

塩害対策の変遷と技術開発

— PC グラウト充填と鋼材腐食の調査 —

石田 雅博*

道路橋の維持管理において、PC 橋の塩害は重要な問題である。海からの飛来塩分に起因する塩害とともに、グラウト未充填のシース内部の鋼材が腐食している事例が近年見られるようになった。本稿では、PC グラウトの充填状況に着目した点検・調査方法を示すとともに、高出力 X 線によるコンクリート内部の調査技術、実橋梁での破壊までの載荷実験を紹介し、技術開発の状況を解説する。

キーワード：塩害、鋼材腐食、グラウト未充填

1. はじめに

高度経済成長期に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が急速に進むなかで、さまざまな劣化要因による損傷事例が報告されている。これらの損傷に対して合理的かつ適切に維持管理を行っていくために、より効率的な検査技術や評価手法の確立が求められている。しかし、劣化損傷や変状の要因が多岐にわたるとともに、橋梁の構造特性や周辺環境、交通量などによっても耐荷性能や耐久性能に与える影響が大きく異なる。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（以下「CAESAR」という。）では、劣化損傷の生じた実橋の状態を把握するため、撤去された橋梁について非破壊検査や載荷試験、解体調査を行っており、これらの取組みを臨床研究と称し、より効率的な検査技術や評価手法の確立に向けて調査研究を進めているところである。ここでは、これらの取組みのなかから既設橋コンクリート部材の塩害に関わる技術開発について報告する。

2. コンクリート橋の塩害対策の現状と課題

2.1 塩害対策の経緯

コンクリート構造物に生じる劣化原因のなかで、塩分がコンクリート中に浸透して内部の鋼材が腐食し、その膨張によりコンクリートにひび割れ・剥離などが生じる、いわゆる「塩害」は、コンクリート構造物の耐久性を低下させる要因の一つとしてとくに深刻である（写真 - 1）。

道路橋においては、海からの飛来塩分に起因する塩害への対策として、1984年に「道路橋の塩害対策指針（案）・



写真 - 1 塩害によって鉄筋や PC 鋼材が腐食破断したコンクリート橋

同解説¹⁾が暫定指針として初めて示された。同指針により、新設橋に対し設計や材料の選定および施工の各方面にわたって十分な配慮がなされ、有効かつ経済的に塩害対策が行われることになった。しかし、その後の被害の実態や研究による知見から、長期の耐久性を考慮した場合、同指針の規定内容では必ずしも十分でない場合があることが明らかになってきたことなどから、それらを踏まえ、2002年に道路橋示方書が改訂され、塩害の影響による最小かぶりの見直しなどの塩害対策が盛り込まれた。一方、コンクリート橋に関する維持管理においては、「橋梁定期点検要領²⁾」に基づき、目視により外観の損傷を発見することを主体としている。しかし、外観に損傷が認められなくても既に鉄筋の腐食が始まっているおそれがあり、その後の対策が遅れると損傷が急速に進行する可能性がある。そこで、塩害による損傷を早期に発見するため、2004年に「コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案）³⁾」が定められ、コンクリート橋への塩分の侵入状況を定期的に点検し、鋼材が塩害により腐食する前に予防保全的な補修を行うこととしている。塩害による損傷を受ける可能性のあるコンクリート橋について、将来にわたって安全に利用していくためには、適切に維持管理を行い、必要に応じて補修・補強などの対策を行わなければならない。

2.2 塩害により損傷した橋梁の維持管理

図 - 1 に国、都道府県政令市など、市区町村の管理体制ごとに健全度判定区分と塩害の影響地域の関係を示してい



* Masahiro ISHIDA

(国研)土木研究所
上席研究員

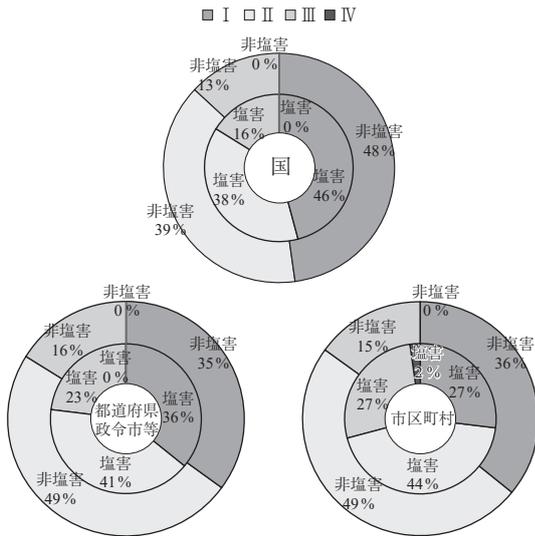


図 - 1 健全度分布の塩害の影響地域による比較⁴⁾

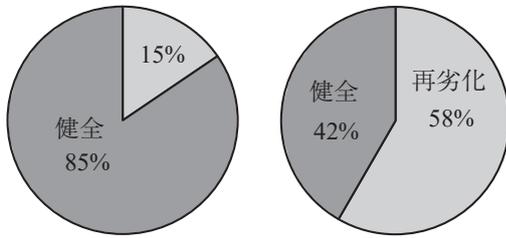


図 - 2 塩害が原因で補修した橋梁の 10 年後の再劣化割合

る。これからはとくに健全度判定Ⅲ、Ⅳといった区分において塩害が大きく影響していることが示されている⁴⁾。また、塩害を受けた橋梁に対して補修などの対策を行っているなかでも、補修後の再劣化が報告されている。とくに海岸線から 100 m 以内に位置する橋梁では補修後 10 年以内に再劣化する割合が約 6 割程度報告されており、塩害を受けた橋梁の維持管理の難しさが示されている (図 - 2)。

一般的に塩害により損傷を受けたコンクリート部材は、鉄筋や PC 鋼材に到達して一定の濃度以上の塩分量を超えてから鋼材の腐食が開始し、鋼材腐食による損傷が著しく進行することで PC 鋼材の破断とそれに伴う耐荷性の低下が顕在化する過程を辿ると想定されている。さらに、PC 鋼材の破断が増加した段階で適切な維持管理が行われない場合には、部材の耐荷力が失われて、最終的に落橋に向かうものと想定される。したがって、既設コンクリート橋における残存耐荷力の推定は、補修・補強対策の要否あるいは通行止めなどを判断するうえで重要な判断指標となる。

3. PC グラウトの充填状況の現状

過去に建設されたポストテンション方式 PC 橋では、ブリーディングが生じるグラウトが用いられていたことによりシース内へのグラウトの充填が不十分となり、上縁定着部からシースの内部に水や塩分が侵入することで (図 - 3)、PC 鋼材が腐食して著しい断面欠損や破断に至った

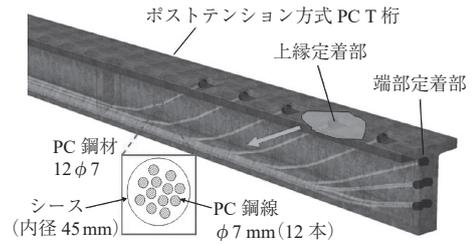


図 - 3 PCT 桁橋の上縁定着部からの水の進入のイメージ

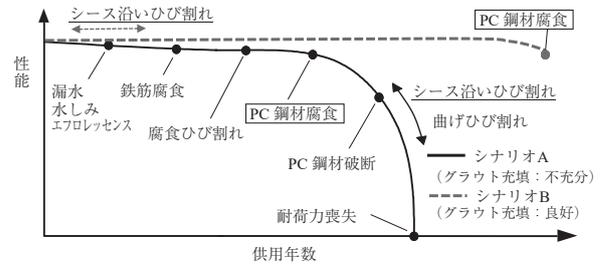


図 - 4 PC 橋の予想される劣化シナリオ

事例が報告されている。この事例では、劣化が内部で進行したことから、PC 鋼材の劣化進行が見逃されたおそれがある。このように、既設 PC 橋の耐久性に重大な影響を及ぼす要因としてポストテンション方式 PC 橋のグラウトの充填不足があげられ、これまでにストックされてきた既設 PC 橋を適切に管理するためにもグラウトの充填状況を把握することが重要である。

3.1 グラウトの充填状況に着目した調査

PC 橋の点検は基本的に近接目視点検で行われている。これによってグラウトの充填状況を直接知ることはできないものの、特定のひび割れパターンを確認し、PC 鋼材位置との関連性や他の変状の有無などを総合的に勘案することによって、間接的にグラウトの充填状況を知ることができると考えられる。この場合の代表的な劣化シナリオとしては、グラウトの充填不足により、① その部位に水や塩分が徐々に侵入し、② PC 鋼材の腐食が経年的に進行、③ シース沿いひび割れの発生が想定される (図 - 4 中シナリオ A)。

3.2 グラウト充填調査のポイント

調査の流れは、橋梁点検結果よりひび割れパターンの確認を行い、書類調査により調査対象橋梁を特定し、「グラウト充填不足の可能性が高い」と特定された場合にはグラウト充填調査を実施し、対策優先度を判断する (図 - 5)。調査の主なポイントを以下に示す。

(1) ひび割れパターンの確認

橋梁点検で確認されたひび割れパターンのなかから、「主桁下面シース沿いひび割れ」、「主桁側面シース沿いひび割れ」の 1 つ以上該当する場合には、グラウト充填不足により PC 鋼材に深刻なダメージを与えていると疑われる変状があると判断し、書類調査を行うものとする。ただし、シースかぶりが極端に小さい場合はグラウトが充填されているにもかかわらずシース沿いひび割れが生じることがある。この場合は別途検討が必要である。

(2) 書類調査による調査対象橋梁の特定

書類調査は橋梁台帳や点検調査などを確認し、「旧タイプのグラウトを使用」、「上縁定着がある」の一つ以上該当する場合はグラウト充填不足の可能性が高いことから、調査が必要と判断する。また、いずれも該当しない場合は、グラウト充填不足の可能性が低いことから、優先度を「低」とする。ブリーディングを生じるグラウト使用の確認は、竣工図書により材料確認を行う方法と、建設年次から判断する方法がある。後者については、1997年にはノンブリーディング型グラウトへの切り替えが行われていることから、1997年以前のポストテンション桁にはブリーディングを生じるグラウトが使われていると判断する。

また、上縁定着されたPC鋼材については、竣工図書による確認のほか、たとえばPCT桁橋の場合、PC鋼材をすべて桁端部に定着することになったのは1993年に改訂された「建設省標準設計」以降であることから、これ以前の

ものは上縁定着であると判断する(図-6)。

(3) グラウト充填調査の実施

グラウト充填不足の有無について、非破壊検査や削孔調査などにより確認する。グラウト充填不足がある場合は、非破壊検査や削孔調査によりPC鋼材の腐食や破断の有無について確認する。調査箇所は、上縁定着されたPC鋼材の曲上げ部やひび割れの前後に着目する。

(4) 対策優先度の判断

グラウト充填不足あるいは未充填が確認され、かつ、PC鋼材の腐食あるいは破断が確認された場合は、対策を優先させる。とくに、水や塩分が侵入する場合は劣化が早まることに留意することが必要である。

4. 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、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などがシース内に侵入するおそれがあり、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。そのため、重大な損傷を見逃さないためにも、外観目視による不具合の予兆を把握することが重要である。しかし、ポストテンション方式のPC橋で確認されている不具合のうち、耐荷性能を大幅に低下させる要因となっているケーブルの腐食や破断、それを誘発させるグラウト未充填箇所の存在は、外観から判断することが難しい。

CAESAR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。

4.1 高出力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程度といわれていること、厚い部材の場合は撮影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X線源の使用が認められている。そのため、東京大学では、現場適用に向けて新たに950keV X線発生装置(以下950keV機)、および3.95MeV X線発生装置(以下3.95MeV機)の開発を行った。3.95MeV機の全体像を写真-2に示す。装置は、X線源、高周波発生装置、電源、水冷ポン

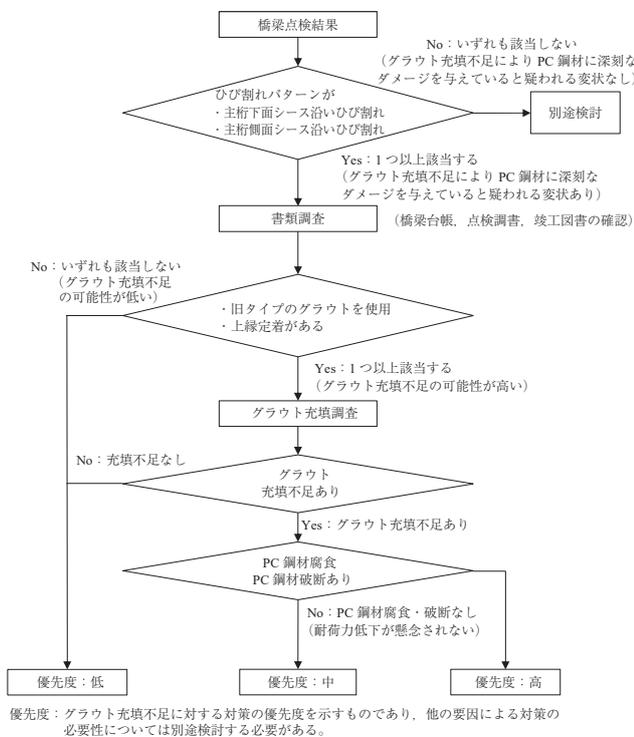


図-5 グラウト充填調査手順

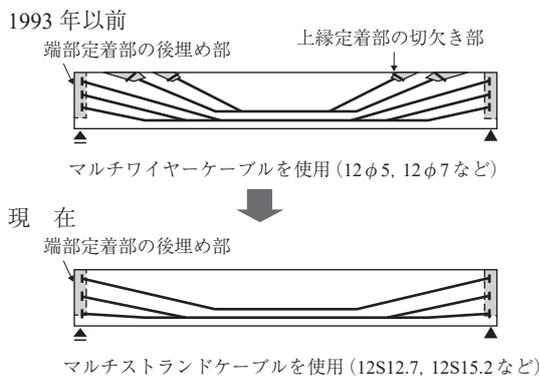


図-6 PCT桁橋におけるPC鋼材配置

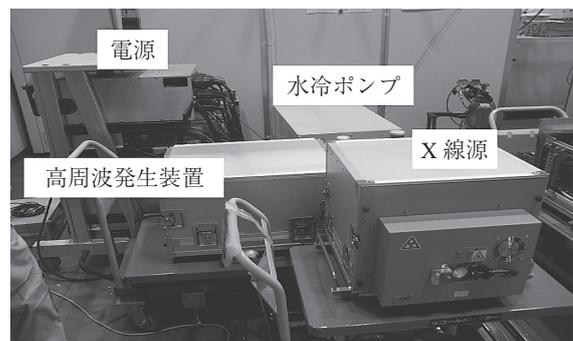


写真-2 3.95 MeV X線発生装置

ブから構成されている。高出力の他装置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線源などを200 kg以下に抑えている。また、実橋梁への適用に向けて、X線源およ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。

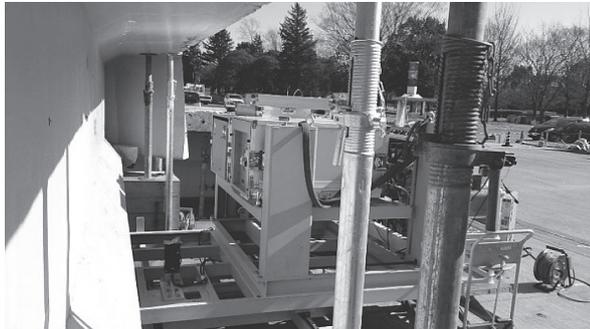
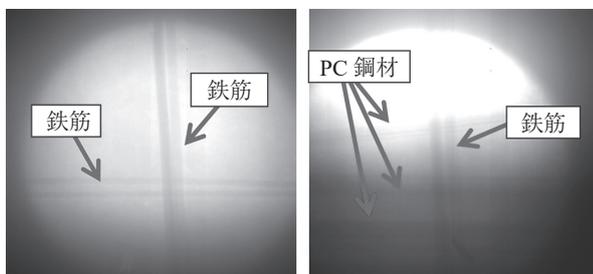


写真 - 3 PC T桁の撮影



(ウェブ部) (下フランジ部)
図 - 7 3.95 MeV 機 FPD 画像

4.2 3.95 MeV X線発生装置による屋外撮影試験

3.95 MeV 機は法的には放射線発生装置であり、橋梁への照射にかぎり一時的な使用場所の変更が認められている。しかし、これまで実際に現場で使用された実績はなかったことから、平成27年に土木研究所内で国内初の屋外での撮影実験を行った。撮影は土研内に設置してあるPCT桁橋を対象とした(写真-3)。ウェブ厚は170 mm、下フランジ部の最大厚さは400 mmである。

3.95 MeV 機は撮影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まで落として撮影を行った。

FPD (Flat Panel Detector) により得られたウェブ部の画像を図-7に示す。ウェブ厚170 mmに対し、3.95 MeV 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影能力があると判断できる。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影を行った。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。

4.3 950 keV X線発生装置による実橋梁の撮影試験

撮影対象の妙高大橋(写真-4)は、新潟県妙高市坂口新田に位置し、太田切川、旧国道18号を跨ぐ橋長300 m、99ブロックからなるプレキャストセグメント架設によるPC4径間連続箱桁橋である。

今回の撮影では箱桁内に加速器を設置し、下側に向けて



写真 - 4 妙高大橋

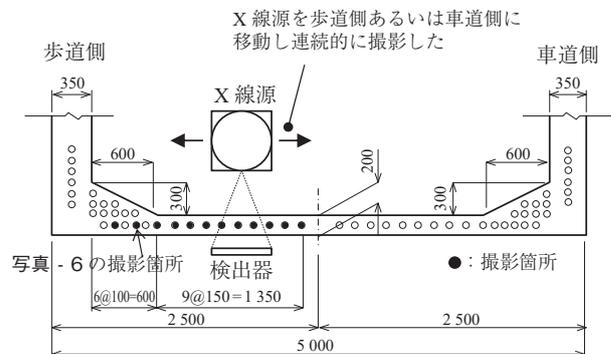


図 - 8 計測対象断面図

X線を照射するので、桁上面を走行する利用者へのX線量はきわめて少なかった。そのため、試運転により放射線量を測定し、安全性を確認したうえで、特段の通行規制を行わず、X線撮影を実施した(図-8)。X線照射装置は検査用マンホールより搬入し、検出器は桁下に設置して撮影を行った。写真-5、6にそれぞれ計器機器の搬入状況および装置の設置状況を示す。写真-7に撮影結果の一部の拡大図を示す。撮影箇所のケーブルは、表面から約20 cmに位置していたが、鋼材の状況を確認することができた。今後は、短時間により鮮明に計測できる技術の開発を目指すとともに、実橋でのデータを蓄積し、さらに精度を高め、現地で適用されるよう、高出力X線による調査方法と評価手法について技術開発を進める。



写真 - 5 マンホールからの機器の搬入

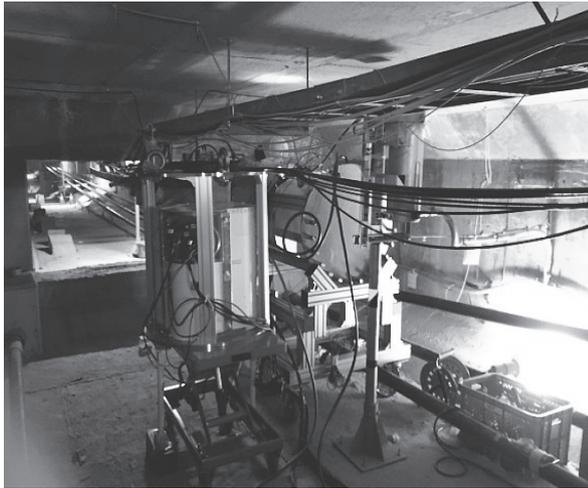


写真 - 6 950 MeV X線発生装置の設置状況

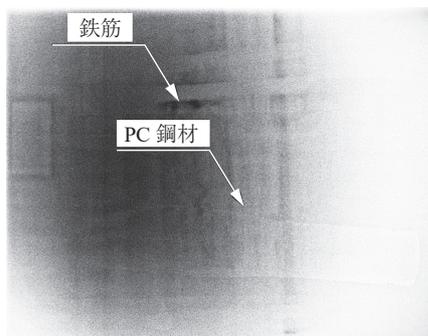


写真 - 7 高出力X線源 (950 keV) を用いた撮影

5. 既設PC橋の現地破壊試験

橋梁を合理的かつ適切な維持管理を行っていくために、損傷の生じた橋梁の残存性能を適切に評価する手法が求められている。これまでの調査研究では、車両走行試験などによる弾性範囲内での評価が中心であり、PC橋が破壊に至るまでの載荷試験による実耐力の検証は、国内で実施された例がない。橋梁全体系において、主に終局状態の力学性能に対して性能の低下を適切に把握し、その情報を補修・補強の要否の判断材料とすることが合理的な維持管理を行ううえで重要であると考えられる。

以上の背景より、プレストレストコンクリート (PC) 道路橋を対象に、橋梁全体の耐力の把握、主桁間での荷重分担率の変化、および終局付近での挙動・破壊性状の確認を目的として実橋での載荷試験を行った。

5.1 対象橋梁

旧築別橋は、1960年に北海道開発局留萌開発建設部管内に建設された単純PCポストテンション方式T桁橋である。本橋は、日本海沿岸からの距離が約170m飛来塩分の影響を受ける環境に位置しており、過去に塩害補修がなされるも、載荷径間において内部鋼材の腐食に起因する主桁のひび割れやコンクリートの剥離などの再劣化が生じていた。2017年7月に実施された載荷試験時には本橋に隣接して新橋が建設され、本橋はすでに通行止めの状況であった。

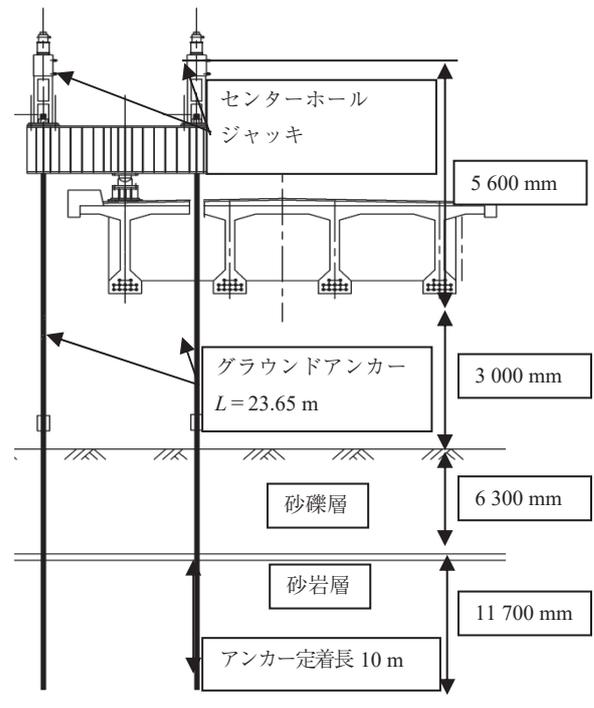


図 - 9 載荷装置全体図

5.2 試験概要

載荷試験は、グラウンドアンカーによる載荷装置、および計測機器を設置するため、河川敷のある第1径間で行った。載荷装置は、耐力2500kNのグラウンドアンカー2本を施工して載荷反力を取り、2台の3000kNセンターホールジャッキにより載荷を行う構造とした。

載荷位置はG1桁支間中央への1点集中載荷とした。これは、G1桁が他主桁と比較して著しく損傷しており耐力がもっとも低いと考えられること、複数主桁間での荷重分配効果を把握するためである。載荷各段階において、残存変位量の計測、変状確認などを行うため、曲げひび割れ発生時、鉄筋降伏時、推定耐力時、そのほか大きな損傷や挙動変化が生じるごとに、一度除荷を行う方法で載荷を行った。

5.3 試験結果

載荷荷重は、事前の推定耐力およそ2500kNを上回り、3300kNに達した際に地覆に圧壊 (写真 - 10) が生じ荷重の増加が見られなくなったため、終局に至ったと判断した。

本試験での特徴的な破壊性状として、支間中央の横桁～隣接する横桁間を中心に、ウェブにせん断によるものと思われるひび割れが生じた (写真 - 8)。載荷荷重1800kNを超えたあたりで表面塗装上でもひび割れを確認し、G1桁ではひび割れ数、ひび割れ幅共に進展し、2000kNを超えたあたりでG2桁にも同様のひび割れが生じた。終局時におけるウェブのひび割れは、大きなもので10mm超に達した。各桁端部付近にはねじりひび割れが発生しており (写真 - 9)、終局時にはねじり剛性が解放されたものと考えられる。載荷点直下の横桁には、G1-G2桁間の打継目に目開き、および鉛直方向にずれが生じた (写真 - 10)。

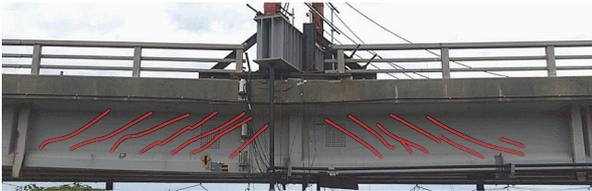


写真 - 8 荷点付近の損傷の様子 (終局時)

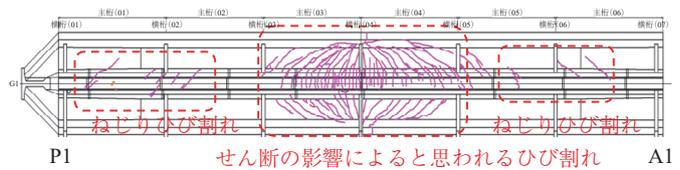


図 - 10 ウェブ 曲げせん断ひび割れ

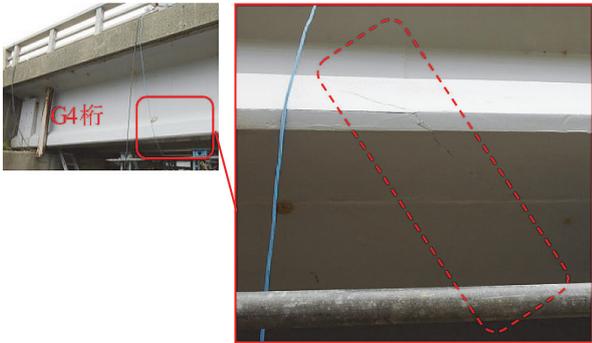


写真 - 9 G4桁 ねじりによるひび割れ



写真 - 10 横桁の目開き, ずれ



写真 - 11 地覆の圧壊

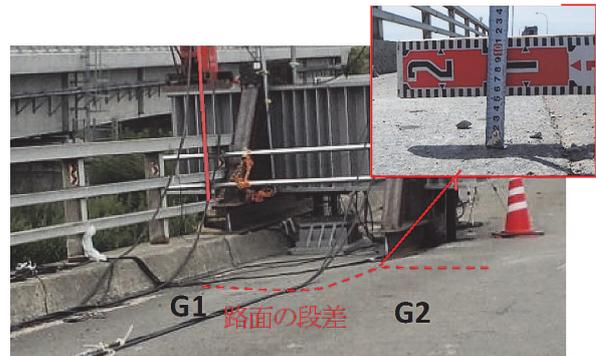


写真 - 12 路面の段差

目開き幅は終局時で 10 mm 程度に達した。また、路面でも G1 - G2 桁間に 50 mm 程度の鉛直方向の段差が生じた (写真 - 12)。

6. おわりに

橋梁の長寿命化を図っていくには、「点検→診断→措置→記録」というメンテナンスサイクルを確実に回していくことが必要である。そのためには、橋梁の劣化事象に応じて、効果的な補修方法とそれを判断するための診断手法、調査技術が求められる。今後も、橋梁の維持管理ニーズに応えるべく、メンテナンスサイクルの確立へ向けた技術開発を進めていきたい。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋の塩害対策指針 (案)・同解説, 1984.
- 2) 国土交通省道路局 国道・防災課：橋梁定期点検要領, 2014.6
- 3) 国土交通省道路局：コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領 (案), 2004.
- 4) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報, 2015
- 5) 土木研究所, プレストレスト・コンクリート建設業協会：撤去橋梁を用いた既設 PC 橋の診断技術高度化に関する共同研究－既設 PC 橋のグラウト充填状況に着目した解体調査－, 共同研究報告書第 488 号, 2016.3

【2018 年 10 月 24 日受付】