

特集：将来の安全・安心な国土の礎となる土木技術

コンクリート道路橋の維持管理技術の向上に向けて — 腐食PCはりのせん断耐力評価 —

花井 拓* 中村英佑** 早川智浩*** 村越 潤**** 木村嘉富***** 田中良樹*****

1. はじめに

近年、自治体の橋梁点検の進捗などに伴い、塩害やアルカリ骨材反応などにより劣化損傷の顕在化したコンクリート道路橋が多く確認されるようになってきている。こうした既設コンクリート道路橋を効率的に維持管理していくためには、供用性や補修・補強の要否に対して耐荷性能に基づいた合理的な判断を下すことが必要である。しかしながら、劣化損傷の生じたコンクリート道路橋の耐荷性能を評価する手法は確立されておらず、早急な対応が必要とされている。

写真-1は、北陸の日本海沿岸で約40年供用したPC橋である（手前の主桁2本）。塩害により桁内部の鋼材が激しく腐食し、一部ではPC鋼材の破断も生じている。塩害により内部の鋼材が腐食した場合、曲げ耐力が腐食の程度に応じて低下することは知られているが、鋼材腐食が生じた場合のせん断耐力、特にPC橋におけるせん断耐力については研究の事例が少ないのが現状である。写真-1のような腐食が生じた場合、剥離したコンクリートかぶり部分や、腐食したPC鋼材・せん断補強鉄筋、更にはそれによるプレストレス低下をせん断耐力評価にどのように考慮するかについては、不明な点が多い。特にせん断力が曲げモーメントに比して大きくなる桁端部付近では、せん断耐力の評価が重要である。



写真-1 PC桁端部の塩害劣化

本研究では、桁端部付近に鋼材腐食の生じたPC橋におけるせん断挙動を確認するために、電食により人工的に鋼材腐食を生じさせたPCはり供試体を製作し、せん断載荷試験を行った。また、あわせて電食過程における劣化の進展を非破壊検査手法により確認した。^{1),2)}

2. 試験方法

図-1に、基本となるPCはり供試体の寸法形状を示す。コンクリートの圧縮強度の目標値を50N/mm²とし、実際の材料試験結果では58～60N/mm²を確認している。この供試体を基準として、鋼材腐食の有無、プレストレス量、かぶりなどをパラメータとして供試体を7体製作した(表-1)。腐食を模擬したM-6-Mでは、C-6-25aの腐食の状態を参考に以下の通りとした。

- 1) せん断補強筋下側を切除し腐食破断を再現
- 2) 載荷前にせん断スパンのかぶりを除去し、腐食によるかぶり剥離を再現
- 3) PC鋼より線を1本切断し腐食破断を再現

表-1 供試体の主なパラメータ

供試体	腐食の有無	プレストレス	かぶり
N-6-25	無	有	標準
C-6-25a	有	有	標準
C-6-25b	有	有	標準
C-0-25	有	無	標準
C-10-25	有	有(大)	標準
C-6-50	有	有	大
M-6-M	模擬	有	はく離模擬

供試体名称：X-p-c

X 鋼材腐食 (N：腐食なし、C：腐食有り、M：腐食を模擬)

p 下縁プレストレス量 (N/mm²)

c せん断補強鉄筋純かぶり (側面、下面) (mm) (Mは、かぶりの剥離を模擬)

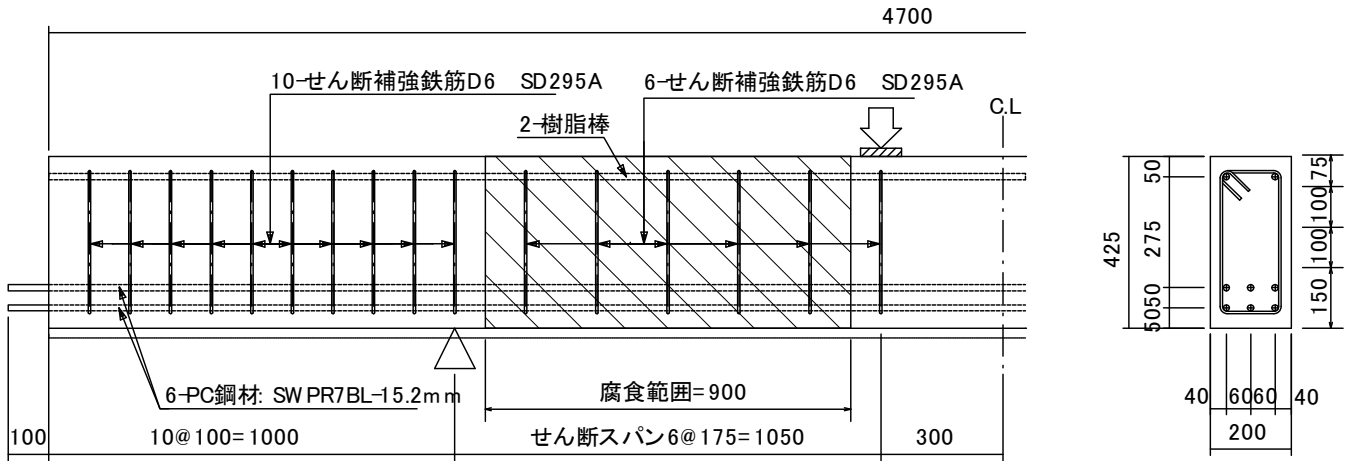


図-1 PCはり供試体の寸法形状 (C-6-25-a) (単位:mm)

PCはり供試体を製作した後、コンクリート中の鉄筋とPC鋼材を腐食させるために電食により人工的に腐食を発生させた。図-1の電食の対象範囲に、ステンレス板を用いて供試体の側面と下面を囲んだ水槽を設置し、これを濃度3%の塩化ナトリウム水溶液で満たして、ステンレス板と内部鋼材の間に通電を行った。通電の概念図を図-2に、通電の状況を写真-2に、電食終了後の外観を写真-3に示す。



写真-3 電食終了後の外観

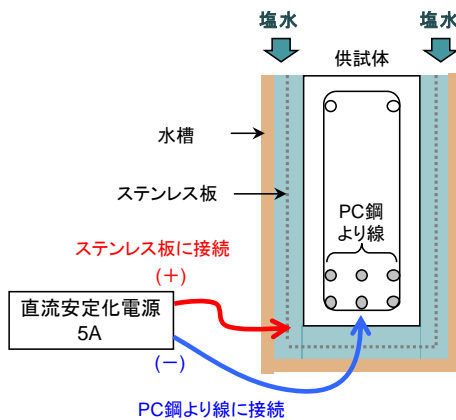


図-2 電食の概念図



写真-2 電食の状況

また、通電期間中には、腐食によるひび割れや、かぶりコンクリートの剥離進展を確認するために、通電を一時的に停止し、ひび割れ状況の確認、非破壊検査手法による調査を実施した。

電食完了後に二点曲げ単調載荷による載荷試験を実施した。

載荷試験後にコンクリートの損傷状態を目視観察した。また、両側のせん断スパンのPC鋼より線とせん断補強鉄筋を全て取り出し、腐食状態を目視観察するとともに、質量減少率を測定した。目標とする質量減少率を20%としたが、結果としてPC鋼材約10%、せん断補強鉄筋約20%の質量減少率となった。

3. 載荷試験結果

腐食させた供試体と健全供試体の、作用せん断力と中央たわみの関係を図-3に示す。腐食させた供試体では、健全供試体と比較して、作用せん断力の最大値が約8割に低下しており、鋼材腐食によりせん断耐力が低下したことを明確に確認することができる。いずれの供試体でも、曲げひび割れ発生から剛性の低下が始まり、たわみが増大した。その後斜めひび割れの発生を経て、載荷点近傍のコンクリートの圧壊に至った。

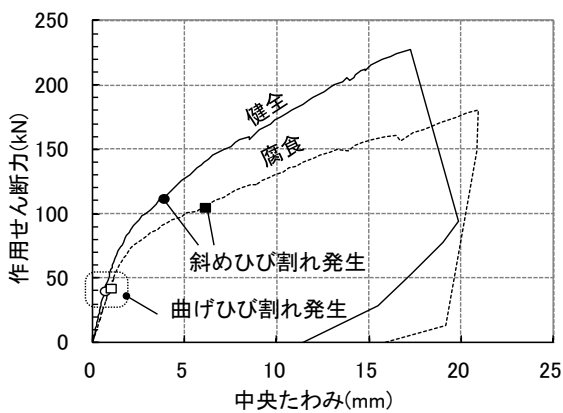


図-3 作用せん断力-中央たわみ関係

腐食させた供試体では、斜めひび割れの発生とともに、せん断スパンのかぶりコンクリートの浮きを確認されはじめ（打音による確認）、終局時には、広い範囲にわたってのかぶりの剥離・剥落が確認された（写真-4）。



写真-4 載荷終了後のかぶりコンクリートの剥離・剥落（白破線の範囲）

4. せん断耐力の評価

既往の研究において提案されている健全なPC桁のせん断耐力評価式を用い、これに実験で確認された腐食劣化の状況を考慮することにより、せん断耐力、斜めひび割れ発生荷重を計算し、今回の試験結果の評価を試みた。計算時の仮定を表-2にまとめる。

図-4に、せん断耐力の計算値と実験値を比較する。せん断耐力の計算値 V_{ucal} は、せん断補強鉄筋を用いないRCはりの斜めひび割れ時せん断力 $V_c^3)$ 、デコンプレッションモーメント（プレストレスによるコンクリートの応力度が部材引張縁で0となる曲げモーメント）をせん断スパンで除したプレストレスによるせん断耐力増分 $V_p^4)$ 、圧縮斜材角を45度と仮定したトラス理論から求めたせん断補強鉄筋負担分 V_s の和とした。終局時の前には既にせん断スパンのかぶりコンクリートが広い範囲で剥離していたことから、終局時においてかぶりコンクリートはせん断耐力に寄与していなかったと見なして、せん断補強鉄筋の純かぶり部分を控除した。また、鋼材断面積についても、試験後に計測された質量減少率を断面減少分として計算した。さらに素線の破断（腐食によるものか、載荷時のものかは不明）が確認されたPC鋼より線については、腐食を考慮した鋼材断面積に破断本数/健全本数の係数を乗じて計算した。 V_p の計算で用いる、実験前にコンクリートに導入されていたプレストレスは、PC鋼より線に設置されたひずみゲージから得られた値を用いて計算した。計算から得られたせん断耐力は、実験で得られたせん断耐力の6割から8割程度であった。実験でのせん断破壊時の斜めひび割れの角度は、計算で仮定した45度よりも浅く、これによってせん断補強鉄筋負担分 V_s が過小に評価されている可能性があること、ひび割れ発生後のアーチ効果によるせん断耐力の増分が適切に見込まれていないことなどが、両者に差が生じた要因として考えられる。

図-5に、斜めひび割れ発生荷重の実験値と、それに対応すると考えられる、計算値（ $V_c + V_p$ ）の関係を示す。かぶりコンクリートの浮きが斜めひび割れ発生以降から確認され始めたことから、この計算においては、かぶり部分に剥離が生じず、

一体となって抵抗したとして計算した。また、載荷試験中の鋼材破断音が斜めひび割れ発生後に確認されていることから、確認された素線の破断は全て斜めひび割れ発生後に生じたとし、この計算で素線の破断は考慮しなかった。全体として、計算値と実験値に近い値を示している。

表-2 計算の仮定

評価対象	評価式	かぶり	鋼材断面減少	PC鋼線破断
せん断耐力	$V_c+V_p+V_s$	非考慮	考慮	考慮
斜めひび割れ発生荷重	V_c+V_p	考慮	考慮	非考慮

V_c : せん断補強鉄筋を用いないRCはりの斜めひび割れ時せん断力
 V_p : デコンプレッションモーメントをせん断スパンで除したプレストレスによるせん断耐力増分
 V_s : 圧縮斜材角を45度と仮定したトラス理論から求めたせん断補強鉄筋負担分

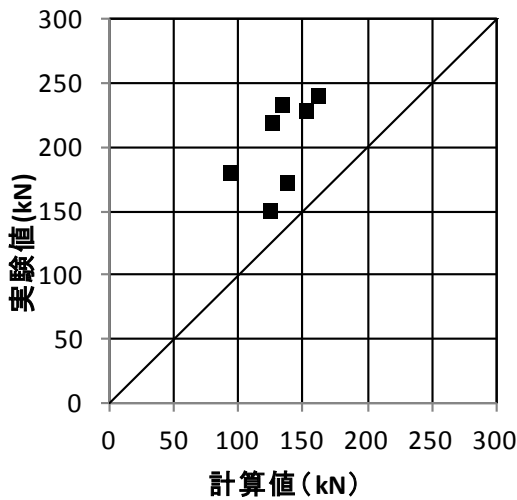


図-4 せん断耐力の実験値と計算値の比較

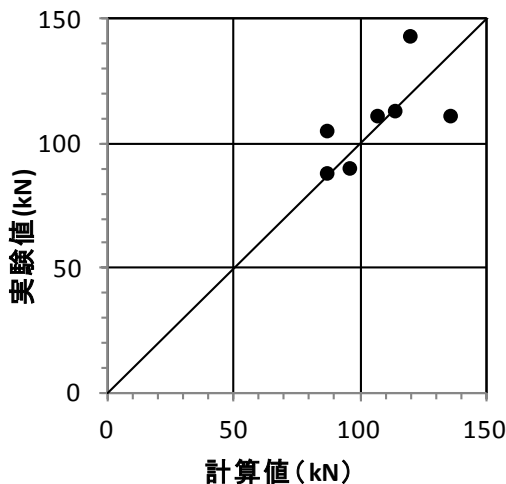


図-5 斜めひび割れ発生荷重の実験値と計算値の比較

5. 腐食劣化過程への非破壊検査手法の適用

電食期間中の劣化の進展を確認するために、通電の前後とその期間中に超音波透過法による調査を実施した。計測方法は図-6に示すとおり、桁のせん断スパン内のウェブ表面・裏面にそれぞれ端子を設置し、桁幅方向の超音波伝播速度を計測した。写真-5は、計測の状況である。写真-6は載荷により破壊が生じなかったせん断スパンで、載荷後にかぶり部分を除去した状況である。図-7は、通電1週間時点と載荷直前における超音波伝播速度をコンター図として示したものである。写真-6の剥離面での錆汁の広がり、と、載荷前の超音波伝播速度の低い部分が概ね一致する傾向が見られる。

解体後の錆汁の状態と、超音波速度の低下度合いの相関より、錆汁が生じていたと考えられる速度低下度の閾値を設定し、電食の各段階において錆汁の進展を推測したものを図-8に示す。電食の進行に伴い、錆汁がせん断補強鉄筋、PC鋼材から面的に広がっている様子が見て取れる。ただし、打音の調査においては、載荷時の斜めひび割れ発生頃までは、浮きを確認できなかったことから、錆汁の発生がそのままかぶりコンクリートの完全な剥離であったとは考えられない。

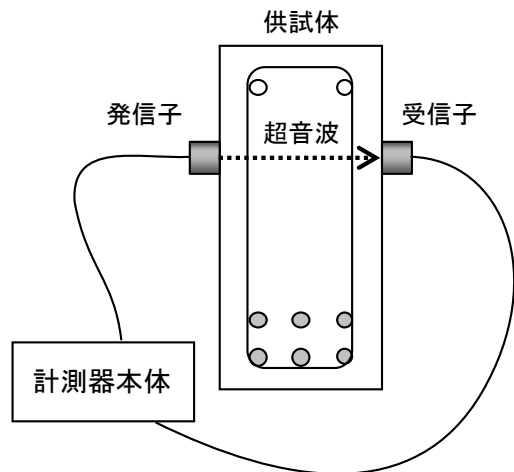


図-6 超音波伝播速度の計測方法



写真-5 超音波伝播速度の計測状況



写真-6 荷役後のかぶりコンクリート撤去状況

6. まとめ

鋼材の腐食したPCはりのせん断時の挙動を、実験的に確認した。鋼材の腐食状況やコンクリートのかぶりの一体性などを勘案すれば、既往のせん断耐力評価式で、せん断耐力を概略推定できることを確認した。

また、非破壊検査手法を用いることによって、将来的なコンクリートかぶり剥離の予兆と考えられる、錆汁の広がり把握することができた。

今後、構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)の臨床研究等において、更なる非破壊検査技術の高度化への取り組み、外観損傷度と内部鋼材腐食度の関連性調査、実橋から採取された劣化部材の荷役試験などを実施し、劣化の影響を考慮したコンクリート橋の耐力評価のマニュアルの作成に反映していく所存である。

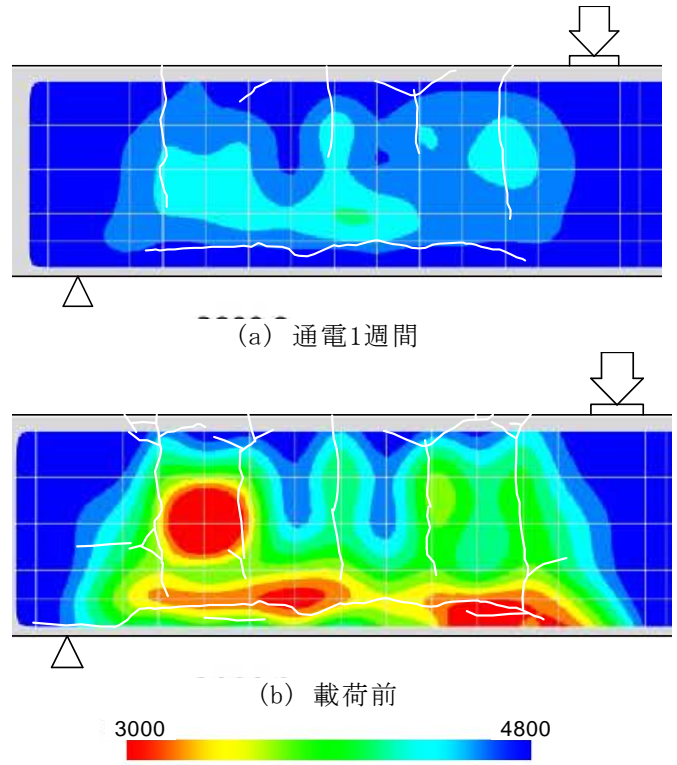


図-7 超音波伝播速度(m/s)
※腐食ひび割れを白線で示す

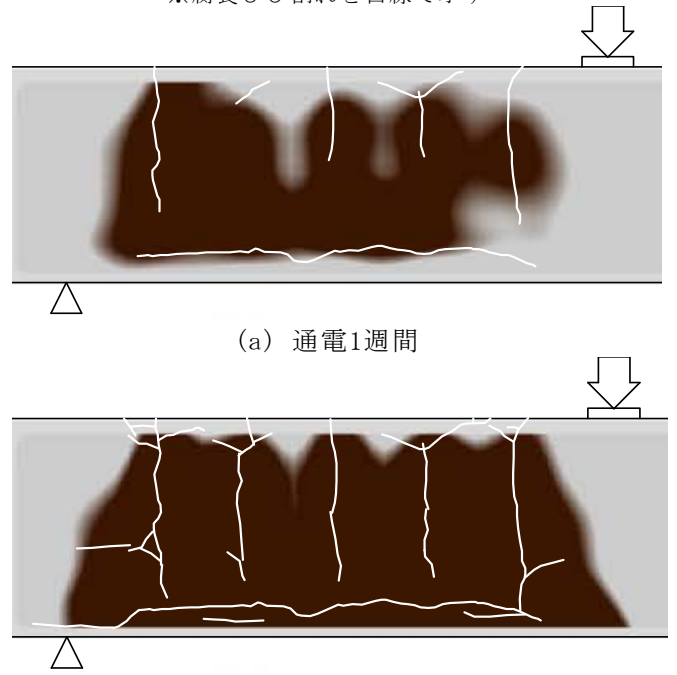


図-8 錆汁の進展状況
※各段階の腐食ひび割れを白線で示す

参考文献

- 1) 中村英佑ほか：鋼材腐食の生じたPCはり部材のせん断耐荷挙動の検討、コンクリート構造物の補修、補強アップグレード論文報告集、Vol.9、pp.411～416、2009.10.
- 2) 早川智浩ほか：鋼材腐食したPCはりのせん断特性に関する検討、コンクリート工学年次論文集、Vol.33、No.2、pp.505～510、2011.7.
- 3) 二羽淳一郎ほか：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集、第372号/V-5、pp.167～176、1986.
- 4) 建設省土木研究所、プレストレスト・コンクリート建設業協会：高強度コンクリート部材の設計法に関する共同研究報告書－高強度コンクリートを用いたプレストレストコンクリート道路橋の設計指針（案）－、共同研究報告書第138号、1995.

花井 拓*



独立行政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
Taku HANAI

中村英佑**



独立行政法人土木研究所つく
ば中央研究所材料資源研究グ
ループ基礎材料チーム 研究
員
Eisuke NAKAMURA

早川智浩***



株式会社大林組本社生産技術
本部橋梁技術部技術第一課副
課長
Tomohiro HAYAKAWA

村越 潤****



独立行政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 上席研究員
Jun MURAKOSHI

木村嘉富*****



独立行政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 上席研究員
Yoshitomi KIMURA

田中良樹*****



独立行政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
Yoshiki TANAKA