

PC 橋の補修・補強技術に関する取り組み

長田 光司*1・野島 昭二*2・佐藤 正明*3・濱田 譲*4

1. はじめに

PC 橋は昭和 30 年代以降本格的に導入され、昭和 40 年代には建設されるコンクリート橋に占める PC 橋の割合は RC 橋を上回るようになった。道路統計年報によると平成 14 年 4 月現在、わが国で供用されている 15 m 以上の道路橋は 142 521 橋あり、このうち PC 橋は 38.8 %、RC 橋 18.0 % となっており、既存ストックにおける PC 橋の数は RC 橋の約 2 倍となっている。JH 日本道路公団（以下 JH という）が管理する高速道路橋は約 13 400 橋であり、平成 9 年から平成 13 年度の間に建設したコンクリート橋に占める PC 橋の割合は約 95 % となっている。

従来、コンクリート橋の維持補修は RC 橋を中心に検討されており、PC 橋は設計上、導入されているプレストレスにより生じるひび割れを制御しているため、耐久性が高いと位置付けられていた。しかしながら、PC 鋼材の耐久性が重要視されるようになったのは最近のことであり、これ以前に設計された橋梁の中には過酷な環境等により、適切な設計・施工が行われていても劣化の進行が認められる橋梁が見られ始めるようになってきたり。今後、コンクリート橋に占める PC 橋の割合を考えると、維持管理に占める PC 橋の割合が増加することが容易に想定でき、PC 構造の特殊性を踏まえた PC 橋梁の補修・補強に関する留意事項を整理し、早急に未解決な点に対する検討を行っておく必要がある。

このような背景のもと本稿では PC 構造物特有の維持管理上の留意事項や問題点について述べ、PC 橋の補修・補強技術の確立を目指して平成 15 年度から 3 年計画で行っている JH 試験研究所とプレストレスト・コンクリート建設業協会（以下 PC 建協という）による共同研究の概要を速報として紹介する。

2. PC 橋の点検・モニタリング

JH では管理延長の増加に伴い、維持管理しなければならない構造物が急速に増加しているが、一方で維持管理に充て可能な予算は限界があるため、明確な維持管理コストの縮減が求められている。ただし、目先の維持管理コストを切り詰めても、将来そのつけがまわってきて、結果として高くつくようなことは避けなければならない。維持管理コストの縮減とはライフサイクルコストを最小にすることであり、このためには適切な時期に適切な方法で補修・補強することが重要である。PC 構造物を適切な時期に補修・補強するためには、PC 橋の現況に関する情報をどのようにして得て、その結果から変状の程度をどのように判定するかが問題となる。PC 橋では PC 鋼材の破断の有無に関する判定がとくに重要であるが、実際に PC 鋼材が破断した橋梁での耐荷挙動を検証した事例は少なく、たとえば『PC ケーブルが破断した場合、フルプレストレスで設計された PC 橋は外観上ひび割れが観察されるだろう。』といった具合に仮定に基づいた判定を行っているのが現状である。一般に桁内に配置された PC 鋼材が同時に破断する可能性は低いと考えられ、腐食により徐々に破断が進行することが想定される。たとえば設計荷重に占める死・活荷重比率が 50 : 50 の場合、PC 鋼材が半分破断するまでは活荷重が載荷していない状態では支間中央部下縁部でも圧縮状態となっているということである。通常、点検しているときは活荷重が載荷していない状態であり、たまたに設計荷重の数十パーセントに相当する大型車が高速で通過して行き、そのときだけ瞬間的にひび割れが開閉するといった具合であろう。ひび割れが発生していても圧縮状態ではひび割れは閉じていて、目視で観察できるようなひび割れ幅にならないことは容易に想像できる。仮に PC 鋼材の破断でひび割れが発



*1 Koji OSADA

日本道路公団 試験研究所
橋梁研究室 主任



*2 Syoji NOJIMA

日本道路公団 試験研究所
橋梁研究室



*3 Masaaki SATO

(社)プレストレスト・コンクリート
建設業協会メンテナンス部会 部会長



*4 Yuzuru HAMADA

(社)プレストレスト・コンクリート
建設業協会メンテナンス部会 副部会長

生し、常時開いた状態にあるということは、半分以上のPC鋼材が破断している可能性があり、そのような場合は突然落橋する危険性すらある状態になっているかもしれない。

以上のようなことからPC橋の点検・モニタリングを行ううえでPC鋼材破断時の死荷重状態での残留ひび割れ幅やひび割れ発生に伴う剛性低下等の耐荷挙動を検討しておく必要がある。ひび割れ幅や、グラウトによる付着に対する挙動は寸法による影響を受けるため、JHとPC建協による共同研究では写真-1に示す1971年に竣工し、1997年に撤去されたポストテンションPC単純T桁橋の主桁を用いて実橋で実験を行うこととした。この桁の支間長は17mであり、桁高は1.0mである。主桁には12-φ7が5本配



写真-1 試験に使用した撤去桁（約35年前に建設され26年間供用し撤去されたポストテンションPC単純T桁橋の主桁）

置されており、すべての鋼材が桁端部に定着されており、ほぼ完全にグラウトが行なわれていた。実験では写真-2に示すように支間中央部で5本中2本PC鋼材を切断し、桁表面に断続的に設置したコンクリートゲージによりプレストレスの損失の程度およびその範囲を計測するほか、静的載荷試験を実施し耐荷挙動を検討するとともに残留ひび割れ幅を観察し、点検・モニタリングに反映できる情報を提供する予定である。また、桁端部からの凍結防止剤として使用している塩分の流入が原因となりPC鋼材が腐食することを想定して、写真-3に示すように5本中4本のPC鋼材を切断し、桁表面のコンクリートゲージによりプレストレスの損失範囲を測定することとした。桁端部はPC鋼材が破断したときでも外ケーブルによる補強ができない範囲である。桁端部でPC鋼材の破断を発見した場合、程度によってはただちに架け替え等の措置を講じる必要に迫られるが、プレストレスの損失範囲が限定されていることを確認できれば、暫定的にプレストレスが損失していない位置に支点を移動し適切なモニタリングを行ないながら計画的な掛け替えが可能な時期までの供用を行うことができると思われる。一方で30年前に行なわれていたグラウトではブリーディングにより特に桁端部付近で付着性能が低下し、プレストレス損失が広範囲にわたっている可能性もある。今回の共同研究では、実桁端部のPC鋼材切断のほか、傾斜状態におけるブリーディングの発生を再現した供試体により、ブリーディングの発生と付着長の関係を検討する試験も計画しており、桁端部のPC鋼材が破断した場合の対策立案に重要な情報を提供できると考えている。すべての

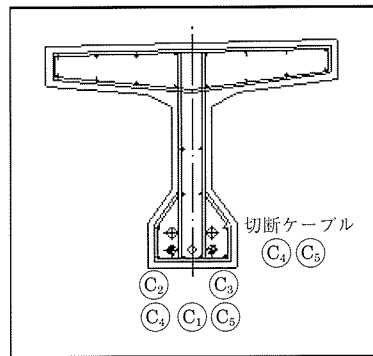
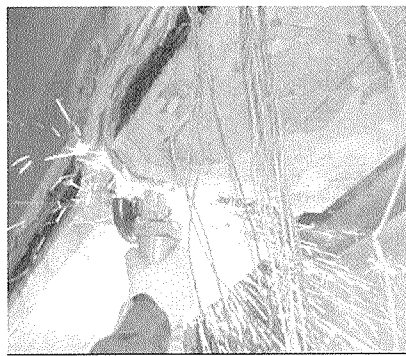


写真-2 撤去桁支間中央部のPC鋼材切断状況

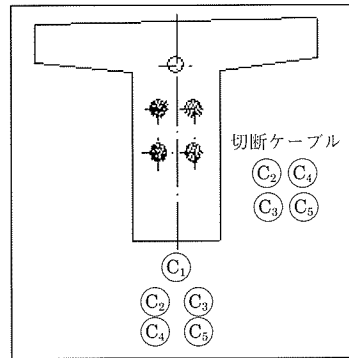
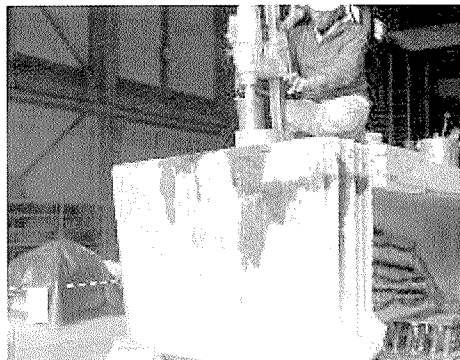


写真-3 撤去桁桁端部のPC鋼材切断状況

試験は平成 17 年 3 月までに行う予定であり、結果がまとまり次第公表する予定である。

3. 補修工法の効果ならびに適用上の留意点・適用限界に関する検討

最適な補修・補強工法を選定するためには補修・補強工法の適用限界や効果を正確に把握しておく必要がある。補修と補強の区別については明確でない場合があるが、ここでは便宜上、耐荷性能の向上を目的としないものを補修、耐荷性能の向上を目的とするものを補強とする。コンクリート構造物の代表的な劣化原因としては塩害・中性化・アルカリ骨材反応・化学的侵食等を挙げることができるが、補修を必要とする劣化の中では塩害または塩害と中性化の複合劣化の頻度が非常に高い。そこで、本文では塩害に対する補修について述べることにする。塩害補修では、有害な塩化物イオン量がコンクリート中に残存すると再劣化が生じる。写真 - 4 は断面修復箇所周辺の塩化物イオンを EPMA で分析した結果である。写真中で赤に着色した部分が塩化物イオンの分布を示している。この様に有害な塩化物イオンをコンクリート中に残した状態で補修すると写真 - 5 に示すように再劣化が生じることとなる。このため、塩害補修では有害な塩化物イオン量を超える部分のコンクリートを除去し、断面を修復することが重要である。ひび割れ補修工法や表面被覆工法は予防保全としては効果が期待できるが、内部の塩化物イオンの除去ができないため、塩害劣化が進行した場合は十分な補修効果が期待できない。したがって、このような場合、断面修復工法がもっとも効果的な工法として選定されることが多い。一方、PC 構造物で断面修復工法を採用する場合、プレストレスが導入されているため、断面を除去すれば残された断面に導入されているプレストレスが集約されることとなる。表 - 1 は、PC 桁を実際にウォータージェットではつた時を想定して図

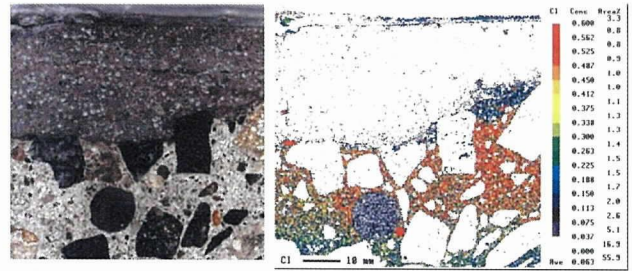


写真 - 4 断面修復箇所周辺の塩化物イオンの分布

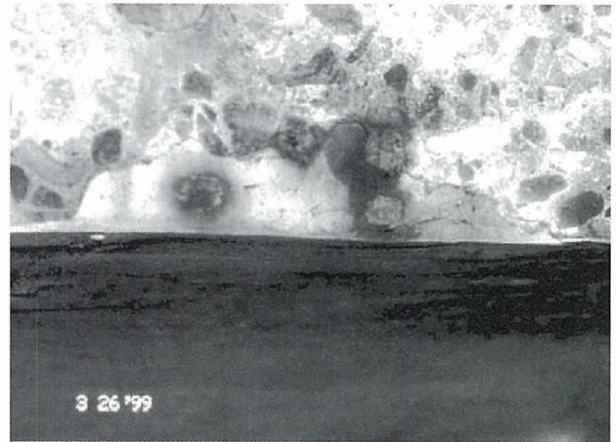


写真 - 5 断面修復箇所周辺の鉄筋の腐食

- 1 に示すようにはつり深さを変化させたときの残存断面のプレストレス増加を FEM 解析により求めた結果を示している。ケース 1 のはつり深さはウエブ部 30 mm、下フランジ部 40 mm であり、はつり範囲はスターラップ位置までである。ケース 2 は、ウエブおよび下フランジのはつり深さをそれぞれ 45 mm および 60 mm とし、ウエブ部でスターラップの裏側まで、下フランジでは軸方向鉄筋裏側まで

表 - 1 FEM 解析結果

下縁圧縮応力度 (N/mm ²)		はつり前	はつりケース 1	はつりケース 2	はつりケース 3
撤去桁	計算値	10.85	15.95	19.84	31.86
	道示許容値 ^{※1}	18.75	18.75	18.75	18.75
実橋 ^{※2}	計算値	7.26	11.64	14.96	25.06
	道示許容値	15.00	15.00	15.00	15.00

※ 1 施工時間割増しとして規準となる許容値を 1.25 倍している。
 ※ 2 ここでの「実橋」とは、橋面荷重を考慮した計算値を意味する。

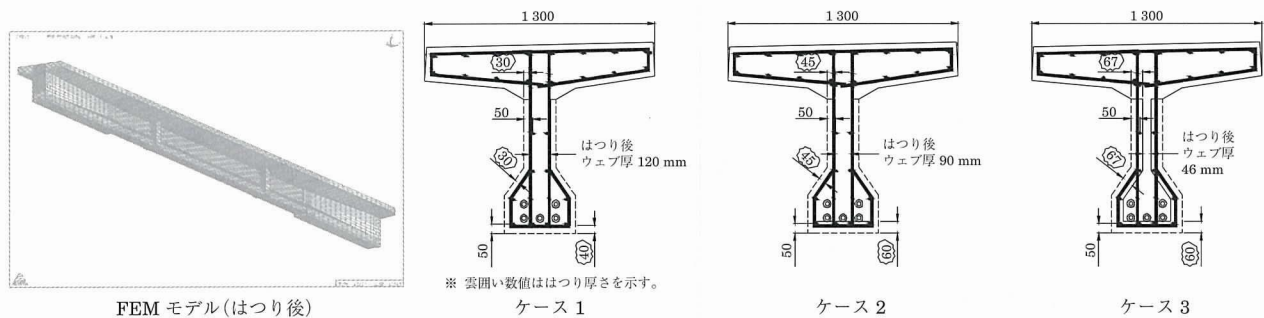


図 - 1 FEM によるはつりによるプレストレスの変化の検討

れぞれはつった場合に相当している。ケース3は、はつり深さ67mmとし、ウェブでも軸方向鉄筋裏側まではつった場合に相当している。なお、表-1の結果には断面修復材の自重が反映されていないため、実際には圧縮応力度増加は若干緩和されると予想される。

表-1に示すとおり橋面荷重が載った状態でもウェブのスターラップ裏側まではつると約2倍の15N/mm²まで上昇し、道示の許容値に匹敵する状態になることがわかる。このように一度にはつる深さは限界があり、ウェブ部軸方向鉄筋の裏側まではつる必要がある場合は段階的にはつりと断面修復を繰り返す等の施工手順の配慮が必要であることがわかる。写真-6に撤去桁をケース2に相当する深さではつった状況を示す。写真に示すように実際に供用している実橋をはつると劣化が進行していた箇所等が脆弱部となり、ウォータージェットを照射したとき、局部的に深くはつられる場所が発生することがわかる。PC桁をはつる場合ははつり深さにばらつきが生じることも勘案して計画を立てる必要がある。

PC構造物を断面修復する場合、プレストレスが導入されている既設コンクリートの周辺にRC断面として修復断面部分が一体化した構造物として挙動することが予想される。この場合、既設コンクリート部分は先程の例で示したように、はつられることにより導入プレストレスが上昇している。一方、修復断面はRC断面としてしか挙動しないため、一般に既設コンクリート部分より小さい荷重でひび割れが発生することとなり、修復断面の材料によっては、設計活荷重の範囲内でひび割れが発生する可能性もある。このため、PC構造物では事前に断面修復後の修復断面におけるひび割れ発生に対する耐久性の検討を行っておく必要があると考えられる。また、検討の結果、設計荷重に対して有害なひび割れが発生する可能性がある場合は、よりひび割れ発生ひずみの大きい断面修復材を選定するか、外ケーブル補強と併用して修復断面のひび割れ幅を制御する必要があると思われる。

以上のことを踏まえて、JHとPC建協との共同研究では断面修復後のひび割れ発生状況や耐荷挙動の確認を目的として写真-1に示した撤去桁のうちの1体を用いて写真-6



写真-6 ウォータージェットによる撤去桁はつり後の状況

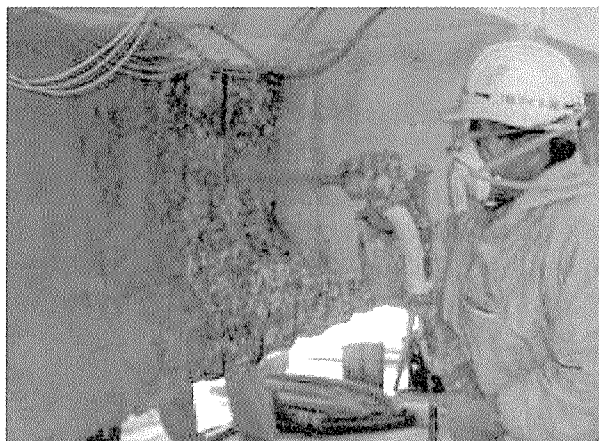


写真-7 吹付け工法による断面修復状況

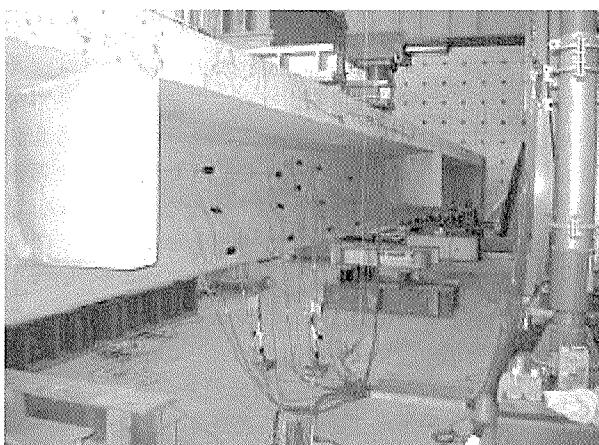


写真-8 断面修復後の桁の荷重試験

に示すウォータージェットによるはつり作業および写真-7に示す吹付けによる断面修復後、写真-8に示すような荷重試験を行っており、現在データの取りまとめ中である。実験結果はなるべく早く公表する予定であり、この実験によりPC構造物を断面修復する場合の耐久性を含めた設計の考え方に関する情報を提供できるとと思われる。

4. 補強工法の効果ならびに適用上の留意点・適用限界に関する検討

PC構造物が耐荷性能の向上を求められる場合には、車両の大型化等により設計上より大きな活荷重を考慮する必要が生じた場合とPC鋼材が腐食し既設構造物のプレストレスが損失し、耐荷性能が低下した場合とが考えられる。このうち後者については最近、過酷な劣化環境下にあるPC構造物の中でPC鋼材が腐食する事例が報告されるようになり、今後早急にPC鋼材の腐食した場合の補強対策のあり方について検討しておく必要がある。そこで本文ではPC鋼材の腐食により耐荷性能が低下した場合を想定し、補強を行う場合の問題点について述べることにする。

プレストレスが損失した場合のもっとも明かな対策としては不足したプレストレスを外ケーブルにより補う工法である。外ケーブル補強により補強する場合、まず補強対象

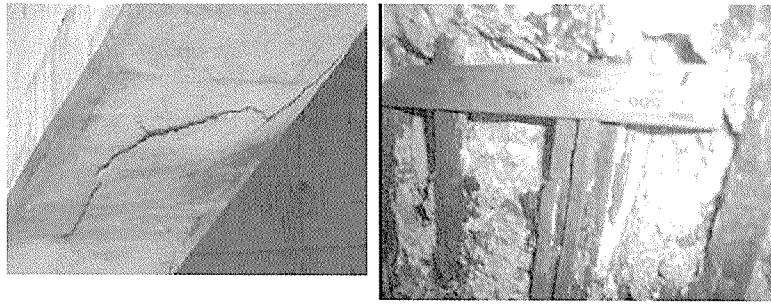


写真-9 PC鋼材の腐食状況

とする桁および設計上必要な導入プレストレスを決定する必要がある。将来に対する安全性の確保を目的として全桁で補強対策を実施する方法も考えられるが、予算上の制約から劣化程度に応じて必要な桁だけ段階的に補強する方法を計画せざるを得ない場合もある。この場合、すべての桁のPC鋼材が同様に腐食が進行することはむしろまれであり、腐食環境に応じてPC鋼材の破断が進行すると考えられる。また、過酷な腐食環境下ではグラウトが行われていてもPC鋼材が破断する可能性もある。実際、写真-9に示す橋梁では、グラウトがほぼ完全に行われていたが、凍結防止剤により耳桁でPC鋼材が破断したことが事例紹介されている¹⁾。このケースでは当初、損傷を受けた桁だけを対象とした補強計画を立案したが、格子解析の結果、反対側の桁で許容量を上回る引張応力が発生したため、結果的に両耳桁を補強することとなった。また、同橋はグラウトがほぼ完全に行われていたため、同じ桁の中でもグラウトによる付着により破断箇所から付着長だけ離れた位置ではプレストレスが損失していないことが想定された。このため、補強設計の際にはグラウトの付着によりプレストレスが損失しない場合も想定し、不利となる方の条件で設計されている。以上のような事象は実際にその挙動を確認した例がほとんどなかったため、H15年度本共同研究ではこの橋梁で補強対象とする桁にプレストレスを導入した場合の当該桁の応力変化や他の桁の挙動を確認することを主な目的として計測を行っている。計測の結果、事前に実施した格子解析結果とほぼ一致する応力が発生することが確認された。現在、引き続き写真-10に示すように、前述の写真-2に示した鋼材切断後の撤去桁を用いて、外ケーブル補強後の実桁の載荷試験を実施しており、この実験結果から外ケーブル補強した桁のひび割れ幅制御の状況および終局までの耐荷挙動等の情報を提供できると考えている。

外ケーブル補強において定着部の設計はもっとも重要である。外ケーブル補強の定着部は、あと施工により構築し既設構造物と一体化するため、ほとんどの場合PC鋼材によりプレストレスを導入し、一体化が図られている。一体化に対する安全性の照査はブロックとしてモデル化した定着部が導入しているプレストレスにより摩擦で一体化されているものとして、境界面の表面処理方法に応じて一定の摩擦係数を与えて検討される場合が多い²⁾が、表面処理や導入プレストレスを変化させて定着部の終局までの耐荷挙動を検討した事例は少なく、定着部やウエブ部に相当する

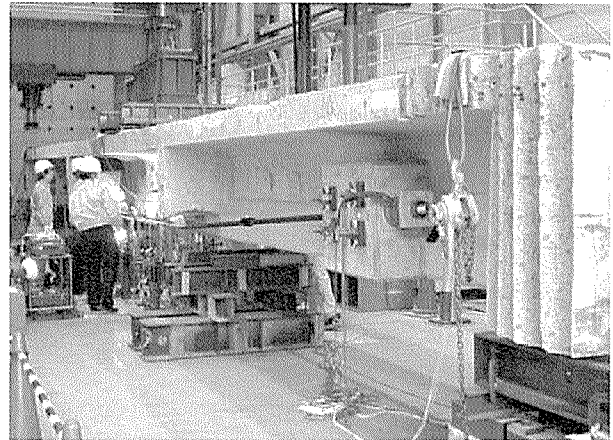


写真-10 外ケーブル補強した実桁の載荷試験

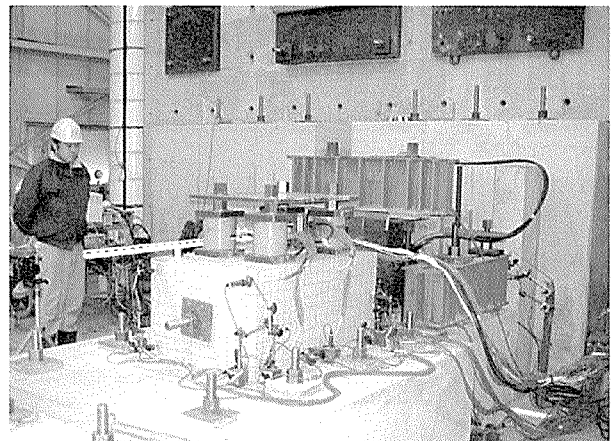


写真-11 外ケーブル定着部の破壊試験

コンクリートの打設方向やウエブ厚さの変化による角度まで再現した実験例はほとんどない。また、定着部を一体化するためのプレストレスはおおむね1 m以下のPC鋼材により導入されており、実際に10%以上張力が低下した例も報告されている^{3), 4)}ため、セットロスを含めて導入後のプレストレスの低下が懸念される。本共同研究では以上を踏まえてウエブと定着部との付着面表面処理や横締め張力等をパラメータとして写真-11に示すような外ケーブル定着部の破壊試験を実施しており、外ケーブル定着部の設計のあり方についての重要な情報を提供できると考えている。

5. ま と め

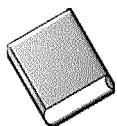
全国の供用中の橋梁に占める PC 橋の割合は RC 橋の約 2 倍である。PC 橋は耐久性が高く、ほとんどメンテナンスを行う必要がないと考えられていたが、過酷な劣化環境にある PC 橋の中には耐久性において深刻な問題が発生した橋梁が見られ始め、一部ではあるが PC ケーブルの破断により耐荷力が低下した事例も報告されている。このようななかで今後、適切な補修・補強を行うことが必要となる PC 橋は速いペースで増加すると考えられる。本稿では PC 構造物を維持管理するうえでとくに留意すべき事項について、点検・モニタリング、補修、補強のそれぞれについて概説した。本稿で述べたように PC 構造物はプレストレスが導入されているため RC 構造物とは異なった考えに基づき計画・設計・施工を行う必要がある。JH 日本道路公団とプレストレス・コンクリート建設業協会では早期の PC 構造物の補修・補強技術の確立を目指して、実物大実験を中心とした検討を行っており、その一部は本稿で速報として紹介した。今後、実験結果の詳細を早期に公表し、PC 橋の補修・補強に関する要領を整備したいと考えている。また、

構造物の維持管理には個々の構造物で高度な技術判断を行うことのできる技術者が必須であり、PC 橋の補修・補強に関する専門的技術者の育成が望まれる。最後に本共同研究にあたっては横浜国立大学名誉教授池田尚治博士にご指導、ご尽力を賜っている。ここに心から感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 西川孝一, 石村勝則, 野島昭二, 江良和徳: 外ケーブルにより補強する PC 合成桁橋の補強効果の検証, 第 13 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.451-456, 2004 年 10 月
- 2) プレストレスト・コンクリート建設業協会: 外ケーブル方式によるコンクリート橋の補強マニュアル (案), 1998 年 10 月
- 3) 長田光司, 下登新一, 野島昭二, 藤原保久: 外ケーブルにより補強する PC 橋の定着部に関する検討, 第 13 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.457-460, 2004 年 10 月
- 4) 野島昭二, 會澤信一, 佐藤正明, 吉田光秀: 外ケーブル補強に関する補強効果の経時的検証, 第 13 回プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.461-466, 2004 年 10 月

【2005 年 2 月 14 日受付】



刊行物案内

プレストレスコンクリート構造物の 新たな動向

第 32 回 PC 技術講習会

(平成 16 年 2 月)

頒布価格 会員特価: 5 000 円 (税込み・送料別途 500 円)
非会員価格: 6 000 円 (税込み・送料別途 500 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会