

PC 鋼材の腐食と部材の性能

田中 泰司*

高度成長期に建設されたコンクリート構造物の老朽化が進んでいるなかで、一部のプレストレストコンクリート（PC）構造物にも PC 鋼材の腐食を伴う劣化が生じている。鋼材の腐食が生じた構造物を維持管理していくためには、PC 鋼材の腐食が構造物にどのような影響を与えるのかを把握しておく必要がある。そこで本解説では、まず、腐食した PC 鋼材自体の力学特性は鋼材の径によって大きく異なること、軟鋼と比較して伸びの低下が顕著であることを示した。次に、塩害環境で供用されていた実橋梁桁の載荷試験結果と有限要素（FEM）解析との比較から、PC 鋼材の腐食を考慮した力学モデルを用いれば、解析により PC 桁の構造挙動が評価可能であることを示した。最後に、PC 鋼材の腐食状況とグラウトの充填状況を把握する方法を確立することが、性能評価の課題であることを指摘した。

キーワード：PC 鋼材、腐食、破断、伸び、FEM 解析

1. はじめに

本来、プレストレストコンクリート（PC）部材は、緻密なコンクリートが使用され、プレストレス力によりひび割れが抑制されているので、耐久性が高い構造部材である。しかし、現実には、割合としては少数ではあるものの、塩害やアルカリシリカ反応といったコンクリートの材料劣化が生じたり、施工不良によってグラウト未充填部が発生したりして、PC 鋼材が腐食している PC 構造物が存在する。劣化した PC 構造物を多数抱えている場合や、維持管理費用を潤沢には確保できない場合には、腐食が生じている PC 構造物をしばらくのあいだ、維持管理していく必要がある。その際には、PC 鋼材の腐食が進行すると、PC 構造物がどのように構造的なふるまいをするのかを知っておく必要がある。

そこで本報では、腐食した PC 鋼材の機械的性質と、腐食した PC 鋼材を有する PC 部材の力学的な挙動について解説する。

2. 腐食した PC 鋼材の機械的性質

鉄筋コンクリート（RC）構造に使用される鉄筋と比較して、PC 鋼材は腐食した場合に機械的性質への影響を受けやすい。たとえば、図 - 1 は、電食により腐食した PC 鋼材の応力-ひずみ関係を示したものである¹⁾。また、図 - 2 にはこれらの試験結果を最大荷重比および破断伸び比

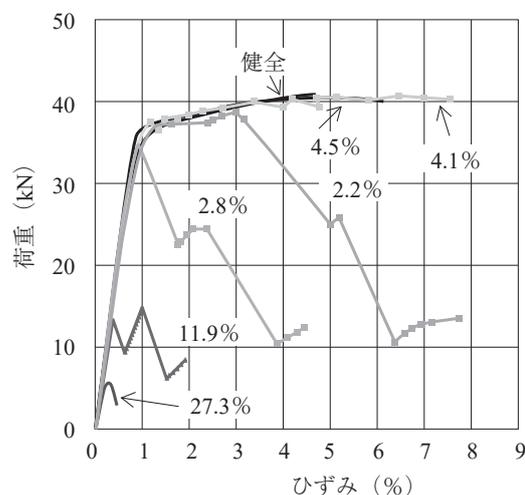


図 - 1 腐食した PC 鋼材の引張試験の例¹⁾ (ϕ 2.9-3 本より線の事例、図中の数字は質量減少率)

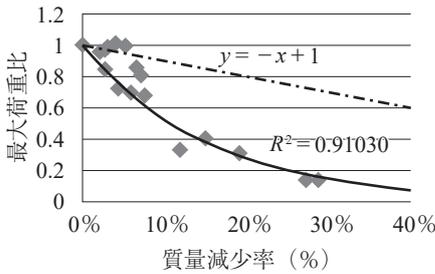
で整理したものを示す。個々の試験体によってばらつきはあるものの、腐食量が質量減少率で数%程度の場合、破断強度にはあまり変化はなくても、破断時の伸びは大きく減少し、脆性的になることがわかる。また、質量減少率が10%程度になると、強度も大きく低下する。

上述の試験結果は、 ϕ 2.9-3 本より線 (ϕ は鋼材径) という細径の PC 鋼材を対象に得られた結果である。PC 鋼材の場合、鋼材径が異なると試験結果も大きく異なる。図 - 3 は、径の異なる腐食した PC 鋼材および丸鋼の引張試験結果²⁻⁴⁾ の回帰モデルを比較したものである。最大荷重比については、 ϕ 7 の PC 鋼線と丸鋼（軟鋼）でほとんど差が見られないのに対し、破断伸びは PC 鋼線の方が小さい。また、その傾向は鋼材径が小さくなるほど顕著になる。このため、PC 鋼材が腐食した場合には、PC 鋼材の破断によって、部材が終局に至るケースが多くなることが PC 構造物の特徴といえる。一方、RC 構造物の場合には、よほど鋼材の腐食が進行しないかぎり、鋼材の伸び能力

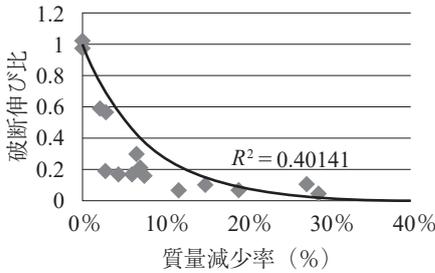


* Yasushi TANAKA

金沢工業大学
環境土木工学科 准教授

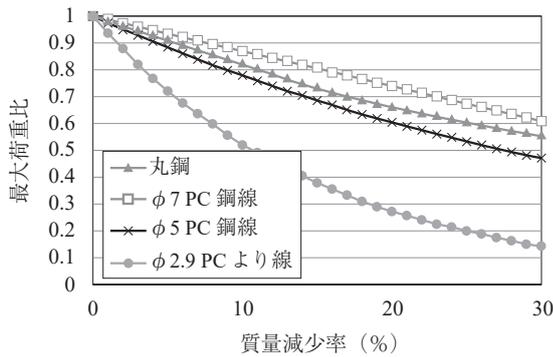


(a) 最大荷重比

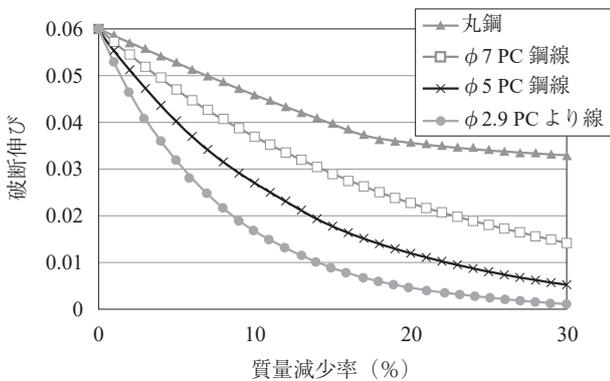


(b) 破断伸び比

図 - 2 質量減少率と最大荷重および破断伸びの関係¹⁾ (φ 2.9-3 本より線の事例, 図中の数字は質量減少率)



(a) 最大荷重比



(b) 破断伸び

図 - 3 鋼材の種類が腐食後の機械的性質に及ぼす影響 (文献 1 ~ 4 の実験結果の回帰式)

は比較的担保されているので、コンクリートの圧縮破壊やせん断破壊で終局に至るケースが多く、鋼材の破断まで至る可能性は比較的少ない。コンクリートで破壊が生じることが担保されていれば、孔食などの細かな腐食分布の影響を考慮する必要はなくなる。とくにせん断耐力などは、鋼材量の感度が比較的小さいので、おおまかな鋼材腐食量が把握できれば耐力評価が可能となる。このような鈍感さによる助けが得られないことが PC 構造物の腐食劣化の難しさを深めている。

3. 腐食 PC 鋼材を有するプレテンション桁

腐食した PC 鋼材の力学性状が把握できたとして、その知見を実橋梁の評価にどのように活かせばよいのだろうか。PC 鋼材に腐食が生じた際に、PC 橋の構造性能がどのように低下するのかを直接的に確認するために、実橋梁の PC 桁の載荷実験が少数ながら行われている^{5~7)}。本報では、プレテンション桁とポストテンション桁に分けて、実験事例を紹介する。

図 - 4 は、筆者らが載荷試験を行ったプレテンション桁の劣化状況を示したものである⁷⁾。対象とした橋梁(鱗崎橋)は、載荷試験時点で竣工から約 35 年が経過していた。日本海沿いで供用されていたために、下フランジに塩害腐食によるひび割れが発生していた(図 - 4 (b))。載荷試験後に解体調査を行ったところ、PC 鋼材が腐食しきっていたり、破断したりしている箇所が多数確認された。PC 鋼材の腐食は、位置によって大きく変化し、数十 cm 離れただけで腐食量が異なるような分布となった。その結果、有効鋼材量の減少率は 2 ~ 90 % と断面によって大きくばらついていた。図 - 5 は、下フランジの切断面写真の一例である。黒丸は切断面から 50 cm 長さの区間で腐食による



(a) 側面の劣化状況 (海側から観察)



(b) 山側の桁 (D 桁) の支承付近

図 - 4 鱗崎橋の劣化状況 (2010 年当時)

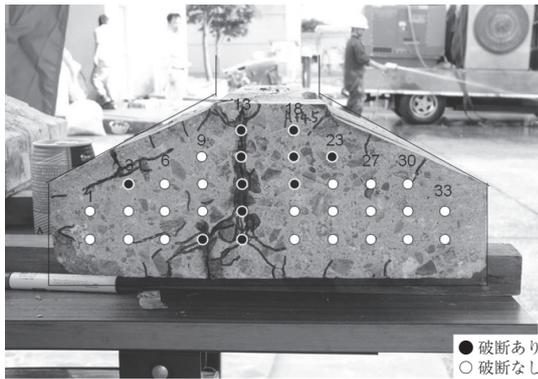


図 - 5 下フランジの切断面 (海側桁の端部付近)

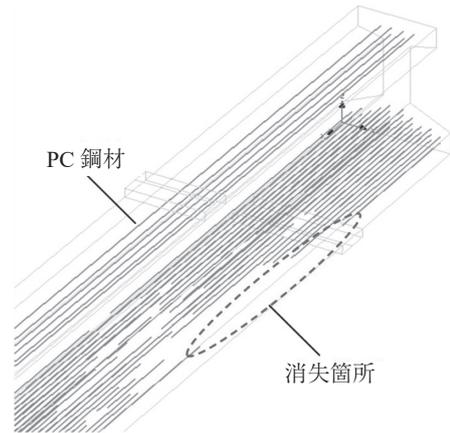
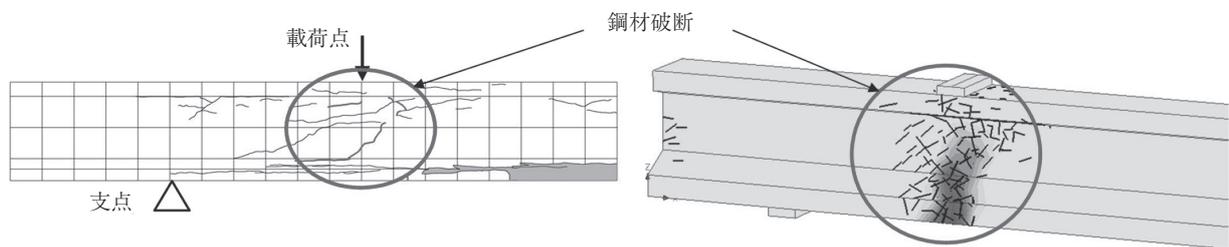
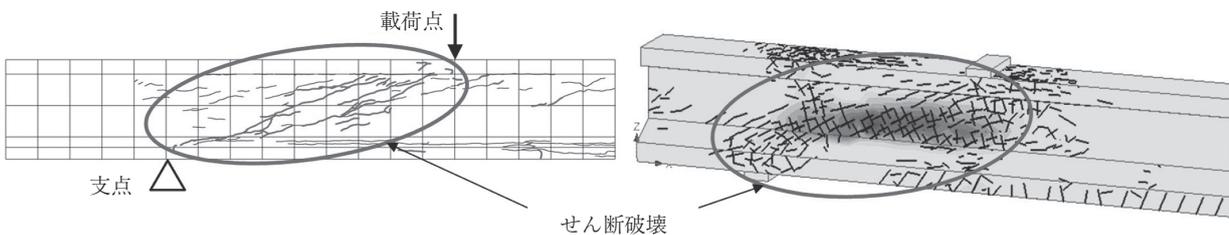


図 - 6 FEM 解析における離散鋼材要素のモデル化 (D-I)



(a) 鋼材破断で破壊した事例 (D-I 試験体)



(b) せん断破壊した事例 (D-II 試験体)

図 - 7 ひび割れ図による実験 (左側) と FEM 解析 (右側) の比較

鋼材破断が確認された PC 鋼材を示している。PC 鋼材の腐食はかぶりの小さなものから順番に発生するのではなく、この場合には垂直方向に発生しているひび割れに沿った PC 鋼材が腐食していた。ウェブに配筋された吊鋼材やスターラップが腐食し、ひび割れが発生すると、そこから海水飛沫が鋼材に沿って浸入するので、下フランジに鉛直方向のひび割れが発生したと考えられる。腐食 PC 鋼材の分布も断面によってまったく様相が異なるため、事前に正確な腐食分布を予測することは困難である。

腐食状況が断面によって大きく異なるため、隣接した桁を同じように載荷しても、試験結果は大きく異なる結果となった。腐食量が小さい場合にはコンクリートのせん断破壊で破壊したが、腐食量が多い場合には、破壊モードは鋼材破断に移行した。PC 鋼材の腐食によって破壊モードがコンクリートの破壊から鋼材破断に移行する現象は、他の橋梁の載荷試験でも確認されている⁹⁾。

部材の破壊モードが鋼材破断であるため、終局状態を精

度良く評価しようとする、腐食 PC 鋼材の力学特性を適切にモデル化することが避けられない。さらに、破断箇所を有する部材の場合には、破断箇所近傍のコンクリートと PC 鋼材の付着を適切に考慮する必要がある。そこで、図 - 6 に示すように、腐食 PC 鋼材の破断箇所を精密にモデル化した FEM モデルを作成して、実験の再現評価を行った⁸⁾。図 - 7 にひび割れ図における実験観察結果と解析結果の比較を示す。適切な鋼材モデルを用いて解析を行った場合、ひび割れの発生位置や破壊モードは実験と同様となった。図 - 8 に荷重 - 載荷点変位関係の一例を示す。図 - 2 で示した実験回帰式を腐食 PC 鋼材の応力 - ひずみ関係に用いると、破壊モードや腐食分布によらず、おおむね実験結果を再現することができた (図中の「陸らの式」)。一方、腐食した異形鉄筋の応力 - ひずみモデルを使うと、解析値は実験値を大きく上回り危険側の評価を与える結果となった (図中の「鉄筋モデル」)。このことから、PC 部材の場合には腐食の影響を RC と同様に扱うことはできな

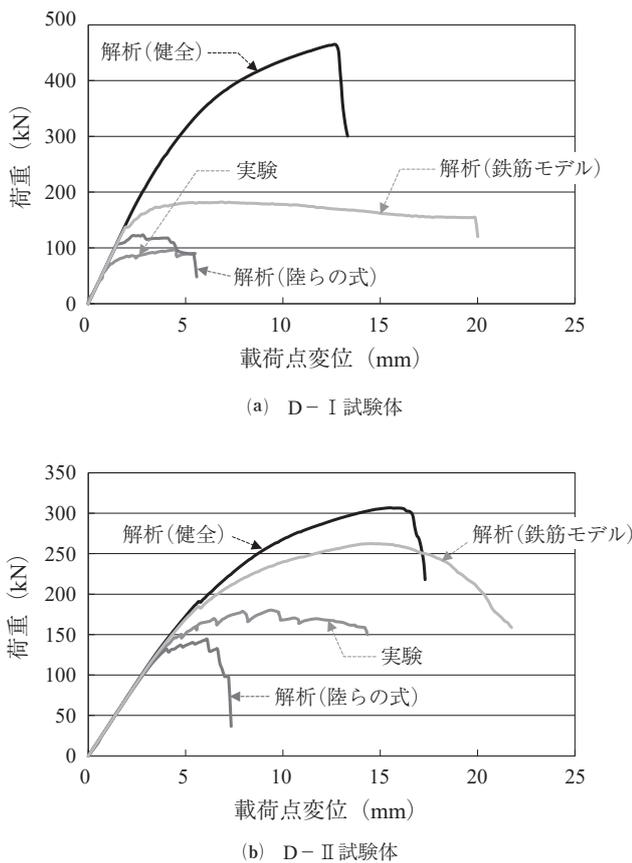


図 - 8 荷重 - 載荷点変位関係における実験とFEM解析の比較⁸⁾

いこと、腐食によってPC鋼材が破断しやすくなる影響を適切に考慮することが重要であるといえる。

FEM解析を用いずに、簡易的に耐力評価を行いたい場合には、PC鋼材の破断箇所と適切な有効定着長を考慮することで、曲げ耐力およびせん断耐力を評価することが可能である⁷⁾。また、疲労強度については、破断箇所と有効定着長を考慮して、静的な曲げ耐力およびせん断耐力を算定し、通常のS-N曲線で疲労強度を算定することで、評価することができる⁹⁾。ただし、これらの知見は鋼材径が十分に小さく、PC鋼材とコンクリートとの付着が比較的大きい部材で得られた結果であるので、付着が顕著に劣化している場合については、その影響を適切に考慮する必要がある。

4. 腐食PC鋼材を有するポストテンション桁

ポストテンション方式のPC橋は支間が大きくなるため、実橋桁の載荷試験は実施例が少ない。そのなかでも、土木研究所で実施された載荷試験^{6, 10)}では、塩害劣化したポストテンションPC桁を破壊に至るまで載荷しており、貴重である。ここでは、土木研究所で行われた実験のうち、旧芦川橋の載荷試験を対象に、再現解析を実施した事例を紹介する¹¹⁾。

図 - 9, 10はG3桁での実験と解析の比較を示したものである。PC鋼材の腐食モデルには、図 - 3中のφ5の鋼材モデルを使用した。破壊箇所付近で実施されたPC鋼

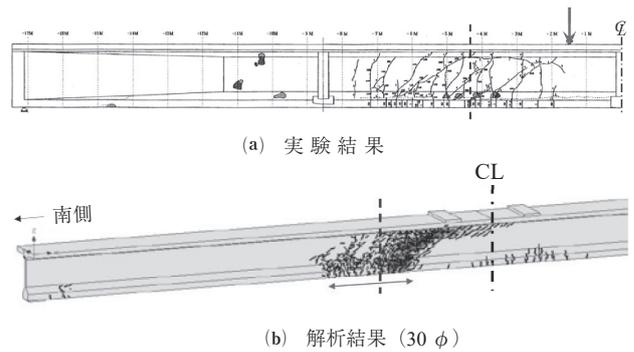


図 - 9 芦川橋 G3 桁の破壊時ひび割れ図¹¹⁾

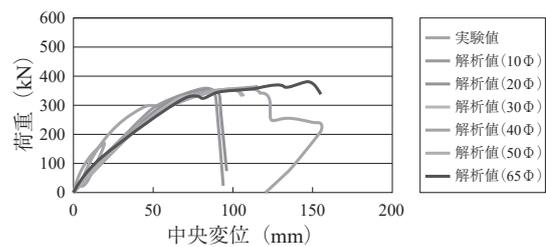


図 - 10 芦川橋 G3 桁の荷重 - 中央変位関係¹¹⁾

材の腐食量調査結果を解析に反映した。破壊断面からどの程度まで腐食が広がっていたのかの記録は残っていなかったため、腐食範囲を10φ～65φとしてパラメータ解析したところ、30φが実験結果との整合性が高かった。このように、PC鋼材の腐食モデル以外は、プレテンション桁と同じ方法で解析を行うことで、ポストテンション桁も基本的には構造性能を評価することが可能といえる。

芦川橋G4桁ではCFRPシートおよび外ケーブル補強が、G5桁ではCFRPシート補強が行われていた。これらの補強効果を簡便に評価するために、PC鋼材の引張力に、CFRPシートの引張強度と外ケーブルの降伏荷重を加えて曲げ耐力を算定したものが表 - 1である。G4, G5桁のいずれも、補強材の効果をすべて見込むと計算値(表中の「腐補」)は実験値よりも大きくなった。これは実験では補強材に十分に応力が導入される前に腐食PC鋼材が破断してしまったためと考えられる。そのため、外ケーブルなどの

表 - 1 芦川橋各桁の実験結果と簡易計算結果との比較¹¹⁾

No.	PC鋼材 残存率	補強 状況	実験の 破壊形式	最大荷重 (実験値) kN	最大荷重 (計算値) kN
G2	99.8%	外ケーブル, 鋼板	せん断	1 455	2 154 (健補) 1 328 (せん断)
G3	44.3%	なし	鋼材破断	369	1 269 (健) 365 (腐)
G4	35.0%	外ケーブル, CFRPシート	鋼材破断	492	1 731 (健) 219 (腐) 714 (腐補)
G5	46.5%	CFRPシート	鋼材破断	459	1 402 (健) 381 (腐) 509 (腐補)

健：健全、腐：腐食考慮、補：補強あり、せん断：土木学会コンクリート示方書せん断耐力式

補強材によって腐食 PC 部材を補強する際の補強効果は、PC 鋼材が破断するまでの変形余裕度を考慮して評価する必要がある。その変形量は、現状だけでなく、将来の腐食進行状況も踏まえて判断する必要があるため、腐食 PC 部材の補強設計はきわめて難しい問題である。

外ケーブル補強の際の導入プレストレス量も悩ましい問題である。表 - 2 および図 - 11 に G4 桁の外ケーブルを対象にプレストレス量をパラメータとした際の感度解析結果を示す。プレストレス量が大きくなればなるほど、補強効果は大きくなる結果となった。腐食 PC 鋼材の伸び能力が小さいので、外ケーブルのプレストレス力が小さいと、破壊直前であっても外ケーブルには大きな引張力が導入されず、十分な補強効果が得られない。しかし、外ケーブルに大きなプレストレスを導入すれば、原コンクリートに過剰な圧縮応力が生じ、クリープ変形・クリープ破壊が問題となる。これらの問題を解決する良策は今のところ無いというのが現状であろう。

表 - 2 外ケーブルの張力をパラメータとした感度解析 (芦川橋 G4 桁)

ケース	張力 (kN)	備考
Case A-0	340	載荷試験時の張力 (外ケーブル降伏荷重の 38%)
Case A-1	888	外ケーブル降伏荷重
Case A-2	666	外ケーブル降伏荷重の 50%
Case A-3	170	載荷試験時の張力の半分 (外ケーブル降伏荷重の 19%)
Case A-4	0	張力なし

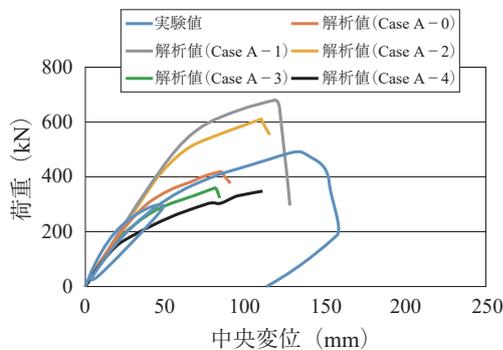


図 - 11 外ケーブル張力の感度解析結果 (芦川橋 G4 桁)

5. 今後の課題

前章までに、腐食 PC 鋼材を有する PC 桁の耐荷挙動を、構造解析との比較によって解釈してきた。PC 鋼材の腐食は位置によってばらつきが大きく、その影響を考慮しないと試験結果を解釈することは難しい。既往の室内試験結果から得られた知見^{12, 13)}を活かしながら構造解析を行うことで、上述のとおり、ある程度、腐食劣化した PC 桁の耐荷挙動を再現できるようになった。しかし、その計算精度は詳細な腐食分布のデータがあつてはじめて確保されるものである。

腐食状況を正確に把握できる調査方法の開発が望まれ

る。現時点では研り調査や内視鏡調査で腐食状況を直接確認するのが一般的である。しかし、PC 構造物ではコンクリートにプレストレスが導入されているので、破壊を伴うこれらの調査では、調査範囲に限界がある。一方で、電気化学的に腐食速度を計測して腐食状況を間接的に評価する方法や、X 線で減肉状況を直接撮影する方法¹⁴⁾ (図 - 12) などの非破壊試験方法も開発されているので、それぞれの方法の適用範囲や精度、調査効率を勘案しながら、腐食の全容が把握できる調査計画を立てることが望まれる。腐食分布は必ずしも部材全体にわたっての調査が必要というわけではなく、最低限、破壊が生じる可能性のあるクリティカルな断面の情報があれば良い。ただし、どこで破壊が生じるのかを外観から判断するのは難しい。室内試験では、腐食が進むほどひび割れ幅が増加するといった結果¹²⁾も得られており、腐食ひび割れがもっとも開いているところがクリティカルな断面ではないかと考えるのが自然である。しかし、実際にはそう簡単には内部の腐食状況を推定できないようである。図 - 13 は、3 章の実橋桁で観察された外観のひび割れ幅と最近傍の PC 鋼材の腐食率の関係を示したものである⁸⁾。データのばらつきは非常に大きく、腐食の程度をひび割れ幅で関連付けることは難しい結果である。実橋桁は室内の試験体と異なり、複雑な配筋と応力状態を有しているため、ひび割れ幅の増加の仕方、場所によって大きく異なるのだと考えられる。このような空間的なばらつきがあるため、調査数量が限られる場合であっても、腐食ひび割れの発生箇所数箇所まで研り調査を行うなどして、クリティカルな断面の見落としを減らす努力が必要である。

プレテンション桁の場合は、PC 鋼材の腐食が進行する

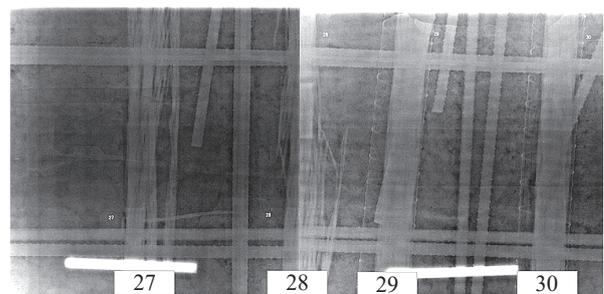


図 - 12 PC 箱桁の下床版における X 線撮影例¹⁴⁾

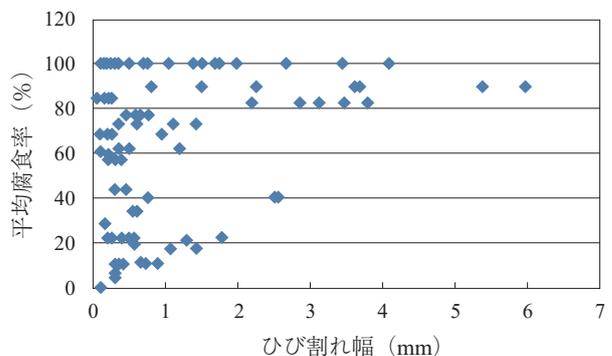


図 - 13 外観のひび割れ幅と直下の PC 鋼材の腐食率の関係 (鱗崎橋)⁸⁾

とほぼ確実に腐食ひび割れが発生するので、外観から腐食範囲を評価することが可能である。一方、ポストテンション桁の場合は、シース内のグラウト充填状況次第である。グラウトの充填不良がある場合には外観に変状が現れないので、劣化の発見が遅れるおそれもある。グラウトの未充填区間が広範囲にわたる場合、もっとも腐食が進行している断面で鋼材破断が生じるので、上述の解析よりも性能低下が大きくなる可能性が高い。さらに、アンボンドであることで付着があるものに比べて、初期から耐力が低くなっていることも考慮しなければならない。鋼材破断が生じた場合に、PC鋼材が突出し、第三者被害が及ぶ可能性もある。このように、グラウト未充填箇所でのPC鋼材の腐食は多方面に深刻な影響を及ぼすことから、グラウトの充填状況を確認するための試験方法の開発も急務である。

6. おわりに

腐食劣化したPC鋼材を有するPC部材の構造性能は詳細な腐食分布が把握できていれば解析的にある程度評価可能である。しかし、腐食状況を正確かつ高密度で把握できる調査方法は開発途上の段階である。また、PC鋼材は細いので鉄筋と比べると腐食の進行は早い。腐食による強度や伸びの低下も鉄筋に比べて顕著である。それゆえ、将来の構造性能を考える場合、すでに腐食が始まっているPC鋼材には応力分担を期待しないのが賢明であろう。PC部材に対する電気防食工法¹⁵⁾も開発されているが、通電時に発生する可能性のある水素によるPC鋼材の水素脆化といった新たな問題もある。

PC部材では、腐食が進行しても変形やひび割れといった変状が現れない場合があるので、目視による調査診断には限界がある。そのため、今後も非破壊調査技術の開発を進め、積極的に適用し、維持管理技術を徐々にレベルアップさせていくことが必要であろう。

参考文献

- 1) 陸 賢, 田中泰司, 山口貴幸, 下村 匠: 腐食したPCより線の機械的性質とプレテンションPC梁の残存耐力の評価, プレストレストコンクリート工学会第21回シンポジウム論文集, pp.211-216, 2012.

- 2) 上原子晶久, 岩城一郎, 鈴木基行: 著しい塩害を受けて劣化した道路橋PC上部工の鋼材腐食を考慮した構造解析, 土木学会論文集E2, Vol.67, No.3, pp.333-350, 2011
- 3) 国土交通省土木研究所: 塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究(III), 土木研究所資料, 第3810号, 2001
- 4) 田中泰司, 山口貴幸, 下村 匠: 塩害劣化により鉄筋腐食が進行した鉄筋コンクリート橋桁の耐荷試験と数値解析による評価, 土木学会論文集, Vol.66, No.4, pp.466-482, 2010
- 5) 田中良樹, 河野広隆, 渡辺博志, 鈴木雅博: 塩害を受けたプレテンションPC桁の耐荷性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.973-978, 1999
- 6) 田中良樹, 河野広隆, 渡辺博志, 木村哲士: ポストテンションPC桁の塩害劣化と耐荷力, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.3, pp.781-786, 2000
- 7) 田中泰司, 山口貴幸, 陸 賢, 井林 康: 鋼材腐食が生じたプレテンションPC桁の曲げせん断性能に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1127-1132, 2011
- 8) 武田健太, 田中泰司, 下村 匠, 山口貴幸, 陸 賢, 井林 康, 村上祐貴: 塩害劣化したプレテンション式PC桁の載荷試験と解析による耐力評価手法の検討, 土木学会論文集E2, Vol.71, No.4, pp.303-322, 2015
- 9) 田中泰司, 陸 賢, 山口貴幸, 下村 匠: 塩害劣化したプレテンションPC桁の疲労破壊性状, プレストレストコンクリート工学会第20回シンポジウム論文集, pp.277-282, 2011
- 10) 国土交通省土木研究所: 塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究(IV), 土木研究所資料, 第3816号, 2001
- 11) 武田健太, 田中泰司, 下村 匠, 石田雅博: 塩害により鋼材腐食の生じたポストテンションPC桁の載荷試験と有限要素解析による耐力評価手法に関する検討, 構造工学論文集, Vol.63A, pp.820-833, 2017
- 12) 谷口博胤, 睦好宏史, 今野洋一, Ha Minh: プレストレストコンクリート部材の鋼材腐食に関する研究, 土木学会第59回年次学術講演会概要集, V-274, 2004
- 13) 京都大学近藤拓也, 山本貴士, 高谷 哲, 宮川豊章: 腐食ひび割れが生じたポストテンション方式PCはりの曲げ耐荷性能, コンクリート工学年次論文集, vol.33, No.2, pp.1489-1494, 2011
- 14) Yano, R., Kusano, J. and Uesaka, M.: Development of a Non-destructive inspection system for industrial and societal infrastructures with 950 keV/3.95 MeV portable X-band linac-based X-ray, Proceedings of IPAC'16, 2016
- 15) 青山敏幸, 関 博, 福手 勤: PC桁への電気防食の適用に伴うPC鋼材および陽極の特性変化に関する実験的研究, 土木学会論文集E, Vol.65, No.4, pp.589-606, 2009

【2018年8月20日受付】



刊行物案内

更新用プレキャストPC床版技術指針

平成28年3月

定 価 8,000 円 / 送料 300 円

会員特価 6,000 円 / 送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会