

橋梁の維持管理における非破壊検査技術の研究開発

石田 雅博・高橋 実

わが国では、急速に社会インフラが高齢化してきており、それに伴う劣化損傷の顕著化が大きな問題になりつつある。しかし、早期に発見し、適切な処置を施せば長寿命化が図られることから、道路橋の劣化損傷に応じた調査・診断、補修・補強技術の確立が求められてきている。

本稿では、道路橋（コンクリート橋、鋼橋）の劣化損傷のうち、非破壊検査技術が用いられる劣化損傷事例を紹介するとともに、道路橋の維持管理における非破壊検査技術の開発に関する取り組みについて紹介する。

キーワード：維持管理、道路橋、非破壊検査、ASR、塩害、ひび割れ、放射線（X線）、き裂、超音波

1. はじめに

現在、わが国では高度経済成長期以降に集中的に整備された橋梁やトンネルなどの社会インフラが、今後、急速に高齢化してくる問題に直面している。その中で、道路橋については、全国に約70万橋、存在しており、10年後には建設後50年経過する橋梁が4割以上になると見込まれている。その経過年数に呼応する形で、沿岸部などの立地環境の厳しい場所などでは、近年、一部の橋梁で老朽化による劣化損傷が顕在化している。

一方、定期的に点検を行い、適時適切な維持管理を行うことにより、建設後80年を経過しても大きな損傷なく使われている橋梁も多く存在している。

土木研究所構造物メンテナンス研究センター（通称、CAESAR）（以下「本研究所」という）では、橋梁のメンテナンスで必要となる「検査技術」、「予測評価技術」、「補修補強技術」、「管理システム」について研究している。本稿では、道路橋（コンクリート橋及び鋼橋）の劣化損傷のうち、非破壊検査技術が用いられる劣化損傷事例を紹介するとともに、非破壊検査技術の開発に関する取り組みについて具体的な事例をもとに紹介する。

2. コンクリート橋の塩害による鋼材腐食

ポストテンション方式のPC構造物では、近年グラウトの充填が十分に行われていない事例が確認されて

おり、対策が進められている。シース内にグラウト未充填箇所が存在すると、雨水や塩化物イオン等がシース内に侵入する恐れがあり、その結果PC鋼材が腐食、破断し、重大事故に繋がる可能性もある。

本研究所では、東京大学と連携し、PC桁全体のグラウト未充填区間、鋼材減肉量、破断有無の把握を目的として、高出力X線源によるコンクリート橋検査技術の開発を行っている。

(1) X線発生装置

現在、橋梁調査で用いているX線源はその出力が300keVまでであること、適用限界厚さは30～40cm程度であり厚い部材の場合は撮像に時間がかかることなど、従来の非破壊検査技術には限界があった。一方で、X線の利用を規定している放射線障害防止法においては、屋外で使用する場合、橋梁検査に限って4MeVまでの加速器の使用が認められている。

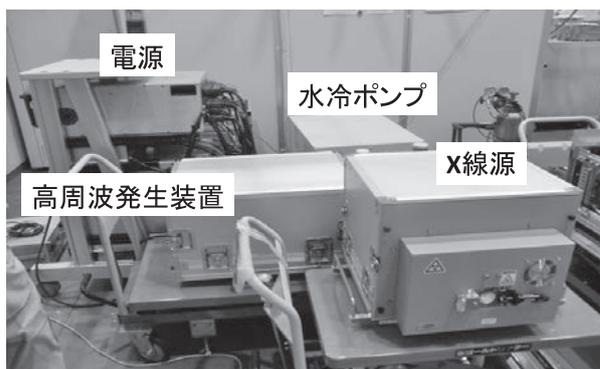


写真-1 3.95MeV X線発生装置

開発した 3.95MeV 機の全体像を写真—1 に示す。装置は、X 線源、高周波発生装置、電源、水冷ポンプから構成されている。高出力の場合に比べ重量が小さいのが特徴であり、既存の橋梁点検車に搭載可能なように、X 線源等を 200 kg 以下に抑えている。また、実橋梁への適用に向けて、X 線源及び検出器を連続的に稼働できる専用のスキャン架台を作成している。

(2) 3.95MeV X 線発生装置による屋外撮像

3.95MeV 機は法的には放射線発生装置であり、橋梁への照射に限り一時的な使用場所の変更が認められている。しかし、これまで使用された実績はなかった。そのため、今回本研究所内で実施された屋外での撮像実験は、国内における初めての試みとなった。撮影は土研内に設置してある PCT 桁橋を対象とした(写真—2)。ウェブ厚は 170 mm、下フランジ部の最大厚さは 400 mm である。



写真—2 PCT 桁橋の撮影

3.95MeV 機は撮像時の線量が非常に高く、検出器が飽和して画像が得られなかったため、出力を定格の 1/6 まで落として撮像を行った。

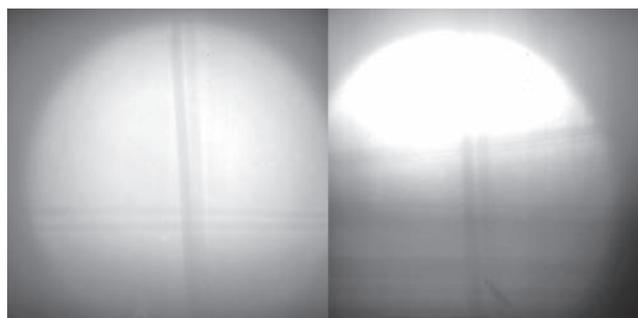
①ウェブ部

FDP により得られたウェブ部の画像を写真—3 に示す。ウェブ厚 170 mm に対し、3.95MeV 機による画像は 1 秒程度で取得されており、定格出力の 1/6 であっても十分な撮像能力があると判断できる。

②下フランジ部

ウェブ撮影後、スキャン架台により検出器を移動させ下フランジ部の撮像を行った。写真—3 に示す通り、部材厚が 400 mm にもかかわらず 30 秒程度で画像を取得することができた。

今回の撮像実験は、国内初の高出力 X 線源の屋外適用であり、必ずしも機器の調整が十分とは言えなかった。今後は、より鮮明な画像が得られるよう機器の調整を実施していく予定である。



(ウェブ部) (下フランジ部)

写真—3 3.95MeV 機 FDP 画像

3. コンクリート橋のアルカリ骨材反応対策

我が国におけるアルカリ骨材反応(以下「ASR」)による損傷は、昭和 50 年代後半から顕在化した。新設のコンクリート道路橋に対しては、昭和 60 年代前半の旧建設省総合技術開発プロジェクトの知見等をもとに各種抑制対策が施行され、平成 2 年の道路橋示方書改定時にそれらが規定された。

一方、これ以前の年代に建設されたコンクリート道路橋では、ASR に起因するひび割れが報告されており、プレストレストコンクリート橋(以下「PC 橋」)における橋軸方向のひび割れも散見される。

以下、PC 橋における ASR 損傷と対策事例の概要、本研究所での関連する研究の取り組みを紹介する。

(1) PC 橋の ASR 損傷

PC 橋に ASR が生じる場合、橋軸方向の膨張がプレストレス力により拘束されることにより、桁上下面や側面に橋軸方向に沿ったひび割れが生じる。

ただし、このような橋軸方向のひび割れは、鉄筋の腐食膨張、グラウト不良、過緊張など他の要因でも生じ、それぞれ対策方針が異なる。また、このようなひび割れから鉄筋や PC 鋼材の腐食、破断に至る恐れがあり、安全性や耐久性に関わることから、適切な原因推定と性能評価、対策が必要である。

(2) ひび割れの原因推定と診断

PC 橋に橋軸方向のひび割れが生じ、建設年や骨材事情などから ASR が疑われる場合、① ASR による劣化の経時変化や雨水の供給状況、② 今後のコンクリート膨張量、③ 耐荷性能への影響が懸念される場合、載荷試験を行い、原因推定と対策の要否判断及び対策工法の選定を行うのが一般的である。

例えば、写真—4 に示す A 橋は昭和 58 年に竣工したプレテン PC 中空床版橋であり、平成 21 年の橋梁

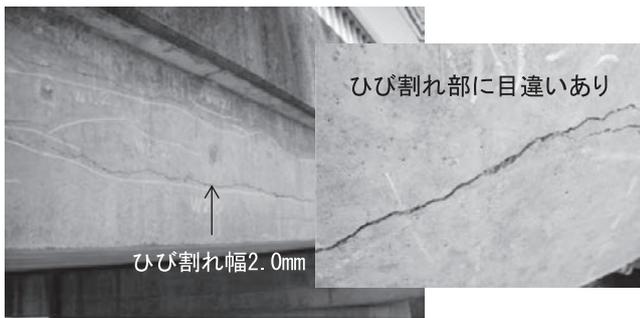


写真-4 PC桁側面のひび割れ状況

点検時にPC桁側面及び下面全面、舗装開削後のPC桁上面の一部に橋軸方向のひび割れが確認された。PC桁側面のひび割れは、幅が2.0mm以上のものもあり、目視でひび割れを挟んだコンクリート表面の目違いが確認されたこと、竣工から現在まで床版防水が行われておらず、雨水が供給される状況だったことから、曲げやせん断、収縮等に伴うひび割れではなく、ASRに起因した膨張によるひび割れが疑われた。

その後、本研究所にて原因究明のため、以下の検討を行った。

採取したコンクリートコアを観察したところ、骨材の輪郭部にASRの特徴である白色の滲出物を確認した(写真-5)。



写真-5 コア断面の観察

また、弾性係数を調べたところ、健全な場合に比べ約6割まで低下しており、同じくASRの特徴である弾性係数の低下が生じていたことから、ひび割れの原因はASRによるものと推定された。参考までに白色の滲出物の元素分析や顕微鏡観察など詳細な調査を行った結果、白色の滲出物はゼリー状であることが確認され、成分分析の結果、Si(ケイ素)を主成分としたゲルを含んでいたことから、ひび割れの原因はASRと判断した。なお、ひび割れ深さは、最大でもせん断補強鉄筋付近に留まっていた。

(3) 耐荷性能の評価

ASRを生じた構造物の耐荷性能については、明らかでない部分も多く研究途上である。本研究所においても、ASRにより桁下面に橋軸方向のひび割れが生じ撤去された歩道橋プレテンPC-I桁の曲げ試験(写真-6)や、PC桁端部の水平ひび割れを模擬した供試体によるせん断試験(写真-7)を行い特定の条件下での耐荷性能を検証している。



写真-6 撤去PC桁の曲げ試験

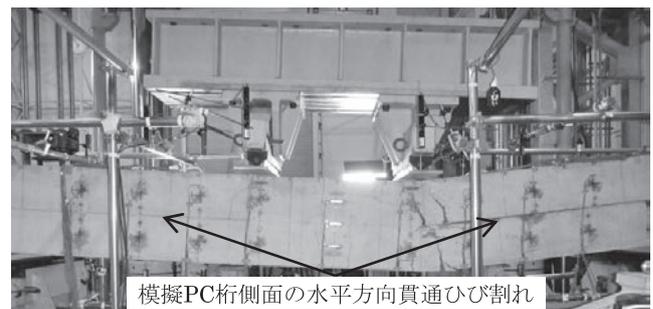


写真-7 ひび割れ模擬PC桁のせん断試験

実橋での評価にあたっては、強度や静弾性係数の低下、鉄筋の破断有無、コンクリートと鉄筋の付着や定着機能の損失、ひび割れによるコンクリート有効断面の変化、残存プレストレスへの影響を踏まえる必要がある。

A橋では、後述するCAESARメンテナンス技術交流会活動において非破壊検査を実施し鉄筋破断がないことを確認した。しかしながら、ひび割れの進展や弾性係数の低下により、部材断面の一体性損失やたわみ増大による安全性と使用性の低下が懸念されたことから、本研究所にて荷重車両(20トン×2台)を使用した静的載荷試験を行った。

その結果、載荷試験の荷重レベル範囲内での最大たわみ量と面的なたわみ分布は、いずれもひび割れが生じておらず弾性係数も低下していないと仮定した計算値の半分程度で、設計で想定する剛性が概ね失われていないことが分かった。

載荷に伴い線形挙動を逸脱する動きはなかったこ

と、複数個所でひび割れの開きやずれはなかったこと、既に路線として8トンに重量規制されており、8トン車が橋梁上に満載の場合でも本載荷試験より安全側の載荷条件となることから、道路管理者にて現行の重量規制を継続している。

(4) 対策工

ASRは、水の介在により反応が促進されることから、遮水が重要である。ただし、コンクリートの内在水分を封じ込めると新たな水分の供給がなくても反応が続く恐れがあることに注意する必要がある。上記を踏まえA橋では、以下の対策を実施している。

- (a) 床版防水、伸縮装置取替、ひび割れ補修、コンクリート表面保護（写真—8）
- (b) 床版上面の排水と中空床版ボイド下面に水抜き孔を設置

なお、桁側面及び桁下面のコンクリート表面保護は、遮水効果と内在水分低減のため通気性を有する含浸材を塗布している。

ASRはその進行がいつまで続くのか、それによる変状がどの程度まで拡大するのかを正確に予測することは困難であるため、経過観察が必要である。



写真—8 主桁表面保護工（含浸系）

4. 鋼橋の疲労対策

道路橋の鋼部材では、自動車通行等に伴って繰り返される応力変動により、溶接部や切欠き部などの応力集中が生じやすい部位に、疲労き裂が生じる場合がある。道路橋では、既設橋での損傷事例の増加の懸念を背景に、平成14年の道路橋示方書改定時に、鋼橋に対し疲労の影響を考慮することが規定された。併せて具体的疲労設計の方法については、「鋼道路橋の疲労設計指針」（社）日本道路協会、平成14年）にとりまと

められている。

一方、これ以前の年代に設計された道路橋の中には疲労耐久性に劣る施工品質や形式の溶接継手や構造を有する橋もあり、鋼橋の様々な部位に疲労損傷が報告されている。

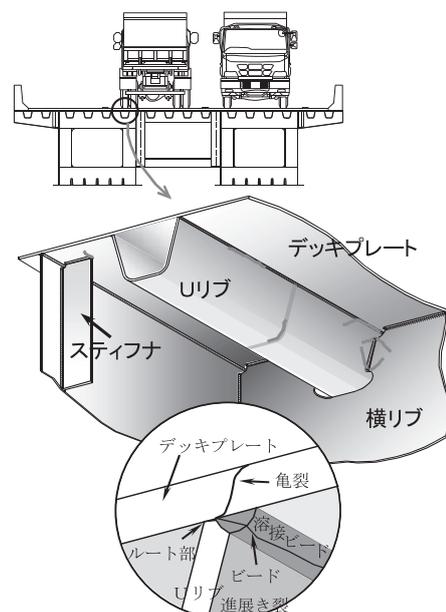
以下、最近の事例から鋼床版橋の事例を中心に、損傷の概要と、関連する本研究所での非破壊検査技術の開発の取り組みを紹介する。

(1) 損傷の概要

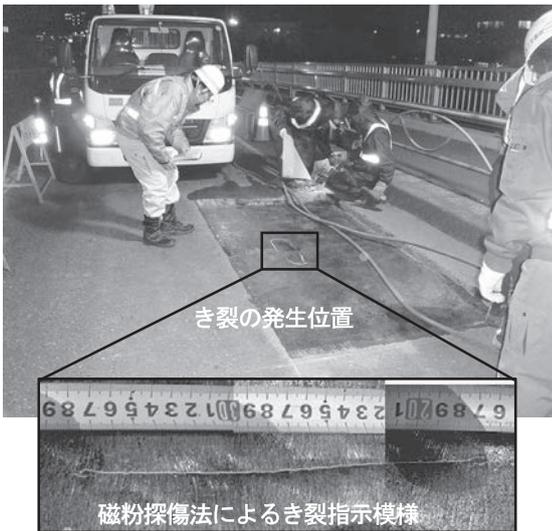
近年、U型の縦リブ（Uリブ）を使用した鋼床版橋において、重交通路線の輪荷重直下の様々な溶接部に疲労き裂が報告されている（図—1）。こうしたき裂のほとんどは、床版の下面側から目視点検できるき裂であるが、デッキプレートとUリブの溶接内部からデッキ内に進展する外観目視困難なき裂（以下、デッキ進展き裂）も報告されつつある。舗装下に隠れた状態で長く進展していくと、路面の陥没など供用性に影響を及ぼすおそれがあるき裂である（写真—9）。また、溶接に沿って進展した後、Uリブ母材に進展していくき裂も見られている。

(2) き裂の調査

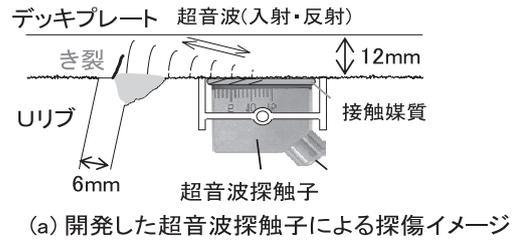
き裂が発見された場合、溶接継手を含めた構造が類似で荷重に対して同様の応力変動を受ける部位では同種のき裂が発生する可能性がある。鋼床版の場合には、輪荷重位置に対して橋軸方向の同一の構造部位に同種のき裂が発生する可能性が高く、結果的に多数のき裂が発生していることもあり注意が必要である。ま



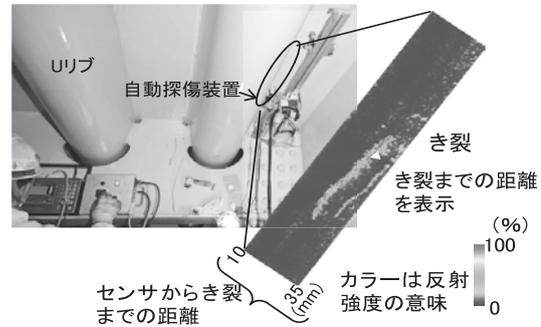
図—1 鋼床版の疲労き裂の発生部位の例



写真—9 舗装下のデッキプレート表面に現れたき裂



(a) 開発した超音波探触子による探傷イメージ



(b) 現場における探傷の状況

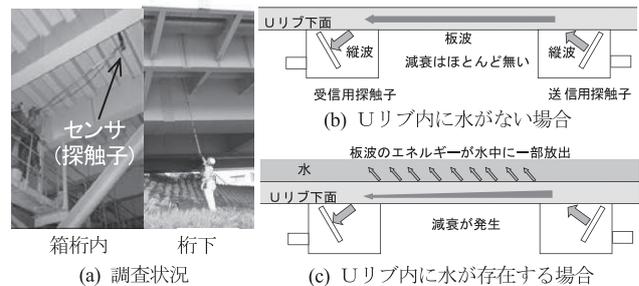
図—2 超音波探傷法によるデッキ進展き裂の調査概要

た、一旦き裂が確認された場合には、橋全体系の構造的要因も考えられることから着目部位だけでなく橋全体の溶接部の損傷状況を把握することも必要である。

疲労き裂の調査に関しては、き裂及びき裂の疑いのある塗膜割れ、き裂からのさび汁等を把握し、その後、磁粉探傷法によりき裂の有無、長さを特定するのが一般的な方法である。

前述の外観目視できないデッキ進展き裂に関しては、段階的な調査によりき裂発生のおそれのある鋼床版橋及び部位を抽出した上で非破壊調査技術の適用が合理的と考えられる。これまでも各種の調査研究が行われてきているが、探傷しようとする条件や目的に応じて必要とする精度・信頼性の確保できる方法を選定する必要がある。本研究所においても、塗膜上から比較的初期のき裂から誤検出することなく検出でき、かつ信頼性を向上させた超音波探傷技術を開発し実用化してきている。図—2に現場での調査状況の概要を示すが、対象とする溶接線に沿って、自動走査装置をデッキ下面に磁石で固定し、探触子を自動走査することにより超音波探傷器上でデータを確認しながら記録するものである。

また、この技術の他に、き裂がデッキを貫通するまで進行している場合、雨水が舗装を通じてUリブ内に侵入・滞水する事例に着目して、Uリブ内の滞水有無から間接的に発見する超音波探傷技術も開発している。この調査技術は、既にデッキ貫通亀裂が見つかったもののデッキ下面に近接しにくい鋼床版橋での、補修前のき裂の早期発見というニーズを踏まえて開発したものである。き裂貫通初期では、必ずしも滞水に至っていない場合があることに留意する必要があるが、貫通き裂の発生が疑われる場合には、効率的に



図—3 超音波を利用したUリブ内の滞水の調査概要

調査する一手段になるものと考えられる。図—3に現場での調査状況の概要を示す。具体的には、送受信用の2個の超音波探触子（板波を使用）をUリブ下面に当てて、Uリブ内の水の存在による超音波の受信波形の顕著な減衰特性より検出するものである。既に現場で試行し、伸縮用の簡易治具を利用し、対象Uリブから4m程度離れた距離から1箇所あたり5秒程度の調査時間で滞水の有無と同時に深さの計測が可能である。なお、滞水に伴う温度変化を捉える手法として有効な赤外線サーモグラフィについて併せて現場適用性を検討したが、遠望からの調査が可能である一方で、日照条件・測定時刻・水深の程度等により計測の制約や検出性能に限界があるため確実性・迅速性の点で優位性を発揮できない結果であった。前述のデッキ進展き裂の検出技術も含め、これらの調査技術に関しては、菱電湘南エレクトロニクス(株)、三菱電機(株)情報技術総合研究所との共同研究により開発したものである。

5. おわりに

今回紹介した調査技術は道路橋の長寿命化を推進していく上で非常に重要となってくる。

また、道路橋の半数以上は、体制的にも財政的にも厳しい市町村がその膨大なストックを管理している。

調査やそれを踏まえて実施される補修・補強といった長寿命化のための技術についても、管理体制や技術力・財政力に応じた、より効率的で経済的な技術についても研究していく必要がある。

土木研究所構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)では、国、地方自治体、高速道路会社といった施設管理者と、産業界、学界の技術者・研究者が一堂に会する場として「CAESAR メンテナンス技交流会」を2011年8月に発足させ、老朽化や震災等で劣化損傷した実橋梁を対象にメンテナンス技術向上のための研究活動を実施している。橋梁の長寿命化を図っ

ていくには、「点検→診断→措置→記録」といったメンテナンスサイクルを確実に回していく必要がある。今後とも、道路管理者のニーズに応えるべく、更なるメンテナンス技術の高度化を図っていくため、産学官一体となって研究を進めて参りたい。

JCMA

【筆者紹介】



石田 雅博 (いしだ まさひろ)
国立研究開発法人土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
橋梁構造研究グループ
首席研究員



高橋 実 (たかはし みのる)
国立研究開発法人土木研究所
構造物メンテナンス研究センター
橋梁構造研究グループ
主任研究員

