CNNでも床版の領域を重要視して判定を行っている。これらはいずれも、判定結果はTPとTFに分類されており、CNNの判定としては成功している。しかしこのように可視化すると、CNNの判定結果は見るべき部材と損傷箇所をみて判断されたものではないことがわかり、CNNの受容が難しくなる。この2つの画像をみると、いずれもグレースケールであるコンクリート部を重要視する傾向にあると考えられる。

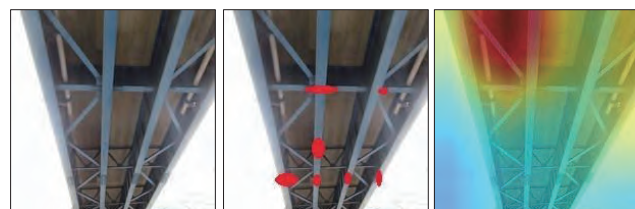
そして図-7 (d) は、夜間に撮影された鋼主桁画像である。表面に軽微な塗膜の劣化がみられ、点検で「損傷度 (b)」と判断されている。一方でCNNは、損傷度の高い区分である「損傷度判定II」を出力してFNとなっている。CNNをみると、白く塗装されている主桁の領域を捉えているものの、明暗差の大きいエッジとその

少し外側の黒い領域をより重要視して判定していることがわかる。夜間に照明やフラッシュをたいて撮影した画像であるため、主桁が浮き上がるような画像となっており、エッジが非常に際立っている。このような画像では画素値が急峻な変化を示すことになり、本検証で構築したCNNはこのような箇所を特徴として抽出していると考えられる。

損傷部の見た目は、周囲との色や質感の変化で捉えられることは納得でき、図-7 (d) のように画素値の急峻な変化部をCNNが捉えていることは受容できる。また、図-7 (a) の腐食のようにいくつかの損傷部では変状によって黒色つまり輝度が低くなる傾向にあり、また図-7 (b) や (c) でコンクリート部材を重要視していたことから、輝度の低い領域を捉えていることも考えられる。ただし、損傷を有する部材が画



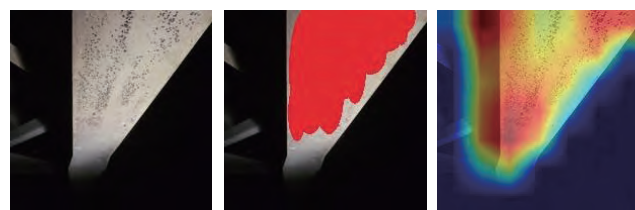
(a) 点検損傷度 (d) ⇔ CNN 損傷度 II (TN)



(b) 点検損傷度 (b) ⇔ CNN 損傷度 I (TP)



(c) 点検損傷度 (c) ⇔ CNN 損傷度 II (TN)



(d) 点検損傷度 (b) ⇔ CNN 損傷度 II (FN)

図-7 「主桁」損傷度判定での人とCNNの判断根拠の比較 (左：元画像、中央：マーキング、右：Grad-CAM)

像全体のある程度の領域を占めていなければ、その損傷領域を捉えられないことも考察される。遠望の画像や1つの画像に複数の部材が写り込む画像に対してとくに受容できる判定結果が得られていないが、用いたデータは本来、点検台帳で記録保存しておくための画像である。このGrad-CAMのような可視化技術を用いながら部材損傷度判定に適した画像データ取得を検討し、CNNを更新していくことが有効と考えている。

6. おわりに

本稿では、著者らが実施してきている橋梁定期点検へのAI・機械学習活用への検討の試みを紹介した。これまでに蓄積された橋梁定期点検でのデータを用いても、70%を超える精度で部材損傷度判定が可能なCNNを構築できた。その上でGrad-CAMによる可視化を行うことでCNNの判定根拠を考察することができ、そこからCNNへの受容を構築していくことの有効性を認識した。今後は、高い性能と可視化での受容が得られた画像データを学習させるといった方法で、AI活用に適した画像データ構成、取得と蓄積、処理方法を検討していくことにしている。また、画像ではとらえきれない技術者の判断根拠を考慮できる可能性があるネットワーク構造や学習方法もあり、適用を試みたいと考えている。ただし、このような段階になってくると、橋梁の運用、維持管理、点検に関わる技術者との協働がなければ進展はしないであろう。データの整備だけでなく、可視化技術も活用してCNNの性能と判断根拠を検証し、フィードバックして更新していく作業が必須である。このことは、これまでの技術者自身の判断根拠の解明と伝承に向けた試みにもつながる。

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局: 橋梁定期点検要領, 2014.
- 2) 国土交通省 道路局: 道路橋定期点検要領, 2014.
- 3) 国土交通省 道路局: 道路橋定期点検要領, 2019.
- 4) 国土交通省 道路局: 橋梁定期点検要領, 2019.
- 5) 国土技術政策総合研究所: 道路橋の定期点検に関する参考資料 (2013年版) 橋梁損傷事例写真集, 国総研資料 第748号, 2013.
- 6) 国土技術政策総合研究所: 道路橋の定期点検に関する参考資料 (2013年版) 橋梁損傷事例写真集, 国総研資料 第748号, 2013.
- 7) 鈴木達也, 西尾真由子: 橋梁定期点検における部材損傷度判定への深層学習の適用に関する検討, 土木学会論文集F3, Vol. 75, No. 1, pp. 48-59, 2019.
- 8) 横浜市道路局建設部橋梁課: 横浜市橋梁点検要領 (案), 2015.
- 9) 西尾真由子, 栗栖雄一: 橋梁点検部材損傷度判定CNNの可視化による判断根拠の理解と活用, AI・データサイエンスシンポジウム論文, 2020. (採択決定)
- 10) Selvaraju, Ramprasaath R., et al.: Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. Proc. IEEE International Conference on Computer Vision. pp. 618-626, 2017.

設計の想定を超える地震作用に対する 橋梁全体系の崩壊挙動の解析

九州産業大学 建築都市工学部 都市デザイン工学科 准教授 奥村 徹

1. まえがき

新型コロナウイルス感染症の世界的な流行や令和2年7月豪雨による河川の氾濫などの想定外の災害を経験した。これらを教訓として、政治、経済、医療、産業等の各分野において想定外の事象が発生した際にも既存のシステムの壊滅的な被害を防止するための仕組みの導入や対策を講ずることの重要性があらためて認識された。近い将来に大規模地震の発生が予想されている我が国においては、耐震分野もその例外ではない。

鋼橋の耐震の分野においては、あらかじめ規定した設計用の地震動に対して、構造安全性や地震後の使用性・修復性等の耐震性能を確保するように設計が行われているが、その前提が崩れた場合、すなわち設計の想定を超える規模の地震動が作用した場合に対しては、構造物が崩壊に至るような致命的な被害を防止するための十分な保証があるとは言い難い。その理由のひとつとして、鋼構造物が崩壊に至る過程では複数の部材の塑性化と座屈の連成による軟化挙動および構造系を構成する各部材間での荷重再配分が構造物の崩壊挙動に敏感に影響を及ぼすため、通常的设计で用いられるはり理論に基づく解析手法では精度が不十分であることが挙げられる。

鋼アーチ橋や鋼トラス橋のような高次の不静定構造では、地震によりある一つの部材が破壊しても他の部材に荷重が再配分されることにより構造全体系として直ちに崩壊に至ることがなく、ある程度のロバスト性を期待できる構造であると考えられる。その一方で、構造を構成する各部材が十分なエネルギー吸収性能を期待できない、いわゆる“非エネルギー吸収部材”である場合には、ある一つの部材の破壊により急激な荷重再配分が生じ、連鎖的に非エネルギー吸収部材の破壊が進行することにより、構造全体系が崩壊に至る可能性もある。現状では鋼アーチ橋や鋼トラス橋に代表

される高次の不静定構造物に対して、非エネルギー吸収部材の座屈を伴う損傷が構造全体系の安全性に及ぼす影響を定量的に評価する手法が確立されていない。このため、実務では非エネルギー吸収部材に対しては損傷を許容しないコンサーバティブな設計が一般的に行われている。この考え方は、あらかじめ想定した設計用地震動に対して構造安全性を確保する方法としては妥当であると考えられる。しかしながら、想定を超える規模の地震作用に対する被害の低減という観点からは十分ではない。すなわち、想定外の地震作用によりある一つの部材が損傷した場合においては、現状ではその後の構造全体系の挙動を予測することは困難であるため、場合によっては一つの部材の破壊を起点に連鎖的に部材の破壊が生じ構造全体系が崩壊に至る可能性も否定できない。

以上のことから、不静定構造の構造全体系の安全性を数値解析により評価するためには、構造全体系が最大耐力点に至るまでに各部材に生ずる全体座屈と局部座屈が連成する軟化挙動を考慮しなければならない。このためには、損傷が生ずる部材に対してはシェル要素を用いた精緻なモデルによる解析が必要となる。また、最大耐力に影響を及ぼす残留応力や初期たわみ等の初期不整も考慮することが望ましい。このようなシェル要素を用いた詳細な橋梁全体系のモデルによる解析を実施するためには技術的に解決すべき以下の二つの課題がある。

一つは、シェル要素を用いた詳細なモデルの構築に多大な労力と時間を要する点である。最近では扱いやすいユーザーインターフェイスを有する高機能のプリプロセッサが普及しているが、これらを利用して多数の部材からなる複雑な鋼橋のFEモデルを構築することは大変な手間と時間がかかる作業である。例えば、複数回の試行により経済的な構造諸元を決定する過程においてFEソフト

ウェアのプリプロセッサを用いてシェル要素のモデルを逐次修正する作業や、構造解析に用いる数値モデルとしての妥当性（各要素間の結合条件やメッシュ分割など）および人的過誤防止のための検証作業が挙げられる。シェル要素を用いた精緻な解析を研究レベルにとどまらず実務への普及までを視野に入れると、モデル構築の合理化は無視できない重要な課題である。

二つ目は、シェル要素を用いることによる自由度の増大に伴う問題である。すなわち、自由度の増大により計算に必要な記憶容量や計算時間が増加すること、さらに解析結果の出力データのファイルサイズが増大し、ポストプロセッサ上での可視化処理や着目する結果データの抽出処理に時間を要することである。

本研究では、複数の非エネルギー吸収部材の損傷を伴い、構造全体系が安全限界に至るまでの終局挙動について検討する。このためのシェル要素を用いた精緻なモデルによるFE解析を行うにあたり、上述の二つの課題を解決するために新たにプログラムを開発した。つぎに、高次の不静定構造の一例として上路式鋼アーチ橋を取り上げ、開発したプログラムによりシェル要素を用いた橋梁全体系の精緻かつ大規模なFEモデルを構築した。このモデルを用いたPushover解析により各部材の損傷過程と構造全体系の終局挙動の関係について考察した。なお、橋梁全体系の大規模FE解析には理化学研究所のスーパーコンピュータ「京」¹⁾を用いた。

2. シェル要素による橋梁全体系モデルの自動構築プログラムの開発

2.1 概要

鋼アーチ橋や鋼トラス橋などの特殊橋梁を対象とした耐震性能照査では、弾塑性はり要素（ファイバーモデル）を用いた橋梁モデルの耐震解析が多く実施されてきた^{2),3)}。これらの耐震性能照査に用いられたインプットデータは構造解析に必要な諸元を抽出した貴重な情報資源である。ファイバーモデルのインプットデータには断面形状に関する情報が含まれるので、部材の形状を構築することが可能である（以降、材料非線形性をファイバーモデルにより考慮した弾塑性はり要素を「はり要素」と略す）。本研究では、既設橋梁の耐震解

析に用いられてきたインプットデータを情報資源として有効活用することを念頭に置き、はり要素による耐震解析モデルの入力データをもとに、シェル要素のモデルを自動的に構築するプログラムを開発した。耐震解析ソフトとしては、材料非線形性をファイバーモデルにより考慮した弾塑性はり要素を実装し、かつ実務でも多く用いられてきた実績のあるScanFEM⁴⁾を対象とした。

2.2 コンセプト

本自動構築プログラムのコンセプトと特徴を以下にまとめる。なお、本プログラムの開発にあたっては、部分的にシェル要素を適用する場合などを想定した実務レベルの耐震性能照査から研究レベルの超大規模モデルの解析までの幅広い範囲での利用を視野に入れた。

(1) はり要素を用いた橋梁モデルからシェル要素を用いた橋梁モデルへのシンプルかつシームレスな変換

シェル要素を用いた橋梁モデルの自動構築プログラムの開発にあたり、通常の耐震解析に用いられるはり要素による橋梁モデルの解析を基本とした。これは、先に述べたように既設橋梁の耐震解析に用いたインプットデータを情報資源として有効活用することに加え、新たに耐震性能照査を実施する場合においても適切な耐震構造を設計するためには、依然としてはり理論に基づく断面力等の各種の物理量をもとに、いわゆる”構造力学”をベースとした巨視的な観点から対象構造の地震時挙動特性を把握することが必要であると考えたためである。すなわち、概略検討は従来のはり要素によるモデルを用いた構造解析により行い、部材の局部座屈を伴う損傷によりはり理論が適用できない場合においては対象となる部材をシェル要素に置換した精緻なモデルによるFE解析を行うことを想定している（図-1）。シェル要素に置換した部材では両端の断面上の節点を図-2に示すように剛体により拘束し、はり理論の基本仮定を与えることで部材両端の軸線位置にそれぞれ一つずつ設けた節点（剛体参照節点）に従属させる。なお、ここでは格点間を両端とする1本の棒材を「部材」と定義する。部材の中にダイアフラムがある場合には部材両端と同様にダイアフラム位置で剛体により拘束し、はり理論の基本仮定を与える。残留

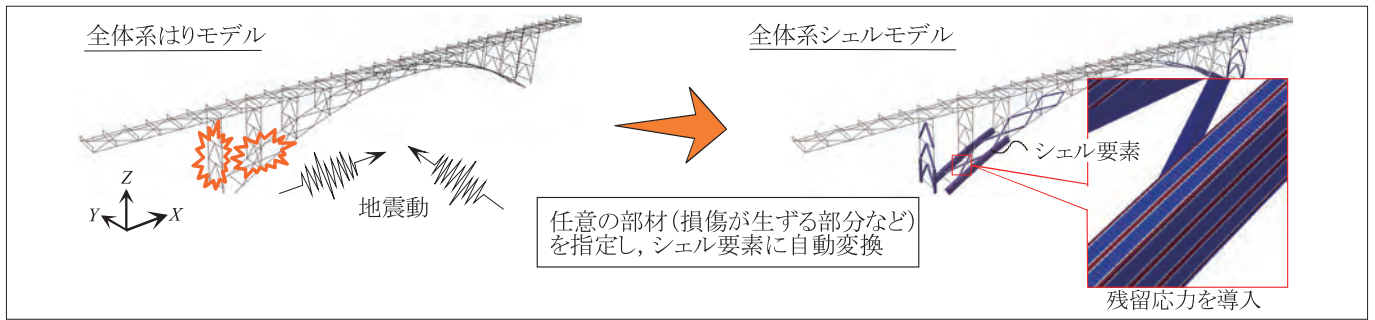


図-1 全体系はりモデルから全体系シェルモデルへの変換

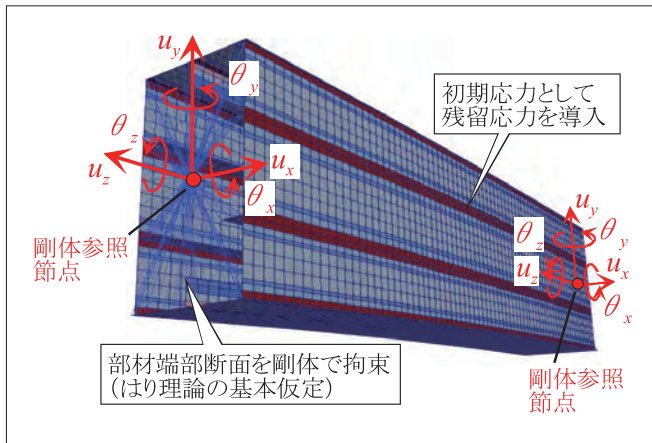


図-2 シェル要素による部材のモデル化

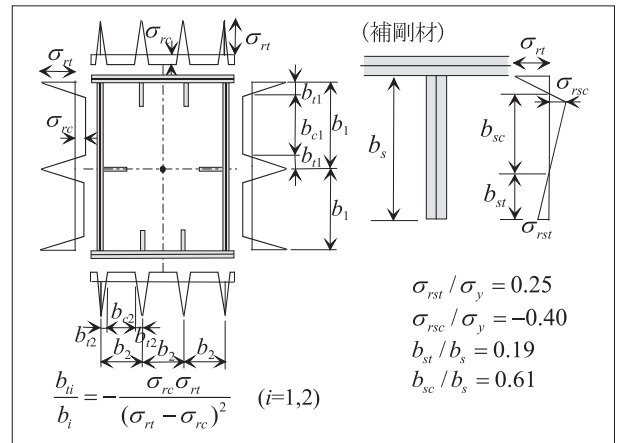


図-3 残留応力分布のモデル (補剛箱型断面の例)

応力については、箱形断面、H形断面などの代表的な断面形状で残留応力分布が明らかなものについては自動的に初期応力として導入する機能を実装した。本プログラムで考慮した残留応力分布のモデル⁵⁾の一例を図-3に示す。要素分割においては、残留応力分布のモデルに基づき、プログラム内で自動的にシェル要素の幅方向（断面方向）の寸法を算定し、部材軸方向のつり合いを満足するように要素節点座標を構築する。本プログラムではより要素モデルのインプットデータに加え、シェル要素に置き換える部材に対して必要最低限の入力情報として以下を与える。

- ・シェル要素に置き換える部材に含まれるはり要素の要素番号
- ・基本メッシュサイズ（断面方向、部材軸方向）
- ・ダイアフラム位置
- ・残留応力の値 σ_{rt}/σ_y , σ_{rc}/σ_y
 (図-3参照 (箱形断面の場合), σ_y : 降伏応力)

既存のはり要素モデルのインプットデータに対してわずかな情報を加えるのみで、従来のはり要素を用いた橋梁全体系の解析モデルに対応したシェル要素による橋梁全体系の解析モデルを機械

的に構築することができる。本プログラムにより、作業の効率化およびモデルを構築する際の人的過誤を大幅に低減できるものと期待できる。

(2) 部材を単位とした領域分割法に基づく並列計算による計算時間の低減と解析結果の処理効率向上

シェル要素でモデル化する部材が多いと解析モデルの自由度が増加し、通常のPCでは処理できない計算規模になる場合がある。このような場合にも対応するために、ワークステーションやスーパーコンピュータ上で並列計算を行うための機能を実装した。シェル要素でモデル化した部材（図-2）はそれぞれ1つの計算ノードに割り当て、このノード内で完結したFE解析を実施する（Domain Decomposition Method (DDM)⁶⁾（図-4）。各計算ノードに部材剛性マトリクスと等価節点力の計算ルーチンを割り当てるイメージである。ここで1部材を1つの領域に割り当てるようにしたのは以下の2つの理由による。ひとつは、DDMを用いるにあたり、部材単位で領域を割り当てることにより、機械的にシェル要素に置換する部材において、境界節点は2節点（12自由度）と大幅に自由度を縮減できるためである。いまひとつは、(1)でも述べ

たように、部材を基本単位とすることにより各計算ノードで算定される部材両端の等価節点力の評価が容易であり、従来の部材に対する照査を基本とした設計の枠組みとの親和性が高いと考えたためである。

解析結果の処理に関しては、部材ごとに出力される解析結果のファイルから必要なものを取捨選択

できるため、ポストプロセッサ上の可視化処理や着目データの抽出処理の負荷を大幅に軽減できる(図-5)。また、通常的设计ではシェル要素の応力やひずみ等の詳細な要素出力値よりも部材単位のマクロ的な情報(例えば格点の変位や復元力)が必要となることが多い。このような場合にも、本プログラムでは境界節点(図-4参照)の出力値が格点の情報に対応するので、シェル要素の大規模な出力データを読み込むことなく、格点の値を出力することができる。なお、解析結果のポスト処理には上述の出力データに関する思想にも対応できるParaView⁷⁾を用いた。

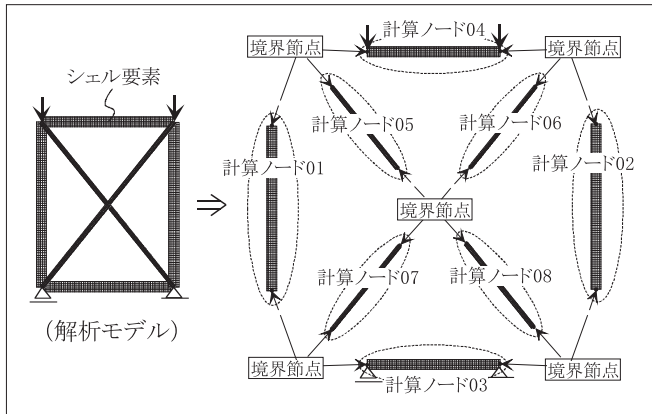


図-4 部材を単位とした領域分割

3. 上路式鋼アーチ橋の地震時終局挙動⁸⁾

解析対象とする上路式鋼アーチ橋^{2), 3)}の構造概要を図-6に示す。一般に、既設の上路式鋼アーチ橋は現行の設計用レベル2地震動に対する照査を行った場合、橋軸直角方向の地震動入力に対して、下横構や対傾構などの二次部材を無損傷にとどめ

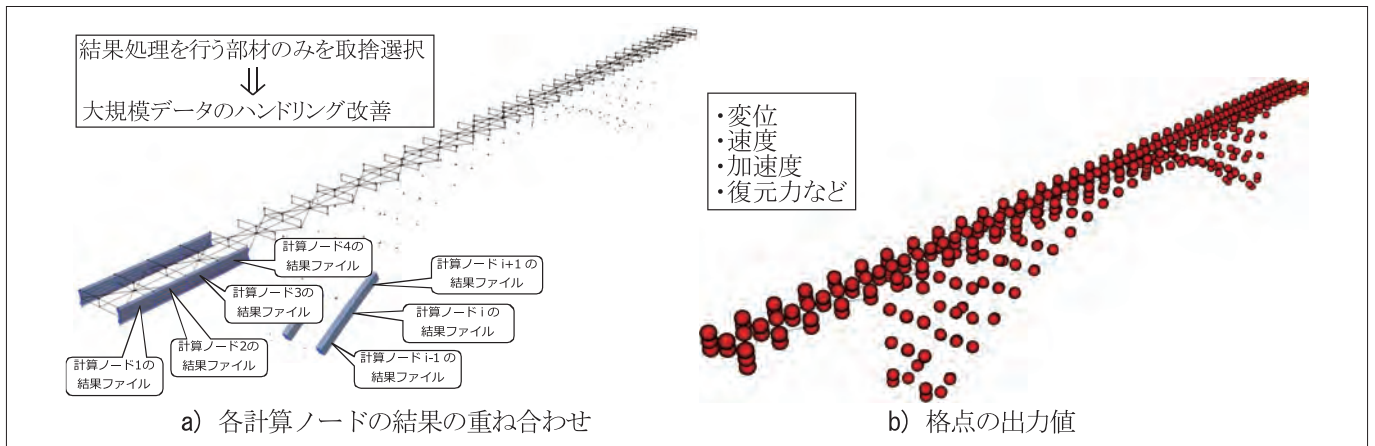


図-5 部材と格点を単位とした解析結果の処理

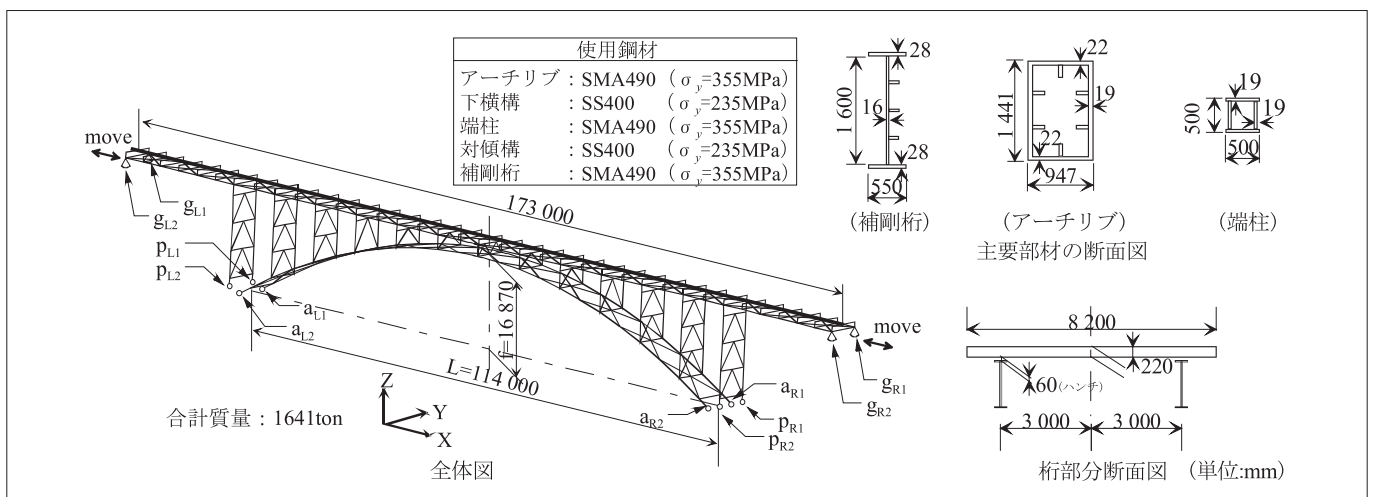


図-6 対象橋梁の概要

ることが困難な場合が多く、耐震性能を確保するためにこれらの部材を座屈拘束ブレースに置き換え制震化を図る場合がある。

3.1 全体系はりモデルの時刻歴応答解析

事前検討として、はり要素を用いた橋梁全体系のモデル（以降、全体系はりモデルと呼ぶ）の時刻歴応答解析を行い、対象橋梁の動的挙動について検討した。

入力地震動には1995年兵庫県南部地震神戸海洋気象台の観測波JMAのNS、EW成分を用い、それぞれ橋軸直角方向、橋軸方向に同時入力した。全体系はりモデルの時刻歴応答解析の結果、時刻 $t=5.27s$ において桁中央部に最大橋軸直角方向変位が生じ、同時に橋軸直角方向水平反力、およびアーチリブ、端柱基部の軸力比もほぼ最大値に近い応答が生じた。本検討では上記の結果を踏まえ、構造全体系として安全限界に近づいたと考えられる時刻 $t=5.27s$ の状態に着目し、このときの橋梁全体への地震による作用力 $\{F_m\}$ に対して構造全体系の安全限界の評価を行うこととした。なお、地震による作用力 $\{F_m\}$ は時刻 t での以下の運動方程式（1）において、死荷重 $\{F_d\}$ を除いた復元力 $\{R_m\}-\{F_d\}$ とつり合う力である。

$$[M]\{\ddot{U}_m\}+[C]\{\dot{U}_m\}+\{R_m\}=-[M]\{\ddot{U}_{g,m}\}+\{F_d\} \quad (1)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ ：構造全体系の質量マトリクス、減衰マトリクス、 $\{\ddot{U}_m\}$ 、 $\{\dot{U}_m\}$ 、 $\{U_m\}$ 、 $\{\ddot{U}_{g,m}\}$ ：着目する時刻 t における構造物の応答加速度、速度、変位および地震加速度である。着目時刻 $t=5.27s$ における地震による作用力 $\{F_m\}$ のモードを図-7に示す。主に桁中央付近に最大値をとり、橋軸直角方

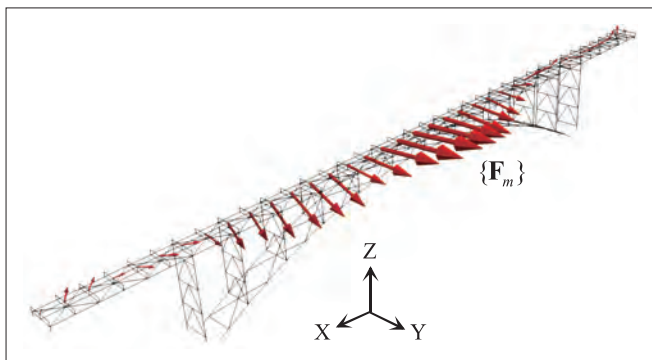


図-7 着目時刻における地震による作用力分布

向（+Y方向）への成分が支配的となっていることがわかる。

3.2 全体系シェルモデルのPushover解析による橋梁全体系の終局挙動

(1) シェル要素を用いた橋梁全体系モデル

2. で述べた自動構築プログラムにより構築したシェル要素を用いたアーチ橋全体系の精緻なモデルに対してPushover解析を行った。本モデルは総節点数237万、総要素数220万の大規模な解析モデルである。材料構成則は全体系はりモデルと同じバイリニア型の移動硬化則とした。初期不整として、すべての鋼部材に対して残留応力を初期応力として導入した。一方、初期たわみについては、現段階では自動構築プログラムにおいて対応していないため無視した。数値解析においてはスーパーコンピュータ「京」上で並列計算を行うことを前提として、2.で述べた部材単位での領域分割を行い、各計算ノード（合計349ノード）に割り当てた。以降、本モデルを全体系シェルモデルと呼ぶ。全体系シェルモデルに対しては、一定の死荷重 $\{F_d\}$ 作用のもと、図-7に示した地震による作用力 $\{F_m\}$ に荷重倍率 Λ を制御パラメータとして乗じた荷重制御により静的に単調載荷することで構造全体系が最大耐力に至るまでの終局挙動を解析した。

(2) 解析結果

解析結果として、構造全体系の最大耐力点近傍での損傷状態を図-8に示す。アーチリブ（A1、A2）および端柱基部（P1、P2）に局部座屈が生じていることがわかる。なお、これらの局部座屈が生じた補剛板（無補剛板）の幅厚比パラメータはそれぞれ $R_R=0.65$ （アーチリブ）、 $R=0.49$ （端柱）である。また、下横構は計44部材中の8部材（B1～B8）に全体座屈が生じている。なお、図中に示す下横構に付した記号（B1～B8）の数字部分は座屈が生じた順番を表す。アーチリブについては同図a)に平均軸力-平均軸方向ひずみの関係（ $N/N_y-u/u_y$ 関係）を示しているが、これより軟化域には至っていないものの、明確な非線形挙動が生じていることがわかる。顕著な局部座屈が生じた端柱基部の平均曲げモーメント-平均曲率関係、平均軸力-平均軸方向ひずみ関係を図-9、10に、下横構の平均軸力-平均軸方向ひずみ関係を図-11に

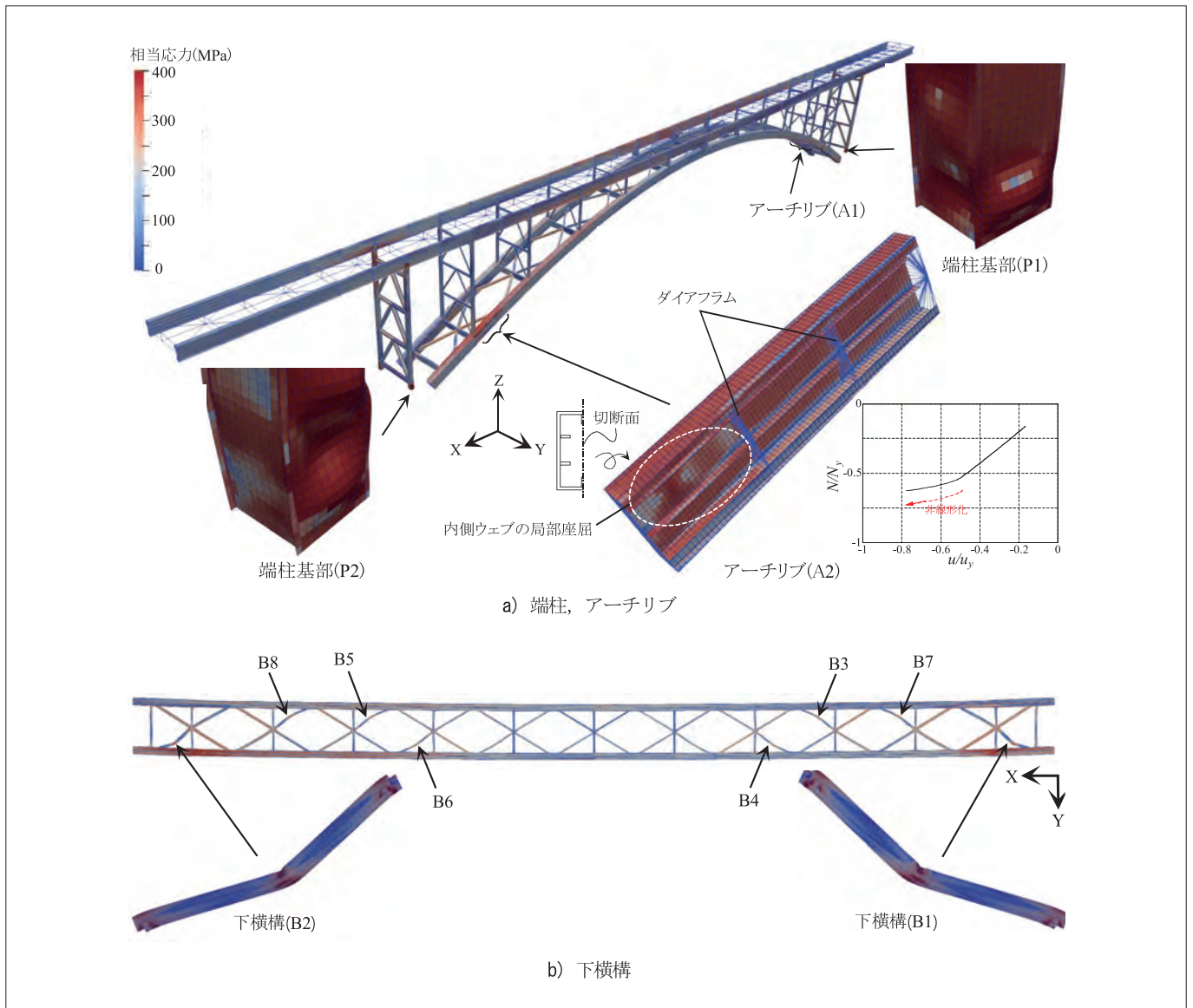


図-8 各部材の損傷状況

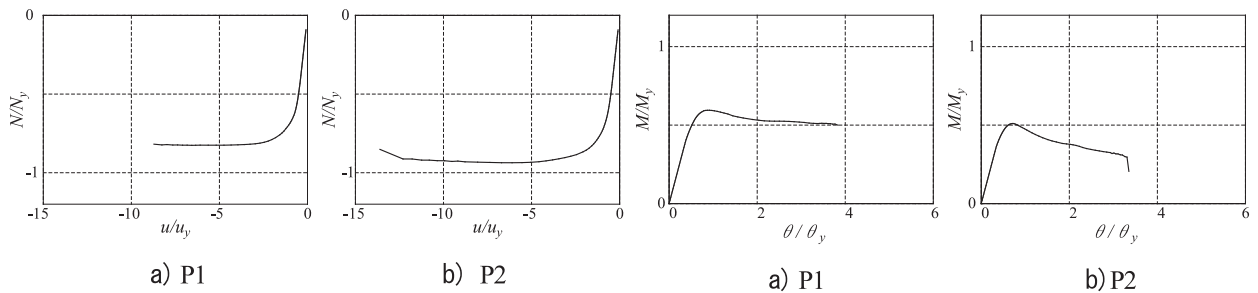


図-9 端柱基部の平均軸力-平均軸方向ひずみ

図-10 端柱基部の平均曲げモーメント-平均曲率

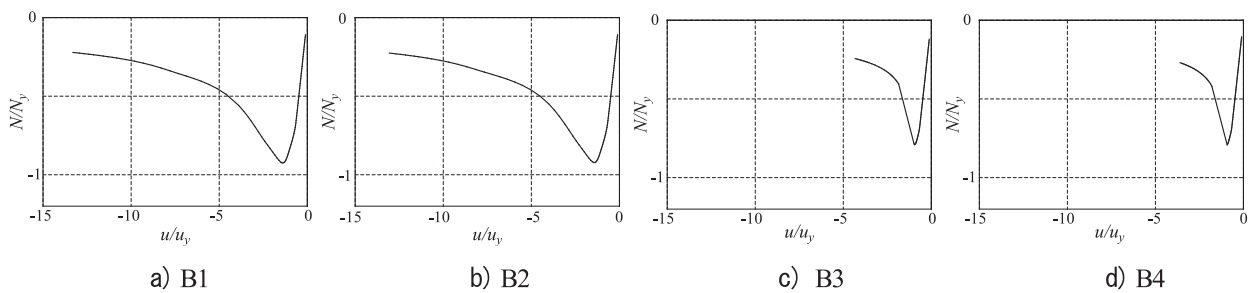


図-11 下横構の平均軸力-平均軸方向ひずみ

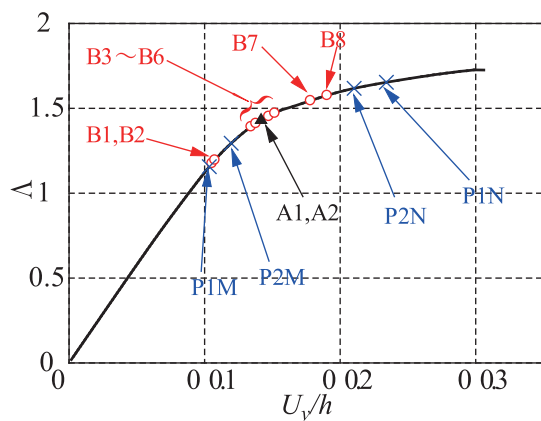


図-12 荷重-変位関係

示す。端柱基部については曲げモーメントと軸力が連成しており、いずれも軟化挙動を示している。なお、P1では軸力比 N/N_y が0.83、P2では0.94と大きな値に達している。下横構についてはピーク点以降の耐力低下が著しく生じており、とくに端部のB1、B2には大きな変形が生じている。

つぎに、構造全体系の荷重-変位関係として、荷重倍率 Λ と桁中央部の橋軸直角方向の水平変位 U_y/h ($h=19.94\text{m}$:高さ)との関係を図-12に示す。これより、 $U_y/h=0.03$ 近傍で剛性がほぼ0に近づいており、概ね最大耐力点まで解析ができていものと考えられる。厳密に最大耐力点を評価するためには弧長制御法を用いて最大耐力点以降の荷重低下領域まで解析を行う必要があるが、今後のプログラム開発における課題としたい。図-12、表-1には各部材の損傷イベントを示している。動的解析での作用力レベルに対応する荷重倍率 $\Lambda=1.0$ では各部材に明確な損傷は認められない。荷重倍率 $\Lambda=1.2$ で端柱基部(P1)の橋軸まわりの曲げモーメントが最大値に達し、ほぼ同時に端部の対傾構B1、B2が座屈する。この段階では構造全体系の剛性に大きな変化はみられないが、その後、端柱基部(P2)の橋軸まわりの曲げモーメントも最大値に達し、荷重倍率付近で下横構(B3~B6)が連鎖的に座屈するのとほぼ同時に図-8に示したアーチリブの部材(A1、A2)も非線形領域に至る。この点を境に構造全体系の剛性が大きく低下し、その後、下横構(B7、B8)に座屈が生じ、端柱基部(P1、P2)の軸力もピークに達し、構造全体系の最大耐力点近傍($\Lambda=1.7$)に至る。仮に、部材が無損傷にとどまる荷重倍率 $\Lambda=1.2$ の状態を通常的设计で

表-1 各部材の損傷イベント

図-12の各点	各部材の損傷
P1M	端柱基部P1の曲げモーメントピーク到達
B1	下横構B1座屈
B2	下横構B2座屈
P2M	端柱基部P2の曲げモーメントピーク到達
B3	下横構B3座屈
B4	下横構B4座屈
A1, A2	アーチリブ非線形化
B5	下横構B5座屈
B6	下横構B6座屈
B7	下横構B7座屈
B8	下横構B8座屈
P2N	端柱基部P2の圧縮軸力ピーク到達
P1N	端柱基部P1の圧縮軸力ピーク到達

許容できる上限であるとすれば、部材が損傷してから構造全体系が最大耐力に至るまでには1.4倍(=1.7/1.2)程度の余裕があることがわかる。ただし、二次部材である下横構のみならず常に死荷重を支持する端柱の基部にも大きな損傷が生じていることにも注意が必要である。以上の全体系シェルモデルの解析結果は、部材間の結合を全体系はり要素モデルと同様に剛結と仮定しているため、ガセットプレートのモデル化は行っていない。したがって、結合部に損傷が生ずる場合にはこの限りではないことに注意されたい。なお、部材損傷後の構造全体系の最大耐力の確保、さらに最大耐力以降の全体系の崩壊に対する抵抗性を高めるためには結合部が破断することなく、各部材間の荷重再配分性能を確保できる構造が望ましいといえよう。本解析で示したように、構造全体系が最大耐力点に至るまでには複数の部材に全体座屈や局部座屈による軟化挙動が生ずるので、構造全体系が最大耐力に至るまでの挙動を評価するためにはこれらを考慮できる解析手法を用いる必要がある。

4. まとめ

通常、耐震設計では無損傷にとどめる非エネルギー吸収部材が損傷した場合の不静定構造の構造全体系の終局挙動についてシェル要素を用いた精緻なFE解析により検討した。

はじめに、シェル要素を用いた精緻なFE解析の実務への普及を図ることを視野に入れ、橋梁全体系モデルを自動的に構築するプログラムを新たに開発し、その概要とコンセプトについて述べた。つぎに、

高次不静定構造である上路式鋼アーチ橋を対象に、水平2方向の極大地震動作用下において、複数の非エネルギー吸収部材が座屈による損傷を伴い構造全体系が安全限界に至るまでの挙動をシェル要素を用いた精緻なFEモデルを用いたPushover解析により明らかにした。対象としたアーチ橋では部材に損傷が生ずる荷重倍率 $\Lambda = 1.2$ に対して、構造全体系が最大耐力に至るまでには1.4倍(=1.7/1.2)程度の余裕があることを示した。

今後、アーチ橋の一部を模した骨組構造モデルの崩壊加振実験を実施し、解析手法の妥当性と精度検証を行う予定である。

謝辞

本研究は、(財)橋梁調査会の「橋梁技術に関する研究開発助成」(H31年度)を受けて実施したものです。また、スーパーコンピュータによる構造解析の一部は名古屋工業大学の野中哲也教授、(株)地震工学研究開発センターの馬越一也氏、吉野廣一氏にご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 理化学研究所計算科学研究センター：京について(2019/9/12), <https://www.r-ccs.riken.jp/jp/k/>
- 2) (社)日本鋼構造協会：鋼橋の耐震設計の信頼性と耐震性能の向上, JSSCテクニカルレポートNo.85, 2009.
- 3) (社)日本鋼構造協会：ファイバーモデルを用いた鋼橋の動的耐震解析の現状と信頼性向上, JSSCテクニカルレポートNo.93, 2011.
- 4) 株式会社耐震解析研究所：SeanFEM ver.1.22 理論マニュアルと検証, 2007.
- 5) 土木研究所：鋼箱形断面圧縮部材の耐荷力に関する研究, 土木研究所資料, 第4221号, 2012.
- 6) 吉野廣一, 野中哲也, 本橋英樹, 金治英貞, 鈴木威, 八ツ元仁, 中村良平：京コンピュータによる高架橋の広域3次元地震応答シミュレーション, 第17回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.43-50, 2014.
- 7) Utkarsh Ayachit: The ParaView Guide (2019/9/13), <https://www.paraview.org/paraview-guide/>
- 8) 奥村徹, 馬越一也, 野中哲也, 吉野廣一：非エネルギー吸収部材の損傷を伴う上路式鋼アーチ橋の構造全体系の地震時終局挙動, 構造工学論文集Vol.66A, pp.264-273, 2020.

道路橋床版疲労シミュレーションに向けたRC床版疲労解析におけるパネル床版と実橋床版との等価解析条件の検討

北海道大学 大学院工学研究院 土木工学部門 教授 松本 高志

1. はじめに

鉄筋コンクリート（RC）床版は鋼道路橋の構成部材の中でも輪荷重が直接作用する部材であり、経年した既設橋において多数の損傷劣化が報告されている。大型車両の増加に伴う輪荷重の繰り返しによる疲労劣化、雨水の床版ひび割れへの侵入による疲労劣化の促進などがRC床版の損傷の要因と考えられている。上記の要因によるRC床版の損傷は、主として床版下面のコンクリートに二方向に広く分布する格子状ひび割れを形成し、終局的にはコンクリートの抜け落ちに至り、舗装の割れや陥没を招くものとなる¹⁾。これは、第三者被害や交通事故に関する構造物の安全性の問題として非常に重要である。

RC床版の疲労損傷劣化については、実橋床版の一部分となる数メートル角サイズのパネル床版に走行輪荷重を繰り返し作用させる輪荷重走行疲労試験により、ひび割れ進展の段階が捉えられ、これに伴う変形と耐荷のメカニズムが明らかにされてきた。現在では、輪荷重走行疲労試験はRC床版の疲労特性を確認するために広く用いられている。

しかしながら、同試験のパネル床版で用いられている境界条件では実橋床版同様の断面力分布の再現が床版中央部のみに限られている。これは実橋床版が橋軸方向に連続であるのに対して、輪荷重走行疲労試験のパネル床版では橋軸方向端部にI形断面梁

を弾性支持として置くことで代替しているからであり、この支持部でたわみやたわみ角が異なるからである（図-1）。よって実橋床版でみられる格子状ひび割れが床版中央部で得られるものの、床版端部では実橋床版と異なり中央部から対角方向へのひび割れが発生する損傷が見られる。これは輪荷重走行疲労試験のパネル床版を疲労解析した時も同様であり、中央部と端部ではひび割れ性状が異なる結果が得られる^{2), 3)}。言うまでもなく輪荷重走行疲労試験はこの点に留意して用いられている。

このような背景のもとで、本研究は、輪荷重走行疲労解析のパネルRC床版が実橋床版と同様の構造・疲労挙動を示すための等価な解析条件を検討するものである。輪荷重走行疲労試験の境界条件と実橋床版を想定した境界条件のそれぞれでパネル床版を解析し、パネル床版においても実橋床版と同様の断面力と変位の分布が得られる境界条件を客観的に得る手順を明らかにする試みである。床版を含む実橋の上部工全体を疲労解析することは計算コストが高く、輪荷重走行疲労試験サイズのパネル床版で等価な解析条件を設定することにより、低コストで実道路橋床版疲労のシミュレーションを可能にするには意義があると考えている。本研究は道路橋床版疲労シミュレーションに向けた一つの重要なステップであると位置づけている。

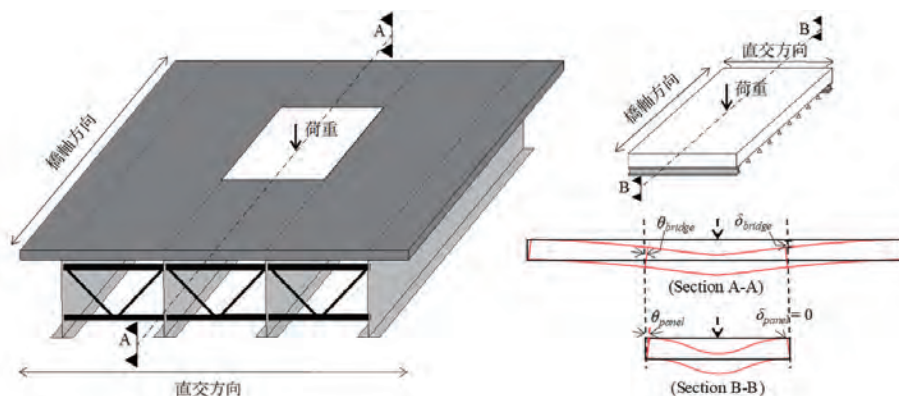


図-1 実橋床版とパネル床版の境界条件

2. RC床版の輪荷重走行疲労解析

輪荷重走行疲労試験はRC床版の疲労特性を確認するために広く用いられている。床版上面を前後に走行する輪荷重を載荷することにより、実橋床版で見られる損傷劣化過程が再現され、既設橋の床版から新たに提案された高耐久性床版まで様々な床版の評価に用いられている。輪荷重走行疲労試験がこの分野へ果たした貢献は多大なるものがある¹⁾。

著者らは、輪荷重走行疲労試験のパネルRC床版に対して、コンクリートひび割れにおける伝達応力劣化を疲労損傷機構とした有限要素解析により、その疲労挙動と寿命を再現することを可能としている²⁾、³⁾。ひび割れにおける骨材や繊維による架橋応力の疲労劣化は、抜け出しや破断により徐々に起こり、疲労ひび割れの進展と破壊の支配的機構であることが示されている⁴⁾。後に、架橋応力劣化は有限要素解析に組み込まれてパネル床版の定点疲労載荷及び輪荷重走行疲労載荷の挙動を再現しうることが示された²⁾。さらに、丸鋼鉄筋を用いた床版の輪荷重走行疲労試験の挙動を再現し、異形鉄筋と比較した丸鋼鉄筋の影響についての検討も行われている³⁾。以下にRC床版の輪荷重走行疲労解析の手法について概要を述べる。

架橋応力とは、ひび割れにおいて骨材や繊維が伝達する応力であり、主にその引張成分が材料特性や構造挙動において重要である。図-2に示すのは引張荷重下のコンクリート系材料挙動の構成則である。載荷初期は線形弾性挙動を示すが、ひび割れ強度 f_t においてひび割れが生じ、その後はひび割れにおいて骨材や繊維が引張応力を伝達する。骨材や繊維はさらなる引張方向の載荷変位により抜け出しや破断が発生し、徐々に伝達応力を減少させていく。最終的には全ての骨材や繊維の抜け出しもしくは破断により伝達応力はゼロとなり、材料は完全に二つに分割されることになる。以上は静的載荷の場合の挙動である。

図-2の枠内の図は疲労繰り返し荷重下における架橋応力の劣化とひび割れ進展を説明する図である。長さ a 、開口幅 w のひび割れは、ひび割れ先端の σ_1 から開口部へと減少する架橋応力分布が発生している。このひび割れに疲労繰り返し荷重が作用した後は骨材や繊維は徐々に抜け出しもしくは破断を起こして架橋応力は劣化する。つまり、枠内右図の点

線から実線へと劣化することになる。これにより伝達応力が減少するためひび割れは a から $a+da$ へと進展し、開口幅は w から $w+dw$ へと増大する。また新たに進展したひび割れ部では劣化していない架橋応力が発生する。このように進展する疲労ひび割れでは、先端近くで「若くてまだ劣化しておらず」、開口部が「一番古くて劣化している」ことになる。同じ一本のひびわれでも位置によって開口幅と履歴繰り返し回数が異なるためその劣化度が異なるのである。図-2に表しているのは架橋応力劣化を含む構成則であり、開口幅によるひずみと履歴繰り返し数に依存して架橋応力が減少する架橋応力劣化則を表しており、次式に従っている。

$$\frac{\sigma_N}{\sigma_1} = 1 - d \log(N) \quad (1)$$

ここに、 σ_1 と σ_N はそれぞれ1回目と N 回目の架橋応力であり d は架橋応力劣化の係数であり、

$$d = d_0 + \gamma W_{max} \quad (2)$$

により表される。ここに d_0 とは γ は係数であり、 W_{max} はひび割れ開閉時の最大開口幅である。既往の実験によりコンクリートの係数は $d_0=0.08$ and $\gamma=4/\text{mm}$ と与えられている⁵⁾。

次に、RC床版の輪荷重走行疲労試験に対する、架橋応力劣化を組み込んだ有限要素解析による床版疲労解析について説明する。図-3では、床版疲労解析の手順を簡略化して示している。対称性を考慮した1/2のRC床版の有限要素モデルの上面に、輪荷重走行に対応する荷重を1往復作用させる。1往復後にひび割れた要素（黄色部分）を確認し、その要素では $N=1$ 回分の劣化を式(1)により設定する。この設定

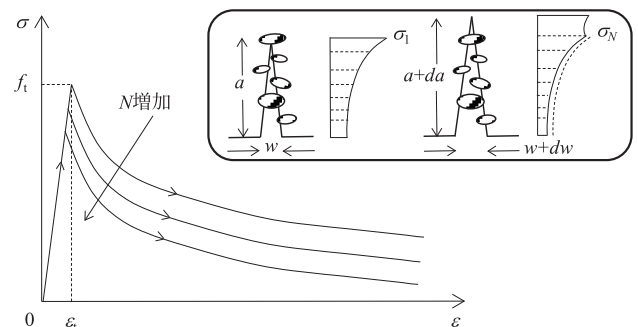


図-2 架橋応力劣化

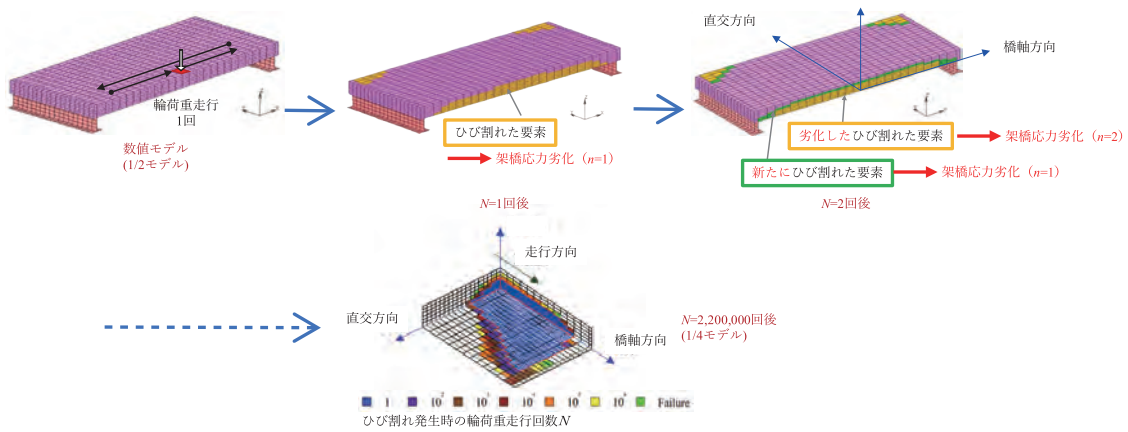


図-3 床版疲労解析

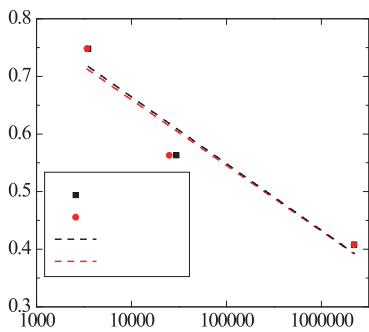


図-4 試験及び解析によるS-N関係

後に2往復目の荷重を作用させて、新たにひび割れた要素（緑色部分）を確認し、この要素では $N=1$ 回分の劣化を設定する。一方で、1往復後にひび割れた要素（黄色部分）では $N=2$ 回分の劣化を設定する。つまり早期に生じたひび割れにはより大きな劣化が起こっているとする。これを繰り返すことで輪荷重走行繰り返しによる疲労ひび割れの発生・進展挙動を解析的に捉えることが可能となり、併せてたわみ変化も得られる。最終的に輪荷重に耐えられなくなりたわみが大きく増大する輪荷重走行回数が疲労寿命となる。図-3にはひび割れ発生時の輪荷重走行回数を色分けして示している。輪荷重走行範囲である中央部よりひび割れ範囲は版の面内方向と版厚方向へと広がり、なかでも面内対角方向へと大きく広がっているのが分かる。最後に図-4は輪荷重走行疲労試験⁶⁾によるS-N関係と本解析手法により得られたS-N関係である。両者が良好に一致していることは、この解析手法の妥当性を示していると考えられる。

3. 等価な解析条件の検討

2章で概要を示したRC床版の輪荷重走行疲労解析は数メートル角サイズのパネル床版を橋軸方向弾性

支持で直交方向単純支持として実施している。これは輪荷重走行疲労試験の条件と同じである。本研究では1章で述べた動機のもとにパネル床版が実橋床版と同様の構造・疲労挙動を示すための等価な解析条件を検討する。

検討したパネルRC床版は既往の文献⁷⁾を参考にして設定した（図-5）。床版の橋軸方向長さは4,500mm、直交方向幅は2,800mm、床版厚は250mmである。コンクリートと鉄筋の材料特性を表-1に示す。引張側の主鉄筋はD19@150mm、配力筋はD16@125mmであり、圧縮側はこれらの50%でありそれぞれD19@300mm、D16@250mmである。

走行輪荷重は図-5の床版上面の赤枠内（3,000mm×500mm）を往復して作用させる。解析では、

表-1 材料特性

コンクリート	圧縮強度 (f'_c)	33.1 (MPa)
	引張強度 (f_t)	1.9 (MPa)
	ヤング率 (E_c)	27.9 (GPa)
鉄筋	降伏強度 (f'_y)	345 (MPa)
	ヤング率 (E_s)	200 (GPa)

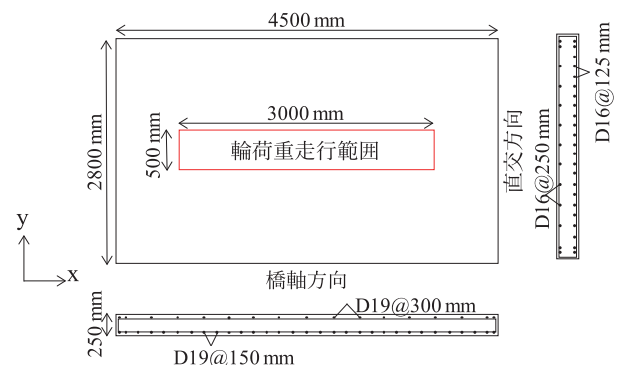


図-5 床版寸法と配筋

200mm×500mmの面積に作用させた分布荷重を除荷させながら隣接する同面積に載荷していくことで走行輪荷重を表現している。本稿の等価な解析条件の検討においては、図-6に示すAからDの4点に輪荷重157kNを作用させて橋軸及び直交軸の断面の発生モーメント分布と橋軸上（対称軸断面）及び直交軸上（各点載荷時断面）たわみ変位分布を検討する。

等価な解析条件の検討として、ここではパネルRC床版の橋軸方向の弾性支持境界条件を5ケースについて比較検討する（図-7）。Case 1は輪荷重走行疲労試験において用いられている弾性支持条件であり、鋼製I形断面梁で通常通り床版の下面を支持している。I形断面梁は強軸まわりの曲げに対して設置しているもの、鉛直方向のたわみ変位は拘束されている。一方でたわみ角はウェブ板の曲げにより生じる（図-1 Section B-B）。なお、梁の断面寸法は文献に従っている⁷⁾。一方で、Case 2から5は、鋼製I形断面梁のフランジ面と床版の側面が接する形に設置しており、I形断面梁は弱軸まわりの曲げに対して配置される。フランジ幅は床版厚の250mmに固定し、ウェブ厚も15mmと固定した上で、フランジ厚を15、30、60、90mmとして4ケースを比較検討する。なお、全5ケースの直交方向のRC床版の境界条件は全て単純支持である。

Case 2から5の弾性支持条件を設定した理由は、図-1の実橋床版（Section A-A）に示されているようにた

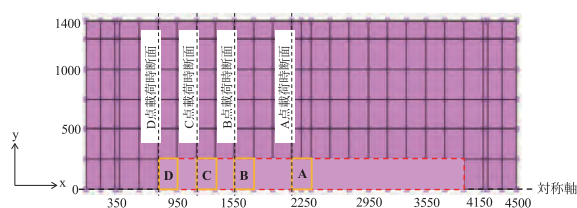


図-6 載荷位置と着目断面（1/2モデル）

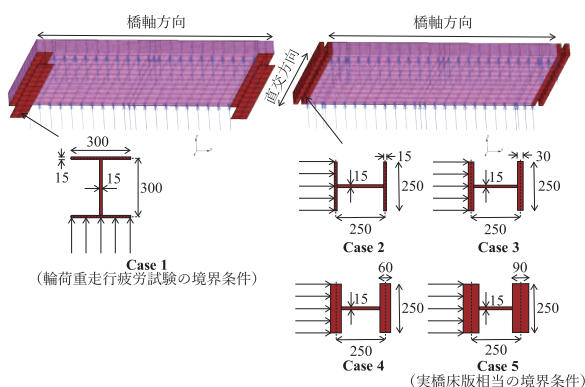


図-7 検討した境界条件（1/2モデル）

わみ δ とたわみ角 θ をパネル床版においても実現するためである。床版側面にI形断面梁を接する形で、弱軸まわりの曲げたわみとウェブ板の曲げによるたわみ角を許容する形となっている。無論、こうした支持条件は実際の輪荷重走行疲労試験では実現困難であり、解析上での表現にとどまる。また、解析上でも今後は弾性ばね支持条件などの設定を考えていく必要があるが、本稿では物理的な理解のしやすさの観点からI形断面梁によるCase 2から5を設定している。

ひび割れ発生モーメント

図-8はひび割れ発生モーメントの等高線を示している。半円状の等高線の内側はひび割れ発生モーメントより高い値であり、ひび割れが生じている領域と考えることができる。それぞれのグラフで載荷位置AからDの4点に載荷した時のひび割れ発生モーメントの等高線を示している。以上をCase 1から5の境界条件についてまとめており、左図が直交方向のひび割れを生じさせるモーメント M_{xx} であり、右図が橋軸方向のひび割れを生じさせるモーメント M_{yy} である。

図-8 (a) のCase 1に示す M_{xx} は載荷位置AからDの結果を比較してもひび割れ領域は大きくは変わっていない。一方で M_{yy} による結果はAからDへと領域が大幅に小さくなっている状況を示している。特に載荷位置CとDの結果はAの結果と比較すると領域の縮小度合いが明瞭である。これはCase 1の橋軸方向の弾性支持境界条件がたわみ変位を許容できずたわみ角のみを許容していることにより、 M_{yy} の値が載荷位置Dにおいては高くならないことによる。

Case 2から4の M_{xx} と M_{yy} が示すひび割れ領域はCase 1と大きく異なる。Case 2ではフランジ厚が最も小さいケースであるため直交方向の曲げ剛性が最も小さい。これにより M_{yy} による領域は載荷位置Dにおいて非常に大きくなる傾向が明瞭である。 M_{xx} による領域は載荷位置Dに向けて小さくなるが、その変化は M_{yy} による領域よりは小さい。Case 2から4へとフランジ厚を大きくするにつれて、いずれの方向のひび割れ領域も載荷位置AからDの差異は小さくなっていくことが確認できる。さらにフランジ厚を大きくしたCase 5においては、載荷位置によらずいずれの方向のひび割れ領域も同様になり、実橋床版相当と考えられる結果が得られた。

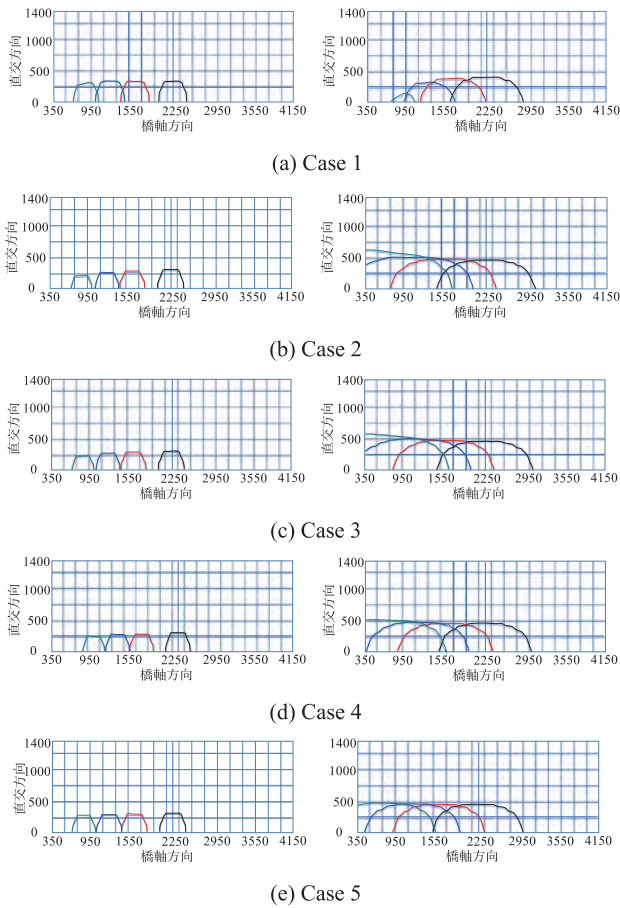


図-8 ひび割れ発生モーメント M_{xx} (左) と M_{yy} (右)

たわみ分布

図-9は、荷重位置AからDの時の橋軸上（対称軸断面）及び直交軸上（各点荷重時断面）のたわみ変位を示している。図-8の結果からも類推できるように、Case 1では荷重位置Aにおいて最も大きなたわみ変位が生じ、B、C、Dとたわみ変位は減少する。直交軸上のたわみ変位分布を見ても各荷重位置断面が同様の挙動を示していないことが明瞭である。Case 2から4では、荷重位置AからDへとたわみ変位は増大するが、フランジ厚を大きくするにつれてその差は小さくなり、Case 5のフランジ厚においてたわみ変位はほぼ同じになり、直交軸上のたわみ変位分布も荷重位置によらずほぼ同じとなる挙動が確認される。これにより実橋床版相当の挙動と考えられる結果が確認された。

4. 階段状荷重漸増荷重でのRC床版の輪荷重走行疲労シミュレーション

3章の等価な解析条件の検討に基づき、Case 1と5の境界条件を用いたRC床版の輪荷重走行疲労シミュレーションを実施した。既往の文献7)に基づいて、図-10に示す階段状荷重漸増荷重の荷重条件

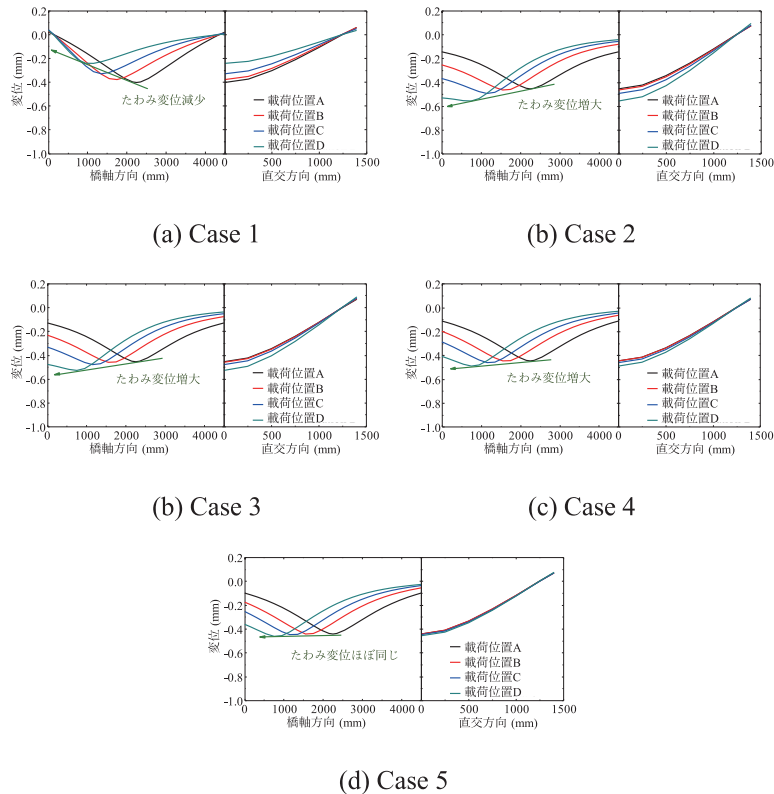


図-9 橋軸上及び直交軸上のたわみ変位分布

とした。ここでは荷重を初期値157kNから40,000回
 載荷毎に19.6kN増大させている。シミュレーション
 では荷重を階段状に漸増させながら図-3の手順で
 解析を行っている。

図-11は、輪荷重走行疲労試験で用いられる境界
 条件であるCase 1と3章で検討した実橋床版相当の挙
 動となる境界条件であるCase 5の解析においてひび
 割れた要素の進展を表した図である。ひび割れてい
 ない要素は白色で表し、ひび割れた要素は発生時の
 輪荷重走行回数に応じて色を分けて表示している。
 Case 1では載荷1回目でひび割れた要素は中央部の
 1,000mm長に限られる。その後、載荷回数の増大に
 伴い、ひび割れた要素は橋軸方向、直交方向、版厚
 方向へと進展する。これはコンクリートのひび割れ
 の開閉による架橋応力劣化に伴いひび割れが進展す
 るためである。200,000回では対角方向へと広く進展
 しており、角の支持部へと到達している。280,000回
 では床版下面のほぼすべての要素がひび割れてお
 り、載荷範囲中央と角の支持部では版厚方向の3/4
 までひび割れが生じている。一方でCase 5では、載
 荷1回目において中央部の1,800mm長の要素がひび
 割れており、Case 1よりも広い領域でひび割れが発
 生する。これはCase 5の境界条件が図-8で示すよ
 うに橋軸方向に床版中央部と同様のモーメント分布を
 与えるためである。以後も橋軸方向、直交方向、版
 厚方向へひび割れた要素が進展しており、Case 1と

異なり200,000回においても対角方向への卓越的な
 進展は見られない。角の支持部に到達するのは
 280,000回であり、その後版厚方向へと進展した。最
 終載荷回数である500,000回において角の支持部は
 版厚の3/4までひび割れ要素が進展する結果となっ
 た。図-11に示されているようにCase 5においては
 ひび割れ要素が輪荷重走行範囲と平行に進展してお
 り、Case 1のように対角方向に卓越的に進展するこ
 とはなかった。Case 5はより実橋床版に近い二方向・
 格子状ひび割れ挙動を示し、Case 1はその挙動が床
 版中央に限られることが、この図より確認できる。

5. まとめと今後の課題

本稿では、パネルRC床版において実橋床版相当の
 構造・疲労挙動を得るために、4つの橋軸方向境界
 条件を検討した。輪荷重走行疲労試験で用いられる
 境界条件と比較を行い、橋軸方向及び直交方向の断
 面に発生する曲げモーメントの分布、橋軸上（対称
 軸断面）と直交軸上（各点載荷時断面）のたわみ変
 位の分布を有限要素解析により算出・比較し、両分
 布より橋軸方向に同様の挙動を得られる実橋床版相
 当の境界条件を得た。

得られた境界条件の下で、階段状荷重漸増載荷で
 のパネルRC床版の輪荷重走行疲労シミュレーショ
 ンを実施した。シミュレーションは輪荷重走行疲労
 試験で用いられる境界条件の結果と比べると、実橋
 床版に近い二方向・格子状のひび割れ挙動をよりよ
 く示しており、本検討で得られた境界条件の妥当性
 を示している。

今後は、実橋上部工（床版、桁、横構、対傾構）
 の解析より床版の発生断面モーメントを取得し、パ
 ネル床版に等価境界条件として与えるスキームを検
 討する。ここで得られる境界条件を本稿のものと同
 比較検討する必要がある。

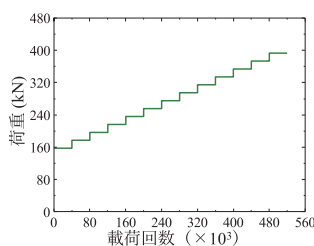


図-10 階段状荷重漸増載荷

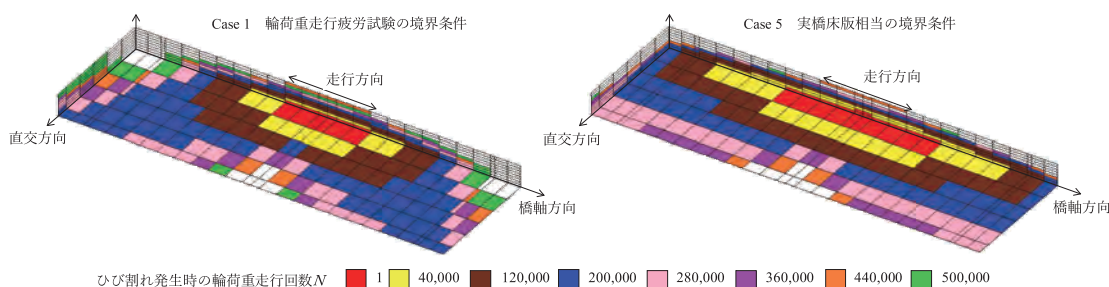


図-11 ひび割れ要素の進展

本研究で構築するスキームにより実橋床版は等価解析条件の輪荷重試験サイズ床版に置き換えられ、これにより床版の耐久性の適切な解析的評価が可能になる。また、実橋挙動により忠実な解析結果が得られるため、格子状ひび割れの床版全体への広がりや床版の性能劣化との関係や、広域な格子状ひび割れと終局押し抜きせん断破壊との関係をより詳細に把握することが可能となり、ひいてはより正確な補修・補強効果の評価にもつながる。

実橋上部工を疲労解析することは計算コストが高いが、等価な解析条件が得られればより低いコストの輪荷重走行疲労試験サイズのパネル床版で疲労シミュレーションの解析が可能となる。実橋床版の劣化現況を反映したモデルを作成することで余寿命推定のシミュレーションが行える解析手法の構築を今後は目指したい。

6. 謝辞

本研究は一般財団法人橋梁調査会の令和元年度橋梁技術に関する研究開発助成を受けて著者（助成研究者）が北海道大学大学院工学研究院・DENG Pengru助教（共同研究者）と実施したものである。また解析においては北海道大学大学院工学院の大学院生KHAN Arslan Qayyum君の多大なる貢献を得ている。ここに記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 松井繁之：道路橋床版 - 設計・施工と維持管理, 森北出版, 2007.
- 2) Peerapong Suthiwarapirak and Takashi Matsumoto: Fatigue Analysis of RC slabs and Repaired RC Slabs based on Crack Bridging Degradation Concept, Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 132, No. 6, pp. 939-948, 2006.
- 3) Ahmed Attia M. Drar and Takashi Matsumoto: Fatigue Analysis of RC Slabs Reinforced with Plain Bars Based on the Bridging Stress Degradation Concept, Journal of Advanced Concrete Technology, Japan Concrete Institute, Vol. 14, No. 1, pp. 21-34, 2016.
- 4) Victor C. Li and Takashi Matsumoto: Fatigue Crack Growth Analysis of Fiber Reinforced Concrete with Effect of Interfacial Bond Degradation, Cement and Concrete Composites, Vol. 20, No. 5, pp. 339-351, 1998.
- 5) Jun Zhang: Fatigue Fracture of Fiber Reinforced Concrete - an Experimental and Theoretical Study, Ph.D. thesis, Department of Structural Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 1998.
- 6) 赤代恵司, 三田村浩, 渡辺忠朋, 岸徳光：丸鋼鉄筋を用いたRC床版の疲労特性に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 1297-1304, 2011.
- 7) 国土技術政策総合研究所：コンクリート系床版の疲労耐久性の解析的評価手法の開発, 国土技術政策総合研究所資料共同研究報告書, 第844号, 2015.

日本での就労を希望するベトナム人橋梁技術者の意識および資質に関する調査研究

ホーチミン工科大学 教授
長大基礎地盤ベトナム（株）

中村 一平
HO THAI HUNG

まえがき

我が国の人口予測によると、人口は確実に減少し、少子高齢化のために15歳以上65歳未満の労働生産人口も減少する。

このような状況により、建設業界をはじめとした日本企業の多くは外国人材にその補完的な役割を期待して彼らを積極的に採用した。

しかし、コロナウイルスの影響で事業が縮小傾向にあり、建設業界における人材不足に関する報道や情報に接する機会は少なくなったが、コロナウイルス禍が収束した際には再び労働力不足が懸念される。

本研究は、コロナウイルス禍の前に、日本での就労を希望している親日的で勤勉なベトナム人学生や橋梁技術者などを対象に彼らの意識や資質に関する調査した結果を考察したものである。

1. 調査概要

(1) 調査目的

ベトナム人は、親日の人が多く、技術力や給料が高く、四季があり、安全・快適な日本での就労を希望する若者が数多くいる。

現在、日本で就労しているベトナム人労働者31.6万人（全外国人労働者の21.7%）¹⁾、ベトナム人留学生は7.2万人（全留学生の24.2%）²⁾であり、就労者の多くは技能実習生として働いている。彼らの就労環境や就労に関する意識調査は自治体³⁾や連合⁴⁾などで行われている。

しかし、高度技術者の就労環境や就労に関する彼らの意識調査は見当たらず、高度技術者の日本に対する意識や彼らの資質を調査し、今後の就労支援における基礎資料とすることを目的とする。

(2) 調査対象

本研究は、ベトナム在住の大学生、そして大学を

卒業し高度な技術力を有する者、および過去に日本で教育を受けた人、また、現在、日本に住んでいるベトナム人学生と技術者、さらには、ベトナム人留学生の指導教員とベトナム人技術者が勤務する職場の関係者を対象に行った。

全回答者は514名であるが、本レポートでは紙面の関係で在越の技術系学生および技術者からの結果のみ記述した。その内訳は下記のとおりである。

- ①ベトナムの北部（ハノイ近郊）と南部（ホーチミン近郊）の大学に在学しているベトナム人技術系学生（271名 内建設系55名）
- ②ベトナム在住で日系企業に勤務しているベトナム人技術者（85名 内建設系45名）

(3) 調査方法

調査は、出来る限り面接により実施することとしたが、調査対象者がベトナムおよび日本国内の広範囲に亘っているために、リンクによるアンケートも併用した。

リンクを利用したために、回答者からその知人へと連鎖的に拡散して、数多くの結果を得ることができた。

アンケート項目は、下記のURLで参考にされたい。

在越ベトナム人学生

(for Vietnamese students in Vietnam)

<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSe2l7zqFkW4mIbsHFSdbxGvJv2i7Ac9nBkrsD5cAlw6OK4q0A/viewform>

在越ベトナム人技術者

(for Vietnamese engineers in Vietnam)

<https://docs.google.com/forms/d/1cbzOpZe3LK0Pz8xus0RaIqMkhsQxkWVWeqmprX95JYI/edit>

(4) 調査期間

2019年7月25日から2020年2月29日

2. 調査結果の概要

(1) ベトナム人の気質と日本観・日本人観

面接およびアンケートから得られたベトナム人の日本観について述べる。

テレビなどを通じて日本文化がベトナム人の若者を中心に広く周知されて浸透している。その中心は、アニメである。また、着物や浴衣、そして寿司、ラーメンなど和食も憧れの的である。さらに、日本の技術力は大変高く評価されており、特に、自動車やバイクは日本製品が席巻している。公共交通が乏しいベトナムでは、バイクが一般的な交通手段であるが、その79%がホンダ製であるとの報道⁵⁾があった。日本については、地震や台風など自然災害は多いものの、ゴミのない清潔な国、富士山などの美しい国、安全・安心そして快適な国、交通機関が発達した便利な国として人気がある。

以上のようなベトナム人の日本国に対する憧れや尊敬の気持ちのために、日本人に対しても大変な好意を持っている。アンケート結果では、多くの回答者が、日本人を「勤勉」「熱心」「時間など規則を厳守」「誠実」「親切」「優しい」など好意的に答えている。

以上の通り、ベトナム人は大変な親日である。しかし、その一方で、「無関心」「水臭い」「低学歴の人ほど外国人を見下す人が多い」「猫かぶり」「曖昧」など否定的な回答もあった。

日本以外の近隣諸国については、同じ共産国でありながら、南沙諸島での領土問題などがある中国との交流は想像したほど積極的ではない。

韓国とは、古くから交流があり、現在も韓国系大型商業施設、ホテルが存在している。ホーチミン人文社会科学大学には、日本学部と共に韓国学部もあり、多くの韓国人学生がベトナム語を学んでいる。(残念ながら、日本人学生を見かけたことはない。) 彼らは将来、韓越両国の経済・文化の懸け橋となり、より一層の連携が図られるものと思われる。食文化についても、ベトナムと韓国は関係が深く、外食好きのベトナムは、ベトナム料理に次いで韓国料理を好むとの調査結果⁶⁾がある。その理由は、一般的に、韓国料理は安価なために利用し易く、日本料理は高価なために敬遠されるとのことである。ベトナム人が日本料理を手軽に食べられるようになることで、食文化を通じてより一層、親密になれると期待される。

ところで、市内中心部に行くと、数多くの老若男女の欧米人観光客を目にする。あれほど、長期間に亘り、アメリカなどと激しい戦争をした国が、わだかまりがあるものの、欧米人を積極的に受け入れている心の広さにいつも敬服する。

(2) ベトナム人の日本での就労意識および資質

日本の技術力や給料の高さに魅力を感じて、日本での就労を希望する者が多いものの、ホーチミン工科大学(以下、「HCMUT」という。) 土木工学部 Dr.Luu Xuan LOC副学部長の話しでは、ベトナムは経済成長率が約7%と極めて高く、現在、社会基盤整備が積極的に行われており、土木系学生の就職はベトナム国内でも十分に賄えており、日本への就労希望者は多くないとのことである。

なお、発展途上のベトナムでは技術系大学は大変人気があり、HCMUT土木工学部の定員は700名と日本の一般的大学の約10倍である。また、その規模が大きいために、名称が土木工学科ではなく、土木工学部であり、その中に高速道路工学科などがあり、各学科には、十数名の教員が所属している。

そして、教育内容も充実しており、朝は6:30から授業が開始し、1コマは2時間30分(一般的に、日本は、1時間30分)で、宿題も多く、授業で習った以上の設問もあり、図書館などで調べる必要があるとのことである。

そのように厳しい修学環境のために、入学時には700名が在籍していたが、卒業できる学生は500名程度になるとのことである。さらに、卒業には、TOEIC 500点が必要であり、多くの学生は仕事に必要な英語力を身に付けており、欧米で就職する者も多い。

日本での就労や留学を希望しているHCMUTの学生は、正規の授業終了後の18時30分から21時まで日本語の語彙、文法、会話などを学び、5段階に区分されている日本語能力検定のN2合格を目指して励んでいる。

このことは、HCMUTに限らず、アンケートの対象にした北部のハノイ土木大学も同様であり、ベトナムで高度の教育を受けた高度技術者および学生の資質はきわめて高度であることを認識しておく必要がある。

日本に対する強い憧れがあるものの、日本での就労を希望する在ベトナム人建設系技術者は62%(非

建設系技術者等は53%)とさほど多くない。それは、高いと思われている日本での賃金がそれほど高くないことも要因と思われる。最低賃金が東京では1,000円を超え、全国加重平均が901円であるものの、日本の地方部では790円⁷⁾と、韓国の747円⁸⁾と遜色がない。

また、在ベトナム人建設系学生の85% (非建設系学生等は77%) が日本での就労または留学を希望するものの、その多くは、上記の理由により実現していない。また、学生よりも社会人が日本での就労を希望する割合が少ない理由は、賃金以外に

- ① すでにベトナム国内で結婚しており家庭がある
- ② 日本への送り出し機関との不調などである
- ③ 日本語能力に自信がない

などである。学生も、「親と一緒に暮らしたい」ことが日本での就労を希望しない一因である。ベトナム人の家族愛は想像以上に強く、遠くで離れて働くことには抵抗がある。インターネットによるテレビ電話もあり、距離感が短くなったとは言え、国民性であり、当面、この問題は残ると思われる。

面接調査では、アニメなど日本の文化に憧れて、会社や仕事内容をよく調べないで、「まず日本に行きたい」と回答したベトナム人学生がいた。

最近では、ベトナム人の若者もSNSで情報交換しており、良い情報はもちろんのこと、良くない情報も瞬時に拡散することに注意を払う必要がある。

(3) 生活上の課題

日本に滞在している、または、滞在経験のあるベトナム人に日本滞在中で困ったことを尋ねた。それは、日本語の問題であった。当然、訪日に際して、日本語を学んでいるものの、「ベトナムの日本語学校で習った日本語は役立たない」との回答もあった。本人の努力や滞在期間中に、日本語は身に付くと思われるが、特に、来日後の不安が大きいようで何らかの支援が必要と思われる。困ったこととして、銀行口座の開設、クレジットカードの発行、携帯電話の契約など身近なことのようである。特に、1年間のビザで入国した者は、日本語能力の問題のみならず、信用上の問題で自分一人での各種契約行為は困難を極めているようである。

また、ベトナムと日本の生活様式の違いにも戸惑いがあるようで、訪日前には、最低でもN2程度の日本語能力を身に付け、ビジネスマナーはもち

ろんのこと、電車に乗る時の乗車券の買い方など基本的な生活スタイルも学んでおく必要がある。

彼らの要望として、「もっと、日本人と話したい」「各地に無料の日本語学校や文化教室を設けてほしい」「ベトナム人を差別しないでほしい」などがあった。

(4) 職場での課題

配属された会社、職場により待遇は大きく異なっていることが分かった。

技能実習生の問題は、マスコミにも取り上げられて社会問題化しているが、高度な教育を受けた技術者も同様の問題を抱えている。

まず、訪日前に送り出し機関から、仕事内容や待遇に関する十分な説明を受けておらず、配属されてはじめて、「思っていた仕事ではない」ことに気付くことがある。これは、送り出し機関はベトナム人技術者を日本企業に紹介することで一般的に初任給の3カ月分の報酬を得ることになっている。さらに、ベトナムで日本語教育を含めた就職斡旋をすると成功報酬として、80万円から100万円が得られるために送り出し機関が斡旋を急ぐことにより、ミスマッチが生じている。

また、熱心に技術指導する会社・職場があるものの、一部では、指導の名の下で「いじめもどき」のこともある。また、「低学歴な日本人ほど、外国人を見下す人が多い」との刺激的な回答もあった。

いずれにしても、就職に際しては、会社の業務内容、担当する仕事内容、待遇などの説明を十分に受け、労使双方が納得した上で日本に来ることが肝要である。面接により、「日本に行きたい。日本に行きたい。」が先行して失敗することが多いことが判明した。

なお、処遇は、月給20万円程度、残業および土日勤務で約5万円、宿舍代として約3万円徴収されることが一般的である。ところで、支度金やボーナス支給の有無など企業により大きく異なり、SNSによる待遇に関する情報交換で不信感が拡散している。

3. 調査結果

面接およびアンケートの結果を述べる。

(1) 在越ベトナム人建設系学生

ベトナムに住んでいる高度の建設系教育を受けている若者の日本に対する意識を知るためのアンケー

ト結果を分析した。

アンケート回答者は、ハノイ土木大学やホーチミン工科大学などの建設系学生で、日本に何らかの関心・興味を持っている学生である。

回答者の学年別人数は、表-1の通りである。

表-1 回答した在越ベトナム人建設系学生の学年別人数

	大学 1年	大学 2年	大学 3年	大学 4年	大学 5年	大学 6年	院生	合 計
人数	19	5	1	12	15	1	2	55
%	35	9	2	22	27	2	4	

ベトナムで建設系学科に所属する学生に日本での就職、または留学の希望について質問した。その結果、希望する学生は、85% (47名) あった。

表-2 在越ベトナム人建設系学生の日本就労希望者数

	希望あり	希望なし	合 計
人数	47	8	55
%	85	15	

文科系も含む非建設系学生にも同様の質問を行ったが、日本での就職や留学を希望する学生は77%であるが、表-2に示す通り、建設系学生の85%が日本での就労を希望しており、より一層、日本に魅力を感じている。

その理由は、

- ① 日本の技術力の高さ
- ② 教育環境や労働環境が良い
- ③ 留学生に対する奨学金が充実している
- ④ 日本人と一緒に働くことで技術や日本文化を修得できる
- ⑤ 給料が高い
- ⑥ 日本人の規律正しさ、勤勉さ、責任感、時間厳守を学びたい

などであった。

将来、日本でどのような会社で、どのような仕事をしたいかとの質問には、予想通り、

- ① 建設会社で、品質管理や安全管理などの施工管理
- ② 鋼橋の施工
- ③ コンクリートに関する仕事
- ④ 道路・橋梁エンジニア
- ⑤ 建設コンサルタント

などに携わりたいと希望している。

以上の通り、大学で学んだことを活かせる職場・仕事を希望しており、さらには、職場環境が良く、給料も良く、週休2日など福利厚生が充実している会社を希望するなど自身の進路について真剣に考えていることが分かった。

しかし、一方では、日本での就職に否定的な意見としては、

- ① 両親の賛成が得られない
- ② 家族から遠くに離れたくない
- ③ 心細い
- ④ 母国（ベトナム）の開発に携わりたい

などであった。日本での就労について、その素晴らしさを認識させると共に、外国人が日本で就労する際に生じる不安や疑問を共同で解消させるなど生活面でのより一層の支援をする制度を充実することにより、さらなる交流拡大が図れるものと思われる。

そして、日本での留学、就労には、日本語能力N1,N2が必要であることを認識すべきである。

また、前述のLoc先生の建設系学生の就職先は、ベトナム国内で賄えるとの意見も考慮すべきことである。

(2) 在越ベトナム人建設系技術者

ベトナムで建設系技術者として働いているベトナム人に日本に対する意識を調査した。

回答者の年代別人数は、表-3の通りである。

表-3 回答した在越ベトナム人建設系技術者の年代別人数

	20歳代	30歳代	40歳代	未記入	合 計
人数	26	10	7	2	45
%	58	22	16	4	

現在、在職している会社で、どのような仕事をしているかとの質問には、

- ① 橋梁会社で設計業務・施工管理
- ② 橋台の設計および図化
- ③ コンクリート技術と検定
- ④ 実験室での試験
- ⑤ 建設コンサルタントでCAD・BIMなどに携わっている。

日本での就職について、その希望について質問した。その結果を表-4に示す。

表-4 在越ベトナム人建設系技術者の日本での就労希望者数

	希望あり	希望なし	合計
人数	28	17	
%	62	38	

日本での就労を希望する在越建設系技術者の比率は62%（28名）ある。在越ベトナム人建設系学生の85%が日本での就労を希望しているのに比べて、日本での就労を希望する技術者の比率は低い。

その理由は、

- ① ベトナム国内ですでに、結婚しており家庭がある
- ② すでに、ベトナム国内で就職している
- ③ 日本語能力に自信がない
- ④ 日本の物価が高い

などである。

将来、日本でどのような会社で、どのような仕事をしたいかとの質問には、

- ① CIM,BIMを展開する会社で設計者として働きたい
- ② スーパーゼネコンで働きたい
- ③ 自身の専門分野を活かした仕事ができる会社に勤務したい
- ④ 社員の生活、希望を考える会社に勤務したい

などの回答が得られた。

なお、「日本人は、ベトナム人を差別し、搾取するので、日本へは行きたくない」との残念な回答もあった。日本人として、真摯に受け止める必要がある。

学生と同様に、日本での就労には、日本語能力N1,N2が必要であることを認識すべきである。

4. 提言とまとめ

技能実習生に関する情報は数多くあるが、これまで、調査があまり行われていなかった大学などで高度の教育を受けた建設系技術者や現在、教育を受けている建設系学生を対象に面接およびアンケートにより日本に対する意識などの調査を行った。

基本的には、建設系の技術者および学生・院生を調査の対象にしたが、ベトナム人の一般的な傾向を把握するために、建設系以外の技術者および学生からの面接・アンケート結果も参考に考察を行った。その結果、

- ① 日本での就労および留学に際しては、N2程度の日本語は必須である。

アンケート回答者の多くは、N3、N4を有しており、来日までに日本語を勉強することにより、

N2以上の能力を身に付けると期待される。

- ② 在越の建設系学生の85%は、将来、日本で就職や留学を希望している。しかし、建設系技術者の日本での就労希望は62%であった。

その理由のひとつが、ベトナムでは、家族と離れて暮らすことに大きな抵抗があることが要因である。家族の団結が非常に強い国柄であり、インターネットの普及やSNSの利用により、ベトナムと日本の距離感が短くなっていることを体験させる必要がある。

- ③ 学生時代に日本企業によるインターンシップなどを通じて日本を体験させる制度を充実することも必要と思われる。

- ④ 賃金は、近隣諸国と比べても日本は思ったほど高額ではない。

給料の多寡のみならず、福利厚生の実施や従業員・近隣住民などとの交流を通じて外国人が暮らしやすい社会を構築する必要がある。

- ⑤ 雇用先と外国人労働者の間でミスマッチが生じている場合がある。

その原因は、送り出し機関が事前に仕事内容を具体的に説明していないことにより生じている。ベトナム人技術者は、就職先を決める際には、勤務の職種、担当する仕事内容、雇用条件などの記載された雇用契約書を熟読して、労使双方が納得して決定する必要がある。

以上の通り、ベトナム人の「行きたい」と「行く」は意味が異なっている。いずれにしろ、いつまでも日本が選ばれる国であり続ける保証はない。外国人を日本の労働力として迎え入れるには、日本人と外国人双方のさらなる努力が求められる。

次に、ベトナム人技術者の資質については、回答者の多くは日本での就労において必要とされる日本語能力N2を有している。

専門能力についても、ベトナムで国立大学の上にランクされている国家大学ホーチミン工科大学やハノイ土木大学の卒業生は充実したカリキュラムによる教育を受けており専門分野の能力は極めて高い。

日本を志向したベトナム人技術者や学生の多くは、日本での経験により、日本の技術や文化を身に付けて母国ベトナムに戻り、母国の発展のために大きな貢献を果たしている。

彼らを支援することが日本国、そして日本人が果たすべき国際貢献である。

あとがき

今回のコロナウイルスの影響により、航空機の欠航や減便、ビザの発給停止などにより国際交流に支障が生じているが、中長期的には、さらなる発展を期待したい。

より詳細な情報が必要な方は、ippeii3367@gmail.comまで連絡を頂ければ幸甚である。

謝辞

本研究の実施に際して、ハノイ地区でのアンケート集計および翻訳には、長大基礎地盤ベトナム(株)のNgoc女史、ホーチミン地区ではホーチミン工科大学 Office for International Programs のThuy先生、Linh先生、Huyen先生にベトナム語のアンケート用紙の作成、リンクの構築、アンケート集計および翻訳などいろいろとお世話になった。心からお礼を申し上げる。

参考文献

- 1) 「外国人雇用状況」の届出状況まとめ（平成30年10月末現在）、厚生労働省職業安定局外国人雇用対策課プレスリリース、平成31年1月25日
- 2) 平成30年度外国人留学生在籍状況調査結果、独立行政法人日本学生支援機構、平成31年1月
- 3) 外国人材就労意識調査 中間報告書、広島県、令和元年11月
- 4) 外国人労働者の受け入れに関する意識調査 2018、連合、2018年10月18日
- 5) The Saigon Times（2020.1.17付け）
- 6) 地域別最低賃金の全国一覧、厚生労働省HP
- 7) 2020年の最低賃金（時給）は2.87%増の8,590ウォンに、日本貿易振興機構 ビジネス短信、2019年8月8日

第36回国際橋梁会議（IBC2019）の聴講参加と ワシントンD.C.、ニューヨークでの橋梁現地調査報告

中部支部 調査役 鎌田 裕一
近畿支部 橋梁課長 倉田 豊

1. はじめに

2019年6月10日～12日までの3日間、第36回国際橋梁会議（IBC2019）がアメリカのメリーランド州ナショナルハーバーにあるゲイロードナショナルリゾート&コンベンションセンターで開催されました。

本報告は、会議の聴講と近隣のワシントンD.C.にある橋梁の現地調査、ニューヨークでの橋梁の現地調査をとりまとめたものです。なお、今回の日程は表-1のとおりです。

表-1 日程表

日程	内容
6月8日（土）	成田泊
6月9日（日）	成田→ワシントンD.C.
6月10日（月）	ワシントンD.C.着のあと、IBC2019聴講 及びワシントンD.C.橋梁の現地調査
6月11日（火）	IBC2019聴講 及びワシントンD.C.の橋梁の現地調査
6月12日（水）	IBC2019聴講 及びワシントンD.C.の橋梁の現地調査
6月13日（木）	ワシントンD.C.→ニューヨーク
6月14日（金）	ニューヨーク市内の橋梁の現地調査
6月15日（土）	ニューヨーク→成田
6月16日（日）	成田着

2. IBC2019の概要と聴講報告

IBCは、毎年1,000橋以上の管理者や政府関係者、橋梁設計者、建設業幹部、そして、米国全土および海外からのサプライヤーが集まる会議です。今回は36年目ですが、前年の2018年の参加は41の州と15か国から来場があったそうです。

聴講したセッションのなかで、スペシャルセッションのうちブリッジ アセット マネジメント セッションを代表して紹介します。

米国連邦道路管理局（FHWA、ワシントンD.C.）から、交通資産管理計画（TAMP）の開発と実施状況、得られた教訓や利用可能な支援ガイダンスなどの紹介がありました。

アセットマネジメントのセッションは、我が国とほぼ同様にB/C（便益費用分析）での曲線における評価が報告された。橋梁の各部材には作業タイプとタイミングの最適な順序があること、またそのタイミングは橋梁の各部材の平均余命と必要性を考慮する必要があるとする考えが紹介されました。費用の面では各部材の供用年間における更新回数は見られず、供用年間に1回の補修が基本のようでした。我が国においては、特に地方でフロー効果の期待が大きく、補修方針を同



写真-1 IBC2019開催場所



写真-2 IBC2019会場にて（左鎌田、右倉田）

列で評価することは難しいですが、補修工事による社会的・経済的な面から、更新回数が極力少ない補修方法への取り組みの重要性を学びました。

3. 橋梁の現地調査報告

3.1 フレデリック・ダグラス・メモリアル・ブリッジ (ワシントンD.C.) ※架け替え工事中

現道の車道部の床版は、グレーチング床版になっており、荷重制限からやむなく採用された形式と推定されますが、補修工程の面からも、置き換えが前提の応急対策としては有効であると感じました。(写真-5,6)

3.2 11th・ストリート・ブリッジ (ワシントンD.C.)

アナコステア川を渡る、多主鉸形式で鋼製型枠のRC床版が組み合わされており、プレファブ化を徹底しているようでした。なお、老朽化により将来は公園に変える計画があるそうです。(写真-7, 8)

3.3 セオドア・ルーズベルト・ブリッジ (ワシントンD.C.)

ポトマック川を渡る、鋼連続有ヒンジ鉸橋 (リベット) であり、ヒンジはピンハンガー構造でした



写真-3 スペシャルセッション会場

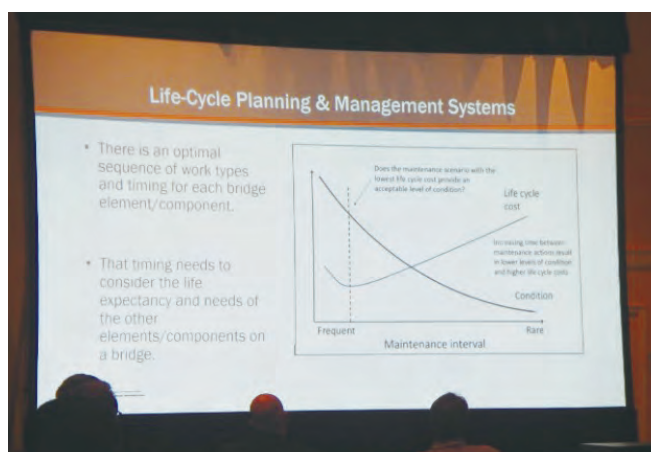


写真-4 紹介されたスライド (メンテナンスインターバルのイメージ)



写真-5 橋梁全景 (架け替え工事中) と将来完成予想図



写真-6 グレーチング床版近景 (橋面からの排水が垂れ流しになっていました)



写真-7 橋梁全景と将来完成予想図



写真-8 床版下面の状況 (鋼製型枠が車道部で使われていました)

ピンハンガー構造は、これまで事故も多く、安全性に疑問符が打たれる場合が多いのですが、落橋防止システムの併用が標準となった現在、ピンハンガーによる補修も考えられる場合もあると思いました。(写真-9、10)

3.4 アーリントン・メモリアル・ブリッジ (ワシントンD.C.)

ポトマック川を渡る、RC充腹アーチ橋であり、訪れた時はセンタースパンを取り替える工事の際中でした。また、表面の石造りの花崗岩は研磨され洗浄されていました。(写真-11、12)



写真-9 橋梁全景

3.5 サウスイーストフリーウェイ (ワシントンD.C.)

最近更新されたと見られる鋼鉄桁の跨道橋です。床版下面にデッキプレート（おそらく型枠材）を使用し、床組みはX型の対傾構のみで横構はありません。端支点は沓座外端に防塵壁が設置され、台座コンクリートを設けることで支承が保護されています。(写真-13、14)

3.7 ブルックリン・ブリッジ（ニューヨーク）

アメリカでもっとも古い吊り橋の1つであり、1883年に完成・竣工しています。鋼製ワイヤーを使った



写真-10 スパン中央のヒンジ
(ヒンジからの漏水が顕著でした)



写真-11 センタースパンの工事の状況

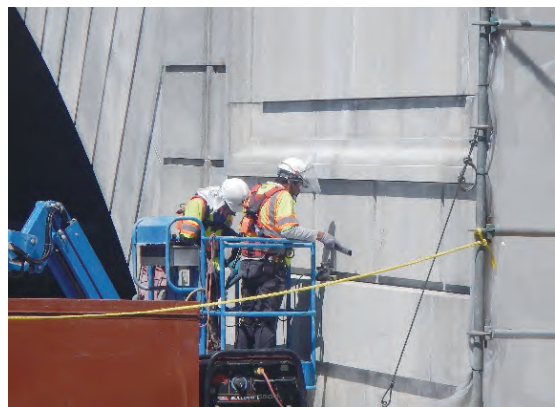


写真-12 花崗岩は研磨され洗浄されていました



写真-13 跨道部下面状況



写真-14 端支点部



写真-15 上層の歩道からの橋梁全景



写真-16 下層の車道



写真-17 橋梁全景



写真-18 真横にトラムが通っています



写真-19 地下鉄車内（ワシントンメトロ）



写真-20 バスターミナル（ワシントンD.C.サウザンアベニュー St.）とバス時刻表

世界初の吊り橋です。2層に分かれていて、上層は人や自転車が、下層は片側3車線の車道となっています。(写真-15、16)

3.8 クイーンズボロ・ブリッジ（ニューヨーク）

1909年完成のキャンチレバートラス橋であり、真横にトラムと呼ばれるロープウェイが通っています。(写真-17、18)

4. 公共交通機関

ワシントンD.C.とメリーランド（ナショナルハーバー）ではワシントンメトロの地下鉄とバスを、ニューヨーク（マンハッタン島）ではニューヨーク

市地下鉄を利用しました。車両と座席の大きさや、プラットフォームとバスターミナルの状況も日本とほぼ同様で、運行ダイヤも正常に感じました。なお、ニューヨーク市地下鉄は複線で、各駅停車と急行が運行されていました。(写真-19、20)

5. おわりに

今回、IBC2019に出席させていただき、海外の技術動向を知るきっかけになりました。また、海外の橋梁、特に歴史的な橋梁を視察でき、大変有意義もありました。このような機会を与えていただきましたことに感謝するとともに、今回得た知見を今後の業務に活かしていければと考えます。

以上

fibシンポジウム2019（クラクフ）参加とポーランド・チェコ・ドイツにおける橋梁視察報告

四国支部 橋梁課長 越智 祥孝

1. はじめに

fib（Fédération internationale du béton：国際コンクリート構造連合）のシンポジウムが2019年5月27日から29日までの3日間、ポーランドのクラクフにて開催された。当シンポジウムに、公益社団法人プレストレストコンクリート工学会の支援を得て結成された調査団に参加し、シンポジウムの聴講及び開催国ならびに近隣に位置するチェコおよびドイツの橋梁を視察したのでその概要を報告する。

2. 全体行程

行程概要を以下（表-1）に示す。

3. fibシンポジウム2019

3.1 シンポジウムの概要

2019シンポジウムは、“Concrete-Innovations in Materials, Design and Structures”をテーマに、クラクフ市内にあるベストウエスタンプレミア クラクフホテル（Best Western Premier Kraków Hotel（写真-1）にて開催された。本シンポジウムには48か国から500人以上の参加者があり、セッションでは補修と補強、せん断とねじり、疲労と繰り返し荷重、耐久

性と持続可能性、プレファブなど幅広いトピックが取り上げられた。参加者は、日本が最多（78名）で、次いでドイツ（64名）、ポーランド（62名）であった。

表-1 行程概要

日程	月日	都市・空港名等	活動内容
1日目	5月25日	羽田空港 フランクフルト空港	航空機による移動
2日目	5月26日	フランクフルト クラクフ	・第2メイン橋視察 ・ビスワ川橋視察
3日目	5月27日	クラクフ	【fibシンポジウム参加】
4日目	5月28日	クラクフ チェコ	【fibシンポジウム参加】 ・ブラビカ高架橋視察
5日目	5月29日	クラクフ	【fibシンポジウム参加】 アウシュビッツ視察
6日目	5月30日	クラクフ空港 デュッセルドルフ空港 ケルン	・フレイ橋視察 ・クニー橋視察
7日目	5月31日	ケルン ヒルシュベルグ	・ドイツアー橋視察 ・リンブルク高架橋視察 ・ニーベルンゲン橋視察
8日目	6月1日	ブラウンスバッハ フランクフルト空港	・コッハタール高架橋視察 ・ムルバレー高架橋視察
9日目	6月2日	羽田空港	航空機による移動



写真-1 Best Western Premier Kraków Hotel

表-2 基調講演内容

	Speaker	Title
1 日 目	Marco di Prisco	Critical infrastructures in Italy: state of the art, case studies, rational approaches to select The intervention priorities
2 日 目	Rudy Ricciotti	Untitled
3 日 目	Renata Kotynia	Is FRP reinforcement alternative to steel in future structural concrete perspective?
	Mikael Braestrup	Concrete plasticity-a historical perspective

表-3 一般講演発表件数

Topics	講演数	日本分
INNOVATIONS IN MATERIALS	54	5
INNOVATIONS IN DESIGN	61	3
INNOVATIONS IN STRUCTURES	67	10
STRENGTHENING & REPAIR	20	4
SHEAR & TORSION	27	1
FATIGUE & CYCLIC LOADS	12	0
SUSTAINABILITY & DURABILITY	30	4
PREFABRICATION	12	0
合計	283	27

3.2 基調講演

本シンポジウムで表-2に示す基調講演（Keynote Lecture）が行われた。また2日目の基調講演の前には Professor Andzej B. Ajdukiewicz の功績を紹介する特別講演が行われた。

3.3 一般講演

一般講演のトピック名および発表件数を表-3に示す。

日本からは27件の講演が行われ、本調査団からは下村団長が座長を務め、講演は9件で8名が行った。

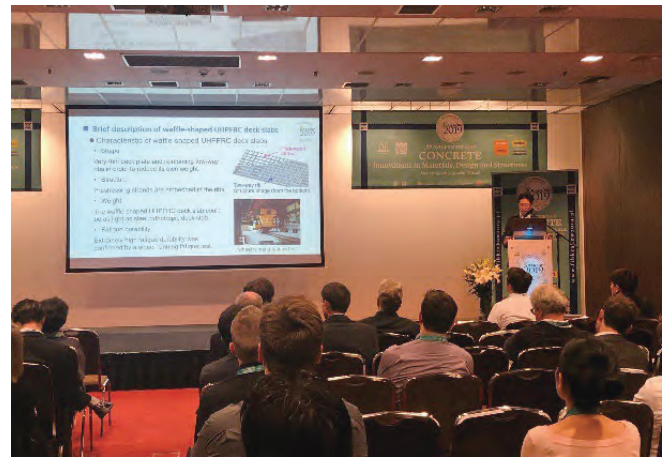


写真-2 一般講演の様子（本調査団：鹿島建設(株)藤代氏）

4. 橋梁視察

4.1 ビスワ川橋（ポーランド）

ビスワ川橋は、ビスワ川に架かる高速道路S7号線の一部であり、北と南の地方を結ぶ斜張橋である。橋長は706m、斜張橋部の最大支間長は200m、主塔高さは63mのA型である。マハルスキ卿にちなんでマハルスキ橋とも呼ばれており、マウオポルスカ地方でもっとも長い橋である。

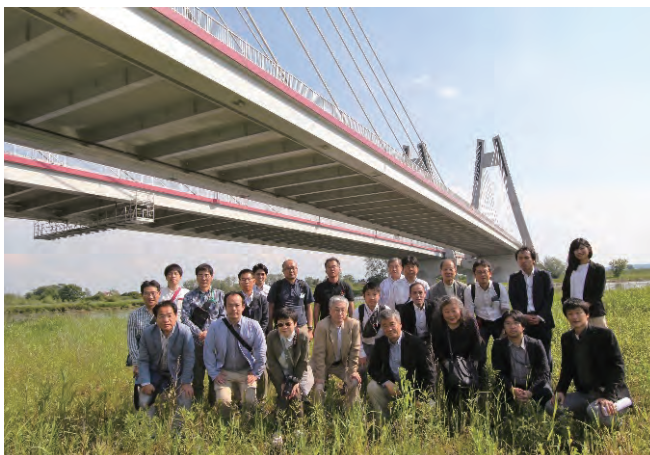


写真-3 ビスワ川橋

4.2 フラビンカ高架橋（チェコ）

フラビンカ高架橋は、チェコのオストラバ市とオパヴァ市を結ぶ高速道路でありフラビンカ渓谷を渡る橋として建設されたものである。ストラット付き鋼箱桁橋で床版はコンクリートである。橋長327m、最大支間長は66m、幅員は25.7m、架設は送り出し架設工法で2015年に完成している。



写真-4 フラビンカ高架橋

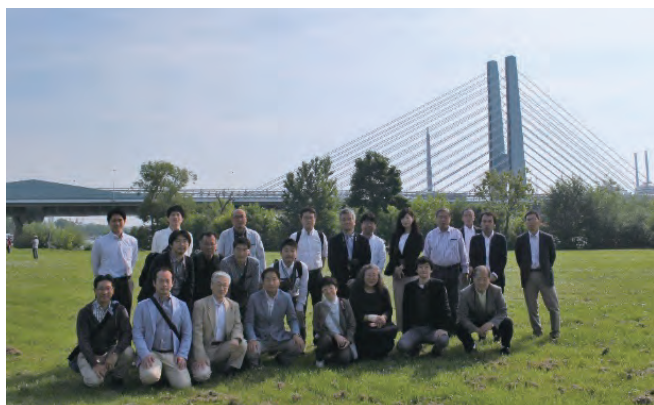


写真-5 第2メイン橋



写真-6 フレーエ橋

4.3 第2メイン橋（ドイツ）

第2メイン橋は、フランクフルトにあるヘキスト工業地域内のメイン川に架かる、工業地域内の輸送用道路・鉄道橋併用のデイビダーク工法により架設されたPC斜張橋である。橋長294m、最大支間長148m、幅員31m、主塔高さ52mで1972年に完成した。道路・鉄道併用の斜張橋として、そして斜材に並列ケーブルを用いたハープ型の斜張橋としては世界初の橋梁であった。

4.4 フレーエ橋（ドイツ）

本橋はデュッセルドルフ市フレーエにおいてライン川を跨ぐ、鋼とコンクリートの複合斜張橋である。橋長は1148m、幅員は41.7m、主塔はRC逆Y字型高さ145mで1979年に完成した。本橋は完成から40年が経過しており、2012～2013年に伸縮装置の交換、2017年にコンクリートの補修工事、2015年にケーブルの点検工事が実施されている。現在も大規模な補修工事が行われており、移動式台車を使った鋼桁の点検、補修を行っている状況が見られた。

4.5 クニー橋（ドイツ）

本橋はライン川に架けられた鋼斜張橋で、デュッセルドルフ市のフリードリヒシュタットとオーバーカッセルを結んでいる。橋長は561m、最大支間長319m、幅員28.9m、主塔は鋼製T形断面で高さ114m、1969年に完成した。

4.6 ドイツァー橋（ドイツ）

ドイツァー橋はケルンの大聖堂にほど近いライン川に架かる橋梁であり、同スパン、同桁形状で鋼橋とコンクリート橋が並ぶ珍しい橋梁である。橋長は437m、最大支間184m、幅員16.3mであり1980年に完成した。下流側の鋼橋は1948年に架橋された世界初の鋼3径間連続箱桁橋であり、レオンハルトによる設計である。



写真-7 クニー橋



写真-8 ドイツァー橋

4.7 リンブルク高架橋（ドイツ）

本橋はアウトバーン3号線の高架橋で、リンブルクのラン川に位置する橋梁である。PC2 主箱桁橋で上下線が隣接している橋梁である。橋長は450m、最大支間95m、幅員21.8m、橋脚高さは最大約60mの上下線分離構造で2016年に完成した。橋脚は自動クライミングフォームを利用して作られたRC製で、上部工はPC2 主箱桁橋でキャンチレバー工法により施工されている。

4.8 ニーベルンゲン橋（ドイツ）

本橋はドイツ連邦道路47号線のライン川に架かる橋梁で、ラインランド・プファルツ州の町ヴォルムスとヘッセン州の町であるランペルトハイム市を結んでいる。現在、旧橋と新橋の2橋が並行して架設されており、ニーベルゲン塔が旧橋に設けられている。橋長は744m、最大スパン114mのPC4 径間箱桁橋で旧橋は1953年、新橋は2008年に完成した。旧橋

の河川部は、世界で初めて支間長100mを超えた張出し架設工法による橋梁で、その建設中に、日本の技術者（齋藤武幸氏ら）が現地を訪れ、張出し架設工法に感銘を受け、その技術を日本に導入し、日本初の張出し架設工法となる嵐山橋につなげたとのことである。

4.9 コッハタール高架橋（ドイツ）

本橋はアウトバーン6号線にあり、ハイルブロンとニュルンベルクの間のコッハ渓谷を横断する橋梁である。桁下高は谷底から最大185 m（橋脚高：最大178 m）で、ドイツでもっとも高い高速道路橋である。橋長は1128m、最大支間長138m、幅員31mで1979年に完成した。本橋の箱桁部は幅8.6m、高さ6.5mであり、11.2mの張出し床版をコンクリート製のストラットが7.67mピッチで支えている。高くスレンダーな橋脚も特徴の一つである。



写真-9 リンブルク高架橋



写真-10 ニーベルンゲン橋



写真-11 コッターール高架橋



写真-12 ムルバレー高架橋

4.10 ムルバレー高架橋

本橋はドイツ連邦道路14号線の高架橋で、バーデン・ヴュルテンベルク州レムス・ムル郡バックナング市を流れるムル川の渓谷を横切っている。橋長419m、アーチ支間108m、幅員14.3mで、2011年に完成した。2つの連続したアーチ構造で、アーチリブ上の支柱と両岸斜面部の橋脚は上部工と一体となっており、橋台上のみ支承構造となっている。アーチリブおよび上部構造は固定式支保工にて施工されている。上部構造は2主桁構造で、上部構造には主桁側面に突起形状が確認でき、主方向にPCが配置されている。

5. おわりに

fibシンポジウムに初めて参加させていただいたが、世界各国の参加状況から、この分野への高い関心がうかがえ、盛大であった。

本シンポジウムの参加者の最多は我が国日本が最多の78名であったが、一般講演の講演件数は27件で

あり、我が国はドイツ、ポーランドに次ぐ3番目となっている。また、講演修了の質疑応答では日本人が質問するケースは極端に少なかったように感じた。自分自身を含め、言語の壁と控え目な性格は、今までもこれからも、日本人にとって課題と思われる。

橋梁視察において、多様なニーズに応じて構築された各都市の歴史的な橋梁は、単なる道の一部ではなく“橋である”という主張が伝わってくるものが多かった。B/Cに重きを置く日本にとっては羨ましくもあるが、これは例えるなら『座るための椅子』を作ってきた日本と、『座るためだけじゃない椅子』を作ってきたヨーロッパとの文化の違いによるものであろうとも思う。

今回の視察全般を通じ、日本が勝っている点、劣っている点を肌感覚で体験することができ、とても有意義な時間となった。

最後になりましたが、このような機会を頂いたことに心より感謝いたします。

以上

国土交通行政関係功労者表彰の受賞について

国土交通行政関係功労者の表彰の一環として、令和元年度に完了した工事、業務の中から優秀な成績をあげた受注者に対して、地方整備局長や事務所長等から表彰が行われます。

当調査会におきましては、令和元年度に完了した以下の業務とその業務に従事した技術者に対して事務所長表彰を頂きました。

表彰者	業務名	表彰対象
北陸地方整備局 新潟国道事務所長	R1新潟国道橋梁維持補修計画検討業務	一般財団法人橋梁調査会
		齋藤 立
九州地方整備局 九州技術事務所長	平成30・31年度 九州管内橋梁診断（その1）業務	一般財団法人橋梁調査会

計画課長 桐原 進彌

橋梁技術に関する研究開発助成について

当調査会では、平成20年度から年に一度「橋梁技術に関する研究開発助成」の助成対象者を決定しております。これまで「橋梁技術に関する研究開発助成」は26件の助成を行ってきたところです。この度、令和2年度分の助成が決定となりました。

助成対象者の選定にあたり、橋梁研究開発助成等

審査委員会（魚本 健人東京大学名誉教授、藤野 陽三城西大学学長、丸山 久一長岡科学技術大学名誉教授）を設け、審査委員会での審査を経て助成を決定しました。

令和2年度の助成対象者は以下のとおりとなりました。

橋梁技術に関する研究開発助成対象者

橋梁技術に関する研究開発についての計画を公募し、優秀研究計画と認められる応募者に対して、当該研究開発に要する費用の一部を助成しています

江本 久雄氏（福島工業高等専門学校都市システム工学科 准教授）
・研究計画：「ARによる橋梁の変状図の可視化システムの研究開発」

蘇 迪氏（東京大学工学系研究科社会基盤学専攻 特任准教授）
・研究計画：「橋梁観測データを活用した強風時車両走行安全性の評価」

佐々木 貴信氏（北海道大学大学院農学研究院森林科学分野木材工学研究室 教授）
・研究計画：「新たな木質材料CLT（直交集成材）の床版用途に関する研究」

佐伯 竜彦氏（新潟大学工学部工学科社会基盤工学プログラム 教授）
富山 潤氏（琉球大学工学部工学科社会基盤デザインコース 教授）
・研究計画：「橋梁各部位の水環境の定量評価と台風による飛来塩分がコンクリート橋に与える影響」

計画課長 桐原 進彌

建設技術フェア等の参加報告

令和元年度に実施した各地方整備局等が主催する建設技術フェア等に、当調査会支部が参加しました。
建設関係者はもとより一般の方々にも、「一般財団

法人 橋梁調査会」とはどのような組織でどんな仕事をしているのかを知って頂く機会として、当調査会が実施する事業を紹介（展示）いたしました。

計画課長 桐原 進彌

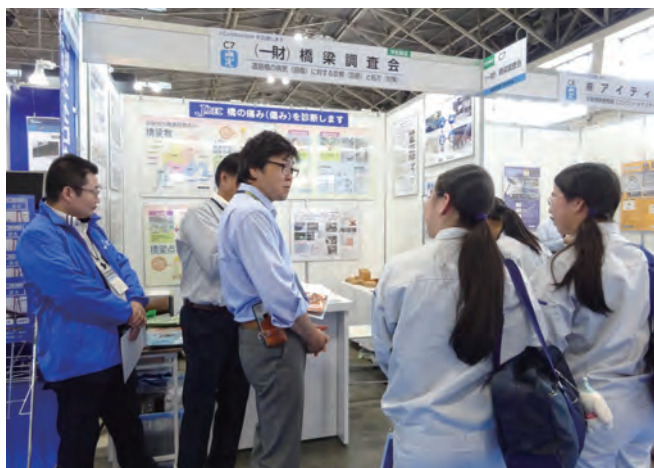
開催日	イベント名	主催者
令和元年6月5日・6日	建設技術公開「EE東北'19」	EE東北実行委員会
令和元年10月2日・3日	けんせつフェア北陸 in 富山2019	「けんせつフェア北陸in富山2019」実行委員会
令和元年10月16日・17日	建設技術フェア2019 in 中部	国土交通省中部地方整備局 名古屋国際見本市委員会 (公財) 名古屋産業振興公社
令和元年11月26日・27日	建設技術フォーラム2019 in 広島	建設技術フォーラム実行委員会



調査機器の説明を聞き入る来場者（東北）



学生たちが模型橋組立てに挑戦（北陸）



学生へ「橋梁診断」の紹介（中部）



『橋梁点検・診断に関する最近の話題』企画課長（中国）

四万十川橋

地域と人とともに歩む、わが町の「赤鉄橋」

四万十市のシンボル「赤鉄橋」

四万十川は、津野町不入山を源流とし、太平洋に注ぐ全長196kmの一級河川である。途中、山林率89%におよぶ高知県の山野を削り、河口の中村平野に達するが、これを出迎えるように架かるのが、鮮やかな赤色の四万十川橋である。

下路式単純ワーレントラスと鉄筋コンクリート単純T桁で、橋長507.2m、幅員5.5m。地元では親しみを込めて「赤鉄橋（あかてつきょう）」と呼ぶ。橋脚付近の河川敷にはお祭り広場、緑地、キャンプ場、テニスコートが設置され、運動や川遊びはもちろん、水泳大会、花火大会、マラソン大会、LEDを使ったクリスマスイベントなど、さまざまな催しが開かれている。

四万十市のシンボルであり、市民には欠かせない憩いの場なのである。

暴れ川に悲願の橋を

四万十川は吉野川と並ぶ四国の暴れ川であり、藩政時代から昭和の初期まで頻繁に氾濫した。築堤も当然行われたが、手に負えずに計画洪水を行うケースも非常に多く、そのため中村地区の町家は1階の浸水を想定し、ほとんどが2階建だったという。

この四万十川に橋建設の機運が高まったのは大正時代の初期のこと。当時、四万十川兩岸、中村地区と具同地区間の交通は、兩岸に渡したワイヤーに滑車を取り付け、船に繋ぐ岡田式渡船を使用していた。岡田式は増水に強いといわれたが、それでも四万十川が荒れれば、数日間渡ることができない。そのうえ時代とともにモノと人の流れが増し、輸送量が大きく安全な橋への要望が高まっていた。

そのような中、悲劇が起こる。大正4年（1915）に幡多郡立実科高等女学校（現・高知県立中村高校）の生徒を乗せた渡し舟が転覆し、多数の犠牲者を出したのである。この事故で住民らの橋建設の声は大きなものとなり、架橋計画は大きく進展した。そして大正13年（1924）3月20日の起工式に至ったのである。

四国一の大橋梁

旧中村町の年間予算が9万2,000円だった時代に総工費50万円（48万円とも）が投じられ、建設が始まった。費用のうち、4万5,000円が篤志家による浄財で、残りは県の地方債で賄われた。関東大震災で疲弊した中央からの予算を当てにせず地元で賄おうとしたところに、この橋に賭ける思いが伝わってくる。

工事は鈴木商店が受注し、鉄材製作を神戸製鋼所、架設工事を鳥羽造船所（当時は、神戸製鋼所鳥羽造船工場）など、子会社に請け負わせた。同社の大番頭、金子直吉は現仁淀川町の出身であり、その他、大正橋（禰原川）、仁淀川橋も同社が受注している。

こうして大正15年（1926）6月、橋長437.6m、幅員5.5mの入り口にランプを備えた四万十川橋（渡川橋とも）が竣工した。完成時点で四国一の大橋梁であり、皆その異様には驚いた。祝賀会は3日にわたって行われ、人口1万人の中村に10万人の見物客が来たといわれている。

その後、昭和11年（1936）には、鉄筋コンクリート単純T桁を伸長し、現在の橋長となった。





- ・四万十川橋：下路式単純ワーレントラス+鉄筋コンクリート単純T桁
(橋長508.45m)
下路式単純ワーレントラス：8径間53.64m (橋長438.90m)
鉄筋コンクリート単純T桁：6径間11.60m (橋長 69.55m)
車道幅員5.5m、歩道幅員2.0m
着工：1924 (大正13) 年 3月
竣工：1926 (大正15) 年 6月

南海地震の甚大な被害を乗り越えて

昭和21年(1946)12月21日未明、紀伊半島沖を震源とするマグニチュード8.0の巨大地震が発生した。強い揺れと4~6メートルの津波が高知県沿岸を襲い、死亡・行方不明679人、負傷1,836人、家屋4,846戸が全壊・流失した。高知県は、全体の半分もの犠牲者を出したが、中でも県下で最も被害が大きかったのは、現四万十市一带であった。地震や津波、さらには市街地の3箇所で出火により、市街地の8割以上の家屋が全半壊した。

四万十川橋も被害をまぬがれず、8連のうち、両端を残して6連のトラスが落下、橋脚3基が倒壊、5基が傾斜するという大被害であった。

このうち4連は補修して橋脚上に戻したが、ダメージの大きかった2連は作り直しとなった。復旧工事は昭和22年(1947)6月にスタート、翌23年(1948)8月に完成した。

戦争の傷が癒えきっていなかった時代のこと。復旧に携わった当時の人々の苦労が忍ばれる。

その後、昭和43年(1968)に両側に歩道橋がつけられ、利便性が図られた。また昭和50年(1975)国道中村バイパスの開通に伴い、建設省(現国土交通省)から県に移管された際、改めて調査したところ、予想以上に老朽化が進行していることが判明した。

県では、橋桁のコンクリート部分を鋼板に置き換えるなど軽量化のための補修に着手、現在に至っている。

奪天工

四万十川橋の中村地区側のたもとに、竣工の石碑が立つ。石碑には中村町長、島崎正勝の揮毫した「奪天工」の書が彫り込まれている。彼は建設計画において二分していた勢力を融和させ、四国一の巨大橋建設を成功させた立役者といわれている。

奪天工とは、中国最古の造園の本「園冶(えんや)」に登場する言葉であるらしい。天工とは造化の巧み(自然の業)を指し、これを奪うほどに自然の造形以上の自然なできばえ、というのが本来の意味である。だが島崎町長は、長い間苦しんだ暴れ川を、近代日本の技術で乗り越えた、という感慨を込めて、奪天工と書き込んだのではないかとされている。



四万十川橋は建設からまもなく100周年を迎える。長い年月をかけて人工物でありながら、人々の生活に溶け込み、景観として愛されていることもまた、「奪天工」と言えるのかもしれない。

- 1 河川敷緑地
- 2 橋から見る四万十川
- 3 河川敷から見る四万十川橋
- 4 南海地震で壊れた四万十川橋 (出典：幡多郷土資料館)
- 5 奪天工石碑

本部・支部 所在地及び連絡先

本部 〒112-0013

東京都文京区音羽2-10-2

TEL : 03-5940-7788(代表) FAX : 03-5940-7789

03-5940-7794(企画部)

03-5940-7791(調査部)

03-5940-7746(研修担当)

03-5940-4800(道路橋点検士事務局)

URL : <http://www.jbec.or.jp> E-Mail : info@jbec.or.jp

東北支部 〒980-0014

仙台市青葉区本町2-1-29(仙台本町ホンマビルディング10階)

TEL : 022-221-5301 FAX : 022-221-5302

関東支部 〒330-0844

さいたま市大宮区下町1-42-2(TS-5BLDG.5階)

TEL : 048-657-6085 FAX : 048-645-2167

北陸支部 〒950-0965

新潟市中央区新光町10-3(技術士センタービルII8階)

TEL : 025-281-3813 FAX : 025-281-3818

中部支部 〒460-0002

名古屋市中区丸の内3-9-29(ダイセンビル6階)

TEL : 052-212-6811 FAX : 052-212-6812

近畿支部 〒540-6591

大阪市中央区大手前1-7-31(OMMビル12階)

TEL : 06-6944-8551 FAX : 06-6944-8556

中国支部 〒730-0013

広島市中区八丁堀15-10(セントラルビル5階)

TEL : 082-511-2203 FAX : 082-225-4745

四国支部 〒760-0026


高松市磨屋町3-1(合田不動産磨屋町ビル6階)

TEL : 087-811-6866 FAX : 087-811-6867

九州支部 〒812-0013

福岡市博多区博多駅東2-9-1(東福第二ビル2階)

TEL : 092-473-0628 FAX : 092-473-0629



J-BEC レポート 2020 Vol.16 令和2年11月発行

編集・発行 一般財団法人 橋梁調査会 J_BECLレポート編集委員会

印刷 (株)大 應

表紙撮影：初芝成應



J.BEC

橋をかける
橋をまもる

r100
有孔配管は100%再生紙を使用しています

PRINTED WITH
SOYINK