

首都高速道路の PC 橋の維持管理の取組み

石田 和久*

首都高速道路（以下、首都高速）の構造物は古い路線でまもなく 60 年を迎える。初期の供用以来、社会情勢や交通状況の変化に対応した不断の維持管理により安全な道路を提供している。管内における PC 橋は、高度経済成長期に建設された橋梁が多く、それらの橋梁に経年に伴う劣化が生じている。本稿では、首都高速の PC 橋の現状と、長期にわたり健全に使い続けるために行った調査、補修ならびに実験について概説する。

キーワード：ゲルバー部連続化、PC 鋼棒突出防止対策、非破壊検査、耐荷性能評価

1. はじめに

首都高速は 1 日約 100 万台のお客様に利用していただいており、首都圏の自動車交通の大動脈として、社会経済活動を支える基幹的な役割を担っている。首都高速ネットワークは 2015 年の中央環状線的全線開通により、都心環状線から延びる放射道路を二つの環状線で結ぶネットワークが完成し、大きな転換点を迎え、2020 年 3 月には東名高速道路と接続する横浜環状北西線（7.1 km）が開通して現在の管理延長は約 327 km となっている。このうち、40 年以上を経過した延長が約 40%，30 年以上を経過した延長が約 60%以上に達し、構造物の高齢化が進行している（図 - 1）。また、都市内高速道路という立地上、構造物の 75%が高架橋であり、さらに大型車交通量が多いという苛酷な使用状況などが加わり、構造物の維持管理に要する労力は大きい。このような状況において、将来にわたって首都高速の安全性を確保するためには、現場が直面している課題を明らかにし、道路構造物のきめ細やかな点検、的確な補修・補強、長期的な安全性を確保するための大規模更新・修繕、維持管理の高度化、効率化などの安全・安心を追求する取組みを進める必要がある。

本稿では、首都高速における PC 橋の維持管理の取組みと今後の展望に焦点を当て概説する。

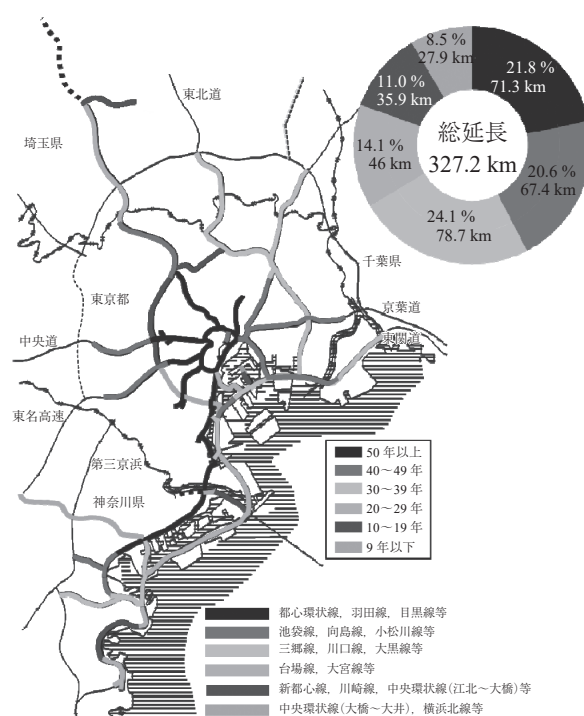


図 - 1 首都高速道路の経過年数

2. PC 構造物の現状

2.1 維持管理の状況

都市内高速道路の用地の制約上、鋼橋が圧倒的に多く、約 12 000 径間の橋梁のうち、PC 橋は約 2 000 径間（16%）に留まる。床版は、RC 床版の約 10 000 径間（83%）に対して、PC 床版はわずか約 500 径間（4%）である。橋脚は、約 9 000 基のうちコンクリート橋脚が約 6 000 基（67%）である。このことから、首都高速の橋梁におけるコンクリート構造物の日常の維持管理は、床版（高欄含む）および橋脚に重点が置かれている状況である。

2.2 構造物の損傷傾向

コンクリート構造物のうち、対応を要する損傷数は、RC 床版（高欄含む）が全体の約 65% ともっとも多く、次いで PC 桁と橋脚がおおの約 15% であり、どの構造物に



* Kazuhiro ISHIDA

首都高速道路(株)
保全・交通部

おいても、ひび割れ、剥離（鉄筋露出）といった損傷が大半を占める。なお、PC 桁のひび割れは、主に PC 鋼材の定着部の後埋めコンクリートに生じているものである。

2.3 PC 橋の損傷

PC 橋は大半が 30 年以上経過しており、PC 橋に特有の不具合や変状が確認されている。具体には、グラウトの充填不良、定着部後埋めコンクリートやゲルバーヒンジ受桁部のひび割れ・剥離、PC 鋼線・鋼棒の破断、シース管の露出・発錆、ASR、床版間詰打継部の剥落などである。

3. PC 橋を健全に保つための維持管理の取組み

3.1 ゲルバー部の連続化

1 号羽田線の勝島地区に位置する 50 年を経過した PC 連続箱桁橋の一部のゲルバーヒンジ受桁部に、ひび割れや剥離などの損傷が確認され、ひび割れは、支承を固定しているアンカー部から垂直方向に伸びており、支承は腐食していた（写真 - 1）。これらの損傷は、狭隘で維持管理が困難なゲルバーヒンジに起因したものであった。そこで、維持管理が困難なゲルバー部の構造改良を含めた橋梁全体の耐久性ならびに耐震性の向上を目的としてゲルバー部の連続化を行った。ゲルバーヒンジは外ケーブルによって連続化（図 - 2）を図り、桁下縁およびウェブ面に炭素繊維補強を併用する設計としたが、すべての径間を連続化することは構造的に困難であったため、連続化は最大 9 径間として、連続化後の主桁応力や移動量などを考慮し、連続化範囲を超える箇所については下部工を新設し、新たに反力を支持させ、ゲルバー部を構造的に分離した（図 - 3）。このほかに連続化による構造変化後の耐震設計により、支承取替えや下部工の補強を行ったこともあり、完了まで 6 年を要した難工事であった¹⁾。首都高速には PC 桁および RC 桁のゲルバー構造が約 90 径間存在する。現在のところ重大な損傷は見当たらないが、損傷の進行状況をとくに注視している。

3.2 PC 鋼棒の突出防止対策

首都高速においては、2007 年に横締め PC 鋼棒の破断、突出が確認されたことを契機に、二方向繊維シートと帯鋼板の併用による突出防止対策を予防的に進めている。一方で、箱桁のウェブなどに多用されるせん断 PC 鋼棒（以下、鉛直 PC 鋼棒）は、使用本数は約 20 000 本と横締め PC 鋼棒よりも多いが対応には至っていない。首都高速では 2018 年に初めて鉛直 PC 鋼棒の破断を確認した。長さ 2.6 m の鋼棒の中央部で破断し、グラウトは未充填であった。変状としては、かぶりコンクリートの剥離に留まり、鋼棒の突出には至っていなかった（写真 - 2）。鉛直 PC 鋼棒が配置される上方は専ら車道であり、下方は高架下の空間がさまざまな形態で利用されていることから、破断に伴う第三者被害が懸念される。そこで、首都高速では、国立大学法人横浜国立大学と共同研究契約を締結し、鉛直 PC 鋼棒の突出リスクを応用要素法による数値解析を用いて、突出による挙動を分析している（図 - 4）²⁾。



写真 - 1 ゲルバー部損傷状況



図 - 2 外ケーブルによる連続化

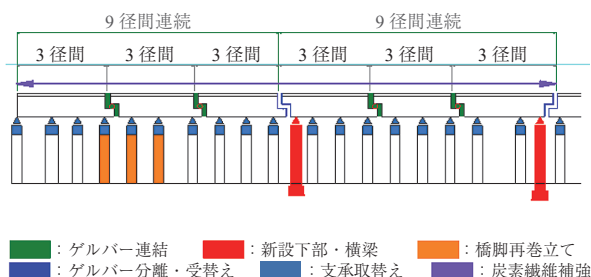
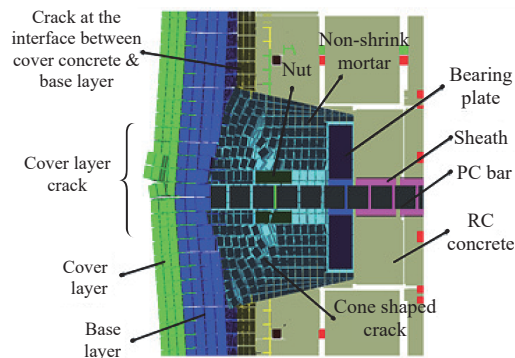


図 - 3 ゲルバー部連続化の全体概要



写真 - 2 鉛直 PC 鋼棒の破断に伴う損傷



AEM numerical simulation

図 - 4 数値解析による突出挙動分析



写真 - 3 鉛直 PC 鋼棒突出実験

また、試験体を用いた鋼棒の突出実験を行い(写真 - 3)、効果的かつ省工程の突出防止工法の開発に鋭意取り組んでいるところである。

3.3 グラウト充填度の非破壊検査手法の精度検証

首都高速の PC 橋は 1980 年代までに大半が施工されており、前項の突出した PC 鋼棒はいずれもグラウト充填が不十分であり、鋼棒の腐食が進展したことによる破断であった。充填が不十分である要因には、建設当時はグラウト材料の充填性や施工技術が不足していた背景もある³⁾。首都高速では主ケーブルの破断事例は確認されていないものの、グラウト充填不足が確認されている。これまでのグラウト充填調査は主としてコンクリート削孔を伴う目視調査が実施されてきた。しかし、この手法では健全な PC 鋼材を損傷させる可能性があり、構造物へ与える影響から望ましくない。また、近年では、X 線透過法、超音波および衝撃弾性波を用いた各種非破壊検査が採用されてきているが、適用性や精度について明らかにされていない。そこで、グラウト充填状況の異なる実物大 PCI 桁試験体を用いて、各種非破壊検査手法の適用性や精度を検証した。検証は、非破壊検査結果と解体後の状態の照合により行った。

X 線透過法(300 kV)、広帯域超音波法は下フランジの最下段やウェブの PC 鋼線には有用であったが、X 線透過法(300 kV)ではウェブ厚 300 mm 程度が適用限界であった。衝撃弾性波法は、ウェブ厚 200 mm 一定の単配置のケーブルであれば、ある程度の精度が認められたが、並列配置のケーブルでは適用が難しかった。また、高出力の X 線(950 keV)装置(写真 - 4)を用いて、桁端のウェブ厚変化部(厚さ 450 mm)、ウェブ厚 200 mm、下フランジのグラウト充填状況を検査したところ、ウェブ厚変化部と下フランジでは画像判定が困難となり、高出力の有意性は認められなかった。しかしこれは、散乱 X 線の影響が鮮明度を低下させた可能性も疑われた。

X 線透過法や広帯域超音波法は、かぶりやケーブル配置、シース径などの条件により適用可否が左右される課題がある。そこで現在では、グラウト充填検知精度の向上と、PCI 桁の下フランジなどの非板状構造物の内部欠陥探査方法の確立を目的として、弾性波の表面観測波と反射波の位相の変化から欠陥位置、大きさを推定できる探査手法の研究を進めている。



写真 - 4 高出力 X 線装置

3.4 破断した PC 鋼材を有する PC 桁の耐荷性能

(1) 実験目的

PC 鋼材の破断は PC 構造物にとって重大な損傷であるが PC 鋼材の破断が耐荷性能に及ぼす影響、破断による性能低下の検出可否、検出可能な場合の調査手法については明らかにされていない。そこで、PC 鋼材が破断した場合の耐荷性能および評価方法を明らかにすることを目的として、実物大 PC 桁試験体を用いた載荷試験を実施し、PC 鋼材破断と耐荷性能の関係を検証した⁴⁾。

(2) 載荷試験方法

グラウト充填割合の異なる 4 体のポステン PCI 桁(図 - 5)を 1960 年代の標準的な設計仕様で製作し、図 - 6 に示すとおり PC ケーブル切断前および 1 束ずつ切断する度に、繰返し載荷(75 kN ~ 185 kN)および静的載荷を実施し、PC ケーブルを全束切断するか、載荷しても荷重が上がらずたわみのみ増加する状態に至るまで繰返し実施した。静的載荷は、支間中央の桁下縁に許容曲げ引張応力度 1.5 N/mm²を生じさせる 275 kN を最大荷重とした。

(3) PC 鋼材破断による耐荷性能の変化

グラウトが全区間に充填されている図 - 5 の試験体「充」および試験体「未-2」は、全 PC ケーブルを切断してもひび割れは発生せず、荷重 - 変位の関係にも変化はみられなかった。試験体「未-1」および試験体「未-3」は、切断する度に残留変位が進行し、試験体「未-1」は 6 束、試験体「未-3」は 3 束切断後に剛性の低下が顕著に表れた(図 - 7)。

これより、グラウトが適切に充填されていれば、破断しても曲げ剛性に与える影響が少ないこと、未充填の場合でも、PC ケーブルの破断束数が 1/3 程度までは、曲げ剛性の低下はほとんどないことを確認した。

(4) 耐荷性能低下の検出指標の検討

耐荷性能の低下を初期ひび割れ発生前に把握する指標として、固有振動数、対数減衰率およびたわみの変化に着目した。しかし実験結果からは、固有振動数および対数減衰率の変化点は、初期ひび割れ発生以降に現れたため、耐荷性能を評価する指標とすることは難しかった。一方で、支間中央部のたわみについては、目視確認によるひび割れ発生段階よりも早期に顕著に変化が現れたことから、たわみの変化に着目することが性能低下を早期に発見する方法として有効と考えられた。

試験体名	充填割合 (PC グラウトの水セメント比)
充	 全区間充填 (42%)
未-1	 排出側未充填 (42%)
未-2	 両側定着部付近未充填 (62%)
未-3	 全区間未充填 (-)
備考	・上縁定着 1 本, 端部定着 1 本に省略して表示 ・凡例:  充填,  未充填 (空隙)

図 - 5 試験桁の PC グラウト充填割合

4. 将来を見据えた維持管理手法の検討

首都高速の PC 橋は古い年代に建設されたものが多く、不具合などが散見されているものの、一部の構造改良を除き、これまで性能向上を目的とした補強は行われておらず、それでも建設時と変わらない構造美を保ち使われ続けている。PC 橋はもっとも重要な部材の PC 鋼材が部分的に損傷しても、直ちに供用制限に陥ることはなく冗長性が高い構造物である。しかし、その PC 鋼材など内部の劣化状態は詳細調査では全容の把握が不可能である。また、内部に損傷が発生していたとしても外観に変状が現れにくい。ため、PC 橋の健全度の厳密な評価は容易ではない。PC 橋の健全度の評価を適切に行うため、今後、グラウトの充填度検知精度の向上、PC 鋼材の破断検知、残存プレストレスなどを非破壊により探査可能な技術を探求し、実装化を目指すと共に、PC 橋の劣化による限界状態⁵⁾を見据えた構造性能評価方法について研究を進めていく。

5. おわりに

首都高速では、近年の新設路線において PC 橋は少なく、そのため、PC 橋の設計・施工のノウハウを有している技術社員は少なくなっている。管理する橋梁のうち、PC 橋の割合は少ないとはいえ、交通ネットワークを支える構造の一部であるため、将来にわたり安心して使用できるように、維持管理のノウハウの蓄積と新たな点検、補修技術の開発に不断の努力を重ねるとともに、得られた知見を後進に向けて継承する仕組みを構築していきたい。

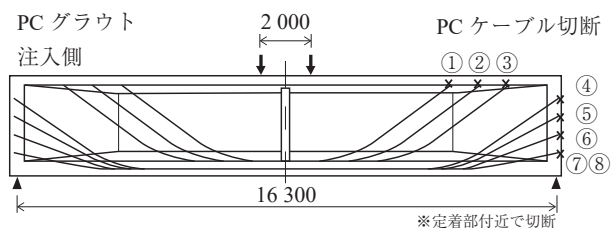
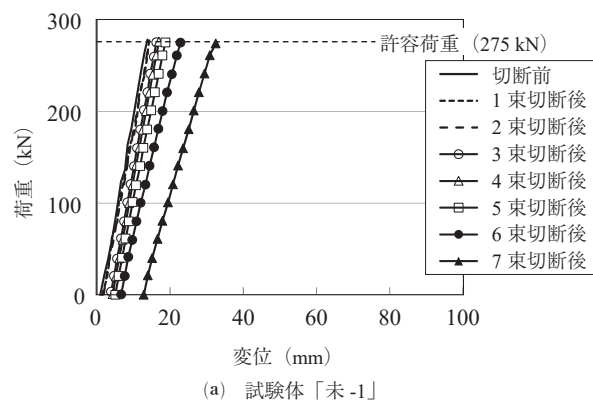
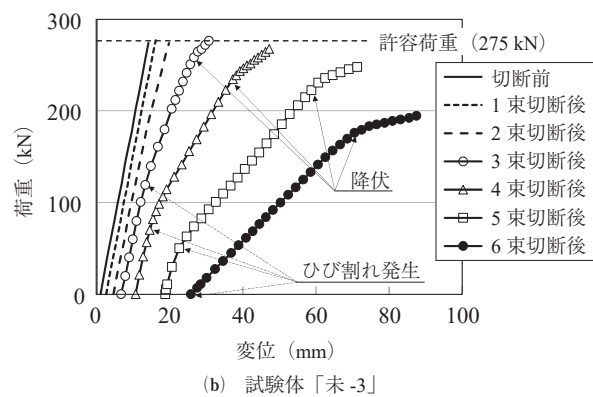


図 - 6 荷重位置と PC ケーブル切断位置



(a) 試験体「未-1」



(b) 試験体「未-3」

図 - 7 切断に伴う支間中央の荷重 - 変位曲線の変化

参考文献

- 1) 寺内威夫, 中村 充, 小島直之, 花房禎三郎, 高島秀和: 下部工新設を伴う PC ゲルバー橋の連続化, 橋梁と基礎, 建設図書, pp.5-10, 2016.6
- 2) 福原牙基, 細田 暁, Salem Hamed, 蒲 和也, 深谷卓央: 応用要素法を用いた PC 鋼棒の破断突出解析と舗装の突出抑制効果の基礎的検討, 土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会, V-397, 2019.9
- 3) 既設ポストテンション橋の PC 鋼材調査および補修・補強指針, プレストレストコンクリート工学会, 2016.9
- 4) 蒲 和也, 御嶽 譲, 大宮 勲: 破断した PC 鋼材を有する PCI 桁の耐荷性能評価, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.27, pp.223-226, 2018.11
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, p.61-66, 2017.11

【2020 年 9 月 18 日受付】