

J-BEC

レポート

2015 Vol. 11



目次

巻頭言

京都大学 インフラシステムマネジメント研究拠点ユニット
特任教授 宮川 豊章

就任挨拶 (一財) 橋梁調査会 専務理事 森永 教夫 01

「道路橋点検士」の登録技術者資格の意義と活用 02

橋梁診断室の活動について 05

道路橋点検に関するロボット導入開発の状況 07

自主研究

・イオン透過抵抗法による耐候性鋼材のさび評価の試行 12

離島架橋

・大島架橋事業について 17

助成研究

・薄板モルタル供試体を用いた塩害—中性化複合劣化進行予測手法の構築 21

・大型連続高架橋模型の2方向加振実験による現実的な設置状況下でのゴム系支承の挙動と終局状態の解明に関する研究 29

第2回 国際シンポジウム「世界の海峡連絡と橋梁のメンテナンス」開催報告 39

世界道路協会 (PIARC) 道路橋委員会の活動 41

海外調査報告

・第37回 IABSE シンポジウム MADRID に参加して 43

・IABSE Conference Nara 2015 “Elegance in Structure” 45

・fib シンポジウム 2015 46

トピック

・国土交通行政関係功労者表彰の受賞について 47

・橋梁研究開発助成等について 48

・第3回賛助会員特別講演会の報告 49

・橋梁のメンテナンスに関するセミナーの報告 50

古(いにしえ)の橋探訪

那珂川に架かる美しいアーチ橋 51

栃木県・晩翠橋(ばんすいばし)

お知らせ

・平成28年度道路橋点検士技術研修会等の開催案内 53

・図書のご案内 54

橋梁の点検・調査・診断

京都大学 インフラシステムマネジメント研究拠点ユニット 特任教授
宮川 豊章



橋梁調査会という組織の名称から連想するのは、当然ながら橋梁を調査することである。ここで用いられている“調査”という言葉は、土木学会のコンクリート標準示方書【維持管理編】からすれば、本来は“点検および調査”と言うべきである。しかし、点検・調査することだけでは意味がない。点検・調査した結果を用い、劣化機構に基づいて診断しなければ、点検・調査は全くの無駄な行為に終わってしまう。この診断はホームズやブラウン神父ものなどを代表とする本格派の推理小説における推理とよく似ており、得られるスリルとサスペンス(?)も似ていないではないと思っている。

このことは、ホームズのモデルになったとされる、作者コナン・ドイルの恩師で医師であるジョゼフ・ベルが、診断には観察力が重要だと教え、膝を突き合わせての問診から、病名だけでなく、職業や住所、家族構成までも指摘してみせたことを思いださせる。それと同様に、目視観察しかも近接目視点検を行い、時には詳細な調査を行ったうえで行う診断からは、劣化機構の推定から寿命予測そして対策・手当への道筋を得ることができる。言い換えれば、あるべきメンテナンス・シナリオを提案することができるのである。さらには、医学において近年発症後の対策よりも発症前の予防対策・予防保全に重点が置かれ始めていることにも思い至る。

何回目かのメンテナンス元年が昨年であったかと思う。20世紀は造りこなす時代であった。まだまだ造りこなすことは必要であるが、21世紀は単純な造りこなすのみの時代から造りこなし使いこなす時代に変わる時代だと考えている。使いこなすための基本がメンテナンスなのである。思い起こせば腹立たしいほどに何度も何度もメンテナンス元年と言われた年はあった、と記憶している。したがって私は、昨年こそが本当のメンテナンス元年になって欲しいと切に願っている。

さて、メンテナンスの基本は点検・調査であり、それに基づく診断である。メンテナンス元年に伴って、基本的に橋梁は5年に一度の近接目視点検が義務付けられた。元来はその程度の間隔でなされてこなかったこと自体がおかしかったのである。しかし、実行されてはいなかったのだから、その実行に当たっては現段階では数多くの障害がある。点検・調査・診断技術の確立、技術者・技能員の質および量の確保、そのための維持管理関係者の責務・名誉・対価の適切化、などである。

私はコンクリートを専門とする。そのため話の中心はコンクリート構造になってしまうが、コンクリート橋の場合、変状・劣化はコンクリート表面のひび割れとなって表れることがほとんどである。したがって、一般には忌み嫌われるひび割れは、実は変状・劣化を教えてくれる頼りにすべき隠密、諜報員あるいはスパイだと言って良い。この密偵をうまく使いこなし、適切に診断することが必要なのである。そのためには、目視点検をはじめとする種々の非破壊検査手法を併せ用いうまく利用することが必要である。

人間には顔の前方に二つの目がある。この二つの目があるため立体感を得ることができるという記憶がある。私は、作る技術のみでは片目をあけているに過ぎないと思う。確かめる技術もあって両目が揃い、立体感を持って世界を造りこなし使いこなすことができるのである。技術が膨らみを持ったものとなるのだ。既設構造物にあっては、補修・補強などの対策という作る技術のみでは私は片目で見ていようなものだと思っている。変状・劣化に対する点検・調査そして診断という確かめる技術がなければならない。診断によってはじめて対策は意味をなす。対策の効果が保証されるのである。

本来我々はすでに鉄腕アトムが活躍する時代に生きていくはずであるが、まだどうも鉄腕アトムの時代ではないようである。と言うのもアトムの時代の交通体系が実現してはいないからである。したがってまだ当分は現在の形式のインフラが必要であろう。交通体系が異なってしまう鉄腕アトムの時代ともなれば、インフラはどの程度長持ちするのが最も良いのか?などという質問が一般的に成り立つ。しかし現在は、いかに長持ちさせるか、という問いかけの方がより真摯であり重要である。点検・調査・診断はこれに答えるだろう。

予算も人手も限られている。したがって長持ちさせる構造物と取り壊すべき構造物を区別して、構造物の選択と予算・人手の集中を図ることが重要であると考えている。そのためには、各構造物にどのような生涯を送らせるかのシナリオを明確にしてやる必要がある。長持ちさせる構造物と取り壊すべき構造物では同じ生涯を送らせる必要はない。当然メンテナンスのレベルは変わってくる。このような柔軟なシナリオによって丈夫で美しく長持ちするコンクリート構造物さらには丈夫で美しく長持ちする市民社会を実現できるのである。橋梁調査会の活動に左袒する所以である。

よろしくお願ひいたします



(一財) 橋梁調査会 専務理事
森永 教夫

6月30日の理事会において専務理事の選定をいただきました森永です。

私の今までの経験をいくつかご紹介して、ごあいさつに代えさせていただきます。

昭和51年4月に当時の建設省に入りました。その夏には浜松工事事務所の工務課に配属され、そこで国道1号のバイパスの事業に係らせていただきました。何もわからない1年生の私に、高架橋の下部工の積算を担当してくれました。どうか工事発注することができ、工事の現場も経験することができました。積算基準や歩掛などもわからない私に、図面の整理や数量の計算、積算資料や電算機に入力するデータ作成など一通りの流れを経験させていただきました。このことが、その後、国交省を退職するまでの30数年に亘っての現場の雰囲気というものを理解する基になったと思います。このほかにも、新たに事業着手するバイパスの設計など建設コンサルタントの方とのやり取りもよい経験をさせていただいたと思っております。また、説明用の2500分の1の平面図作りも、一年生の私の重要な仕事でした。平面図には、盛土、切り土、構造物、水路系など決められた着色をします。この図面に着色するという単純な作業ですが何度も繰り返すことによって、道路の構造を感覚的に把握する目が培われたのではないかと思います。

その後、多くの職場を経験しましたが、通算で10年近く勤務した近畿地方では、幹線道路網の計画策定に携わることができました。特に思い出に残るのは明石海峡大橋の神戸側の自動車専用道路計画でした。特に垂水JCTは複数の事業者が関係することもあり、巨大なタービン型のジャンクションになり、自治体等の関係機関と協議を重ね、何度も何度も計画図を書き換えて都市計画案にまとめることが出来ました。

この他にも京都と大阪を結ぶ第二京阪道路、関空関連の湾岸道路、京都縦貫道路などに係りました。それぞれの道路では計画の調整や環境アセスメント等で困難なこともありました。すでに完成しているのを見ると感慨深いものがあります。

大きな自然災害も経験いたしました。

衝撃的なものとしては阪神淡路大震災に関連するものです。震災当日、霞が関でテレビのニュース映像で被害の様子が伝えられて、その大きさに驚いていた時、急きょ幹部の方が現地に行き、上空から被害状況を把握するとの話が出て、それに同行することになりました。名古屋まで新幹線で、そこから大

型ヘリコプターで神戸へ移動しました。被災地の上空は、すでに夜になっていましたが、いたるところで火災が発生しており、その悲惨な状況は想像を絶するものでありました。

その後建設省では、早急に復旧のための仕様をまとめることになり、橋梁の先生方からなる委員会を設けて精力的に取り組み、2月27日にいわゆる「道路橋の復旧仕様」としてまとめられました。その間、橋梁を担当する課に所属していたこともあり、委員会の精力的な検討に触れることができました。

橋梁に関する経験を一つ紹介いたします。

岡山県の土木部長をさせていただいた時は、総合的な建設関連の仕事を経験することができました。その中で、総社市内の高梁川に架かる国道486号、川辺橋の改良事業が記憶に残っております。橋詰の交差点が恒常的な渋滞箇所のため、対策としては橋梁側で拡幅し車線を増設置する必要がありました。ところが、この橋梁は7径間のトラス橋でそのままでは拡幅は困難です。また全面架け替えは財政上も困難という状況でした。最終的には、下部工の状況も検討して、交差点側の2径間のみを架け替えして拡幅に対応することになりました。完成したのは県を離れた後ですが、現在航空写真で見るとトラス橋と桁橋が連続したハイブリッドな橋の状況がわかります。予算の制約の中で柔軟に対応した例として参考になると思いました。

さて、国土交通省では平成25年度を「社会資本メンテナンス元年」と位置付けてインフラの老朽化対策について、総合的・横断的な取り組みを始めました。今から30年程まえ、「荒廃するアメリカ」という本の翻訳に係ったことがあります。あのアメリカが道路予算の減少によって道路インフラの補修がどこおき、社会問題化したことを紹介した本です。その当時、わが国ではまだ新設の道路整備が求められている時代であり、わが国でもインフラの老朽化時代が訪れるとは実感ができなかったことを記憶しております。

社会資本審議会の提言でもメンテナンスサイクルの確定が求められています。メンテナンスサイクルを構成する「点検」「診断」「措置」「記録」は道路管理者の責務であるとされております。私も橋梁調査会もこのサイクルに係っています。このサイクルがまわり始めると、今まで以上に、メンテナンスに関連する要求が高まると考えられます。

皆様方とともに、このような動きの中で橋梁調査会の役割を果たしていきたいと思っております。

「道路橋点検士」の登録技術者資格の意義と活用

常務理事(兼)企画部長 大石 龍太郎

1. はじめに

私は、平成27年7月より、(一財)橋梁調査会審議役から常務理事になりました。企画部長としての仕事は継続し、一層、橋梁調査会の社会への貢献に力を尽くしていきますので、引き続き御協力、ご支援のほどお願い致します。

さて、日本の道路橋等の社会インフラの危機的状況を脱却し、国民の方々への安全で長持ちするインフラのメンテナンス体制を構築していくためには、まだまだ時間と労力と予算が必要ですが、その方向へ向けてようやく本格的に動き始めています。道路橋についても、昨年道路法や品確法等の改正により、全国70万橋の点検義務化や技術力を活用した業務体制の構築が進み、その中で道路橋点検に係る品質の確保、向上が求められております。当調査会としても、この政策の動きに呼応するように、昨年「道路橋点検士」資格を創設し、その活用に向けて業務を進めてまいりました。

2. 「道路橋点検士」が国土交通省技術者資格に登録されました。

現在我が国は、今後急速に老朽化する高度経済成長期に集中的に整備された社会資本ストックの維持管理・更新や技術者の減少等、社会資本の品質の確保について大きな課題を抱えており、これに的確に対応していくためには、その担い手を中長期的に育成し、将来にわたり確保することが強く求められています。この要請に応えるため、国土交通省は、公共工事に関する調査(点検及び診断を含む。以下同じ。)及び設計等に関して、その業務の内容に応じて必要となる知識・技術を有する者の資格(以下、「技術者資格」という。)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ことを目的とした新たな制度を平成26年11月に創設しました。この制度は、「公共工事に関する調査及び設計等の品質確保に資する技術者

資格登録規程」(以下、「登録規程」という。)と呼ばれ、公共工事の発注者は、登録を受けた技術者資格を保有する者(以下、「登録資格保有者」という。)を公共工事に関する調査及び設計等に関して必要な知識・技術を有する者として評価し、十分な活用を図っていくことにしています。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、この登録規定に則り、「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。

3. 道路橋点検士技術研修について

道路橋点検士の資格取得には、まず当調査会主催の道路橋点検士技術研修会を受講する必要があります。その経緯や研修内容等について以下に記述します。

1) 経緯

本研修は、平成6年度から開始され、この21年間(平成27年7月現在)に78回開催され、講義研修及び実地研修の受講並びに修了試験に合格した延べ10,866名(民間7,163名、道路管理者3,702名)の道路橋の点検技術者を養成してきました。それらの技術者は、直轄橋梁の点検業務はもとより、地方公共団体の道路橋点検業務においても活躍しています。

2) 研修内容

- ・橋梁の維持管理に関する基調講義(藤野横浜国立大学上席特別教授、宮川京都大学特任教授、丸山長岡技術科学大学名誉教授、森法政大学教授による各回一人ずつの講義)
- ・国の「橋梁定期点検要領(平成26年度)」の解説を中心に橋梁点検技術(点検要領、損傷評価基準、点検調書の記入方法、対策区分判定要領等)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
- ・実橋での点検調書作成実習

3) 試験

点検結果の整理、橋梁構造の基本知識および研修内容に関する試験を実施しています。

橋梁構造の基本知識およ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道路橋維持管理の心構え、②道路橋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点検調書の作成は以下のものです。

- ・点検調書（その5）（その7）（その8）（その9）

4) 研修期間

3日間

5) 受講資格要件

大学卒業後5年以上（土木等の指定学科は3年以上）の橋梁に関する実務経験を有する者が受講資格要件です。これは、点検技術を取得するためには、橋梁に係る知識と経験が不可欠となっているためです。

6) 研修修了者（平成27年7月時点）

10,866名

7) 年間研修開催回数及び申込み状況

平成27年度において先着順で募集した当初計画の5回の研修会では、申込み初日の9時台で定員を超える申込みがあり、多数の研修受講希望者の方々が受講できない状況となりましたので、10月（東京）、11月（大阪）に追加開催を行うことにしました。

4. 道路橋点検士

道路橋の点検を担う点検技術者の更なる技術の向上や点検結果の精度、信頼性の確保を図るため、国が定める統一的な「橋梁定期点検要領」に基づく点検調書を適切かつ正確に作成できる技術力を有する技術者の資格として、（一財）橋梁調査会は平成26年度に「道路橋点検士」という資格を創設しました。資格取得のためには、橋梁点検技術研修会あるいは道路橋点検士技術研修会を修了し、平成16年度以降

の既設道路橋に関する一定の点検・診断に関する業務実績を添えて登録申請を行い、当調査会の道路橋点検士制度委員会にて認定されれば、道路橋点検士として登録されます。詳細は当調査会ホームページを参照ください。平成27年10月時点での登録者数は3,654人です。なお、都道府県別分布を表-1に示しています。

5. 地方公共団体等からの道路橋点検業務発注への活用

多数の道路橋の点検業務を発注する場合には、管理技術者と担当技術者で構成される業務体制がとられることが一般的です。この場合には、管理技術者には、技術士やRCCM等の診断ができる技術者を要件とし、担当技術者に従来より地方公共団体等で採用されている橋梁点検技術研修修了者とともに、「道路橋点検士」も技術者要件に加え、正確な道路橋の損傷状況の記録をデータベース化しておくことが、維持管理上効果的と考えられます。業務発注に際しては以下のような実施体制が考えられます。是非ご検討ください。

管理技術者：技術士 等

担当技術者：道路橋点検士、橋梁点検技術研修修了者 等

6. 全国70万道路橋の安全確保に向けて

日本の道路橋の現状を考えますと、まず道路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等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、橋梁点検技術研修修了者です。道路橋点検の義務化に伴い、その要員である技術者の確保とともに点検業務の品質確保が求められております。かつての1980年代の「荒廃するアメリカ」の二の舞とならないように、産学官が総力戦で臨まなければならない状況ですが、現場の第一線での道路橋の安全に係るリスクを捉え、対処できる「道路橋点検士」や橋梁点検技術研修修了者が全国で活躍され、道路橋の安全確保、さらには長寿命化に貢献されることを期待しています。

表-1 都道府県別道路橋点検士技術研修会修了者数及び道路橋点検士数 (H27.10.1現在)

| 整備局等 | 都道府県 | 研修会修了者 | 道路橋点検士 |
|--------|------|--------|--------|
| 北海道 | 北海道 | 465 | 178 |
| | 青森県 | 48 | 13 |
| 東北 | 岩手県 | 179 | 32 |
| | 宮城県 | 482 | 195 |
| | 秋田県 | 145 | 32 |
| | 山形県 | 111 | 35 |
| | 福島県 | 151 | 60 |
| | 茨城県 | 146 | 72 |
| 関東 | 栃木県 | 67 | 39 |
| | 群馬県 | 74 | 35 |
| | 埼玉県 | 196 | 77 |
| | 千葉県 | 276 | 65 |
| | 東京都 | 1,521 | 547 |
| | 神奈川県 | 329 | 94 |
| | 山梨県 | 52 | 13 |
| | 長野県 | 119 | 34 |
| 北陸 | 新潟県 | 305 | 82 |
| | 富山県 | 175 | 62 |
| | 石川県 | 141 | 40 |
| 中部 | 岐阜県 | 165 | 76 |
| | 静岡県 | 130 | 69 |
| | 愛知県 | 684 | 275 |
| | 三重県 | 96 | 6 |
| 近畿 | 福井県 | 127 | 24 |
| | 滋賀県 | 69 | 15 |
| | 京都府 | 170 | 46 |
| | 大阪府 | 966 | 353 |
| | 兵庫県 | 281 | 79 |
| | 奈良県 | 59 | 7 |
| | 和歌山県 | 71 | 24 |
| 中国 | 鳥取県 | 51 | 13 |
| | 島根県 | 107 | 33 |
| | 岡山県 | 135 | 39 |
| | 広島県 | 448 | 155 |
| | 山口県 | 108 | 30 |
| 四国 | 徳島県 | 115 | 50 |
| | 香川県 | 196 | 59 |
| | 愛媛県 | 105 | 28 |
| | 高知県 | 85 | 13 |
| 九州 | 福岡県 | 784 | 309 |
| | 佐賀県 | 64 | 5 |
| | 長崎県 | 70 | 10 |
| | 熊本県 | 113 | 50 |
| | 大分県 | 130 | 57 |
| | 宮崎県 | 67 | 31 |
| | 鹿児島県 | 139 | 65 |
| 沖縄 | 沖縄県 | 94 | 28 |
| 不明・その他 | | 255 | 0 |
| 合計 | | 10,866 | 3,654 |

※各人数には、民間技術者と道路管理者を含みます。

※修了者または道路橋点検士の現在登録されている勤務先の住所に基づき整理しています。

◇道路管理者のかたへー企業別の内訳が必要な場合は以下にお問い合わせ下さい。

お問合せ先：<https://www.jbec.or.jp/inquiry/index.php?tenken>

一般財団法人橋梁調査会

橋梁診断室の活動について

調査部長 兼 橋梁診断室長 石井 武

はじめに

平成25年6月5日、道路の老朽化や大規模災害の発生の可能性等を踏まえた道路の適正な管理を図るため、予防保全の観点も踏まえて道路の点検を行うべきこと等を内容とする「道路法等の一部を改正する法律」が公布され、同年9月2日に施行された。

改正された道路法等により、トンネル、橋等の点検が義務付けられ、点検を行ったときは健全性の診断を行うことなどが規定された。重要度が益々高まる道路橋の点検・診断について、道路橋の診断を行っている橋梁調査会では、「橋梁診断室」を設置して対応を図っているため、その取り組みについて紹介する。

1. 今後の維持管理について

(メンテナンスサイクルの構築)

道路構造物については、定期的に点検・診断を行い、安全性および維持管理の効率性の確保を目的とする予防的な保全による維持管理が基本となる。

この維持管理により、最小のライフサイクルコストで安全・安心やその他の必要なサービス水準を確保することが、今後の維持管理の目標である。

その実現のためには、点検→診断→措置→記録→(次の点検)という維持管理の業務サイクル(メンテナンスサイクル)の構築が不可欠であり、このサイクルを通して、施設に求められる性能をより長期間保持するための長寿命化計画等を作成・充実させ、効率的、効果的に道路の維持管理を進めていくことになる。

2. 橋梁診断室の設置について

点検・診断は、メンテナンスサイクルの根幹をなすものであり、橋梁調査会では、的確な診断にあたることを目的として橋梁診断室を平成26年4月に発足させた。

3. 橋梁診断室の役割

国土交通省は、平成16年3月に「橋梁定期点検要領(案)」を定め、直轄国道の橋梁について、この要領(案)に基づく定期点検に入った。そして、平成26年度は道路法等の改正を受け改定した「橋梁定期点検要領」に基づき3巡目の点検に入った。

この間、各地方整備局は、定期点検結果を基に橋梁長寿命化修繕計画を策定し、計画的な橋梁の維持管理に取り組み、また、橋梁調査会は、国が発注する診断業務を履行する中で、全国の橋梁の現状に接してきた。

その結果、全国の供用する橋梁の、損傷、損傷の進展具合、補修と再劣化の発生など、数多くの損傷事例に向き合ってきた。

この中で培った診断のノウハウを、老朽化が進む道路橋の予防保全の観点も踏まえた維持管理(メンテナンスサイクル)に役立て、診断面から貢献することが診断業務を履行する者の責務と捉え、橋梁診断室を柱に的確な診断を行っていくこととしている。

具体には、橋梁診断室では、診断に迷う難しい橋梁案件について、診断会議を通して、診断を実施する各支部の指導・助言にあたっている。

4. 橋梁診断室の活動について

平成26年度は、本部での診断会議を22回開催、また、支部へ出向いての診断会議を17回開催し、扱った橋梁は163橋となった。

この診断会議を通して把握した診断に関する主な留意事項について、次に示す。

<主な留意事項>

①「損傷原因の特定を誤らない様にする。」(誤診を防ぐこと)

なぜその変状から損傷の可能性が疑われたのか、なぜその損傷が〇〇だと特定できるのか、なぜその損傷の原因が〇〇だと断定できるのか等、

プロセスを踏む診断を行う事が必要。

②「損傷進行度合いの推測を誤らないこと。」

前回点検と比較するなどして進行度合いを推測し、現状維持とするのか、放置すると危険な状態になるのか、ならないのか、を見極めて診断を行う事が必要。

③「再劣化の発生防止」

損傷に応じた補修方法を選定すること。

このためには、損傷と補修の関係についての蓄積された事例を基に対応を立案するなどして、損傷原因を踏まえ、損傷の根本原因を除去する補修対応を選定する事が必要。

この他、損傷を放置した場合、損傷がどのように進行するのか、そして、事態がどのように変わるのかなどについて、道路管理者へ論理的な説明を行うことが必要となる。

<橋梁診断室の取り組み>

橋梁診断室では、前述の留意事項を踏まえ次の2点を主にした取り組みを行っている。

①「遺漏なく、過不足なく、的を射た、的確な診断の実施」

橋梁の置かれている環境と変状から損傷原因を特定し、さらに対策の有無も含めた損傷進行度合いを見極め（推測）、補修方法も念頭においた診断をする。

②「補修方針を含めた処方箋の作成」

損傷の根本原因を除去する補修方針を記す処方箋を作成する。

この取り組みは、損傷に応じた対策に繋がり、無駄な補修の排除（適正な補修の実施）と再劣化を防止することになる。結果として、無駄なコストの排除と長寿命化に資する。

この取り組みを果たしていくには、診断員には「損傷の原因や深刻度を見極める力」「損傷の進行を推測する力」「補修方法を選定する力」が必要になる他、「プロセスを踏む診断」を行う習慣を身に付け、論理的な「処方箋」を作成することが求められる。これら診断力の向上に、診断会議の場にて、橋梁診断室と支部で議論をしながら取り組んでいる。



橋梁診断会議（本部）
（TV会議で支部と案件について議論）



橋梁診断会議（支部）
（橋梁診断室が支部に出向き案件について議論）

おわりに

国土交通省では、国民・道路利用者に道路インフラの現状及び老朽化対策について理解いただくため、点検の実施状況や結果等を調査し、国土交通省および高速道路会社の管理施設について「道路メンテナンス年報」としてまとめ、平成27年8月に公表した。

国民に社会資本の現状や課題等について知ってもらい、理解してもらい、そしてその維持管理・更新について国民から支持・支援を得るために、徹底して情報の見える化を図ることは、社会資本に関わる最も基本となるべき政策のひとつである。

点検・診断は、国民・道路利用者への情報提供の基礎となるものであり、また、メンテナンスサイクルによる維持管理の一翼を担うものである。

橋梁調査会は、正確な情報提供に資するべく道路橋の診断に努めていく所存である。

道路橋点検に関する ロボット導入開発の状況

企画部 調査役 吉田 好孝

1. 経緯と背景 “なぜロボットを橋梁点検に？”

チェコの小説家チャペック（Karel Capek, 1887–1945）は、初めて“ロボット”という言葉を生み出した。ロシア生まれのアメリカ人作家アシモフ（Isaac Asimov, 1920–1992）は1950年にSF小説「われはロボット」の中で、ロボットの頭脳を支配する三つの基本法則（ロボット三原則）なるものを考え出した。日本でのロボットのイメージは何と云っても手塚治虫（1928–1989）の「鉄腕アトム」の影響が大きい。日本のロボット技術は産業ロボットを中心に発展を続け、世界でも指折りのロボット大国といわれるようになった。

一方、わが国は全国で約70万もの道路橋を有しており、その7割以上を占める約50万橋が市町村道の橋梁である。これらの橋梁は年々老朽化が進行しており、例えば平成25年に50年を経過した橋梁数は約71,000橋であったが、10年後の平成35年には約171,000橋にも増加すると予想されている（文献1）。上記70万橋の中には、このほか、建設年などの記録が確認できない橋梁が30万橋もあり、これらも併せて橋梁の老朽化は深刻な問題になりつつある。

近年、わが国や諸外国において供用中の橋梁に深刻な事故が相次いで発生するようになった。具体的な事例を挙げると、山添橋（鉄桁、平18）、木曾川大橋（トラス橋、平19）、君津新橋（コンクリートアーチ橋、平20）、妙高大橋（PC桁橋、平21）などで主要な部材の破断といった事故が相次いで発生した。これらは幸いにも死傷者を伴わなかったが、平成24年には原田橋（吊橋）の落橋で死者2名を出すに至った。また、2012（平24）年12月に笹子トンネル天井板落下事故が発生し、犠牲者9名を出している。外国でもカナダのデラ・コンコルド橋（PC橋、平18）が落橋し死者5名を出し、米国インターステートのI-35W橋（トラス橋、平19）の落橋では死者35名という大惨事を招いた（文献2）。

国土省所管の社会資本整備審議会は、平成14年以

降、繰り返しインフラ施設に対し、適切な投資と修繕の必要性を提言していた。これらの相次ぐ事故などを背景に、同審議会は平成26年に「最後の警告ー今すぐ本格的なメンテナンスに舵を切れ」という危機感あふれる提言を公表した（文献3）。

このような状況の中で、国土交通省は2013（平25）に道路構造物の維持管理に関連する道路法の改正を行い、道路法の施行令が定められた。2014（平26）には省令として道路法施行規則が公布され、全国の自治体が管理する橋梁についても近接目視を原則とした5年ごとの定期点検及び診断が法的に義務付けられることとなった（文献2）。

しかしながら橋梁やトンネルの点検義務化と近接目視の手法については、困惑している自治体も多い。すなわち多くの自治体にとっては、必要な技術者も費用も絶対的に不足しているのである。（たとえば文献4）。

そこで我が国が他国より数歩先んじており、評価の高いロボット技術を橋梁点検の分野にも積極的に応用していく方針となった。これまで橋梁の定期点検にロボットが適用された事例はないが、いよいよその試みが始まったのである。

2. 一般公募 “橋梁を点検したいロボット、みんな集まれ！”

2014年、国土交通省総合政策局は、インフラ施設の安全性確保に関する専門技術者の不足を補い、維持管理コストの軽減を目指して、ロボットを橋梁点検に応用する技術の一般公募を行った。同時に委員会を組織し、5分野においてそれぞれの専門部会を立ち上げた。

橋梁維持管理部会は部会長に横浜国立大学の藤野陽三上席特別教授（当時は特任教授）を迎え、委員として芝浦工業大学の油田信一特任教授、東京大学大学院の浅間一教授をはじめ、国交省、経産省及びその関係研究機関、土木研究所、建設業界など13名

から構成された。

このプロジェクトは3年以内に実用化を見込めるものを対象に、民間企業や大学などの研究機関において開発されているロボット技術を積極的に活用あるいは開発の支援を行おうというものである。対象となった各分野と公募技術の分類を表-1に、橋梁の点検対象項目を表-2に示す。

公募期間は平成26年4月9日～5月28日の50日間で、応募者数は技術分野内の重複を除いて31者であった。これら応募者に対して更に個別にヒアリング等を実施し、開発状況の確認、公募の意図と開発技術の摺合せなどを行い、部会の審議を経て、橋梁維持管理部門では最終的に17者が現場検証を実施する運びとなった。

3. 現場検証試験 “さまざまな点検ロボットが登場”

現場検証試験は平成26年10月から11月にかけて実施された。現場検証の対象箇所を表-3に示す。現場検証3橋梁ではそれぞれ異なった日に現場検証が実施されたが、いずれも風があり、特に浜名大橋では、地上付近で常に6～9m/secの風が吹いていた。当日は準備や撤去の時間を除き、正味30分で橋梁の対象部分を点検し、その結果を損傷図として提出していただくこととした。後日提出された各応募者の損傷結果は、通常の点検員による近接目視の点検結果と綿密に照合した。現場検証に参加した各種の点

検ロボットを以下に示す。

1) 飛行系

- ①ドローン型：ヘリコプターのような回転翼を備えた機体を特にマルチコプター型とも称する。4～8基のプロペラを装備し、高精度カメラなどを搭載して橋梁に近接し、損傷部を撮影することにより点検を行うシステムである。高所や河川上などの橋梁点検に適しているが、一般のプレートガーダー橋などのように、横構、対傾構などの部材が輻輳している部位には近接が難しい。機種にもよるが、一般に強風に弱く、風速6～7m/secを越えると飛行が安定しなくなることが多い。



写真-1 飛行系（ドローン型）点検ロボットによる鋼桁点検（新浅川橋）

表-1 一般公募の対象となった各分野

| No. | 技術分野 | | 公募技術の分類 |
|-----|------|------|----------------|
| 1 | 維持管理 | 橋梁 | 近接目視、打音点検、作業台車 |
| 2 | | トンネル | 近接目視、打音点検、作業台車 |
| 3 | | 水中 | ダム、河川 |
| 4 | 災害対応 | 災害調査 | 土砂・火山、トンネル |
| 5 | | 応急復旧 | 土砂・火山 |

表-2 橋梁維持管理分野の点検対象項目

| No. | 橋梁の種類と部位 | 手段 | 点検対象とする損傷 |
|-----|---------------|------|--------------------------------|
| [1] | 鋼橋の桁 | 近接目視 | 腐食、亀裂、ゆるみ・脱落、破断、防食機能の劣化 |
| [2] | コンクリート橋の桁 | | ひびわれ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、うき |
| [3] | 鋼橋・コンクリート橋の床版 | | 床版ひびわれ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、抜け落ち、うき |
| [4] | 鋼橋の桁 | 打音検査 | ゆるみ・脱落、破断 |
| | コンクリート橋の桁 | | うき |
| [5] | 鋼橋・コンクリート橋の床版 | | うき |
| [6] | 鋼橋・コンクリート橋 | 作業台車 | 点検者を点検箇所に近づけることのできるシステム |

表-3 橋梁の現場検証箇所

| No. | 現場検証箇所 | 橋梁形式 | 対象部位と損傷 |
|-----|-----------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 新浅川橋P6~P7 (一般国道16号) | 鋼2、3径間連続桁橋 | 鋼桁及びコンクリート床版の損傷 (文献6による) |
| 2 | 浜名大橋P16~P17 (一般国道1号) | PC5径間連続有ヒンジラーメン箱桁橋 | コンクリート橋の桁及び床版の損傷 (文献6による) |
| 3 | 国総研内橋梁 (3号橋) P2~A2 (国総研敷地内) | 鋼単純合成桁橋、及び撤去された コンクリート桁ブロック | 可動試験、要素試験、コンクリート桁のうき (文献6による) |



写真-2 浜名大橋の桁下を飛行するドローン型点検ロボット



写真-4 歩道上の車両系作業車から伸ばした点検アームで点検 (新浅川橋)



写真-3 飛行系 (球殻で覆われたドローン型) 点検ロボットの飛行準備 (新浅川橋)



写真-5 車両系点検装置の点検状況 (国総研内橋梁)

②気球型：小型の気球 (バルーン) にカメラなどを搭載して、橋梁の対象部位を点検する。ドローン型に比べ受風面積が大きいので、さらに風の影響を受けやすい。無風あるいはそれに近い環境が必要である。

2) 車両系

車両 (車輪型、及び小型クローラ型) に取り付けられたアームの先端に、カメラあるいは打音装置などを設置して、点検を行うシステムである。安定した点検作業が可能で、高精度のデータが得られ易いが、一方で点検箇所がアームの延伸・回転範囲に限定される。

3) 懸架系

I 桁の下フランジ上に梁を渡し、その梁を走行さ



写真-6 懸架系点検ロボットの走行設備取付け作業
(新浅川橋)

せて、搭載したカメラで橋梁の点検を行うシステムと、橋下に梁を吊り下げ、その梁上にカメラを搭載するシステムがある。

カメラは点検の対象部位に近接できるが、スムーズな梁の設置、移動などが課題である。

4) ポール系

ポールの先端にカメラなどを設置し、地上から点検を行うシステム。橋上から降下させる形で橋の下面を点検することも可能。ただし点検範囲はポールの設置可能な箇所や延伸範囲に影響される。ドローン型と併用して、特に桁端部周辺や狭隘部をポール系で点検する方式もある。

5) 作業台車

表-2 [6] に示す「点検者を点検箇所に近づけるシステム」は、今回は応募者がなかった。

4. 実証試験結果 “まだまだ点検員の近接目視点検には追いつけず”

現地3橋の実証試験では部分的によいパフォーマンスを示した応募者があった一方で、様々な不具合も見られた。例えば、機器がスムーズに作動しない、飛行が安定しない、点検対象範囲をカバーしきれていないなどである。

点検ロボットにより得られた点検結果を、従来の近接目視点検の結果と照合した。その結果、部分的にはよい精度で損傷図を作成できた応募者があったが、ひびわれや遊離石灰、塗膜劣化などの基本的な損傷を発見できていないケース、損傷を認識していても不正確であったり、評価を誤ったケースなども多く見られた。これは撮影された写真が不鮮明であること、及び写真の分析者が橋梁の損傷に習熟していないことなどに起因すると推定される。



写真-7 ポール系点検装置の点検状況。地上と橋上の両方から点検。(新浅川橋)

これらの結果に基づき、部会において慎重な審議を行い、その結果が藤野部会長から公表された。その内容の要約を以下に示す。

- ①鋼橋及びコンクリート橋の桁と床版の近接目視点検については、それぞれの技術の操作技術や損傷の把握の精度向上など、より一層の改善が必要である。
- ②飛行系ロボットは風の影響により飛行できないものもあった。飛行の安定性に向けての技術向上が必要である。
- ③コンクリート桁及び床版のうきの把握については、精度検証が難しく、再度うきに関する検証が望まれる。
- ④今回の現場検証では、いずれの結果も従来の点検員による近接目視点検の再現には至っていない。
- ⑤多くの応募があった飛行系については、橋梁に近接し写真データを取得できたものがあったが、遠景写真程度のものもあった。車両系、懸架系、ポール系においても、損傷状況の把握の精度の向上や操作の安定性についての技術向上が望まれる。
- ⑥高精細な写真が得られていても、それを解析する技術が未熟なため、成果の精度が低くなっていることもあった。橋梁の損傷に関する知識や写真判読技術の向上も課題と考えられる。

表-4 現場検証を実施した応募者（国総研内橋梁における要素実験、可動試験を含む）

| 機 構 | | 応募者（代表者） |
|----------|---------------------|---|
| 飛行系 | ドローン型 （マルチコプター型） | （国大法）東北大学、総合警備保障（株）、（株）アスコ、（株）フォーラムエイト、三信建材工業（株）、東日本高速道路（株）、（株）富士建、川田テクノロジーズ（株） |
| | 気球型 | （学法）足利工業大学 |
| | ドローン型+ポール系 | ルーチェサーチ（株） |
| 車両系 | 車輪型 | （株）帝国設計事務所、古河機械金属（株） |
| | 小型クローラ型 | ジビル調査設計（株） |
| 懸架系 | 主桁下フランジ利用 | 富士フィルム（株） |
| | 橋上から吊下げ | （株）ミライト |
| ポール系 | | 三井住友建設（株） |
| タブレット調査系 | | 西日本高速道路エンジニアリング四国（株） |

5. 今後の進展 “それでもやがては橋梁点検ロボットの時代が…”

経験を積んだ点検員は、点検対象に近づくと、無意識のうちにこれから調べる損傷の種類を絞り込んでいる。そして、対象部位を一目見てただちに劣化状況を把握し、次々と損傷の種類（点検要領では26種類）と損傷程度（各損傷ごとに基本的にa～eの5段階）を特定し記録していく。点検ハンマーでコンクリートを軽く叩くことにより、瞬時にそのコンクリートがうきを内在するか否かを判断できる。狭隘部ではためらうことなく手や首を伸ばし、体を傾けたりよじったりして必要な情報を得る。このようなことがほとんど迷わずにできる人間とは全く優れたシステムである。

この一連の高度な作業を、室内解析作業も含めた点検ロボットシステムに代替させることは、現段階ではなかなか容易ではない。しかも多数の部材が輻輳する形式の橋梁にあっては、その困難さは格段に難しいものとなる。

今回の一般公募による現場検証試験は、改めて当プロジェクトの関係者に橋梁点検の困難さを認識させた。しかし、一方で今後の点検ロボットシステムの開発方向がかなり明確になったのである。このようなことが理解されただけでも意義のある試みであった。

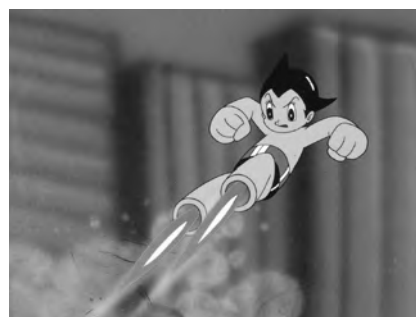
ロボット三原則の第1条は「ロボットは人間に危害を加えてはならない」というものである。今の橋梁点検ロボットはとてもそのようなハイレベルではなく、何とか人間の働きの一部でも肩代わりしてほしいという状況である。しかし、現在、点検員が行っている数々の複雑な作業を、いずれは点検ロボットと解析ソフトを中心とする高度なシステムが肩代わ

りする日が来るであろう。橋梁の現場で作業を行うロボットやカメラ、センサーの性能向上のみならず、得られた画像データから迅速に損傷を見出し、評価して調書を作成するというプロセスまでも自動化されると、すばらしい支援システムになるであろう。今回のプロジェクトはまさにその第一歩であると言える。

（当調査会は、国交省総合政策局公共事業企画調整課発注の「次世代インフラ用ロボット開発・導入に係る現場検証支援業務」を、平成26年5月に（一財）先端建設技術センター及び（一社）日本建設機械施工協会と共同で受託しました）

参考文献

- 1) 老朽化の現状・老朽化対策の課題、国交省HP、平成27年8月
- 2) 多田宏行編著、「保全技術者のための橋梁構造の基礎知識（改訂版）」、2015年、鹿島出版会
- 3) 道路の老朽化対策の本格実施に関する提言、国交省HP、平成26年4月14日
- 4) 日経コンストラクション、2015. 8. 24、インフラマネジメント 壁の向こう側
- 5) 橋梁維持管理技術の公募【公募要領】、平成26年4月、国土交通省 総合政策局 公共事業企画調整課
- 6) 橋梁定期点検要領、平成26年6月、国土交通省 道路局 国道・防災課



©手塚プロダクション・虫プロダクション

いつの日か、このようなロボットが点検を手伝ってくれるといいですね

イオン透過抵抗法による 耐候性鋼材のさび評価の試行

企画部 開発課長 藤原 英之
同 調査役 諸隈 成幸

1. はじめに

耐候性鋼材の防食機能の特徴を端的に示す表現として、「耐候性鋼材は、数年の曝露期間を経て鋼材表面に緻密な保護性さびが形成され、以降の腐食を防ぐ。」という表現が使われます。

もう少し慎重に言えば、条件は「適当な構造で、適当な環境下における数年の曝露期間」、効果は「以降の腐食の進行を大幅に抑制する。」となります。つまり、適当な構造、環境下で使用しないと、腐食が進行すると言い換えることもできます。

この適当な構造、環境については、道路橋示方書をはじめ多くの文献^{1)~4)}などで解説されていますが、構造は別として、環境については、あくまで大括りの概況を表しているにすぎません。また、地形や橋自らが構成する空間により、ひとつの橋の中でも部位によって環境は異なります。さびは温度、湿度、風通し、水仕舞いなどの環境状態に影響を受けますので、そこに形成されるさびも千差万別と考えられます。このさびの多様さゆえに、耐候性鋼橋の防食性能の評価が難しくなります。

現在一般的に耐候性鋼橋の防食性能は、さびの外観で評価します。本来知りたいのは想定する使用期間内に腐食の進行による過度な板厚減少がないことですが、現状のさび外観と将来的な板厚減少量に対応することを前提にさびの外観評価をおこなっています⁴⁾。しかしながら、さびの色合いは環境によって異なる場合があり、粗さなども、たまたま観察するタイミングが、粗いさびが剥がれ落ちた直後であった場合などには見誤る恐れもあります。

そうした懸念を踏まえて、幾つかの写真見本や解説、また、最近では模擬サンプル⁵⁾や立体視できる写真見本⁶⁾なども提供されています。しかし、あくまで判定は評価者の主観によるため、バラツキを完全に排除できるとは言えません。また、同じ外観評価であっても、その後の腐食の進行状況が異なる

ケースも幾つか報告されています⁷⁾。

一方、耐候性鋼材の将来的な腐食による板厚減少量やさびの組成や電気化学的な物性から環境遮断効果を評価する手法も幾つか提案されています。

前者は架橋地点の環境因子や鋼材の合金成分をパラメータとした数値シミュレーション法^{8), 9)}、後者ではさび層の断面マクロ観察（EPMAを含む）や電位法、イオン透過抵抗法（RST法）などが代表例として挙げられます¹⁰⁾。

こうした手法は外観評定に比べてより直接的にさびの効果を評価するという点で期待できますが、前者は主に新橋計画時に耐候性鋼材の採用適否を諮るもので、後者は部分的なサンプルの採取が必要であったり、現場でのデータ採取に時間が掛かるなどの理由で、局所的な詳細点検では使われても、通常の点検で採用されることはありませんでした。

しかし近年、これらの直接的手法の中でもイオン透過抵抗法に関する機器の改良が進められ、通常の点検での使用も考えられる程度に簡便で短時間の測定が可能となったことから、今回、実際の現橋での試行をおこない、その使用性や評価結果について通常点検での適用性の観点から検討をおこないました。

2. イオン透過抵抗法（RST法）について^{10)~12)}

イオン透過抵抗法による腐食診断は、従来からおこなわれています。耐候性鋼橋に関しては、今回採用した機器の開発者である日鉄住金防蝕株式会社でも、受託調査や試験研究として、既に多くの実橋での採用実績を有しています。

イオン透過抵抗法による耐候性鋼のさび評価は、イオン透過抵抗値とさび厚の関係を図-1に示す片対数グラフ上にプロットされる領域を区分して評価をおこないます。

縦軸（対数軸）であるイオン透過抵抗値は、鋼材表面の腐食（酸化）に伴うイオンの移動に対する抵

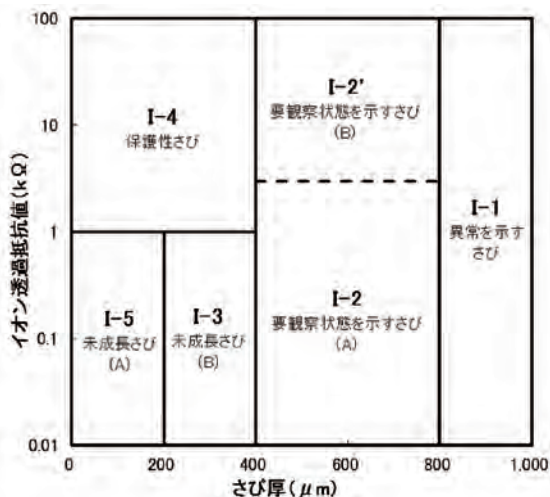


図-1 イオン透過抵抗法による評価区分図



図-2 イオン透過抵抗測定状況

抗値を示し、抵抗値が高いほど腐食が進みにくい、いわゆる環境遮断性が高いことになります。

横軸は、さび厚です。本来、イオン透過抵抗値だけで判定をおこなうのが明快ですが、正常にさびが進行する過程であっても、さびが薄く、抵抗値も低い状態があり得るため、さび厚との関係が必要となります。また、曝露環境によっては、薄いさびの状態が長期間継続することもあり、その場合、保護性さびは形成されていないが、腐食も進行しないという、予期せぬ好結果を示す場合もあります。

判定領域は、図-1に示す6つに区分されています。

さび厚が薄い（400 μm 以下）範囲では、イオン透過抵抗値の程度で、保護性さび（イオン透過抵抗値1k Ω 以上）と未成長さび（同1k Ω 未満）に区分されます。さび厚が400 μm を越えると、要観察状態を示すさび、さらに800 μm を越えた領域は異常を示すさびと評価されます。なお、未成長さびと要観察状態を示すさびでは、それぞれ（A）、（B）の領域に分割されています。ここでは詳しくは述べませんが、未成長さび（A）は、さび始めの若齢期に見られるさび、同（B）は少し粗めのさびが生じているが、これからどう進行するかが確定できない状態です。要観察状態を示すさびの（A）はさびの更なる進行が予想される状態であり、同（B）はさび状態は良くないものの鋼表面のさびは固着しており、以降のさびの進行が抑えられる可能性があるさび状態を示します。各領域の示す評価の詳細は文献^{10)~12)}を参照願います。

3. 調査対象

今回調査をおこなった橋梁は、静岡県内の道路橋

で、太平洋（駿河湾）からの離岸距離は約15km、冬期の凍結防止剤はほとんど散布しない地域にあります。また、供用後20年が経過しています。構造はトラス橋で耐候性鋼材の裸使用です。調査箇所は、トラスの格点部と水漏れにより層状さびが生じていた下横構部としました。

4. 調査結果

(1) イオン透過抵抗測定作業について

現地では測定作業に先立ち、イオン透過抵抗値測定器のキャリブレーションをおこないます。キャリブレーションは付属のサンプル板を用いて数分で終了する作業です。測定作業では、はじめに測定箇所表面の清掃をおこないます。清掃では表面に堆積している埃やさび粒、剥離さびを払い除きます。専用の刷毛を使用することで、表面の水、剥離さびの除去の程度（力加減）にバラツキをなくし、測定精度の影響を抑えるように工夫されています。


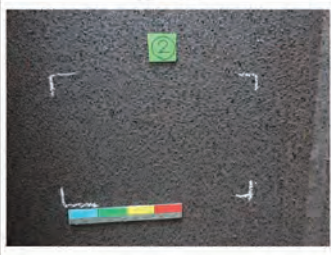
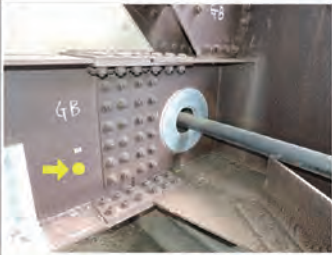
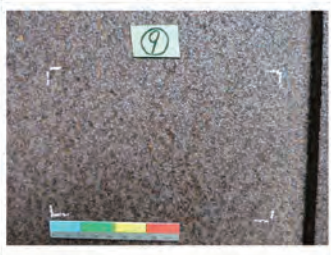

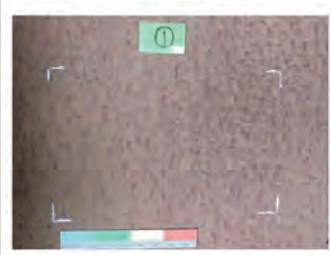

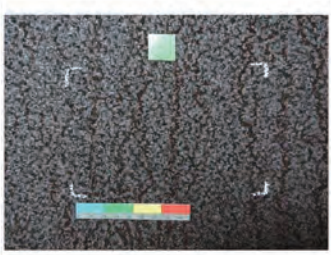

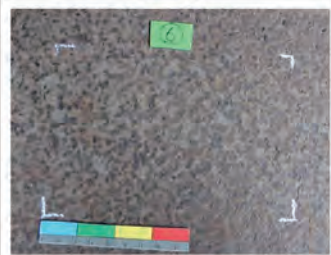

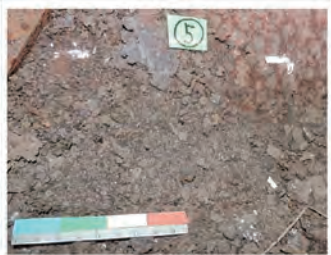

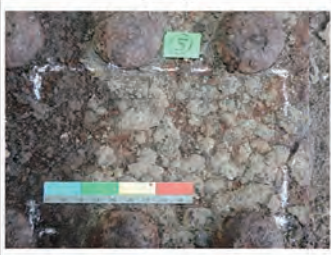

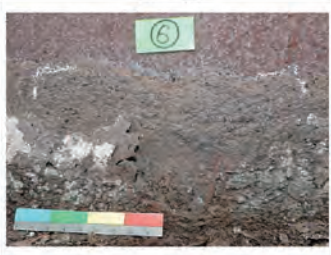
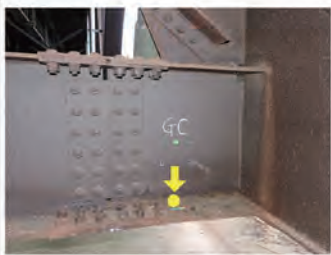
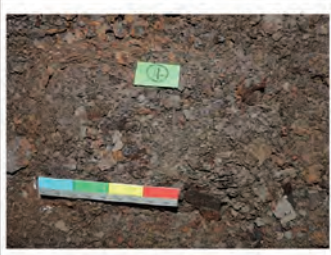


続いて、さび厚を測定します。さび厚は、塗膜と同様に電磁式膜厚計で測定します。

最後にイオン透過抵抗値を測定します。測定作業としては、プローブのセットと測定開始のボタンを押すだけの簡単なものです。樹脂製のプローブは、内蔵のマグネットで測定箇所に固定できるようになっているため、取り外しも簡単です。

イオン透過抵抗値の測定状況を図-2に示します。図に示すように測定器自体も小型、軽量で、取り回しも特に気になるものではありませんでした。

以上、清掃作業から測定終了まで、1箇所あたり2~3分で作業を終えられます。

表-1 測定結果（イオン透過抵抗法による評定と外観）

| I-5 | | | |
|---|---|--|---|
| ⑤-1 端対傾構ウエブ下向き面 | | ⑤-2 支点上支材ウエブ支間側面 | |
| さび厚 158 μm | RST抵抗値 0.59 k Ω | さび厚 141 μm | RST抵抗値 0.40 k Ω |
| 部位 | 外観 | 部位 | 外観 |
|  |  |  |  |
| I-4 | | | |
| ④-1 端対傾構ウエブ上向き面 | | ④-2 端柱フランジ内向き面 | |
| さび厚 134 μm | RST抵抗値 2.05 k Ω | さび厚 156 μm | RST抵抗値 1.23 k Ω |
| 部位 | 外観 | 部位 | 外観 |
|  |  |  |  |
| I-3 | | | |
| ③-1 中間支材下フランジ上面(幅員中央部) | | ③-2 下横構ガセットプレート上面 | |
| さび厚 231 μm | RST抵抗値 0.97 k Ω | さび厚 356 μm | RST抵抗値 0.33 k Ω |
| 部位 | 外観 | 部位 | 外観 |
|  |  |  |  |
| I-2 | | | |
| ②-1 支点上支材上フランジ添接板上向き面 | | ②-2 下弦材ウエブ内向き面 | |
| さび厚 514 μm | RST抵抗値 1.13 k Ω | さび厚 685 μm | RST抵抗値 0.65 k Ω |
| 部位 | 外観 | 部位 | 外観 |
|  |  |  |  |
| I-1 | | | |
| ①-1 中間支材下フランジ上面 | | ①-2 下横構ウエブ | |
| さび厚 1471 μm | RST抵抗値 0.30 k Ω | さび厚 801 μm | RST抵抗値 0.25 k Ω |
| 部位 | 外観 | 部位 | 外観 |
|  |  |  |  |

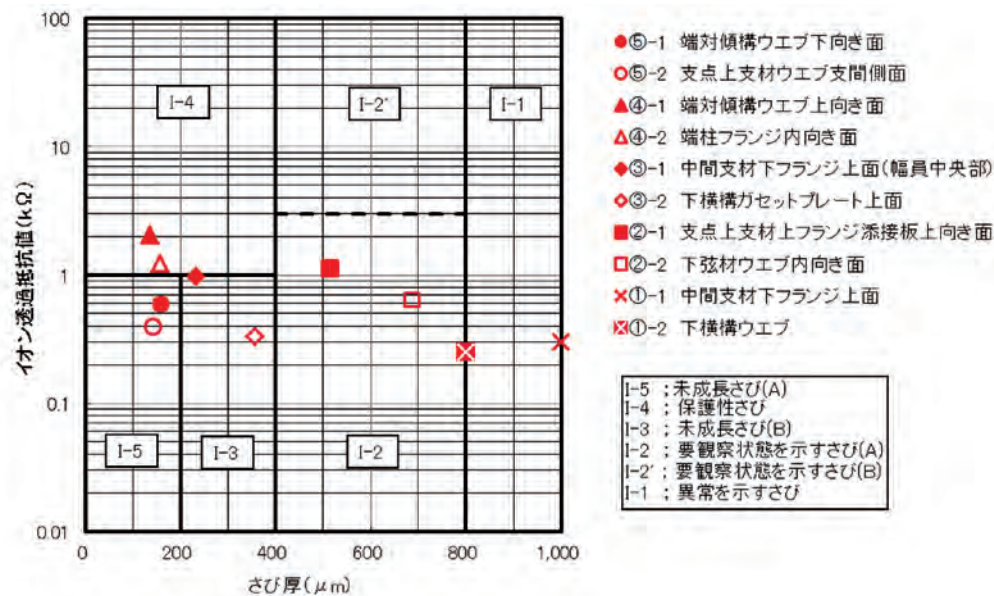


図-3 測定結果

(2) さび評価結果

今回の試行では40箇所の測定をおこないましたが、そのうち各評定ランクの代表的な2箇所を抜粋して外観状況を表-1に、評定結果を図-3に示します。なお、表-1の外観は清掃前の状況です。

以下、評定毎に外観と測定結果の概要を示します。

1) I-5「未成長さび(A)」

表-1に示す⑤-1,2は、2例とも雨掛かりのほとんどない立面ですが、⑤-1は表面に細かく毛羽立ったようなさび粒子が目立ち、⑤-2は表面が比較的平坦で赤茶色のさびが点在する状況が見受けられます。いずれも曝露期間が20年以上経過してもなおイオン透過抵抗は低い状態で、保護性さびが形成されているわけではありませんが、さびも進行していない状態であり、腐食による減厚もない状態ですから、この状態が継続していても防食上の問題はないと言えます。

2) I-4「保護性さび」

④-1、④-2は、耐候性鋼本来の保護性さびが形成されていると判定される状態です。従来から言われていることですが、保護性さびが形成されているという状態でも外観は多様であり、④-1は上向き面で若干塵埃などが積もりやすいためか、全体に赤っぽいさび色を呈しており、ややさびが若い感じがします。しかし、図-3を見るとイオン透過抵抗値は比較した範囲で最も高く、保護性の高いさび状態であることがわかります。④-2は垂直面で塵埃や水の滞留のない環境であるためか、粒子も細かく、色合いも黒褐色で典型的な保護性さびのイメージのように

思われます。

3) I-3「未成長さび(B)」

この評定区分は、現状では問題となるさび状況ではないものの、保護性さびが形成される途上にある状態と、進行性さびに進みつつある状態が混在する領域になります。

表-1に示す③-1は、若干さび粒子が粗いようですが、特に腐食が進行している感じはなく、このまま安定化することが見込まれます。一方③-2は、周辺に剥離さび箇所があり、近いうちに同じようにさびが悪化すると想定される状況にあります。この2つが同じ評定となることには若干の違和感を持ちますが、図-3のデータで見ると、③-1はI-4との境界線に近い位置にプロットされており、一方の③-2はI-2に推移することが感じられる位置にプロットされていることがわかります。

このように等級分けによる評定では、ある程度の幅を持つことは避けられず、特にこの評定ランクにおいては、評定区分と合わせてグラフ上のプロット位置を見ることで、より正しくさび状態を把握することが可能になるものと考えられます。

4) I-2「要観察状態を示すさび(A)」およびI-1「異常を示すさび」

これらはいずれも外観だけでも異常なさびであることは判断できます。ただし、外観だけではI-2とI-1の明確な差異はわかりにくいと思います。したがってI-2とI-1の区分が必要かどうかの議論もあるかも知れません。しかし、図-3のプロットを見るとI-1の2箇所の方がI-2の2箇所よりもイオン透

過抵抗値は低くなっており、I-1領域ではその後の腐食が速く進む懸念があることがわかります。

以上見たように、定量的なデータに基づくことで、等級分けの評定にブレがなくなることと合わせて、より詳細にさび状態の把握が可能となることも、本法のメリットになることが確認できました。

4. まとめ

今回のイオン透過抵抗法の試行により以下について確認できました。

○最新のイオン透過抵抗法機器を用いれば、簡便で短時間に現場測定が可能である。

○イオン透過抵抗法による等級分けによる評定結果は、概ね外観からの直感的な評価と一致する。

○客観的なデータに基づくことで、評定のバラツキが無くなるとともに、等級分けの評定では知り得ない詳細のさび状態を把握することができる。

以上、今回の試行は1橋での限られたデータであるため、評価精度を詳しく見ることはできませんが、イオン透過抵抗法の現場適用性とその結果を用いることによる点検、診断の信頼性向上に繋がる可能性を示すことができました。今後、種々の環境、さび状態の測定データを蓄積し、データの分析技術を向上させることで、点検・診断結果の信頼性を高めていく予定です。

謝辞

本試行にあたっては、現場測定からデータ整理まで、日鉄住金防蝕（株）エンジニアリング事業部の今井様、同技術開発部の石田様にご指導、ご協力をいただいたことに感謝致します。また、実橋での試行機会を与えていただきました、国土交通省中部地方整備局沼津河川国道事務所道路管理課および御殿場国道維持出張所の皆様に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2012.
- 2) 建設省土木研究所，鋼材倶楽部，日本橋梁建設協会：耐候性鋼材の橋梁への適用に関する共同研究報告書（XX）－無塗装耐候性橋梁の設計・施工要領（改定案）－，1993.
- 3) 日本橋梁建設協会耐候性橋梁部会：耐候性鋼橋梁の手引き，2013
- 4) (社) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧，2005.
- 5) (一社) 日本橋梁調査会ホームページ
<http://www.jasbc.or.jp/sabi/>
- 6) 玉越隆史，横井芳輝，岡田沙也加，水口知樹，強瀬義輝：耐候性鋼橋の外観性状によるさび状態の評価法に関する研究，国土技術政策総合研究所資料第828号，2015
- 7) 藤野陽三，安波博道，長井正嗣，岩崎英治，加納勇，山口栄輝：鋼橋の防食設計とLCC（その1），橋梁と基礎，Vol.38/01，pp.51-60，2004.
- 8) (社) 日本鋼構造協会：テクニカルレポートNo.73 耐候性鋼橋の可能性と新しい技術，2006.
- 9) 紀平 寛，田辺 康児，楠 隆，竹澤 博，安波博道，田中睦人，松岡和巳，原田佳幸：耐候性鋼の腐食減耗予測モデルに関する研究，土木学会論文集，No.780/I-70，pp.71-86，2005.
- 10) 紀平 寛，塩谷和彦，幸 英昭，中山武典，竹村誠洋，渡辺祐一：耐候性さび安定化評価技術の体系化，土木学会論文集No.745/I-65，pp.77-87，2003.
- 11) 紀平 寛：耐候性鋼上の安定さび形成状況評価と診断，材料と環境，Vol.48，pp.697-700，1999.
- 12) 今井篤実，大屋 誠，武邊勝道，麻生稔彦：さび安定化補助処理を施した耐候性鋼橋梁の表面状態とその評価，土木学会論文集A1，Vol.69，No.2，pp.283-294，2013.

大島架橋事業について

宮城県 土木部道路課 橋梁整備班

1. はじめに

宮城県気仙沼湾に位置する大島は、約3,000人が居住する東北最大の離島ですが、平成23年3月11日の

東日本大震災により島民が長期間孤立する等の問題が顕在化し、離島架橋の必要性が再認識されたため、宮城県では、平成23年度より大島架橋事業を推進し

計画ルート



今後のスケジュール

| 項目 | 年度 | H23 | H24 | H25 | H26 | H27 | H28 | H29 | H30 |
|--------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 調査設計 | | | | | | | | | |
| 用地補償 | | | | | | | | | |
| 道路工事 | | | | | | | | | |
| トンネル工事 | | | | | | | | | |
| 架橋工事 | | | | | | | | | |

事業内容

| 事業区間 | 国道45号(東八幡前)~(仮)大島IC | (仮)大島IC~浦の浜 |
|------------------|---------------------|---|
| 事業期間 | 平成23年度~平成30年度 | |
| 事業費 | 約206億円 | |
| 延長 | L=約2.7km | L=約5.3km |
| 車道幅員 ()内は全幅員 | 6.5(10.5)m | 6.0(10.0)m トンネル 6.0(9.5)m 橋梁 6.0(9.5)m |
| 道路規格 | 第3種第2級 | 第3種第3級 |
| 道路諸元 設計速度 | 60km/h | 50km/h |

図-1 大島架橋事業の事業内容

てきているところです。

大島架橋は、一般県道大島浪板線にある、本土（気仙沼市三ノ浜）と大島（気仙沼市磯草）を結ぶ橋長356mの鋼中路式アーチ橋です。

本橋は国内最大級のアーチ橋であり、東日本大震災からの教訓や新道路橋示方書にある維持管理に配慮した構造が必要という改訂点を踏まえ、平成23年に「大島架橋設計検討委員会」を設置し、災害に強く維持管理性に優れた橋梁を意図し検討しました。

ここでは、主に「大島架橋設計検討委員会」での検討事項について紹介いたします。

2. 大島架橋設計検討委員会について

「構造設計が終わってから検査路を取り付ける位置を考え始めるようでは、真に維持管理しやすい橋梁など実現できない」そのような問題意識から、大島架橋の設計はスタートしました。

前例のないプロセスで橋梁設計をする必要があったため、県では「大島架橋設計検討委員会（委員長：鈴木基行 東北大学大学院工学研究科教授）を設置



写真-1 大島架橋設計検討委員会の様子

し、平成23年10月から平成25年3月にわたって合計4回の検討を重ね、橋梁形式の選定から維持管理要領の作成に取り組みました。

検討にあたっては、「震災による損傷事例から経年劣化の事例まで、既設の橋に何が起きているか」を調べ、例えば、震災によりアーチの二次部材が破断した石巻市の天王橋では、この部材が損傷しても

◆設計の基本フロー

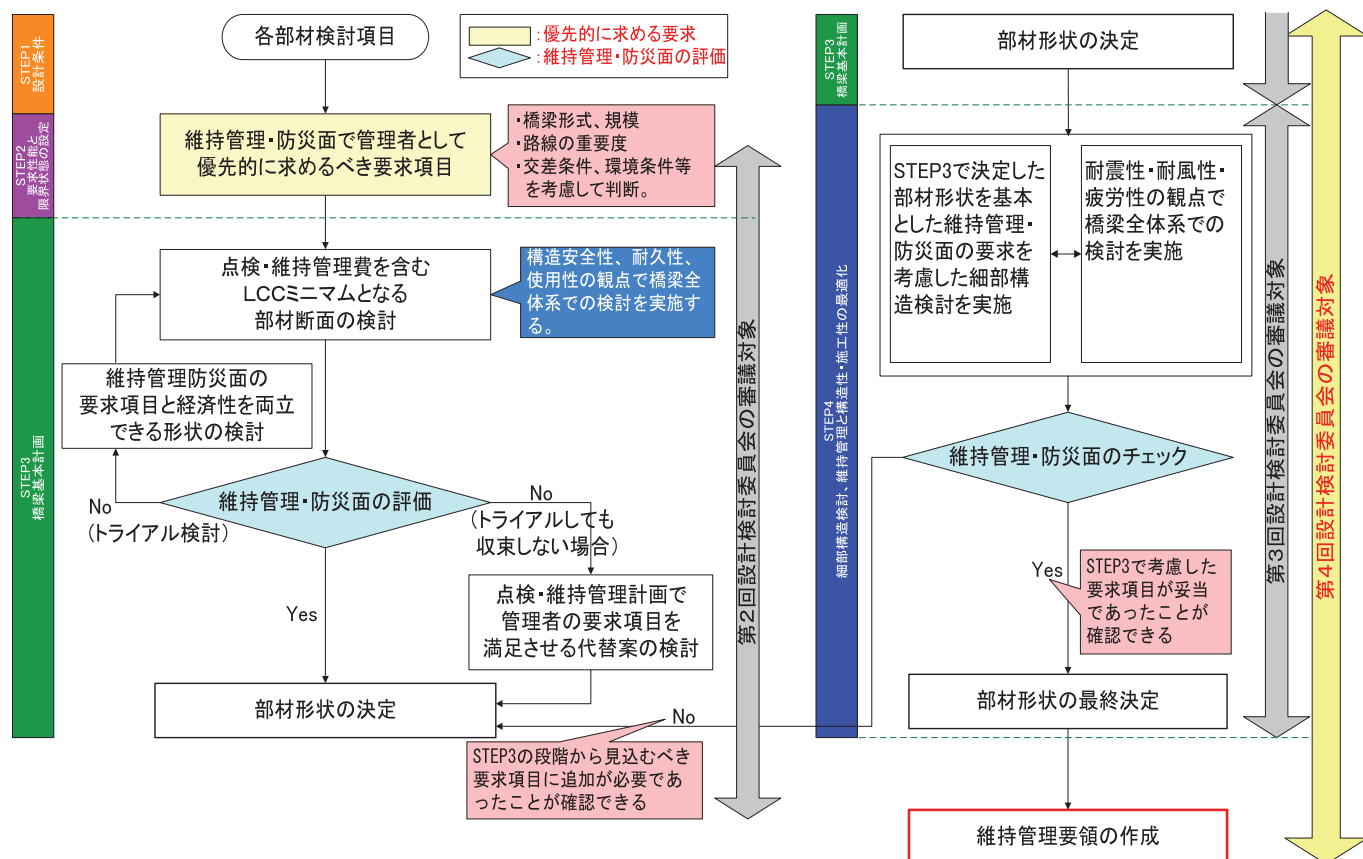


図-2 大島架橋事業の設計フロー

■横支材断面の検討

| 点検・維持管理費を含む ミニマムとなる 横支材断面の検討 | 比較案の選定結果 | | | | |
|------------------------------------|----------------------------------|---------------|---------------|----------------|-----------------------|
| | 比較案 | 第2案：標準タイプ長方形 | 第1案：標準タイプ正方形 | 第3案：上面フランジ合わせ案 | 第4案：上下面フランジ合わせ案中間折れなし |
| | 略図 | | | | |
| 経済性評価 | コスト比率： 1.00 ◎ | コスト比率： 1.03 ○ | コスト比率： 1.07 ○ | コスト比率： 1.13 △ | |
| 備考 | 初期コストは横支材のコスト、点検・維持管理コストは横支材のコスト | | | | |

| 維持管理点検性における 要求性能を満足するか | 要求項目 | 評価 | 第1案 | 第2案 | 第3案 | 第4案 | 項目抽出 S要求 T要求 E3 P1 3点 での 該当 項目 抽出 | |
|---------------------------|-------------------------------|---|-----|-----|-----|-----|--|--|
| | 要求1-① 維持管理スペース | ・第1案はダイヤフラム開口部が0.5mであり、維持管理上要求する0.6mの開口を確保できない。 | × | ○ | ○ | ◎ | | 項目抽出 S要求 T要求 E3 P1 3点 での 該当 項目 抽出 |
| | 要求3-① 維持管理に優れた部材断面、部材配置の検討 | ・第2案が断面積が最小であり点検性に優れる。 | △ | ◎ | ○ | △ | | |
| | 要求3-② 点検の障害となる箇所 | ・第1案と第2案はアーチリブ内に点検困難な狭小な閉塞部が2箇所できる。 | × | × | ○ | ◎ | | |
| 要求3-③ 点検の正確性・迅速性 | ・第2案は部材高が低く、他案に比べ点検迅速性に劣る。 | △ | ○ | ○ | ◎ | | | |

STEP3検討結果

★経済性で3位であるが、維持管理、点検性を満足する「第3案：□1.5×1.5（上面合わせ）を採用」

図-3 部材設計検討の例（横支材断面の検討）

構造上問題ありませんが、部材を撤去するまで交通を開放できなくなり、補修するにも高所なので手間が掛かるというような事例を抽出しました。

委員会では、このような事例から抽出した設計上の要求項目を「維持管理性」、「防災性」、「点検性」の三つに分類し、主構造や細部構造に反映しました。その際、構造の合理性と経済性を犠牲にせず、維持管理性と並立させることを基本方針としました。

構造安定性を満たした経済的な部材断面を比較検討し、維持管理性などの要求項目を満たすか確認し、問題がなければ次へ進み、要求項目を満たさなければ代替案を検討するというような流れとしました。（設計フローについては図-2のとおり）

具体的には、橋の致命的な崩壊に至る事態に配慮して吊りケーブルの設計にリダンダンシー性を考慮したこと、点検作業を确实・容易にするための点検路確保の観点から構造部材の断面構成を決定したこと等が特徴です。（部材設計検討の例（横支材断面の検討）については図-3のとおり）

3. 大島架橋事業の工事状況

本橋の施工には安全で確実な架設方法とすることが重要であり、高度な技術を要することから、橋梁本体工事の発注は入札参加者から技術提案を受け付ける総合評価落札方式（高度型）にて行い、評価点が最も高い「JFE・橋本店・東日本建設工事共同企業体」を落札者としました。

また、主要構造物であるトンネル5基については全て貫通しており、道路改良工事を進めているところ です。

大島架橋は26年11月に現場着工し、下部工を施工中です。また、平成28年度には上部工架設を予定しており、平成30年度の事業完成へ向け順調に進捗しているところ です。



H26.10 浦島1号トンネル完成

H26.11 大島架橋本体工事着工式

H27.3 浦島2号トンネル完成



H27.3 大島架橋本体下部工掘削状況

大島架橋完成イメージ図



図-4 大島架橋事業の進捗状況

4. おわりに

大島架橋事業は、架橋で本土と離島を結び、離島の隔絶性解消へ寄与するだけでなく、大島架橋へのアプローチ道路となる一般県道大島浪板線については、今回の震災の浸水高を踏まえた高さに変更し、津波避難路としての機能を持っていることや、三陸

縦貫自動車道の（仮称）大島IC、（仮称）気仙沼北IC及び国道45号と接続することにより震災復興、救急医療の確保及び地域間交流等に寄与する道路でもあり、多くの事業効果が期待されています。

今後は、気仙沼市など関係機関と連携して、架橋を生かした大島復興策についても検討する予定です。

薄板モルタル供試体を用いた 塩害－中性化複合劣化進行予測手法の構築

新潟大学 工学部建設学科 教授 佐伯 竜彦

1. はじめに

塩害と中性化が複合して鉄筋コンクリート構造物に作用した場合、塩分濃度のピークがコンクリート表面ではなく内部に生じ、鋼材表面の塩分濃度の増加および細孔溶液のpHの低下により、鋼材腐食の開始が早まることが知られている。さらに、中性化が進行しやすい環境では塩分の濃縮が生じるだけでなく、酸素の供給も容易であることから、鋼材腐食が進行しやすい非常に厳しい環境と言える。

また、塩分浸透抑制効果が高いことが知られる混合セメント（高炉セメント、フライアッシュセメント）は中性化の進行が速いことが欠点であり、副産物有効利用や環境負荷低減の観点から今後使用が増加すると予想される混合セメントを用いたコンクリートの耐久性を考える上からも複合劣化に対する検討は重要である。

塩害または中性化による単独の劣化進行予測に関する研究は多いが、両者が複合した場合の検討は十分でない。しかし、個々の劣化のメカニズムは解明されていることから、両者の複合を検討するためには、特に環境条件（劣化外力）の影響を適切に評価する必要がある。著者らは、実構造物の劣化環境の定量的評価を目的として、「薄板モルタル供試体」を用いた一連の研究^{1)~3)}を行ってきており、塩害単独および中性化単独の劣化環境の定量的評価と劣化進行予測が可能であることを確かめている。本研究では、この手法を塩害－中性化複合劣化環境に応用し、複合劣化進行予測手法を構築することを目的とした。

2. 実験概要

本研究では、塩害－中性化複合劣化について基礎的な検討を行うため、モルタル供試体を用いて、塩水浸漬と促進中性化試験を交互に繰り返す複合劣化促進試験を行った⁴⁾。

2.1 材料および配合

本研究で使用したセメントは、研究用普通ポルトランドセメントである。また、混和材として、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いた。表-1に各結合材の物理的性質と化学成分を示す。

本研究では、劣化環境評価のための4cm×3cm×0.5cmの薄板供試体と4cm×4cm×16cmの角柱供試体の2種類を実験に用いた。4cm×4cm×16cmの角柱供試体は厚みがあるため、塩化物イオンや二酸化炭素の浸透においてコンクリート構造物を模擬するものとして実験に用いた。供試体の配合を表-2に示す。また、混和材として高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いた場合、微細組織の緻密化などの効果により塩分浸透が抑制される一方で、中性化に対する抵抗性が低下することが知られている。そこで、表-2に示すように、混和材を用いた供試体（B50、B70、F15、F30）も作製した。

細骨材はISO標準砂（密度：2.64g/cm³）を用い、細骨材容積率は50%とした。また、N60は水結合材比が高いため、混和剤として増粘剤と消泡剤を水の質量の2.0%使用した。

供試体は薄板、角柱ともに、打設後1日で脱型し、材齢28日まで20℃水中養生を行った。

表-1 各結合材の物理的性質および化学成分

| 種類 | 密度 (g/cm ³) | ブレン (cm ² /g) | 化学成分 (%) | | | | | |
|--------------|----------------------------|-----------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|
| | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ |
| 普通ポルトランドセメント | 3.16 | 3,310 | 21.2 | 5.7 | 2.6 | 64.8 | 1.4 | 2.0 |
| 高炉スラグ微粉末 | 2.87 | 3,900 | 33.4 | 13.9 | 0.1 | 42.6 | 5.5 | 2.0 |
| フライアッシュ | 2.25 | 2,950 | 51.3 | 22.8 | 9.9 | 4.3 | 1.2 | 0.4 |

表-2 供試体の配合

| | 記号 | 結合材種類 | 水結合材比 (%) | 混和材置換率 (%) |
|-------|-----|-----------------------|-----------|------------|
| 薄板供試体 | N50 | 普通ポルトランドセメント | 50 | 0 |
| | N60 | 普通ポルトランドセメント | 60 | 0 |
| 角柱供試体 | OPC | 普通ポルトランドセメント | 55 | 0 |
| | B50 | 普通ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末 | 55 | 50 |
| | B70 | 普通ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末 | 55 | 70 |
| | F15 | 普通ポルトランドセメント+フライアッシュ | 55 | 15 |
| | F30 | 普通ポルトランドセメント+フライアッシュ | 55 | 30 |

2.2 供試体の基本特性

(1) 酸素拡散係数

酸素の拡散係数は、拡散セル法により測定を行った。試料は、材齢28日の3cm×4cm×0.5cmモルタル供試体を、温度50℃の乾燥炉の中で恒量としたものを用いた。本研究では、白川らの方法⁵⁾を参考に試験を行い、酸素拡散係数を求めた。

(2) 塩化物イオン実効拡散係数

塩化物イオンの実効拡散係数は、拡散セル法により測定した。試料は、材齢28日の3cm×4cm×0.5cmのモルタル供試体を用いた。拡散セルを用い、供試体を挟んでセルの一方に0.3mol/LのNaOH水溶液を、もう一方に0.5mol/LのNaCl水溶液をそれぞれ0.42Lずつ満たした。経時的にNaOH側の溶液を採取し、NaOH側の塩化物イオン濃度の増加割合が一定となった時点で塩化物イオンの実効拡散係数を算出した。

2.3 複合劣化促進試験

(1) 供試体

薄板モルタル供試体は、初期養生終了後に表乾質量を測定し、暴露面である3cm×4cmの1面のみを残し、その他の5面をアルミテープでシールした。

4cm×4cm×16cmの角柱供試体は、初期養生終了後、型枠底面に接する4cm×16cmの1面を除いた5面をエポキシ系の接着剤でシールし、促進試験を行った。

(2) 促進条件

塩害と中性化の複合劣化を模擬するために、促進中性化と塩水浸漬を交互に行った。促進中性化試験は、温度20℃、相対湿度60%、二酸化炭素濃度5%の条件を一定に保った中性化促進装置内に供試体を暴露して行った。塩水浸漬試験は、3.5%塩化ナトリウム水溶液を用いて行った。

乾湿繰り返しの周期は、促進中性化2日-塩水浸

漬1日とした。薄板供試体はこの乾湿繰り返しを5サイクル(15日)行い、角柱供試体は32サイクル(96日)行った。

(3) 測定項目

a) 薄板供試体の塩分浸透量および炭酸カルシウム生成量

本研究では、供試体に浸透した塩化物イオンの濃度分布および炭酸カルシウムの濃度分布ではなく浸透総量に着目したため、供試体全体を粉碎して試料とし塩分浸透量と炭酸カルシウム生成量の測定を行った。

JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に準拠し、電位差滴定法により供試体中の塩分浸透量を測定した。

また、炭酸カルシウム量は、熱重量分析により測定した。

b) 角柱供試体の塩化物イオン浸透量

所定の促進試験を行った角柱供試体の暴露面から0~5mm、5~10mm、10~15mmの位置から試料を採取し、採取した試料それぞれについてJCI-SC4に準じて全塩化物イオンを定量した。

c) 角柱供試体の中性化深さ

試験開始から32サイクル(96日)目において、供試体の端部を約4cm切り落とし、その切り落とした面にフェノールフタレインの1%溶液を吹き付け、中性化深さを測定した。

3. 複合劣化進行予測手法の構築

本研究では、同一環境下に短期間暴露した薄板供試体中の炭酸カルシウム生成量および塩化物イオン浸透量の測定値から、実構造物を模擬した4×4×16cmの角柱供試体の中性化深さおよび塩化物イオン濃度分布を推定する手法について検討した。

3.1 塩害—中性化複合劣化の進行

図-1に、促進劣化試験における角柱供試体の複合劣化試験32サイクル（96日）目の全塩化物イオン濃度分布の一例を示す。図より、中性化の進行の速い混和材高置換の配合（B70）において、内部への塩分浸透が促進されている。

3.2 薄板供試体による塩分浸透予測

(1) 塩化物イオンの拡散係数に及ぼす固定化の影響

セメント硬化体における塩化物イオンの固定化を線形固定と考えた場合、固定化の影響を考慮した塩化物イオンの見掛けの拡散係数と固定化を考慮しない塩化物イオンの実効拡散係数の関係は、以下の式(1)の通りである。

$$D_a = D_e / (R+1) \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 D_a ：塩化物イオンの見掛けの拡散係数
(cm^2/day)

D_e ：塩化物イオンの実効拡散係数
(cm^2/day)

R ：固定化率

(2) 塩化物イオンの拡散係数に及ぼす含水状態の影響

2.2に示す拡散セル法により求められる塩化物イオン実効拡散係数は飽水状態における値である。しかし、陸上の構造物のコンクリートは必ずしも飽水状態ではないため、塩分浸透はコンクリートの含水状態に依存すると考えられる。そこで、3.3に示す方法で試験中の供試体の平均含水率を算出し、促進試験終了時における薄板供試体の含水率の測定結果と飽水状態の拡散係数から以下の式(2)を用いて、促進試験中の薄板供試体の塩化物イオンの拡散係数を推定した。

$$D_w / D_0 = 0.0032 \times 10^{0.025W} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 W ：相対含水率（%）

D_w ：相対含水率 W の時の塩化物イオンの拡散係数 (cm^2/day)

D_0 ：飽水状態の塩化物イオンの拡散係数 (cm^2/day)

(3) 薄板供試体による構造物の塩化物イオン浸透量の推定

本研究で暴露試験に用いた薄板モルタル供試体における条件、即ち、厚さ l で一面のみが暴露面であり、拡散係数および表面塩化物イオン濃度が一定と仮定した場合のFickの拡散方程式の解析解から、供試体単位暴露面積当たりの拡散物質（塩化物イオン）の浸透量は次の式で与えられる。

$$\frac{M_t}{M_\infty} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left\{ \frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{4l^2} \right\} \dots (3)$$

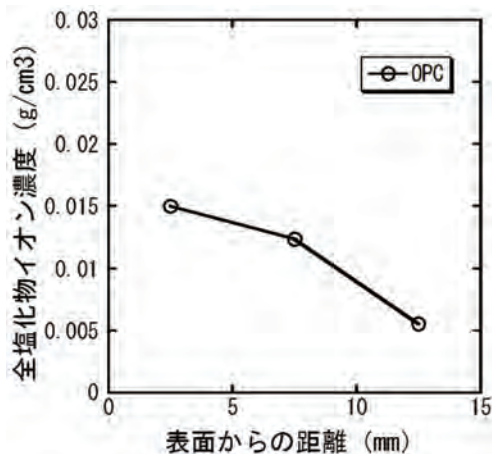
ここで、 l ：供試体厚さ（ cm ）

M_t ：時刻 t における塩化物イオン浸透量 (g/cm^2)

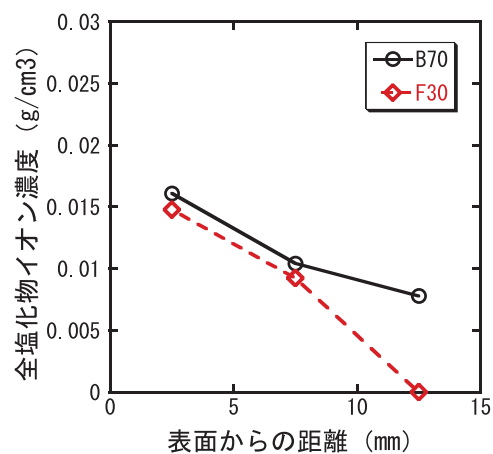
M_∞ ： $t = \infty$ における塩化物イオン浸透量 (g/cm^2)

D ：塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm^2/day)

式(1)、(2)を用いて塩化物イオンの固定化および含水率の影響を考慮し、式(3)から求めた基準配合との見掛けの拡散係数比と基準配合との塩分浸透量比の関係を図-2に示す¹⁾。図より、材料・配合によらず塩化物イオンの見掛けの拡散係数比から塩化物イオン浸透量比を求めることが可能となる。さらに、薄板供試体中へ塩分浸透量を測定するので、角柱供試体の塩分浸透量を推定することが可能となる。



(a)OPC



(b)F15

図-1 角柱供試体の複合劣化試験32サイクルにおける全塩化物イオン濃度分布

以上の検討より、5サイクル（15日）の薄板供試体の塩分浸透量と見掛けの拡散係数、32サイクル（96日）の角柱供試体の見掛けの拡散係数から角柱供試体への塩化物イオン浸透量を推定した。角柱供試体に浸透した塩化物イオン総量の推定値と実測値を図-3に示す。図より、各配合において、薄板供試体の配合によらず乾湿繰り返し複合劣化5サイクルの薄板供試体の暴露試験により角柱供試体の32サイクルにおける塩分浸透量を評価できていることがわかる。

(4) 薄板供試体による角柱供試体の塩化物イオン濃度分布の推定

(3) で求めた推定値は角柱供試体の暴露期間中において、角柱供試体に浸透した塩化物イオン浸透量の総量を表したものである。しかし、複合劣化進行予測で知る必要があるのは鉄筋位置での塩化物イオン濃度である。

そこで、(3) において求めた塩化物イオン浸透総量から角柱供試体における表面塩化物イオン濃度 C_0

の推定値を式 (4) によって逆算し、薄板供試体の塩化物イオン浸透量から角柱供試体の塩化物イオン濃度分布の推定を行った。薄板供試体による塩化物イオン濃度分布の推定値と、角柱供試体より得られた深さごとの塩化物イオン濃度の実測値を比較した結果の一例を図-4に示す。

$$M_t = 2C_0 \sqrt{\frac{D \cdot t}{\pi}} \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 M_t ：試験期間 t における塩化物イオン浸透総量 (g/cm²)

C_0 ：表面塩化物イオン濃度 (g/cm³)

D ：塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm²/day)

t ：促進期間 (day)

図より、塩害-中性化複合劣化環境において、薄板供試体を用いて角柱供試体の塩化物イオン濃度分布をおおよそ推定可能であることが確認できた。しかし、F15のように中性化深さが大きい場合には、

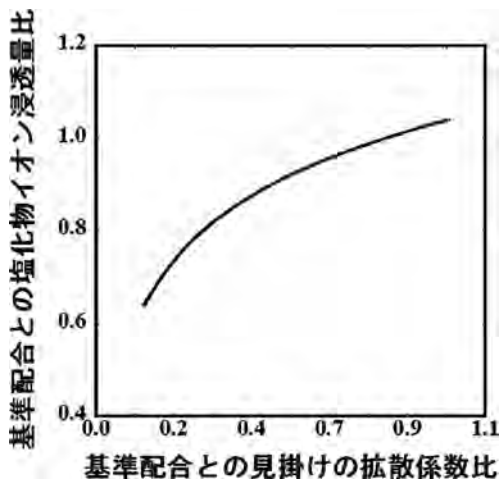


図-2 基準配合との見掛けの拡散係数比と基準配合との塩化物イオン浸透量比

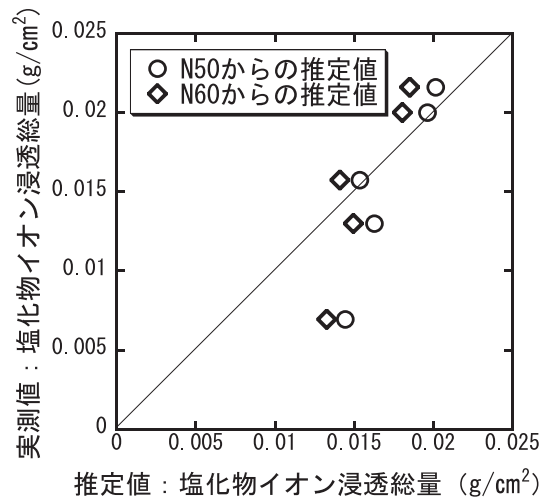
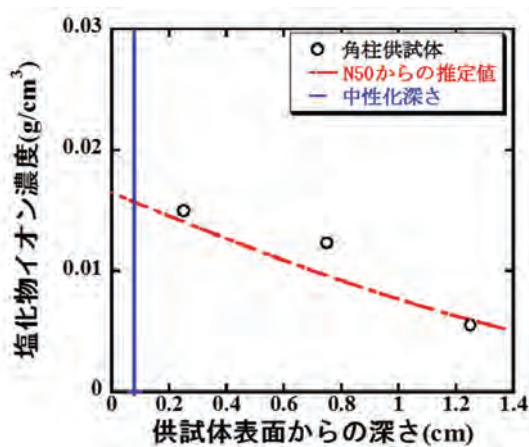
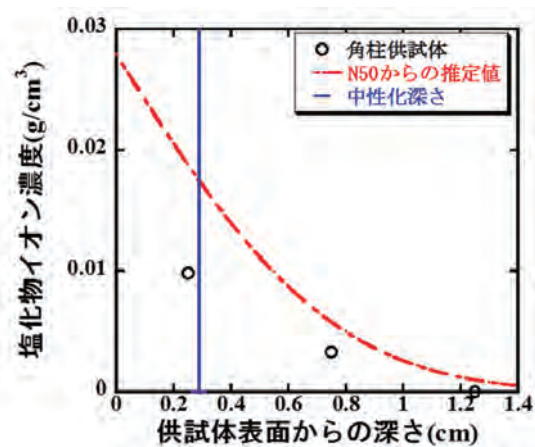


図-3 塩化物イオン浸透総量



(a) OPC



(b) F15

図-4 促進32サイクルの角柱供試体における塩化物イオン濃度分布

複合劣化の影響により表面付近の塩化物イオン濃度が低下しており。これによって推定精度が低下していることがわかる。これは、中性化の影響を考慮していないためである。

3.3 薄板供試体による中性化進行予測

本研究では、3.2に示した塩害環境評価手法をベースに、供試体中に浸透する物質を塩化物イオンから二酸化炭素に置換えて、中性化進行予測手法を構築した。

(1) 二酸化炭素の拡散係数に及ぼす炭酸化反応の影響

中性化はコンクリート中の水酸化カルシウムが二酸化炭素と反応して炭酸カルシウムとなり進行することから、初期水酸化カルシウム量によって塩害における固定化率に相当する値を求めることができる。固定化率 R （水酸化カルシウムと反応する二酸化炭素量）は初期養生終了後の水酸化カルシウム量から算出した。

$$D' = D / (R + 1) \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 D' ：固定化を考慮した二酸化炭素拡散係数 (cm²/day)

D ：固定化を考慮しない二酸化炭素拡散係数 (cm²/day)

R ：固定化率

(2) 二酸化炭素の拡散係数に及ぼす含水状態の影響

コンクリート中の二酸化炭素の拡散係数は、含水率の影響を受ける。本研究では、含水率の影響を考慮した二酸化炭素拡散係数⁶⁾を以下の式によって算出した。

$$D_{CO_2} = 0.33(3.62 \times 10^{12})^V - 0.33 \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 D_{CO_2} ：含水状態を考慮した二酸化炭素の拡散係数 (cm²/day)

V ：含水率を考慮した細孔量 (cm³/cm³)

(3) 二酸化炭素浸透量の推定

薄板供試体への二酸化炭素浸透量から角柱供試体への二酸化炭素浸透量を推定するには、両者の二酸化炭素拡散係数比を求める必要がある。

薄板供試体の二酸化炭素拡散係数は、以下のよう
に求めた。供試体を50℃で炉乾燥し、拡散セル法により酸素拡散係数を測定した。得られた酸素拡散係数を酸素と二酸化炭素の分子量の比で補正することにより、二酸化炭素拡散係数を算出した。

コンクリート中に侵入した二酸化炭素は、水和物との炭酸化反応を生じながら移動する。このため反応による二酸化炭素の固定化の影響を含む見掛けの

拡散係数を以下のように求めた。炭酸化反応による二酸化炭素の固定化速度を $(\partial S / \partial t)$ とし、固定化量 S がコンクリート中の二酸化炭素濃度と線形関係(式(7))にあると仮定すると、式(8)は固定化率 R を用いて式(9)のように変形できる。ここで、固定化率はコンクリート中の水酸化カルシウム量を全て炭酸化するために必要な二酸化炭素量と仮定した。炭酸化は水酸化カルシウム以外のセメント水和物でも生じるが、水酸化カルシウム起源の炭酸カルシウムが大部分を占めることが確認されていることから、このように仮定した。なお、このときの式(9)中の二酸化炭素濃度 C は、固定化の影響を含んだ見掛けの濃度である。

$$S = RC \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{\partial S}{\partial t} \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{D}{R+1} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = D' \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots (9)$$

以上のようにして求められた見掛けの二酸化炭素拡散係数は、50℃乾燥で恒量となった状態の拡散係数である。一方で、実構造物のコンクリートはあるいは本研究で促進試験を行った供試体は空隙中に水分が存在し、含水率は経時的に変化している。コンクリート中の気体の拡散係数は、コンクリートの含水状態によって大きく変化する。このため、コンクリート中の含水率を把握しなければ、コンクリート中の二酸化炭素拡散係数は把握することはできない。しかし、実構造物において環境条件の影響を受け経時的に変化する含水状態を長期にわたって正確に把握することは事実上不可能である。このことから本研究では、劣化期間中の平均的な含水率を求め、拡散係数に反映させることとした。表面濃度一定、拡散係数が一定の場合の拡散物質の浸透総量は以下のようになる。

$$M_t = 2C_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \dots\dots\dots (10)$$

上式から含水率の影響を含む二酸化炭素の見掛けの拡散係数を逆算した。ここで、表面濃度 C_0 をコンクリートが固定できる二酸化炭素量の上限值（水酸化カルシウム生成量から計算）とし、 M_t は薄板供試体中に浸透した二酸化炭素の総量であり、熱重量分析で供試体中の炭酸カルシウム生成量を測定し、計算により求めた。

二酸化炭素拡散係数の含水率依存性は、式(6)

のように定式化されているから、50℃乾燥供試体の拡散係数から逆算される空隙率を分母とし、式(6)から逆算される空隙率を分子として相対含水率を計算した。これによって、試験中の平均含水率を求めた。塩化物イオンの浸透の場合は、塩分の浸透量はコンクリート表面に供給される塩分量と含水率の双方の影響を受けるが、大気中の二酸化炭素濃度は構造物の部位によって異なることはないため、二酸化炭素浸透量の違いは含水率による拡散係数の違いによるものと考えることができる。

本研究では、角柱供試体中の炭酸カルシウム量の分布を測定しているため、この濃度分布を回帰して含水率の影響を含む見掛けの二酸化炭素拡散係数を逆算した。本来は、濃度分布の測定ではなく、前もっての拡散セル試験や材料・配合条件または空隙構造からの推定などで拡散係数を求める必要がある。

(4) 中性化深さの推定

次に、以下の手順で中性化深さの推定を行った。反応して炭酸カルシウムとなったものも含む二酸化炭素の濃度分布は、反応の影響を含む見掛けの拡散係数を用いて、下記の式で求めることができる。

$$\frac{C}{C_0} = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \dots\dots\dots (11)$$

供試体中の炭酸カルシウムは、全て水酸化カルシウムから生成するとし、水酸化カルシウムが移動しないと仮定すると、1molの二酸化炭素と1molの水酸化カルシウムが反応することから、浸透した二酸化炭素量と初期養生終了後の水酸化カルシウム量から残存している水酸化カルシウム量を計算することができる。さらに、水酸化カルシウムが消失した部分を中性化領域と考えると、中性化深さを推定することができる。図-5に中性化深さの推定結果を示す。図より、劣化促進試験5サイクル目における薄板供試体中の炭酸カルシウム生成量から角柱供試体の32サイクルの中性化深さを精度よく推定できることが確認された。

3.4 中性化の影響を受ける場合の塩分濃度分布の推定

3.2および3.3より、薄板供試体の短期間暴露試験によって角柱供試体の塩分浸透量および中性化深さを推定できることを示した。ここでは、中性化の影響を受けた場合の塩分濃度分布の推定について検討する。

本研究で行った複合劣化促進試験は、2.実験概要

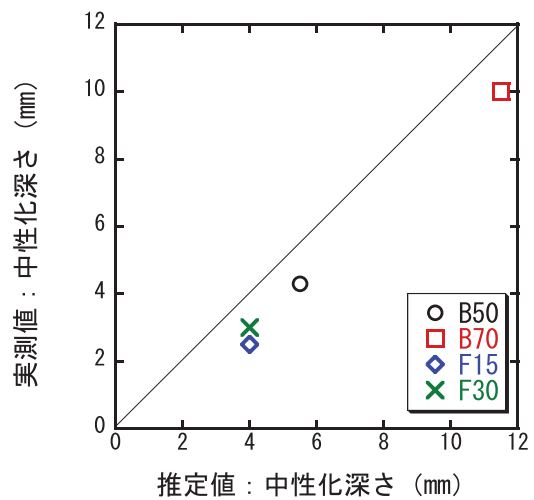


図-5 中性化深さの推定結果 (N50より推定)

で示した通り、促進中性化試験と塩水浸漬試験を交互に繰り返す乾湿繰り返し試験である。本試験において、中性化は促進中性化試験中に進行し、塩分浸透は塩水浸漬試験中に進行する。それぞれの期間は当然把握されているが、実構造物では、乾燥および降雨や漏水による水分浸透が生じコンクリート中の含水状態が経時的に変化し、それを正確に把握することはできない。このため、劣化評価・予測のための劣化期間は供用開始からの時間を用いざるを得ない。本研究ではこのことを考慮し、劣化評価や予測に用いる時間を通算の促進期間とした。

(1) 固定化された塩化物イオン濃度

塩害、中性化が複合的に作用した場合、コンクリート中の水和物に固定化されていた塩化物イオンが細孔溶液中に解離し塩化物イオンとなることで、未中性化領域に塩分の濃縮現象が生じる。そこでまず、式(12)を用いて未中性化時に固定化されていた塩化物イオン濃度を求めた。

$$C_{fix} = \frac{R}{(1+R)} C_{total} \dots\dots\dots (12)$$

ここで、 C_{fix} : 固定化された塩化物イオン濃度 (g/cm³)

C_{total} : 全塩化物イオン濃度 (g/cm³)

R : 固定化率

(2) 自由塩化物イオン濃度

(1)によって求めた固定化された塩化物イオン濃度と式(13)を用いて自由塩化物イオン濃度を求めた。

$$C_{free} = C_{total} - C_{fix} \dots\dots\dots (13)$$

ここで、 C_{free} : 自由塩化物イオン濃度 (g/cm³)

C_{total} : 全塩化物イオン濃度 (g/cm³)

C_{fix} : 固定化された塩化物イオン濃度 (g/cm³)

(3) 中性化深さを考慮した塩化物イオン濃度分布

(1) より求めた固定化された塩化物イオン濃度を用いて、供試体表面から中性化深さ位置までの固定化塩分総量 M_{fix} を計算した。また、中性化深さ位置から内部に浸透している全塩化物総量を M_t' とした。これらを足し合わせたものを M_t とし、この塩分量が中性化の影響によって未中性化部分に再分配され、中性化部分には自由塩化物イオンのみが存在すると考えた。求めた M_t' と式(14)を用いて C_0' を求めた。ここで得られる C_0' は、中性化深さの位置を表面と考えた場合の表面塩化物イオン濃度である。

$$M_t' = 2C_0' \sqrt{\frac{D \cdot t}{\pi}} \dots\dots\dots (14)$$

- ここで、 M_t' ：試験期間 t における塩化物イオン浸透総量 (g/cm²)
- C_0' ：表面塩化物イオン濃度 (g/cm³)
- D ：塩化物イオンの見掛けの拡散係数 (cm²/day)

t ：促進期間 (day)

3.3の方法で推定した中性化位置までは、(2)の方法で求めた自由塩化物イオンのみが存在するものとし、中性化深さ位置からは、求めた C_0' を用いて塩化物イオン濃度分布を推定した。濃度分布推定の概念図を図-6に、推定結果の一例を図-7に示す。図より、中性化により塩分濃縮の影響を再現できており、本手法の有効性が確認できる。

(4) 実構造物による検証

本研究で構築した複合劣化進行予測手法の妥当性を検証するため、塩害-中性化複合劣化を生じた実構造物に薄板供試体を冬期6ヶ月暴露した。対象とした構造物は新潟県内陸部にあり凍結防止剤散布環境下にある橋梁である。コア採取によって得られた構造物の中性化深さと塩化物イオン濃度分布を図-8に示す。

構造物からのコア採取位置に貼り付けた薄板供試体への二酸化炭素浸透量 (=炭酸カルシウム) の測

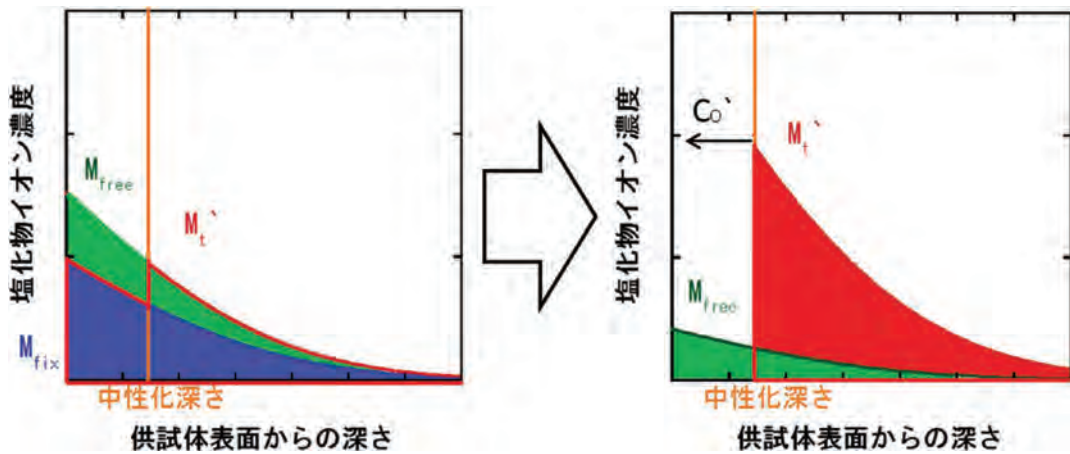
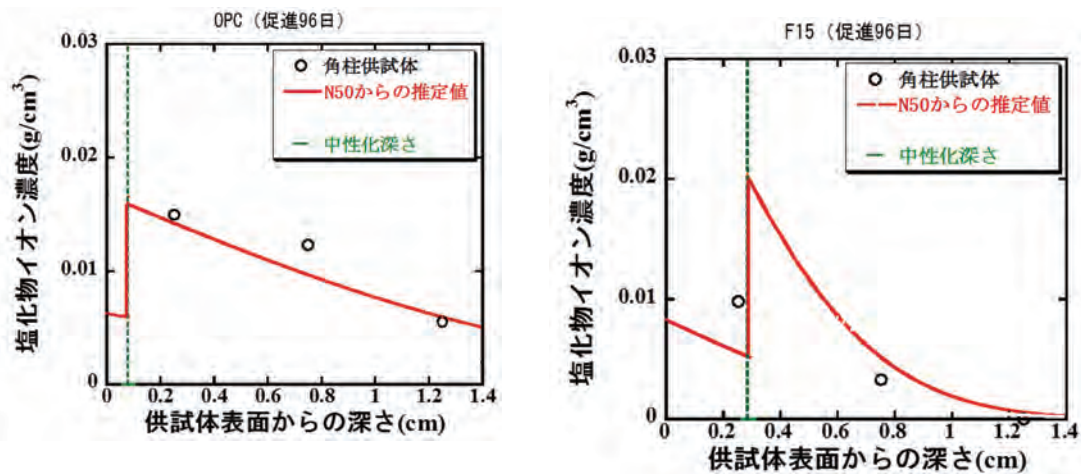


図-6 中性化の影響を受けた場合の濃度分布推定の概念図



(a) OPC

(b) F15

図-7 促進32サイクル目の角柱供試体における塩化物イオン濃度分布の推定結果

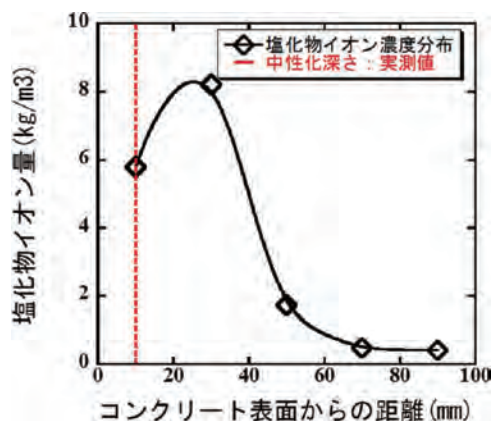


図-8 構造物の塩化物イオン濃度分布図

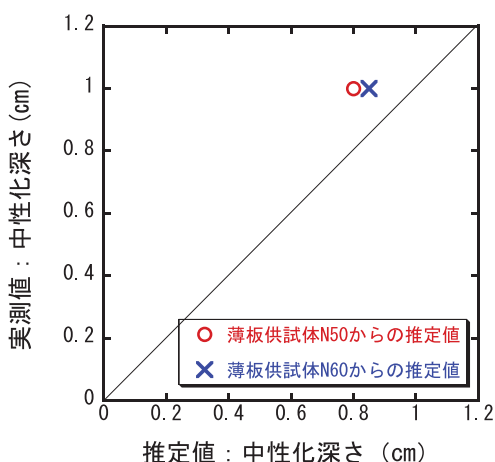


図-9 構造物の中性化深さの推定結果

定を行い、中性化深さを推定した。結果を図-9に示す。図より、薄板供試体中の炭酸カルシウム生成量から実構造物の中性化深さを評価できることが確認できる。

一方で、暴露試験から回収した薄板供試体中に塩化物イオンを確認することができなかった。暴露試験で対象とした構造物は、凍結防止剤による劣化が進行しており、コンクリートが剥離・剥落している箇所も見られた。そのため暴露期間中にさらに劣化が進み、凍結防止剤を含む漏水の経路が変わり、結果として薄板供試体に塩分が供給されなかったと考えられる。

4. まとめ

本研究では、実用的な塩害-中性化複合劣化進行

予測手法を構築するため、予測対象とする構造物と同一環境下に薄板供試体を短期間暴露し、供試体への塩化物イオン浸透量および二酸化炭素浸透量の測定値から構造物の中性化深さおよび塩化物イオン濃度分布を推定する手法を構築した。

本手法は塩害-中性化複合劣化促進試験結果を一定の精度で予測することが可能であった。しかし、実構造物での検証はできなかった。

今後は精度の向上のための更なる検討と、実構造物での検証のためのデータの蓄積が必要である。

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を受けて実施したものであり、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐伯竜彦, 竹田光明, 佐々木謙二, 嶋毅: 飛来塩分環境の定量評価に関する研究, 土木学会論文集, Vol.66, No.1, pp.1-20, 2010
- 2) 佐伯竜彦, 能勢陽祐, 菊地道生: 薄板モルタル供試体を用いたマイクロ塩害環境評価手法に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.803-808, 2011.
- 3) 山田 猛, 菊地道生, 斎藤 豪, 佐伯竜彦: 薄板モルタル供試体を用いた中性化環境の評価に関する基礎的検討, セメント・コンクリート論文集, No. 66, pp. 485-490, 2012.
- 4) 佐伯竜彦, 関谷輝: 混和材が塩害と中性化の複合劣化に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, vol.24, No.1, pp. 729-734, 2002.
- 5) 白川敏夫ほか: セメント硬化体中への気体の拡散係数測定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第515号, pp.15-21, 1999.
- 6) 佐伯竜彦, 大賀宏行, 長瀧重義: コンクリートの中性化の機構解明と進行予測, 土木学会論文集, No.414, pp.99-108, 1990.

大型連続高架橋模型の2方向加振実験による現実的な設置状況下でのゴム系支承の挙動と終局状態の解明に関する研究

名古屋工業大学 工学部都市社会工学科 助教 海老澤 健正

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、積層ゴム系支承は極大地震に対する橋梁の有効な耐震性能向上策として多く採用されてきた。ゴム系支承は橋脚の保有水平耐力以上の耐力を持つことが前提で、橋脚の損傷を制御するための重要な役目を持っているが、東北地方太平洋沖地震（2011）では橋脚の損傷以前に積層ゴム支承（NRB）が破断するという重大な被害が初めて確認された。支承の破壊が生じると、免震機能の喪失により高架橋の耐震設計思想が根本的に破綻する可能性も考えられる。にもかかわらず、高架橋に設置されたゴム支承の地震動下での実際の挙動や破壊に至る過程はほとんど解明されていない。このため、ゴム系支承の上下鋼板を平行に拘束した状態での1方向せん断試験による性能評価と単純なせん断バネでモデル化した支承モデルを用いた耐震解析による現行の安全照査法の妥当性は十分に検証されているとは言い難い。

上記の認識から、本報告では、鋼製橋脚で支持された連続高架橋に設置された積層ゴム支承のより詳細な地震時挙動の特性を明らかにすることを目的として、まず、実構造をできるだけ正確に反映した2径間連続高架橋の大型模型（ $1/s=1/6.7$ ）を用いて、橋脚が終局状態に至るまでの水平2方向同時加振実験¹⁻³⁾を同済大学（中国）保有の世界最大級のマルチ振動台を用いて実施した。つぎに、この実験を基にゴム支承に作用する力や支承の変形特性を調べるとともに、実験結果に整合する支承モデルを提示した。さらに、提示したゴム支承のモデルと構成則に三曲面モデル⁴⁾を導入したシェル要素で離散化した鋼製橋脚と上部構造のFEモデル⁵⁾を用いて高架橋の供試体モデルを構築し、その妥当性を加振実験結果により検証した。最後に、高架橋供試体のモデル化と同様な手法を用いて実大の連続高架橋のFEモデルを構築した。そして、数値解析により可能な限り現実における水平2方向地震動下でのゴム支承の応答

を再現することで、その特性を考察した。

2. 高架橋加振実験におけるゴム支承の挙動とFEモデルの構築

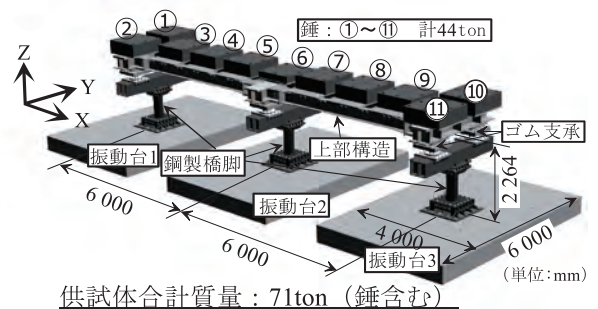
(1) 加振実験

a) 供試体概要

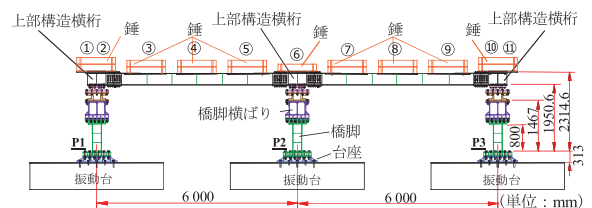
2径間連続高架橋模型と加振実験の概略図を図-1に示す。高架橋模型の構成要素は無充填円形断面鋼製橋脚、ゴム支承、上部構造からなる。諸元を決定するにあたり、はじめに対象とする実大の高架橋の諸元（支間長40m、幅員19m、橋脚の支承下端までの高さ12.5m）を設定し、主荷重に対して上部構造（非



(a) 概観



(b) 概要図



(c) 側面図

図-1 連続高架橋模型 ($s=1/6.7$)

表-1 ゴム支承諸元 (実験供試体)

| 諸元 | 端橋脚上 | 中央橋脚上 |
|------------------------|-----------------|-----------------|
| ゴム材料の種類 | NR (G10) | |
| ゴム体平面寸法 $a \times b$ | 0.26 × 0.39 | 0.30 × 0.45 |
| 高さ $n \times t_e$ (m) | 4 × 0.01 | 4 × 0.01 |
| S1 (1次形状係数) | 7.8 | 9.0 |
| S2 (2次形状係数) | 6.5 | 7.5 |
| せん断剛性： K_s (MN/m) | 2.54 × 2 基=5.08 | 3.38 × 2 基=6.76 |
| 鉛直剛性： K_v (MN/m) | 692 × 2 基=1384 | 1063 × 2 基=2126 |

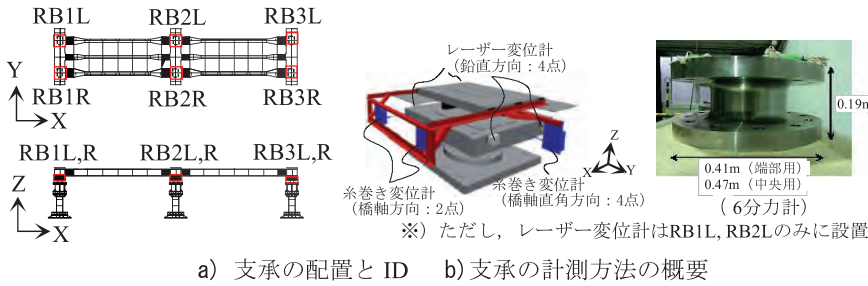


図-3 支承の計測方法

合成I桁(7主桁)の設計を行った。縮小模型($s=1/6.7$)はこの実大の高架橋をもとに振動台の寸法やその他の制約条件を考慮して設計した。この際、実験供試体では2主桁構造として簡単化を行った。曲げ剛性を相似則に基づき設計したが、載荷質量としての鋼製スラブを上部構造上面に結合する構造に変更したため、最終的な曲げ剛性は高くなっている。この上部構造を実験模型に用いることを前提に、振動台の加振能力の範囲で橋脚の損傷で高架橋全体系が終局状態に到達するように無充填円形断面鋼製橋脚とゴム支承の諸元ならびに入力地震動の振幅拡大倍率を決定した。

b) 支承の設計

想定した実大高架橋では、1橋脚上の支承数は7基であり、その平面寸法の橋軸方向長さ a 、橋軸直角方向長さ b の比を1:1とした。一方、実験供試体では2主桁としたため、1橋脚上の支承数は2基となる。そのため、支承での支持条件になるべく等価にするには上下鋼板の縦横比 ($a:b$) は $a:b=1:3.5$ とするのが望ましいが、支承製作上の制約から実験模型では $a:b=1:1.5$ とした。1橋脚上の2基の支承間隔については7基の支承と橋軸方向と橋軸直角方向のせん断剛性が等しい条件下で鉛直軸まわりでの回転剛性が等しくなるように設定した。実験模型のゴム支承の諸元の設定条件として、ゴム層の層数は3層以上、形状係数 $S1$ 、 $S2$ が $6 \leq S1 \leq 11$ 、 $4 \leq S2$ 、ゴム支承の応答せん断ひずみが175%以下となるように表-1のよう

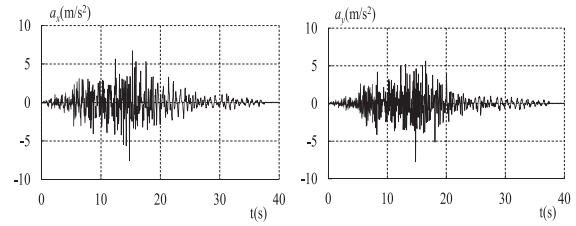


図-2 入力地震動

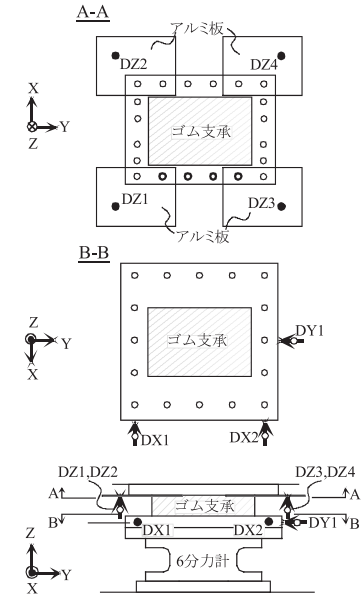


図-4 支承の変位計測点

に設定した。

c) 入力地震動

比較的多くの繰り返しが作用するという理由から過去の単柱の加振実験でも用いた図-2に示すTsugaru波(日本海中部地震津軽大橋観測波)を与えた。時間軸は相似則に従い $1/\sqrt{s}$ に縮小し($1/s$ =模型の縮尺率)、なるべく多くの繰り返しの後に鋼製橋脚が終局状態に到達しその後高架橋全体系が倒壊するようにTsugaru波(1g+tr)の振幅倍率を270%に設定した。

d) 支承挙動の計測方法

加振実験では支承部の変形成分と反力成分を計測した。計測した変形成分はせん断変形2成分、鉛直変形成分、回転変形2成分およびねじれ変形成分の計6成分である。支承配置と計測方法を図-3に、支承の変位計測点を図-4に示す。せん断変形とねじれ変形成分は全6基のゴム支承の上鋼板と下鋼板間に設置した糸巻き変位計(各支承;橋軸方向2点、橋軸直角方向1点)で計測し評価した。鉛直変形成分と回転変形2成分は2基(RB1L, RB2L)の中央橋脚のゴム支承の上下鋼板の鉛直方向相対変位を4隅

に設置したレーザー変位計で計測することで評価した。反力（力3成分+モーメント3成分）は独自に開発した高精度の6分力計を全6基の支承と橋脚横ばり間に設置した。

(2) 高架橋供試体のFEモデルと加振実験の解析

a) 橋脚・上部構造のモデル化

解析はABAQUSを用いることを前提として図-5に概要を示すモデルの構築を行った。橋脚、橋脚横ばりおよび上部構造は厚肉シェル要素S4Rを用いて実際の構造に忠実にモデル化を行った。特に橋脚については幾何学的初期不整を反映してモデルを構築した。橋脚基部の振動台への接合部はその固定度を表すために独立した2方向の回転バネによりモデル化した。このバネ定数ならびに減衰係数は事前に実施した独立柱の弾性加振実験により同定した。塑性化する橋脚躯体の離散化に用いる厚肉シェル要素の材料構成則には繰り返し塑性を考慮した三曲面モデル⁴⁾を用いた。

上部構造に設置する錘は重心位置に集中質量と回転慣性を与えてモデル化した。これらの錘と上部構造間の結合は錘の重心位置の節点と上部構造の錘設置面上のシェル要素の節点を複数の剛体はり（錘設置面側はピン結合）で拘束した。錘を拘束する上部構造の錘設置面は上部構造と錘の四辺が接触する部分のみとした。

b) 実験で得られた積層ゴム支承の挙動

①せん断挙動

中央橋脚P2左端の支承に生じる平均せん断応力-平均せん断ひずみ関係を図-6に示す。なお、平均せん断応力はゴム支承に作用するせん断力を初期断面積で除した値、平均せん断ひずみは上下鋼板の相対水平変位をゴム層の総厚で除した値として定義している。また、後述のc)の支承単体の1方向せん断載荷実験の結果および現行設計で用いられるせん断バネの値もあわせて示す。ひずみ振幅が小さい加振実験ではせん断剛性が高く生じており、振幅の大きさに依存して剛性が変化する傾向を確認できる。

②鉛直方向の挙動

中央橋脚P2上の左右のゴム支承に作用する鉛直方向平均応力の時刻歴応答を図-7に示す。図より左右の支承に作用する鉛直方向平均応力は上部構造の死荷重による平均圧縮応力を振動の中心として振幅のほぼ等しい逆位相の変動をしている。これは上部

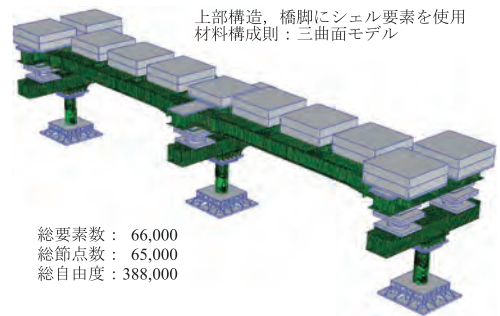


図-5 解析モデルの概要

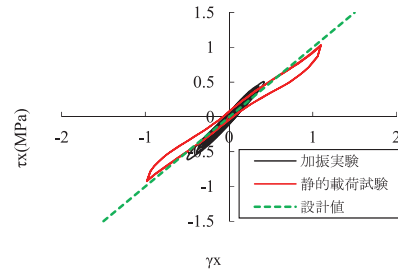


図-6 平均せん断応力-平均せん断ひずみ関係

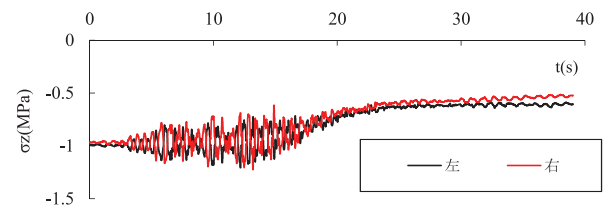


図-7 鉛直方向平均応力の時刻歴応答

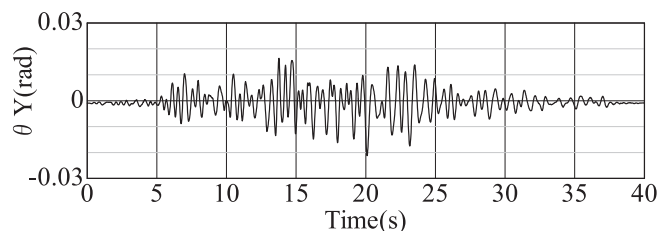


図-8 橋軸直角軸まわりの相対回転角の時刻歴応答

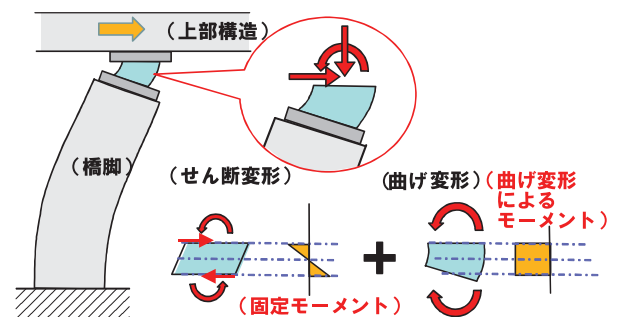


図-9 高架橋に設置されたゴム支承の挙動

表-2 支承のモデル化

| 自由度 | 剛性 | 減衰 | パラメータ同定 |
|----------|-------|-----------|----------|
| 橋軸方向 | 線形弾性 | 線形ダッシュポット | 加震実験 |
| 橋軸直角方向 | 線形弾性 | 線形ダッシュポット | 加震実験 |
| 鉛直方向 | 線形弾性 | 無視 | 支承載荷実験 |
| 橋軸まわり | 線形弾性 | 無視 | 支承 FE 解析 |
| 橋軸直角軸まわり | 非線形弾性 | 線形ダッシュポット | 加震実験 |
| 鉛直軸まわり | 線形弾性 | 無視 | 支承 FE 解析 |

表-3 ゴム支承のモデル化における各種定数

| 支承 | ばね定数 | | | | | | 減衰係数 ^{*2)} | | | | | |
|------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------|
| | 並進 (MN/m) | | | 回転 (MN・m) | | | 並進 | | | | 回転 | |
| | 橋軸 方向 K_x | 橋直 方向 K_y | 鉛直 方向 K_z | 橋軸 回り K_{rx} | 橋直 回り $K_{ry}^{*1)}$ | ねじ り K_{rz} | 橋軸方向 | | 橋直方向 | | 橋直回り C_{ry} | 橋直 回り β_{ry} |
| | | | | | | | C_x | β_x | C_y | β_y | | |
| | | | | | | (MN/m・s) | (s) | (MN/m・s) | (s) | | | |
| RB1L | 3.01 | 3.37 | 504 | 5.58 | 3.69 | 0.042 | 3.55×10^{-2} | 1.18×10^{-2} | 4.95×10^{-2} | 1.47×10^{-2} | 1.82×10^{-2} | 4.93×10^{-3} |
| RB1R | 2.92 | 3.37 | 504 | 5.58 | 3.69 | 0.042 | 4.12×10^{-2} | 1.41×10^{-2} | 4.95×10^{-2} | 1.47×10^{-2} | 1.82×10^{-2} | 4.93×10^{-3} |
| RB2L | 4.48 | 4.96 | 894 | 12.04 | 5.25 | 0.074 | 5.09×10^{-2} | 1.14×10^{-2} | 4.94×10^{-2} | 1.00×10^{-2} | 3.96×10^{-2} | 7.54×10^{-3} |
| RB2R | 4.23 | 5.03 | 894 | 12.04 | 5.25 | 0.074 | 5.28×10^{-2} | 1.25×10^{-2} | 6.13×10^{-2} | 1.22×10^{-2} | 3.96×10^{-2} | 7.54×10^{-3} |
| RB3L | 2.90 | 3.52 | 504 | 5.58 | 3.69 | 0.042 | 3.36×10^{-2} | 1.16×10^{-2} | 5.31×10^{-2} | 1.51×10^{-2} | 1.82×10^{-2} | 4.93×10^{-3} |
| RB3R | 2.86 | 2.84 | 504 | 5.58 | 3.69 | 0.042 | 3.29×10^{-2} | 1.15×10^{-2} | 6.17×10^{-2} | 2.17×10^{-2} | 1.82×10^{-2} | 4.93×10^{-3} |

*1) トリリニアモデルの初期剛性 (図-10参照) *2) 記載以外の成分の減衰は0

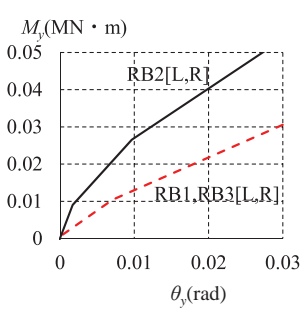


図-10 ゴム支承の橋軸直角軸回りの回転ばねのモーメント-相対回転角関係

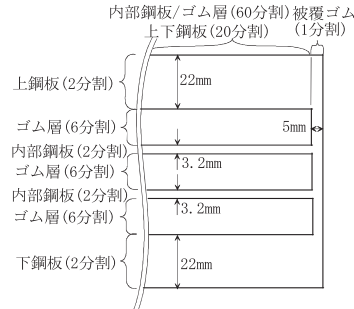


図-11 ゴム支承単体のソリッド要素によるFE解析

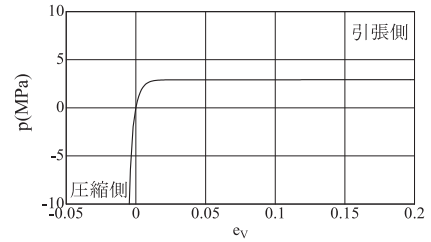
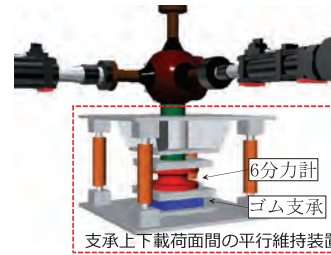


図-12 超弾性材料の静水圧応力・体積ひずみ関係

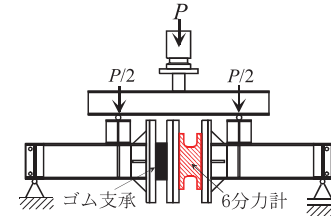
構造に作用する橋軸直角方向の水平地震力により生じる橋軸回りの転倒モーメントに左右の支承が鉛直方向偶力で抵抗することによる。なお、P2橋脚の座屈が進行するとこの橋脚が負担する死荷重が減少するため平均圧縮応力は減少する。

③相対回転に関する挙動

中央橋脚上のゴム支承に生じる橋軸直角軸まわりの相対回転角の時刻歴応答を図-8に示す。なお、橋軸まわりの回転に関しては、上部構造に作用する橋軸直角方向の転倒モーメントに2基の支承が偶力で抵抗するため個々の支承に作用するモーメントは小さく、相対回転もほとんど生じない。橋軸直角軸まわりの相対回転挙動に関しては、最大で約0.02radの大きな相対回転角が生じている。現行の設計では地震時の相対回転角が作用することは考慮されていない。なおこの地震時の相対回転量は常時の回転角照査での許容値(中間支点: 1/300rad)と比べて約6倍に相当する。このような大きな回転角が支承に生じるのは、図-9に示すように、上部構造の橋軸方向への移動に対して橋脚が曲げ変形し、橋脚天端の橋軸直角周りのたわみ角が発生することによる。支承の相対回転角は別途計測した橋脚頂部面でのたわみ角とよく一致することを確認した。



(a) 支承の圧縮・引張, 2方向せん試験装置



(b) 曲げ载荷試験

図-13 ゴム支承単体の载荷試験との比較

c) 積層ゴム支承のモデル化

ゴム支承の6自由度の挙動を表現するために表-2に示す各成分の連成を無視した非線形弾性バネとダッシュポットでモデル化した。これらのバネ定数、減衰係数のうち、応答値の大きい橋軸方向(X方向)、橋軸直角方向(Y方向)、橋軸直角軸まわり(Y軸まわり)については②に示すように加振実験での計測から同定したが、その他の応答の小さい成分については①に示すゴム支承単体をソリッド要素によりモデル化した有限変位・有限ひずみのFE解析で求めた荷重-変位関係を近似するようにバネ定数を評価した。また、これらのバネについては減衰を無視し

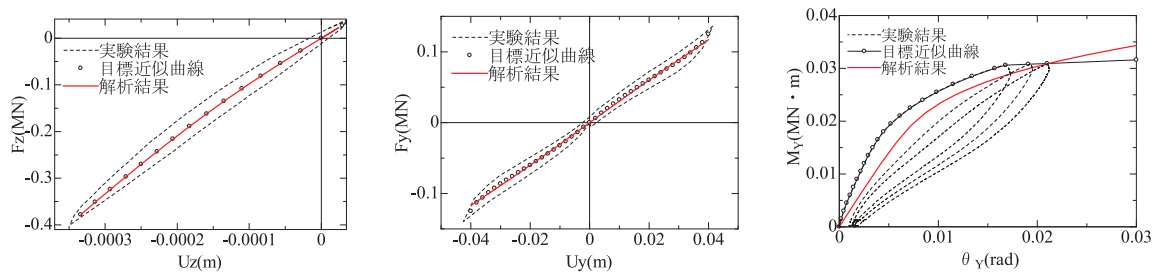


図-14 ゴム支承単体のFE解析と事前载荷試験との比較

表-4 ゴムの材料定数

| | | | | |
|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|
| C_{11} (MPa) | C_{21} (MPa) | C_{31} (MPa) | C_{41} (MPa) | C_{51} |
| 2.548×10^{-1} | 2.362×10^{-3} | 6.975×10^{-3} | 1.084×10^{-1} | -6.042×10^{-1} |
| C_{12} (MPa) | C_{22} (MPa) | C_{32} (MPa) | C_{42} (MPa) | C_{52} |
| 5.596×10^{-2} | 3.528×10^{-3} | 8.361×10^{-4} | 2.537×10^{-3} | 3.282×10^{-2} |
| D_1 (MPa $^{-1}$) | D_2 (MPa $^{-1}$) | E_1 (MPa) | E_2 | E_3 (MPa) |
| 2.610×10^{-3} | 7.656×10^{-8} | 2.913 | -2.630×10^2 | 1.645×10^{-1} |

た。表-3、図-10に解析に用いたバネ定数および減衰係数を示す。

① 支承単体のFEモデルの構築とゴム材の材料パラメータの同定

図-11に示すようにゴム層と内部鋼板のみならず、上および下鋼板と被覆ゴムを考慮したFEモデルをABAQUSを用いて構築した。ゴム層および被覆ゴムは8節点ハイブリッドソリッド要素 (C3D8H)、上下鋼板および内部鋼板は8節点ソリッド要素 (C3D8) で離散化した。上下鋼板と内部鋼板には線形弾性構成則を用いた。ゴム材料には圧縮性を考慮した以下に示す歪エネルギー関数に基づく超弾性体構成則^{6), 7)}を用いた。ここでは、静水圧応力が引張り状態になった際のゴム内部のポイド発生による剛性低下 (図-12) を考慮するため、静水圧応力の正負で異なる以下に示す関数を設定した⁵⁾。ゴム支承は大きなせん断変形が生じることから幾何学的非線形性を考慮した。

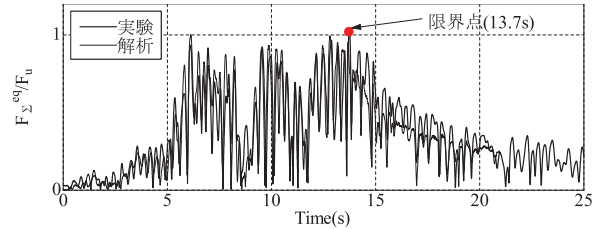
$$W = W_I(\bar{I}_1, \bar{I}_2) + W_J(J) \quad (1)$$

$$\begin{aligned}
 W_I(\bar{I}_1, \bar{I}_2) = & C_{11}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{C_{21}}{2}(\bar{I}_1 - 3)^2 \\
 & + \frac{C_{31}}{3}(\bar{I}_1 - 3)^3 + \frac{C_{41}}{C_{51}} \exp(C_{51}(\bar{I}_1 - 3)) \\
 & + C_{12}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{C_{22}}{2}(\bar{I}_2 - 3)^2 \\
 & + \frac{C_{32}}{3}(\bar{I}_2 - 3)^3 + \frac{C_{42}}{C_{52}} \exp(C_{52}(\bar{I}_2 - 3))
 \end{aligned} \quad (2)$$

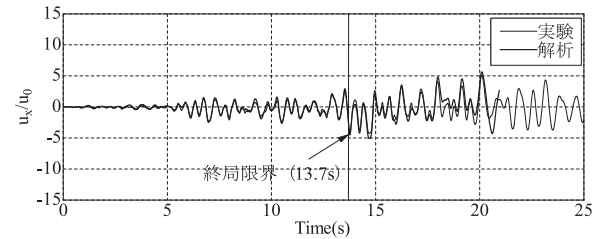
圧縮時: $(J - 1) > 0$

$$W_J(J) = \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 + \frac{1}{D_2}(J - 1)^4 \quad (3)$$

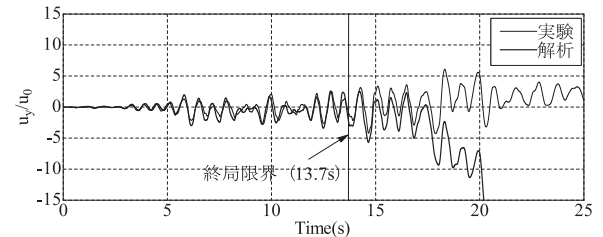
引張り時: $(J - 1) < 0$



a) 等価水平復元力の合力



b) 橋軸方向変位



c) 橋軸直角方向変位

図-15 橋脚の応答 (P2)

$$W_J(J) = E_1[(J - 1) - \frac{1}{E_2} \exp\{E_2(J - 1)\}] + \frac{E_3}{2}(J - 1)^2 \quad (4)$$

歪エネルギー関数の材料定数は高架橋加振実験で使用したゴム支承を対象に事前に実施した圧縮試験、1方向せん断試験、曲げ試験により得られた荷重-変位関係およびモーメント-相対回転角関係との誤差が最小となるように同定した。支承の実験装置を図-13、同定された材料定数を表-4、荷重-変位関係およびモーメント-相対回転角関係を実験と比較して図-14に示す。支承のバネ定数はFE解析での各成分の荷重-変位関係を近似するように決定する。

② 加振実験での支承挙動に基づくモデルの同定

加振実験から支承モデルの定数を同定する場合には、支承ごとに計測したゴム支承の相対変位、回転角の時刻歴応答値から速度を算定し、解析 (バネ+

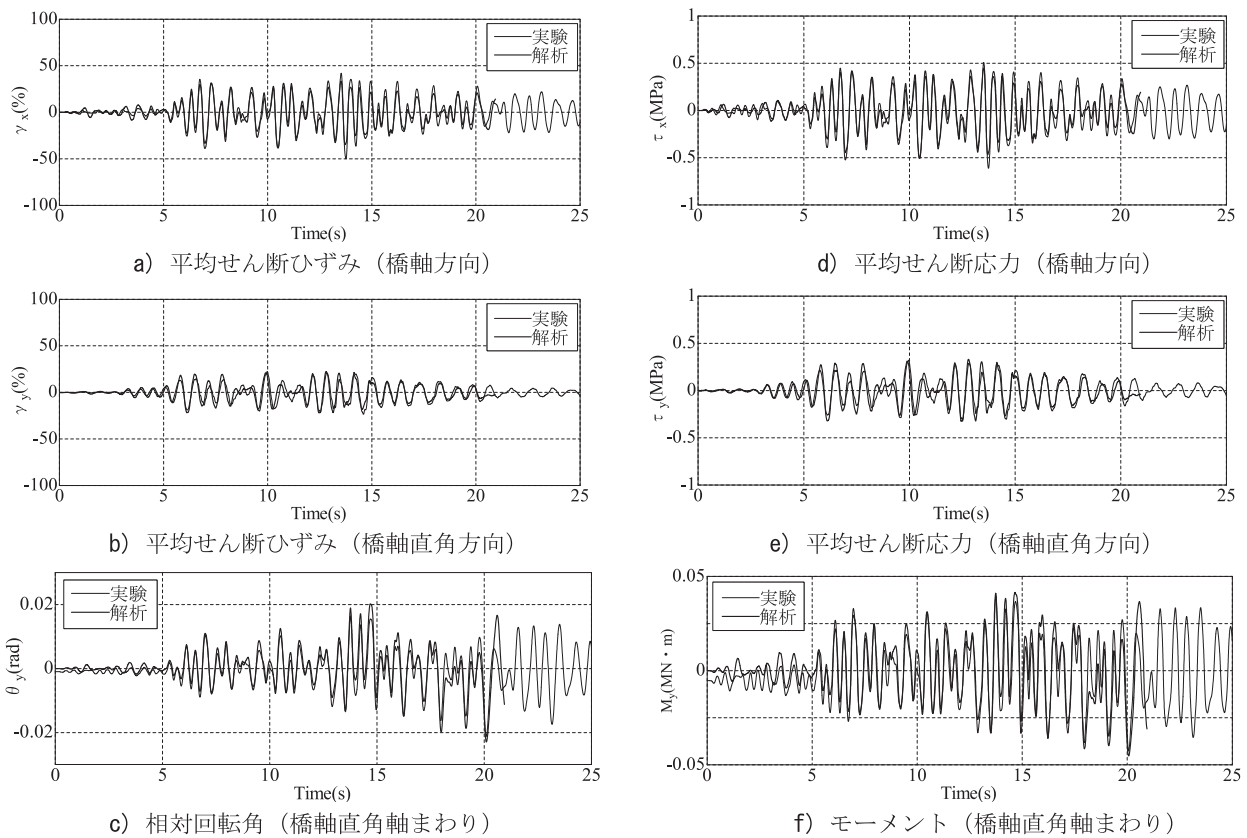


図-16 支承の応答値 (中央橋脚上支承)

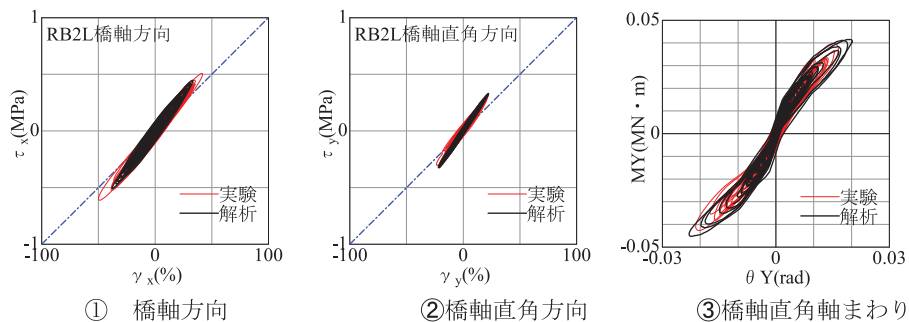


図-17 支承の履歴曲線 (中央橋脚上支承)

ダッシュポットによる力) と実験 (分力計により計測した支承の作用力) との誤差が最小となる各支承のバネ定数とダッシュポットの減衰係数の最適値を求めた。

d) 支承以外の高架橋模型の粘性減衰

各橋脚について独立柱としての加振実験で求めた減衰定数と振動数から剛性比例減衰 $C = \beta K$ の係数 $\beta = 2.55 \times 10^{-4} \text{s}$ を計算し、これを、全体モデルにおける基部の回転バネ要素と鋼脚部分のシェル要素 (横ばりを除く) に考慮した。橋脚以外の鋼部材 (橋脚横ばり、上部構造) は粘性減衰を同定するような実験を行っていないこと、また、これらの粘性減衰の影響は小さいと考えられることから、粘性減衰を無視した。

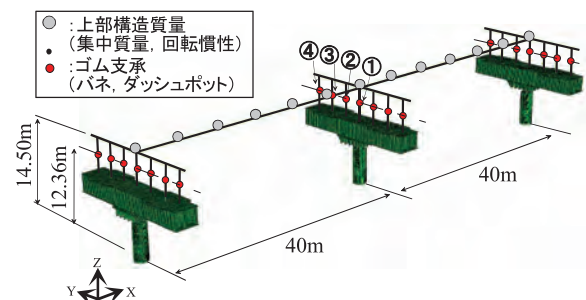


図-18 実構造モデル

e) 地震動の入力方法

地震入力は各振動台で同一とすることを目標としたが、実際には各振動台で入力加速度の差異が若干生じた。ここではこれを考慮するために計測した水平変位 (2成分) を各橋脚の基部にそれぞれ独立に与えた。

表-5 ゴム支承の諸元 (実構造モデル)

| 諸元 | 端橋脚上 | 中央橋脚上 |
|--------------------------|--------------|---------------|
| ゴム材料の種類 | NR (G10) | |
| ゴム体平面寸法 $a \times b$ (m) | 0.567×0.567 | 0.556×0.556 |
| 高さ $n \times t_e$ (m) | 3×0.027 | 3×0.015 |
| S1 (1次形状係数) | 5.2 | 9.2 |
| S2 (2次形状係数) | 7.0 | 10.9 |
| 設計せん断剛性: K_s (MN/m) | 3.93×7基=27.5 | 6.07×7基=42.5 |
| 設計鉛直剛性: K_v (MN/m) | 727×7基=5087 | 1953×7基=13673 |

表-6 ゴム支承のモデル化における各定数

| モデル | | 自由度 | 端部橋脚上 | 中央橋脚上 |
|-------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| バネ | 並進 (MN/m) | 橋軸方向 | 3.26 | 6.23 |
| | | 橋軸直角方向 | | |
| | 回転 (MN・m) | 鉛直方向 | 5.87×10 ² | 2.31×10 ³ |
| | | 橋軸まわり | 7.05 | 2.64×10 ¹ |
| 橋軸直角軸まわり | | | | |
| ねじれ | 1.96×10 ⁻¹ | 3.26×10 ⁻¹ | | |
| ダッシュ ポット | 並進 (MN/m・s) | 橋軸方向 | 3.48×10 ⁻² | 6.61×10 ⁻² |
| | | 橋軸直角方向 | | |
| | 回転 (MN・m・s) | 橋軸直角軸まわり | 5.30×10 ⁻² | 2.02×10 ⁻¹ |

※) トリリニアの初期剛性

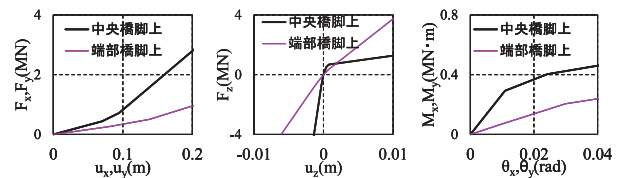


図-19 ゴム支承のトリリニアモデル

の支承数と支承剛性、の2点において想定する実際の連続高架橋との間に主たる差異が生じた。

ここでは、上記の点を2.で構築した高架橋模型のFEモデルで実際の構造に対応するように修正した図-18に示すモデル(以降、実構造モデルと呼ぶ)を設定する。そして実構造モデルを用いた解析により、連続高架橋における積層ゴム支承の水平2方向地震動下の挙動特性を検討する。

実構造モデルの上部構造はI形断面を有する7主桁の構造とし、主荷重に対して設計を行った。FEモデルではこの上部構造の諸元を用いて1本の弾性はりに置換した。具体的には7本の主桁とコンクリート床版からなる上部構造を1本の弾性はりに置換し、断面変化点ごとに断面定数を相似則に従い設定した。なお、本研究で対象とする支承の最大応答が生じる範囲で上部構造を1本の弾性はりでモデル化することの妥当性は2.での加振実験結果をもとに別途検証した。

支承については、加振実験での模型は簡素化のために1支承線上の支承数を2基としたが、実構造モデルでは主桁数と等しい7基とする。支承の緒元は簡易的に、実験供試体を相似則に従い実大サイズにした橋脚のPushover解析におけるピーク荷重(水平耐力)に対して支承のせん断ひずみ250%の許容値におさまるように設計を行う。橋脚の水平耐力は載荷高さが低い橋軸方向載荷の方が大きくなるのでこの水平耐力を用いて支承を設計した。常時荷重に対する照査では支承の相対回転角を端部橋脚で1/150rad、中央橋脚で1/300radとし、支承反力として想定した実大の上部構造の反力ゴム支承縁端で引張ひずみが発生しないようにした。設計したゴム支承の諸元を表-5に示す。

高架橋全体系のFEモデルにおけるゴム支承は6自由度の成分に対してバネとダッシュポットでモデル化し、各成分の連成は無視した。表-6の支承の各バネの成分の挙動はソリッド要素を用いたFE解析で同定した。すなわち、2.で実施した支承単体の載荷実験で同定した材料定数を用いた超弾性構成則を導

(3) 加振実験との比較によるFE解析の精度検証

a) 橋脚の応答

中央橋脚(P2)頂部の等価水平復元力の合力³⁾の時刻歴応答を図-15 a)に、水平変位成分の時刻歴応答を図-15 b)、c)に示す。これより、橋脚の等価水平復元力合力が最大値に到達する13.7s付近までは橋脚頂部の等価水平復元力合力や水平変位成分については解析と実験とはよく一致しており、少なくとも本FEモデルは、支承への最大地震力作用時までの応答を精度よく評価できると考えられる。

b) ゴム支承の応答

中央橋脚(P2)上のゴム支承の変形成分および作用力成分の時刻歴応答を図-16に、履歴曲線を図-17に示す。図-16より解析で倒壊挙動が顕著になる17s付近までのゴム支承の応答に関して解析と実験はよく一致している。支承の各成分はこの範囲で最大応答を示すのでFEモデルで支承の挙動は十分検討できる。

3. 実構造を想定した高架橋のFEモデルによる水平2方向地震動下の支承の挙動特性

(1) 実構造を想定した連続高架橋モデル

模型供試体では製作および実験条件の制約により、①上部構造の剛性と重心位置、②1支承線上で

入したソリッド要素による支承単体の単調載荷解析により荷重-変位関係を求め、これをトリリニア型の非線形弾性モデルで近似した。なお、ねじりを表すバネ成分に関してはモーメント-相対回転角関係の非線形性が小さいため、線形弾性バネとした。減衰については2.の実験モデルと同様に2方向のせん断と橋軸直角周りの回転挙動について線形ダッシュポットを考慮した。減衰係数の値は剛性比例型 ($C = \beta K$) を仮定した。 β は2.の振動台実験でのRB2L支承での値とし、並進については橋軸方向と橋軸直角方向の平均値 $1.07 \times 10^{-2} s$ 、橋軸直角まわりの回転については $7.52 \times 10^{-3} s$ を用い、 K は上記のトリリニアバネの初期剛性とした。ゴム支承モデルにおける各定数と静的応答特性を表-6、図-19に示す。

(2) 解析結果

a) 2方向加振に対する応答

橋脚の終局限界への到達を把握するために、等価水平復元力の合力の時刻歴応答を図-20に示す。これより、中央橋脚は7.4s付近で終局限界に到達し、10s以降に耐力低下が生じていることを確認できる。

中央橋脚の支承線上の中央から左側の縁端 (+Y側) までの4つのゴム支承 (①~④) (図-18参照) の各応答値を図-21示す。

これより、(1)の実構造モデルの支承の設計で述べたように、平均せん断ひずみは橋軸直角方向 ($\gamma_y = 190\%$) と比べ橋軸方向成分 ($\gamma_x = 220\%$) が大きく、限界値 (=250%) 近くまで生じている (図-21 a), b)。また一支承線上の①~④の各支承の応答はほぼ一致していることがわかる。

橋軸直角軸まわりの相対回転角 (図-21 c)) についても各支承の挙動はほぼ一致しており、橋脚が終局限界に到達する7.4s付近で0.02radの大きさの回転角が生じている。これは支承の設計で考慮する回転角 (=1/300rad) の6倍に相当する。なお、同図に破線で示した橋脚頂部の回転角が支承の相対回転角 (=支承上面の回転角 - 支承下面の回転角) と等しい大きさの振幅で逆位層の応答を示していることから、支承の相対回転角は上部構造が支承上面をほぼ水平に拘束し、橋脚のたわみに伴う頂部の回転角 (=支承下面の回転角) により生ずるものであることがわかる。この相対回転角に対応するモーメントの応答値をもとに支承便覧での算定法と同様に平面保持を仮定して算定した支承縁端部の曲げ引張応力 (図-

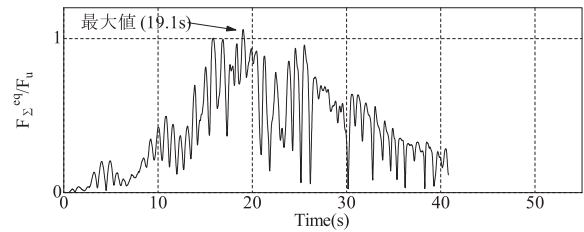
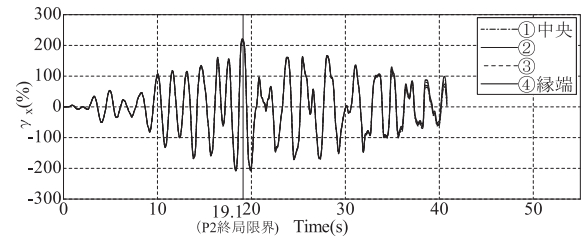
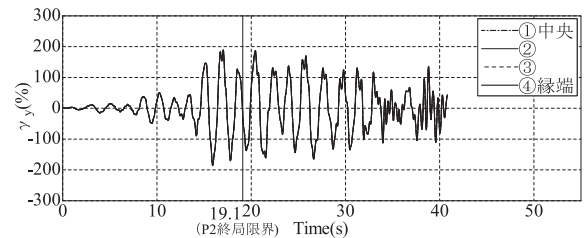


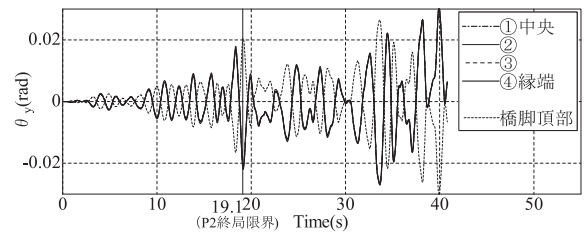
図-20 等価水平復元力の合力 (P2橋脚)



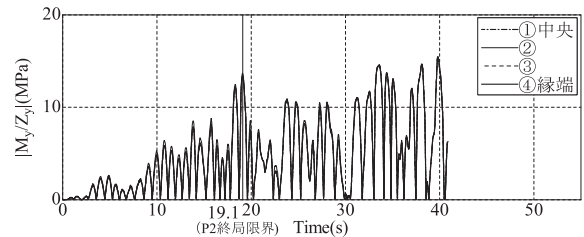
a) 平均せん断ひずみ (橋軸方向)



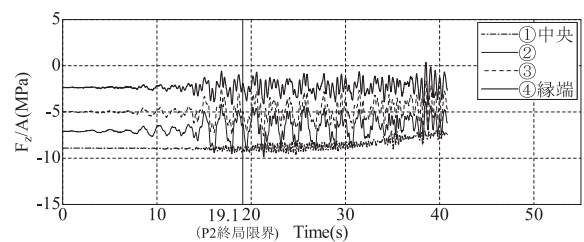
b) 平均せん断ひずみ (橋軸直角方向)



c) 相対回転角 (橋軸直角軸まわり)



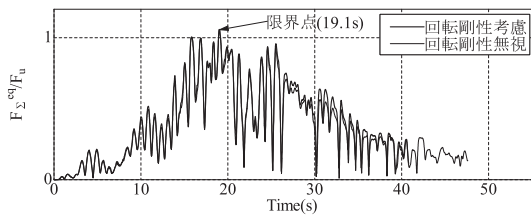
d) 曲げ応力



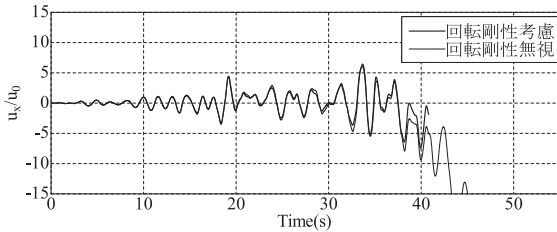
e) 平均圧縮応力

図-21 支承の応答値 (中央橋脚上支承)

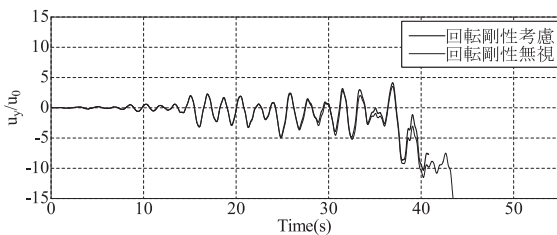
21 d)) は橋脚が終局限界に到達する7.4s付近で13MPa生じている。この値は、例えば支承便覧で規



a) 等価水平復元力の合力



b) 橋軸方向変位



c) 橋軸直角方向変位

図-22 橋脚の応答値 (中央橋脚)

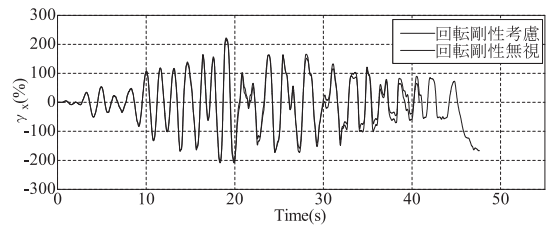
定される地震時の許容引張応力である2MPa (ただし平均引張応力) を大幅に超えている。近似計算ではあるが、橋脚が終局限界に到達する前にこのような大きな引張応力が発生していることは注目すべきである。

鉛直反力による支承の平均圧縮応力 (図-21 e)) については、支承を支持する橋脚横ばりの各支承支持位置での鉛直剛性の差異により死荷重載荷時において各支承間で差異が生じている。すなわち、①中央に比べ、④縁端の支承ほど圧縮応力は小さい。これより、曲げ引張応力の影響は縁端の支承ほど小さくなると考えられる。

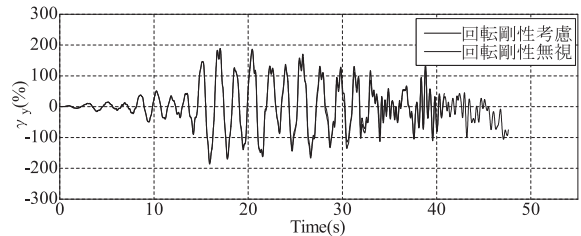
b) 支承の回転剛性の影響

現行の耐震設計ではゴム支承の回転剛性を無視し、せん断剛性と鉛直剛性のみを考慮したモデル化を行っている。このような支承部の回転剛性を無視することの妥当性を検証するために実構造モデルに対して支承部の回転剛性2成分とねじり剛性1成分を無視したモデルの解析を行いその挙動について考察する。

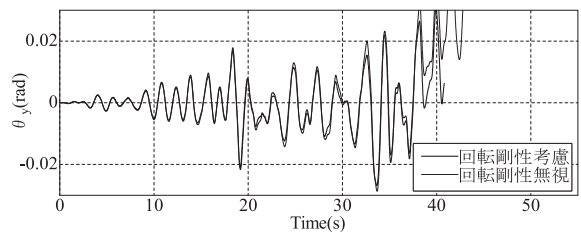
中央橋脚 (P2) の等価水平復元力の合力および頂部水平変位成分の時刻歴応答を図-22に示す。これより等価水平復元力の合力が最大値に到達し、橋脚



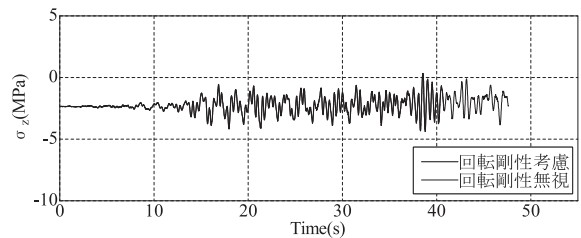
a) 平均せん断ひずみ (橋軸方向)



b) 平均せん断ひずみ (橋軸直角方向)



c) 相対回転角 (橋軸直角軸まわり)



d) 平均圧縮応力

図-23 支承の応答値 (中央橋脚上支承)

が終局限界へ到達したと考えられる7.4s付近まで支承部の回転剛性の有無による明確な影響はみられない。以上より、本検討の範囲では橋脚の限界状態の照査のための耐震解析では支承の回転剛性は無視できるといえる。しかし、橋脚が終局状態を越えて軟化領域に入ると徐々に回転剛性の影響が現れ、回転剛性を無視した高架橋モデルの倒壊が先行する。

中央橋脚縁端 (+Y側) のゴム支承の応答変形および作用力の時刻歴応答を図-23に示す。これらの支承部の応答値についても橋脚の終局限界到達時 (7.4s) までは支承の回転剛性を無視する影響はほとんどない。無視することの影響は終局限界以降の倒壊に向かう領域において橋軸方向の平均せん断ひずみと橋軸直角軸まわりの相対回転角において若干見られる程度である。

以上の結果より、橋脚が終局状態に到達するまで

はゴム支承の回転剛性の考慮の有無が支承以外の高架橋の構成要素の耐震性能照査に与える影響は小さいと考えられる。しかしながら、高架橋に設置された実際の支承には軸方向変形、2方向のせん断変形に加えて、a) で述べたように橋軸直角軸まわりに大きな相対回転角が生じており、支承内部の応力やひずみ分布は上下鋼板の平行が維持されていると仮定して1方向繰り返しで評価する現行の耐震照査の想定とは大きく異なっている。したがって、応力やひずみを指標とした現行の支承の耐震安全性照査法の妥当性についてはさらに検討が必要である。

4. まとめ

鋼製橋脚で支持された連続高架橋に設置された実際の積層ゴム支承の挙動特性を検討した。すなわち、加振実験で妥当性を検証した精緻なFEモデルを適用した実大の連続高架橋モデルの時刻歴応答解析を実施し、ゴム支承の変形特性と作用力について検討を行った。得られた結論を以下に示す。

- ・橋脚が終局限界に到達する前においてもゴム支承には橋軸直角軸まわりに0.02rad（常時の設計で考慮する値の6倍）の大きな相対回転角が生ずる。
- ・橋脚の終局限界到達前までであれば支承の回転剛性の有無が橋脚の応答や支承の変形に与える影響は小さい。
- ・支承には橋軸直角軸まわりに大きな相対回転角が生じるので、支承内部の応力やひずみ分布は上下鋼板を平行に維持した境界条件下での1方向繰り返し載荷で評価する現行の耐震照査での想定とはかなり異なることが考えられる。したがって、応力やひずみを指標とした現行の支承の耐震安全性照査法の妥当性についてはさらに検討が必要である。

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、加振実験の実施に当たっては中国同済大学のJianzhong Li教授、Yan Xu准教授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) 後藤芳顯、海老澤健正、奥村 徹、松澤 陽、小畑 誠、Jianzhong Li、Yan Xu：水平2方向加振を受ける連続高架橋模型における橋脚、ゴム支承、上部構造の連成とその終局挙動について、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.431-438、2014.
- 2) 奥村 徹、後藤芳顯、海老澤健正、小畑 誠、Jianzhong Li、Yan Xu、鋼製橋脚で支持された連続高架橋における積層ゴム支承の水平2方向地震動下の挙動特性、第18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.49-56、2015.
- 3) 海老澤健正、後藤芳顯、小畑誠、Jianzhong Li、Yan Xu：円形断面鋼製橋脚を持つ連続高架橋模型の2方向加振実験のFE解析と終局挙動特性、第18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.57-64、2015.
- 4) 後藤芳顯、江坤生、小畑誠：2方向繰り返し荷重を受ける薄肉円形断面鋼製橋脚柱の履歴特性、土木学会論文集、No.780/I-70、pp.181-198、2005。
- 5) Dassault Systemes Simulia Corp.：ABAQUS/Standard user's manual, 2014.
- 6) W.Seki、Y.Fukahori：A Large-Deformation Finite-Element Analysis for Multilayer Eastomeric Bearings、Rubber Chemistry and Technology, Vol. 60, No. 5, pp. 856-869, 1987.
- 7) 松田泰治、大塚久哲、北村幸司：FEMによるゴム材料の圧縮性を考慮した積層ゴム支承の局部せん断ひずみ評価に関する研究、構造工学論文集 Vol.50 A、pp.575-584、2004.

第2回 国際シンポジウム「世界の海峡連絡と橋梁のメンテナンス」開催報告

企画部

一昨年度の橋梁調査会設立35周年記念講演会「世界の橋梁建設とメンテナンス」のご好評を受け、第2回となる国際シンポジウムを平成26年11月27日（木）、イイノホール（東京都千代田区）にて、開催しました。（共催：（公社）日本道路協会）

本講演会は、海外の建設プロジェクトと橋梁のメンテナンスに関する技術情報はもちろんのこと、各国の多様な社会条件下でのプロジェクトの計画、遂行にあたっての要所やメンテナンス事情を第一線で活躍されている担当者から直接聞くことができる国内でも希少な講演会となっています。

今回は、「世界の海峡連絡と橋梁のメンテナンス」と題し、下表の講演プログラムに従い、それぞれ最新的话题を紹介していただきました。

以下に各講演の概要を示します。



講演会会場風景

講演1. 本州四国連絡橋のメンテナンス

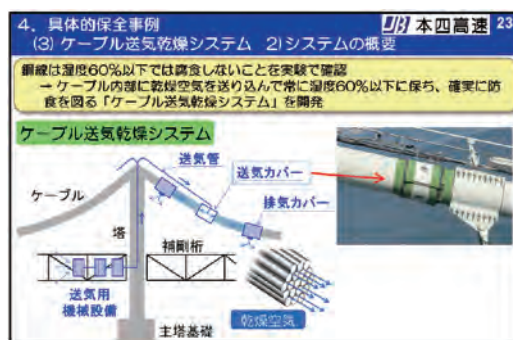
【講演者】（敬称略、以下同。）

本州四国連絡高速道路株式会社

取締役 常務執行役員 金崎 智樹

【主な講演内容】

- ・ 本州四国連絡高速道路の概要
- ・ 本州四国連絡橋のメンテナンスの基本
- ・ 本州四国連絡橋の点検
- ・ 具体的保全事例



- ・ 200年以上の利用を目指して

講演2. スカンジナビアンリンクの建設と橋梁のメンテナンス

【講演者】

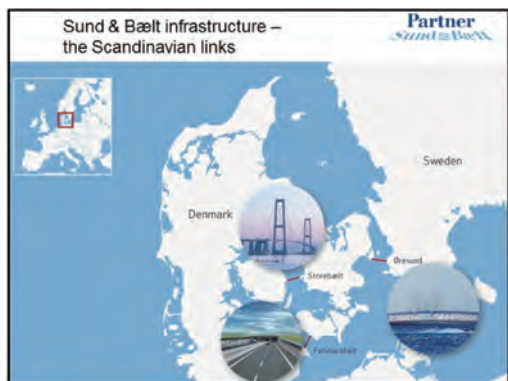
デンマーク海峡連絡公団 技術担当理事

Leif J.Vincentzen

| 「世界の海峡連絡と橋梁のメンテナンス」 プログラム | | |
|---------------------------|---------------------------|--|
| 13:30~13:35 | (一財) 橋梁調査会 理事長挨拶 | 伊藤 學 |
| 13:35~13:40 | (公社) 日本道路協会 理事 国際委員会委員長挨拶 | 菊川 滋 |
| 13:40~14:20 | 本州四国連絡橋のメンテナンス | 本州四国連絡高速道路（株） 取締役 常務執行役員 金崎 智樹 |
| 14:20~15:20 | スカンジナビアンリンクの建設と橋梁のメンテナンス | デンマーク架橋公団 技術担当理事 Leif J.Vincentzen |
| 15:40~16:10 | ボスポラス海峡沈埋トンネルの施工 | 大成建設（株） 土木本部土木技術部 部長 今石 尚 |
| 16:10~16:40 | イズミット橋建設及びボスポラス橋補修工事 | (株) IHIインフラシステム理事、 イズミット橋副プロジェクトマネージャー 柳原 正浩 |
| 16:40~17:25 | ドイツにおける橋梁のメンテナンス | ノルトライン・ヴェストファーレン州 道路建設局 橋梁課長 Gero Marzahn |
| 17:25~17:30 | 閉会挨拶 | (一財) 橋梁調査会専務理事 西川 和廣 |

【主な講演内容】

- ・デンマーク海峡連絡公団（Sund & Bælt Holding A/S）とスカンジナビアンリンクの概要



- ・スカンジナビアンリンクによる経済効果
- ・グレートベルトリンクとオーレソンリンクの維持管理

- ・計画・設計概要
- ・建設状況



講演3. ボスポラス海峡沈埋トンネルの施工

【講演者】

大成建設株式会社 土木技術部 部長 今石 尚

【主な講演内容】

- ・トルコ共和国事情
- ・日本・トルコの政府間協定
- ・ボスポラス海峡横断鉄道プロジェクトの概要
- ・世界初となる函体接合技術



- ・歴史遺産との調和（埋設文化財の発掘）

講演4. トルコの建設プロジェクト（イズミット橋建設など）

【講演者】

株式会社IHIインフラシステム 理事
イズミット橋副プロジェクトマネージャー
柳原 正浩

【主な講演内容】

- ・トルコ共和国の交通事情と道路計画概要
- ・イズミット橋プロジェクト概要

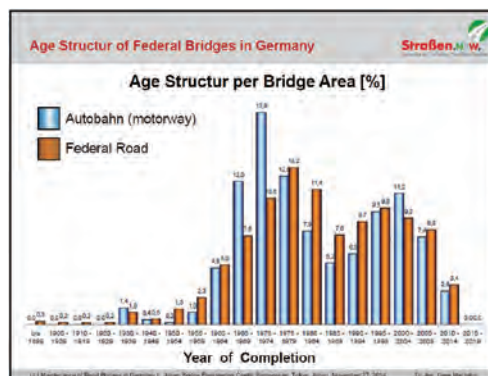
講演5. ドイツにおける橋梁のメンテナンス

【講演者】

ノルトライン・ヴェストファーレン州道路建設局
橋梁課長 Gero Marzahn

【主な講演内容】

- ・ドイツの道路管理体制 Straßen.NRWについて
- ・ドイツの橋梁概要



- ・橋梁の維持管理制度・体制
- ・交通需要の変化に応じた橋梁の改修

以上概要を示しましたが、本講演会は産官学それぞれの立場で興味を持って聴講していただける内容となっており、当日は、満席に近い盛況となりました。また、ご来場いただいた皆様からは、大変なご好評を賜りました。（当日アンケート結果より。非常に良い40%、良い54%）

最後になりましたが、貴重なご講演をいただきました講師の皆様、またご後援いただきました、国土交通省・(公社)土木学会・(一社)日本橋梁建設協会・(一社)プレストレスト・コンクリート建設業協会・(一社)建設コンサルタンツ協会・(一社)日本トンネル技術協会)の関係者皆様には、多大なご協力をたまわりましたことに深く感謝の意を表します。

文責：開発課長 藤原 英之

世界道路協会(PIARC)道路橋委員会の活動

常務理事 加嶋 聰

1. はじめに

PIARC道路橋委員会(TC4.3)は世界道路協会の17の常設の技術委員会の一つで橋梁の維持管理の問題を扱っている。

2012~2015年の道路橋委員会では①気候変動への適応、②新しい補修方法、修復方法、③道路橋のリスクベースマネジメント、④損傷や欠陥に基づく既設道路橋の耐荷力の推定の調査課題に取り組んでいる。

これらの調査課題に対応するために、3つのワーキンググループを設けて課題に対するテクニカルレポートを作成し、その成果を2015年11月世界道路会議ソウル大会のテクニカルセッションで発表することになっている。

2. TC4.3の活動

技術委員会は4年間のタームで、年2回の技術委員会を通じた調査・研究活動、2回のセミナー、報告書の発行という活動方針のもと、以下の体制で活動を行った。

- ・委員長：加嶋 聰 ((一財)橋梁調査会)
 - ・Sekretarier(英語)：Dimitrios Konstantinidis (ギリシャ)
 - ・Sekretarier(仏語)：Louis Marie Belanger (カナダ ケベック)
 - ・Sekretarier(スペイン語)：Pablo Diaz Simal (スペイン)
- 委員会への参加は46カ国から83名である。

日本からは委員長の他に(株)本州四国連絡高速道路の今井委員、国土技術政策総合研究所の玉越連絡委員、(一社)日本橋梁建設協会の佐藤準委員として活動を行った。また、日本道路協会内に国内委員会(委員長：玉越室長)を設け、アンケートへの対応を行った。

2012年3月のパリでのキックオフミーティングでは前ターム(2007~2011)の成果報告後、引き続き今期の調査課題の調査方針、成果内容について委員長が説明し、参加委員が議論を行い活動の方向性に



写真-1 キックオフミーティング(2012.3.パリ)

ついて理解を深めた。写真-1はキックオフミーティングに参加したメンバーである。

それらを踏まえ、活動計画を策定するとともに、4つの課題に対して3つのグループに分かれて活動することを決めてグループ分けを行った。

その後、各グループ別に今後の活動内容について議論を深めた。

3つのグループは以下の調査課題を担当した。

グループ1

検討体制：リーダー：Borre Stensvold(ノルウェー)
サブリーダー：Laurent LLOP(フランス)
委員：15名

調査課題1：気候変動への適応
調査課題3：道路橋のリスクベースマネジメント

グループ2

検討体制：リーダー：Pierre Gilles(ベルギー)
サブリーダー：Michele Mele(イタリア)
委員：13名

調査課題2：新しい補修方法、修復方法

グループ3

検討体制：リーダー：今井清裕(日本)
サブリーダー：Scot Becker(アメリカ)
委員：14名

調査課題4：損傷や欠陥に基づく既設道路橋の耐荷力の推定

表-1 技術委員会

| | 開催年月 | 開催地名 |
|-----|----------|---------------------------------------|
| 第1回 | 2012年3月 | パリ（フランス） |
| 第2回 | 2012年10月 | マドリード（スペイン） |
| 第3回 | 2013年6月 | ベルゲン（ノルウェー） 海峡横断シンポジウムと同時開催 |
| 第4回 | 2013年11月 | 神戸（日本） 橋梁調査会主催第1回国際シンポジウム（東京）と同時開催 |
| 第5回 | 2014年2月 | アンドラ 第14回冬期世界道路会議と同時開催 |
| 第6回 | 2014年10月 | 上海（中国） セミナー同時開催（長大橋の建設、維持管理） |
| 第7回 | 2015年5月 | ブカレスト（ルーマニア） セミナー同時開催（橋梁の維持管理） |
| 第8回 | 2015年11月 | ソウル（韓国） 第25回世界道路会議と同時開催 |

道路橋委員会の開催時期と場所は表-1の通りであり、作業工程を表-2に示す。写真-2は神戸で開催時のテクニカルツアーでのグループ写真である。

道路橋委員会の4つの課題に関する報告書は予定通り英語、仏語、スペイン語の3カ国語で完成させ、2015年4月に事務局に提出した。

委員会の成果については2015年11月の世界道路会議のソウル大会の橋梁セッションで報告される事になっている。

又、3カ国語の報告書についてはPIARCのWebに公開される予定である。

その他、委員長はPIARC本部の要請に応じて、2013年8月にはリトアニアのバルト3国道路会議では前タームの成果の報告を行った。

2014年9月にはサンティアゴでのPIARCチリ国内委員会主催第1回国際橋梁会議-2014Chileに出席し、PIARC代表挨拶と長大橋の建設と維持管理について基調講演（写真-3）を行った。



写真-2 明石海峡大橋で（2013.11）

3. おわりに

PIARCの技術委員会は、4年間毎に4~5の課題が与えられ、主にアンケートによるデータを基に報告書をまとめる事になる。各グループリーダーを中心に作業が進められたが、アンケートには各国の協力をいただいて予定通りの工程で報告書をまとめることが出来た。日本の国内委員会の皆様には忙しい時間を割いてすべての課題に回答を作成していただいた事で各グループから感謝していただいた。

最後に、4年間の活動を通じ、国土交通省、日本道路協会国内委員会をはじめ、多くの方々の協力を得て韓国での世界道路会議に臨む事ができる事を感謝いたします。



写真-3 委員長挨拶（2014.9. サンティアゴ）

表-2 作業工程

| | 2012 | | | 2013 | | | | | | | | | | | | 2014 | | | | | | | | | | | | 2015 | | | | | | | |
|----------------|------|----|----|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|------|---|---|---|---|---|---|--|
| | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | | |
| TC 4.3（道路橋）委員会 | × | | | | | | | | × | | | | | × | | | | | | | | | | | × | | | | | | | | × | | |
| 作業方針の決定 | × | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 報告書内容の検討 | | × | × | × | × | × | × | × | × | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| アンケート配付 | | | | | | | | | × | × | × | × | × | × | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 報告書(第1次案)の準備 | | | | | | | | | | | | | × | × | × | × | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| グループ内で照査 | | | | | | | | | | | | | | | | × | × | × | × | × | × | × | × | × | × | | | | | | | | | | |
| 報告書の作成 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | × | × | | | | | | | | |
| 翻訳 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | × | × | × | | | | | |
| 翻訳の照査 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | × | × | × | | | |
| 事務局へ提出 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | × | |

第37回IABSEシンポジウムMADRIDに参加して

1. はじめに

2014年9月3日～9月5日に第37回IABSEシンポジウムがスペインのマドリードにて開催されました。また、9月6日にフランス・パリ市内のセヌ川に架かる橋梁調査を併せて行ってまいりました。

IABSEは、International Association for Bridge and Structural Engineeringの略称で橋梁と構造に関する国際学会です。

以下にその概要を報告します。

2. 会議内容

会議はマドリード郊外のCEUサンパブロ工科大学にて行われ、テーマをNATURE AND PEOPLEと題して、9月3日午前9時よりオープニングセッションに

続いて全体会議が開催され、開幕しました。(写真-1、2)

全体会議は、9編の基調講演で構成され、欧州を中心に各国の構造工学に関する報告が行われました。また、論文発表の場となる各セッションは、9つの分類に分かれ、全体として約400編の技術報告が行われました。内容は、新たな設計方法に関するものが約100編と最も多く、次いで大規模プロジェクトに関する報告、構造解析、維持管理が各々約80編程度と続き、そのほかが60編程度となっています。

印象に残る発表として、地元スペインの橋梁事例において革新的なはね橋の発表があり、高い関心を集めていました。(写真-3、4)



写真-1 会場外観



写真-3 発表状況 (はね橋) その1



写真-2 オープニングセッション



写真-4 発表状況 (はね橋) その2

3. スペインの歴史的橋梁視察

スペインの歴史は古く、紀元前におけるローマ帝国による支配から、15世紀～16世紀にはスペイン帝国としてヨーロッパにおける覇権国家としての地位を得ていました。

そんな歴史あるスペインを代表する橋梁として、世界遺産に登録されているセゴビアのローマ水道橋があります。

ローマ水道橋は、紀元前80年頃、ローマ帝国によって作られた水道橋で、全長728m、径間6m、地上からの高さ28mの壮大なアーチ橋です。鋼材はいっさい使われておらず、石の積み上げだけであり、古代の驚くべき架橋技術が込められています。この橋は、19世紀末まで実際に使われており、その耐久性の高さにただただ驚かされるばかりで、ヨーロッパの歴史的な重みとそれに根ざした文化の重厚さを感じさせる構造物です。(写真-5、6)

4. パリ市内の橋梁調査

IABSE会議終了後の9月6日にパリのセヌ川に架かる橋梁調査を行いました。セヌ川にはおよそ37本の橋が架かり、その多くが19世紀の建設です。川を渡る構築物としてだけでなく、機能と優美さを追求しており、それぞれがヨーロッパの長い歴史を感じさせてくれる趣をもっていました。(写真-7、8)

5. おわりに

会議に出席して多数の講演を聴講することで、世界の橋梁技術の動向を学ぶことができました。今後、日本は本格的な維持管理時代に突入することとなりますが、ヨーロッパにおける数百年、数千年の橋に接して、維持管理の大切さを再認識した次第です。

今回の調査結果を業務に役立てるため、今後ますます自己研鑽に努めていく所存です。

文責：中部支部 山藤 俊広



写真-5 ローマ水道橋 その1



写真-7 アレクサンドル三世橋



写真-6 ローマ水道橋 その2



写真-8 コンコルド橋

IABSE Conference Nara 2015 “Elegance in Structure”

奈良春日野国際フォーラム“菟”において5月13日～15日にIABSEの春季大会が開催（JBECは後援団体）され、参加してきた。IABSEの大会が日本で開催されるのは1998年の神戸開催以来だそうである。

会議のテーマを“Elegance in Structure”と題し、構造物のエレガントな形状のみならず、エレガントな解析方法や構造のモデル化といったテーマで、橋梁や建築物に関連した様々な論文が発表され、キーノート講演9題、セッションキーノート講演25題のほか、美しくスマートな設計・構造、革新的設計・施工法、新構造・新技術、災害対策、歴史的建造物等に関する一般講演210題が発表された。メイン会場のホールはステージが能舞台になっており、開会式の歓迎アトラクションでは幽玄な能が披露され、その後の各位の挨拶ならびに、セッションキーノート講演では、発表者らが靴を脱いで登壇する様に会場は笑いに包まれていた。（写真-1～2）

JBECの事業と縁の深い長大架橋事業に関する論文、メンテナンスに関する論文も多く発表され（写真-3）、また、普段馴染みのない建築分野の技術者も含め、多くの発表者や参加者との交流をすることができた。奈良での開催ということもあり、歴史的寺社建築の耐震性に関する論文も多く発表されていた。

テクニカルツアーは興福寺、唐招提寺の歴史的木造建築物のほか新名神高速道路建設現場を訪れるものであった。

また、夜の懇親会においては、当調査会の、伊藤理事長と特別技術アドバイザーでもある藤野横浜国大上席特別教授が開催国を代表して挨拶された。

文責：企画課長 二宮 仁司



写真-1



写真-2

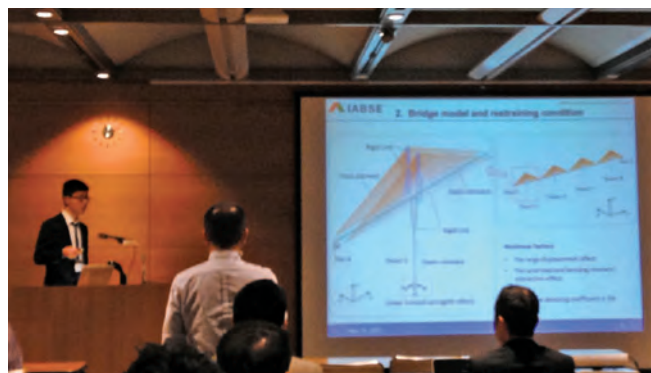


写真-3



写真-4

fibシンポジウム2015

2015年5月18日（月）から20日（水）まで、デンマークのコペンハーゲンで「Concrete - Innovation and Design」をテーマとして、fibシンポジウムが開催された。（fib: Federation internationale du beton/ International Federation for Structural Concrete/ 国際コンクリート連合）

シンポジウム中には、特別講演および論文発表と並行して、ポスターセッションや技術展示が行われた。

開会式では、本年のfibメダルの授与式が行われた。コンクリート構造およびfib組織活動に大きな貢献をされた個人に贈られる賞HONORARY MEMBERSHIPについては、上田多門北海道大学大学院教授と堺孝司日本サステイナビリティ研究所代表の2名の日本人を含む全5名にメダルが授与された。

開会式に引き続き、表-1に示す3名からの基調講演が行われた。

一般講演は、1日目の午後から9つのトピックで、全191講演（表-2）が行われた。講演数はアブストラクト応募総数の5割程度と報告された。日本人による発表は全18件（道路管理者4、民間6、大学・研究機関8）であった。

一般講演の間に、ポスターセッションが実施され、全20件のプレゼンテーションが行われた。日本による発表は3件であった。

閉会式では、Christian の Munch-Petersen 氏からの、「LARGE DANISH INFRASTRUCTURE PROJECTS - A MATTER OF POLITICAL AND CONCRETE STRENGTH」と題して講演があり、その後、2016年に南アのケープタウンで行われるfibシンポジウム、2017年にオランダのマーストリヒトで行われるfibシンポジウム、2018年豪州メルボルンで行われるfibコンGRESSへの紹介が行われた。

参考文献

fib Symposium 2015参加とデンマーク・フランスにおける橋梁視察団報告書

文責：東北支部 佐々木 雅敏



図-1 プログラム表紙

表-1 基調講演の概要

| TOPICS | SPEAKER | TYTLE |
|------------------------------|----------------------|--|
| Civil Works | Ulf Jonsson | THE DEVELOPMENT OF THE CONCRETE REQUIREMENTS FEHMARNBELTFIXED LINK |
| New Materials and Structures | Thomas Juul Andersen | DIGITAL FABRICATION OF A FULL-SCALE SCULPTURAL CONCRETE STRUCTURE |
| Life Cycle Design | Michael D. Lepech | THE ROLE OF LIMIT STATE SELECTION IN THE DESIGN AND MANAGEMENT OF SUSTAINABLE REINFORCED CONCRETE INFRASTRUCTURE |

表-2 一般講演の概要

| Topics | Session | 講演数 | 日本分 |
|------------------------------|---|-----|-----|
| Analysis and Design | Shear | 54 | 2 |
| | Columns and Elements | | |
| | Fibre Reinforced Concrete | | |
| | Mechanics | | |
| | Special Loadingsand Conditions | | |
| | Crack and SLS | | |
| | Civil Works | 13 | 3 |
| New Materials and Structures | Structures | 40 | 3 |
| | Structures and UHPC | | |
| | Materials | | |
| | Material Properties | | |
| Life Cycle Design | Life Cycle Design LCA, LCC and Service Life | 14 | 2 |
| Modelling of Concrete | Mechanics | 16 | - |
| | Cracking and Transport | | |
| Conservation of Structures | Asset Management | 22 | 7 |
| | Asset Management and Diagnosis | | |
| | Repair | | |
| | Repair and Strengthening | | |
| Numerical Modeling | | 17 | - |
| Safety and Reliability | | 6 | 1 |
| Innovation in Buildings | | 9 | |
| 合計 | | 191 | 18 |

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表彰とは、国土交通省から発注された工事や業務等に関して、その施工や成果が特に優秀で他の模範となるものが選定され、企業又は技術者について、発注者より表彰が行われる

ものです。当調査会におきましては、平成26年度の以下の業務に対し、受託者として（一財）橋梁調査会及び技術者として北海道駐在所長が局長表彰を頂きました。

文責：企画課長 二宮 仁司

| 業務名 | 表彰者 | 表彰対象 |
|--------|---------|---------------------------------|
| 橋梁診断業務 | 北海道開発局長 | JBEC・ローメック設計共同体 一般財団法人 橋梁調査会 |
| 橋梁診断業務 | 北海道開発局長 | 山本 和利 |



受賞の様子（平成27年7月24日）

橋梁研究開発助成等について

当調査会では、平成20年度から「橋梁技術に関する研究開発助成」及び「国際会議等への参加に関する助成」を始めており、年に一度、助成対象者を決定しております。今迄「橋梁技術に関する研究開発助成」は11件、「国際会議等への参加に関する助成」は17件の助成を行ってきたところです。この度、平成27年度分の助成が決定となりました。

なお、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（国立研究開発法人土木研究所 魚本 健人理事長、横浜国立大学 藤野 陽三上席特別教授、長岡科学技術大学 丸山 久一名誉教授）を設け、審査委員会での審査を経て、それぞれの助成を決定しました。

平成27年度の助成対象者は以下の通りとなりました。

文責：企画課長 二宮 仁司

橋梁技術に関する研究開発助成

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

平成27年度

玉田 和也氏（舞鶴工業高等専門学校建設システム工学科 教授）

- ・研究計画：「アクティブ・ラーニングを基軸とする橋梁メンテナンス技術者育成カリキュラムの研究開発」

小松 怜史氏（横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院 助教）

- ・研究計画：「表面吸水試験を用いたコンクリート床版のスケーリング抵抗性の評価方法の開発」

国際会議への参加に関する助成

橋梁技術に関する国際会議において研究等の発表のために渡航する方に対し、その渡航に係る費用等を助成

平成27年度

吉田 直人氏（関西大学 学生）

- ・国際会議名：「The 27th Conference on Structural Failures」
- ・提出論文：「Fatigue behaviour of web penetration details with a slit in steel girder」

第3回賛助会員特別講演会の報告

定例の賛助会員限定の特別講演会を2015年5月11日にアルカディア市ヶ谷にて開催しました。

本年は、元 国土交通省技監（現：一般財団法人経済調査会理事長）の菊川 滋氏を特別講師にお招きして、「我が国の道路政策を考える」と題した講演をいただきました。また、橋梁調査会審議役（現：常務理事）兼企画部長の大石 龍太郎より「最近の橋梁点検に関する動向等」の最新情報を紹介させていただきました。また、伊藤 学 橋梁調査会理事長の開会挨拶では、国土交通省登録資格「道路橋点検士」の制度の紹介と登録状況についての報告をいたしました。

菊川氏のご講演では、人口減少・高齢化、自然災害等のリスクの増大、国際競争力の低下、厳しい財政状況といった課題を抱える我が国において、道路の果たすべき役割と効果、および老朽化の進む現状について各種データをもとに解説していただきました。またそれら状況下で、新技術を活用したインフラマネジメントや海外展開など次世代に向けた道路政策を示していただきました。

本講演会も定例化して3回目を数えますが、例年、政策や道路行政に関わりの深い講師をお招きし、大局的な観点からの業界のトレンドを示していただいております。回を重ねる毎に参加希望者数も増加し、講師の皆様、およびご参加いただいた皆様には厚く

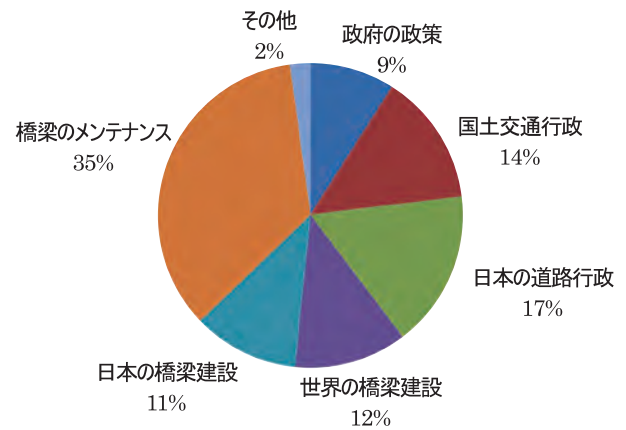


表-1 希望する講演会・セミナーのテーマ
(会場アンケート結果：複数回答可)

感謝申し上げます。

本年の講演会にて実施した調査会主催する講演会、セミナーでの今後テーマアップを希望する内容についてのアンケート結果を上図に示します。

結果は、「政策・行政に関するもの」が40%、続いて「橋梁のメンテナンス」が35%、国内外の「橋梁建設」が23%となりました。

この結果も参考にして、今後も時事動向を的確に捉えた情報を適時発信していく予定です。

今後ともご協力のほどよろしくお願い申し上げます。

文責：開発課長 藤原英之



写真-1 元 国土交通省技監 菊川 滋氏のご講演風景



写真-2 講演会会場風景

橋梁のメンテナンスに関する セミナーの報告

橋梁調査会では、一昨年より橋梁のメンテナンス技術の普及を目的としたセミナーを開催しています。

本年は、各回で特定テーマを定め、1、2題の基調講演に加えて、参加者の皆様にも関連情報の提供を依頼し、参加者全員での討議をおこなう、参加型のセミナーを試行しました。

本原稿作成時点で計2回、2月3日（火）と6月23日（火）に開催し、それぞれ「コンクリート橋の塩害」、「鋼橋の腐食－耐候性鋼橋および塗装橋－」を特定テーマとしました。

特定テーマ「コンクリート橋の塩害」では、調査会の西川 和廣 専務理事（当時。現（一財）土木研究センター理事長）より、塩害への初期対応の重要性や対策工法選定における留意点等に関する基調講演をおこないました。その後、参加者より沿岸地域での塩害調査および対策工法の検討事例や、対策後の経時観測結果などの事例を紹介いただきました。

次の特定テーマ「鋼橋の腐食－耐候性鋼橋および塗装橋－」では、西川専務理事（同）の耐候性鋼橋に関する講演と、（一財）土木研究センターの片脇清士 土木研究アドバイザーによる「鋼橋の補修塗装における諸課題」と題した基調講演をおこないました。

基調講演では、それぞれ、耐候性鋼橋における不適切な計画、構造による不具合事例と、イオン透過

抵抗測定（RST法）を用いた耐候性鋼材のさびの保護性、進行性に関する診断技術の紹介、鋼道路橋塗装・防食便覧における補修塗装仕様の変遷と品質および安全管理上の課題と提案等のお話をいただきました。

またこの回では、参加者より耐候性鋼橋の塩分環境とさび状況の観察データや補修方法とその経過観察結果の報告のほか、日鉄住金防蝕（株）のご協力を受けてイオン透過抵抗測定の実演もおこないました。

上述のとおり、本セミナーでの双方向の情報発信による全員参加型の試みは、高いレベルで技術の深化、共有を図ることができたものと思います。今後とも話題性の高いテーマを選定し、回を重ねていきたいと考えております。参加の皆様には引き続き積極的な情報提供と討議への参画にご協力いただきますようお願い申し上げます。

また、討議の充実を図るため、定員を50名程に限定したことで、参加申込みいただきながらも、ご辞退をお願いせざるを得ない結果となりました。

今後の運営方法などの改善に努めてまいりますのでご理解いただきますよう、合わせてお願い申し上げます。

なお、本セミナーは賛助会員限定で開催しております。ご興味をお持ちいただきましたら、調査会担当者までご一報下さい。

文責：開発課長 藤原英之



写真-3 セミナー風景

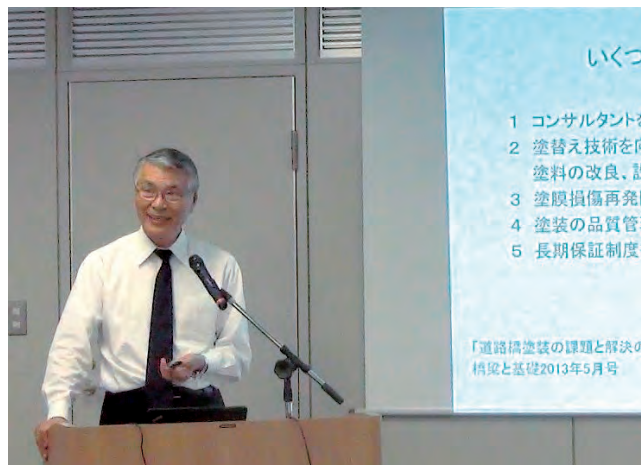


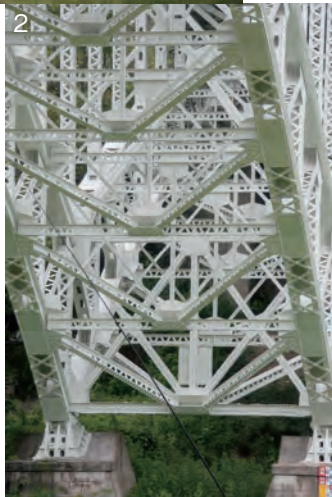
写真-4 橋梁のメンテナンスに関するセミナーの報告

那珂川に架かる美しいアーチ橋

栃木県・晩翠橋(ばんすいばし)

古の橋探訪

シリーズ 第10回



那珂川の清流を跨ぐ名橋

晩翠橋は栃木県那須塩原市と那須町の境にあり、黒磯と那須を結び、一級河川・那珂川を跨ぐ架け橋である。バランスド・アーチのなかでもこの橋のスタイルは秀逸といわれ、県下有数の名橋として名高い。

JR東北本線の黒磯駅で下車し、商店街を抜けてしばらくすると緑豊かな自然が目に入り、やがて晩翠橋の上に出る。

橋の上からは、那珂川の流れと上流側に那須岳や大佐飛山、下流側に八溝山が見られる。ただ、車で通過するだけでは、橋の全体像や景観に映える橋の姿は見えにくい。路面が構造物の上にある「上路式」であるため、橋の姿に気づかずに通過してしまいがちだからである。

しかし、河原に降り立つと、まさに圧巻の橋の姿を眺めることができる。アーチの雄大さ、橋を組み上げている個々の部材、そして河岸段丘上の見事な赤松林、那須連山、那珂川の流れなど、周囲の渓谷とに調和した素晴らしい景観をつくり出している。

明治の架橋から現在は5代目

晩翠橋の架橋は明治に遡る。明治維新のあと、政府は殖産興業などの観点から東北方面の開発に目を向けた。東北各県で道路改良事業を行う命を受けた栃木県令の三島通庸は、1884（明治17）年に栃木県を縦断する陸羽街道の改修計画に着手。5か月というスピードで整備された道路が、国道4号線である。

この際に那珂川に架けられたのが初代の晩翠橋であった。この木造の橋は、6年後の1890年（明治23年）の洪水で流出。初代の橋のすぐ脇に2代目の晩翠橋が完成。橋台、橋脚（中央に1基）はともに

- 1 アーチリブのトラス部材と床組を支える鉛直材の取り合い
- 2 レースの様な細かい部材で構成された横構、対傾構
- 3 アーチ反力の特性に配慮した支承
- 4 重厚さを感じさせる鋼板、形鋼をリベットで結合した部材
- 5 川岸の遊歩道にある記念碑

所在地：栃木県 那須塩原市橋本町・那須町高久甲（那珂川）

構造形式：鋼ブレースト・リブ・バランスド・アーチ
施工主：内務省東京土木出張所
設計者：永田年、富樫凱一
橋長：128.6m
幅員：9.0m
着工：1931（昭和6）年5月
竣工：1932（昭和7）年7月
最寄駅：黒磯駅から1.1km 徒歩14分

石材で建設され、長さ110m、幅7mの木橋の上路式トラス橋であった。

その後も橋は流出を繰り返し、3代目は1908年（明治41年）に、4代目は1922年（大正12年）にトラス橋として架橋された。

若き2人の土木技術者の活躍

昭和に入ると、世界恐慌の影響から日本は厳しい不況下にさらされ、多くの失業者が発生。政府はその救済事業として国道改良直営工事を行い、栃木県内では国道4号線の改良が行われた。これは、那須野が原縦断の新しいルートとして、主街道を奥州街道から西側にシフトさせたものである。

このときの工事の一環として、晩翠橋の掛け替えが行われた。橋の設計は、台湾総督府帰りの内務省土木局技師永田年（すすむ）（33歳）と設計補助及び現場に赴任して施工にあたったのが北大から内務省に入って2年目の富樫凱一（25歳）であった。永田年は、電力開発関係に移り、佐久間ダムの建設所長を務め、富樫凱一は、道路行政に携わり建設技監、日本道路公団総裁、本州四国連絡橋公団総裁を歴任した。両者は第49代、第55代の土木学会会長を努めた。

架橋工事は、1931年（昭和6年）に着手し、約1年余の非常に短い工事期間で翌年7月に竣工された。旧橋より数10m下流に建設され、橋長は128.6m、幅員9.0m、水面からの高さ約21m。70mの主径間とその両側に半弧のアーチを連結したバランスド・アーチである。

この鋼製の上路ブレースドリブ・3径間バランスド・アーチ橋という形式の構造工学的な意味は以下のようなものである。「ブレースト・リブ」は強度を増すため斜材を使って組まれたトラス構造のアーチ部材のこと。「バランスド・アーチ」は、中央支間と側支間（橋の両端側）を連続させてバランスをとる構造のことで、3径間連続のアーチになっている。

また、アーチリブを構成するトラス部の交点より、鉛直部材を立ち上げて床板を受けている。これによってより力強さを感じさせる構造となっている。

バランスド・アーチ形式を採用したのは、現場での基礎施工と工場での上部工製作を並行できるという工期的な利点がある。さらには、他の橋梁よりもより進んだものにしたという内務省エンジニアのプライドがあったのではないかと推測されている。

選奨土木遺産に認定

この橋の形式は、この晩翠橋のほかには埼玉県秩父市の荒川橋（1929（昭和4）年竣工）にしかない貴重なものである。歴史的、景観的にも重要な橋であることから、土木学会は栃木県では初の選奨土木遺産に平成14年度（2002）に認定した。これを記念して橋の袂には晩翠橋の名を彫った碑がある。

また、周囲の景観との調和によって橋の美しさが際立つことから現代の名橋百選にも選ばれ、那須塩原市の代表的な構造物として親しまれている。

例年12月末の夜間にはハロゲンライトによるライトアップの演出によって、夜空に浮かぶアーチ橋が幻想的な光景を描き出している。

晩翠橋は、関東から東北に通ずる国道4号として、長年、物流の大動脈を担ってきた。そして1978年（昭和53年）下流に新晩翠橋が架橋されたことにより現在は、主要地方道路としての役目を担っている。



お知らせ

平成 28 年度 道路橋点検士技術研修会等の開催案内

平成 28 年度は民間及び道路管理者を対象とした「道路橋点検士技術研修会」及び道路管理者のみを対象とした「道路橋点検技術講習会」、また、平成 15 年度以前の橋梁点検技術研修会の修了者を対象とした「道路橋点検士切替技術研修会」を下記の日程及び場所で開催する予定です。

1. 開催予定日及び場所

- | | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|----|
| ① 道路橋点検士技術研修会 | 平成 28 年 4 月 12 日 (火) ~ 4 月 14 日 (木) | 東京 |
| ② 道路橋点検士技術研修会 | 平成 28 年 5 月 17 日 (火) ~ 5 月 19 日 (木) | 東京 |
| ③ 道路橋点検士技術研修会 | 平成 28 年 5 月 30 日 (月) ~ 6 月 1 日 (水) | 大阪 |
| ④ 道路橋点検士切替技術研修会 | 平成 28 年 6 月 16 日 (木) | 東京 |
| ⑤ 道路橋点検技術講習会・道路橋点検士技術研修会 合同開催 | 平成 28 年 6 月 28 日 (火) ~ 6 月 30 日 (木) | 東京 |
| ⑥ 道路橋点検士技術研修会 | 平成 28 年 7 月 12 日 (火) ~ 7 月 14 日 (木) | 東京 |
| ⑦ 道路橋点検士技術研修会 | 平成 28 年 9 月 13 日 (火) ~ 9 月 15 日 (木) | 東京 |

内容が変更される場合がありますのでご注意ください。

2. 参加者募集

研修会及び講習会の参加者の募集は開催予定日の約 2 ヶ月前に当調査会ホームページに「募集案内」を掲示します。

ホームページアドレス <http://www.jbec.or.jp/>

問合先 TEL 03 (5940) 7746 企画部 研修担当

連絡先

本部 〒112-0013

東京都文京区音羽2-10-2(音羽NSビル8階)

TEL : 03-5940-7788 FAX : 03-5940-7789

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(NQビル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10-2(技術士センタービル3階)

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

中部支部 〒460-0002

名古屋市中区丸の内1-16-15(名古屋フコク生命ビル5階)

TEL : 052-218-3151 FAX : 052-218-3153

北海道駐在所 〒003-0804

札幌市白石区菊水4条2-1-6(政陽ビル2階)

TEL : 011-867-9255 FAX : 011-832-0606

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(マニュライフプレイス高松2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

道路橋の補修・補強計算例Ⅱ

実務に役立つ設計計算例

一般道路橋の補修補強・耐震補強における設計計算例を数多く紹介・解説した実用書です。鋼橋及びコンクリート橋の上部工、下部工、支承・検査路等、前書に盛り込めなかった新しい事例を集めた内容です。



執筆者

吉田 好孝 一般財団法人 橋梁調査会
 山口 恒太 パシフィックコンサルタンツ(株)
 長谷川泰聡 三菱樹脂インフラテック(株)
 浅野 雄司 大日本コンサルタント(株)
 富田 克彦 (株)長大
 直野 和人 極東興和(株)

サイズ・定価

◆B5版・約200頁
 ◆5,400円(本体5,000円)

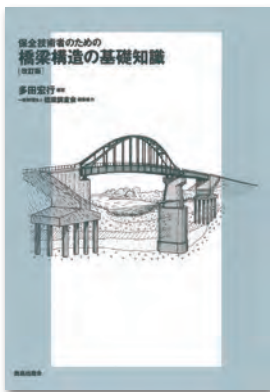
鹿島出版会 <http://www.kajima-publishing.co.jp/>

主要目次

- 第1章 鋼橋上部工**
- 1.1 炭素繊維シート接着工法による鋼桁端部の補修
 - 1.2 炭素繊維プレートによる鋼桁の補強
 - 1.3 炭素繊維シートによるRC床版の補強
 - 1.4 下面増厚によるRC床版の補強
- 第2章 コンクリート橋上部工**
- 2.1 RC桁の炭素繊維シート接着による主桁のせん断補強
 - 2.2 コンクリート充填によるRCT桁の構造改良
- 第3章 下部工**
- 3.1 コンクリート巻立て工法による橋脚の耐震補強
 - 3.2 PC巻立て工法による橋脚の耐震補強
 - 3.3 鋼パイルベント腐食の鋼板溶接工法による補修
 - 3.4 亜硝酸リチウム内部圧入による橋台のASR補修
- 第4章**
- 4.1 鋼橋の支承受替に伴う下部工付きブラケットの設計
 - 4.2 PC桁の支承受替に伴う縁端拡幅部の設計
 - 4.3 FRPを用いた検査路の設計

保全技術者のための橋梁構造の基礎知識 [改訂版]

橋の点検・診断、補修・補強の保全業務に役立つ実務書！
 橋の長寿命化について適切な判断を下すために……
 橋の構造を知り、技術基準の変遷と設計方法を理解する
 本書は、一般的な橋の保全上の留意点を示した参考書です。



主要目次

- 第1編 橋の構造**
- 第1章 道路橋概説**
 はじめに／現況／整備の推移／道路橋の基礎知識／維持管理
- 第2章 鋼橋**
 鋼橋の技術の変遷／鋼橋の特徴と保全上の留意点／鋼橋の耐荷力判定、RC床版の損傷、鋼部材の疲労損傷に関する経緯
- 第3章 コンクリート橋**
 コンクリート橋の技術の変遷／コンクリート橋の特徴と保全上の留意点／コンクリート橋の耐荷力および耐荷力と耐久性に影響を与える損傷
- 第4章 下部構造**
 下部構造形式の変遷／下部構造の技術の変遷／下部構造の保全上の留意点
- 第5章 橋面舗装等**
 橋面舗装／伸縮装置／支承／落橋防止装置

執筆者

多田宏行 編著
 一般財団法人橋梁調査会 編集協力

サイズ・定価

◆A6版・約270頁
 ◆本体2,900円+税

- 第2編 技術基準と設計方法**
- 第6章 技術基準の変遷**
 概説／技術基準の意義／基準の変遷の概要／基準の制定・改定の歴史
- 第7章 設計方法**
 概説／既設橋の保全に関わる設計／建設時に採られた構造解析モデル／既設橋の保全に関わる設計の構造解析モデル／安全性の照査／部材断面の算定法
- 付表**
 道路橋の活荷重の変遷／鋼材規格の変遷／鋼材の許容応力度の変遷／RC床版の設計活荷重、曲げモーメント算定式などの変遷／コンクリート橋の許容応力度の変遷／コンクリート橋の標準設計および JIS 規格の変遷／コンクリート橋床版の設計曲げモーメントの算定式の変遷／SI 単位系への換算率表
- 鹿島出版会 <http://www.kajima-publishing.co.jp/>

J-BEC レポート 2015 Vol.11 平成27年10月発行

編集・発行 一般財団法人 橋梁調査会

印刷 (株)大 應



J-BEC

橋をかける
橋をまもる