

PC鋼線の腐食に伴う張力変動に関する一検討

(一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 正会員 博(工) ○渡邊 晋也
 (株) 高速道路総合技術研究所 正会員 工修 村西 信哉
 (株) 高速道路総合技術研究所 正会員 長谷 俊彦
 (一社) 日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 博(工) 小野 秀一

Abstract : This study presents whether the decrease in the introduced tension force occurs due to the corrosion of the Prestressed concrete steel wires by durability test. As a result of measuring the tension force changes of the specimen which introduced the designed prestress, the reduction of the tension force caused by corrosion of Prestressed concrete steel wires was confirmed. In addition, as a result of confirming the relationship between the cross-sectional area of Prestressed concrete steel wires and tension force, it was found that both have high correlation. In the case of the Prestressed concrete steel wires, it was found difficult to obtain the precursor behavior of the fracture due to the tension changes by corrosion.

Key words : Prestressed concrete steel wires , Corrosion , Tension force

1. はじめに

PC構造物の維持管理については関心が高まり、数多くの補修・補強技術が研究・開発されている。とくにPC構造物の重要部材であるPC鋼材については、一般にPCグラウトに覆われており腐食が生じにくい部材である。しかしながら、PC技術が諸外国から導入され始めた黎明期に建設されたものや高度経済成長期に建設されたものの中には、PCグラウトの充填不足などの不具合が確認されているケースがある。とくに、橋梁では上縁定着部や桁端部からPCシーす内に雨水が流入し、凍結防止剤や海洋由来の塩化物イオンがPC鋼材の腐食を助長している現象が確認され、その結果、PC鋼材が腐食し最悪の場合破断するなどの損傷が報告^{1)・2)}されている。

今後の維持管理としては、PCグラウトの未充填部を充填し、PC鋼材を腐食から守る対策が急務になっていると考えられる。しかしながら、すでに腐食が生じているものの破断が確認されていないPC鋼材についての対処方法についての検討がなされていない。たとえば、PC鋼材の腐食に伴い導入されている緊張力が極端に低下する場合は、腐食が生じているPC鋼材は破断しているものと同様であるとされ、外ケーブル補強などの対策を実施することなど検討するべきである。一方で、腐食に伴う緊張力の低下がわずかな場合は、早急にグラウト再注入などを検討することが考えられる。そこで、本研究は、PC鋼線を対象としPC鋼線の腐食にともなう緊張力の変動を把握することを目的として検討を行った。本論文は、PC鋼線の腐食程度が緊張力に与える影響について取りまとめたものである。

2. 試験概要

本研究では、腐食状況に応じた張力の変動を把握することを目的として、PC鋼線の腐食により破断に至る過程における張力の変動について評価を行った。腐食促進環境として2通りの方法を用いて検討を行っている。①塩温水乾湿繰り返し方法、②塩水噴霧方法である。また、比較のため③無負荷の環境(ブランク)の計3環境とした。PC鋼線の張力が腐食に及ぼす影響を確認することを目的として、緊張力を導入していない試験体も腐食促進環境下に設置し、腐食状況や断面欠損について測定を実施し、張力の影響についても検討を行った。

2.1 試験体

(1) 試験体寸法

緊張力を導入した試験体形状寸法を図-1に示す。試験体の長さは緊張力の導入と試験装置の大きさから試験体長さを3mとした。断面寸法は150×150mmとしている。定着端部に緊張用ジャッキを設置した方を緊張側、張力変動測定用のロードセルを設置した方を固定側と称している。PC鋼線の腐食範囲は軸力方向に対して100mmとし、その範囲は鋼製の支柱で開口し、PC鋼線が露出した状態としている。この範囲以外は、PCグラウトもしくはモリブデングリッドを用いて腐食を抑制した。なお、本試験体ではくさび式定着体を用いている。

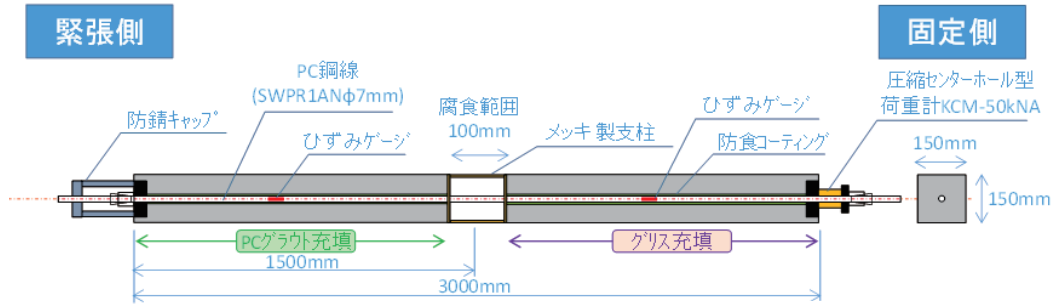


図-1 試験体の仕様

(2) 使用材料

試験体に用いたコンクリートの配合を表-1に示す。セメントは早強セメントとし、スランブを12cm、粗骨材の最大寸法を25mm、空気量を4.5%とした。コンクリートの標準養生における圧縮強度試験結果は材齢3日で38.7N/mm²、7日で53.2N/mm²であった。また、PC鋼線はSWPR1ANのφ7mmである。

表-1 試験体に用いたコンクリート配合

呼び強度	Gmax (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
						水 W	セメント C	細骨材		粗骨材 G	混和剤 Ad
								S1	S2		
40	25	12	4.5	37.6	43.9	155	413	464	310	998	2.684
備考 C: 早強ポルトランドセメント (3.14g/cm ³), S1: 富士川産川砂 (2.64g/cm ³) S2: 富士宮産山砂 (2.65g/cm ³) G: 富士川産川砂利 (2.66g/cm ³) Ad: 高性能AE減水剤											

(3) 緊張力の導入

コンクリートの材齢8日に緊張力を導入した。導入した緊張力は設計荷重34.6kN (0.6σ_{pu})に事前に算出したセットロス量2.75kNを考慮し、37.4kNとした。

2.2 促進試験

コンクリート材齢24日目(緊張力導入から16日後)からPC鋼線の腐食促進を開始した。本研究では、PC鋼線の腐食促進条件を2手法として実施している。また、腐食が生じない試験体を比較試験体とした。促進試験状況を写真-1に示す。また、詳細な促進条件を以下に示す。

(1) 塩温水乾湿繰り返し方法の概要

塩温水乾湿繰り返し方法の条件として、40±10℃の5%NaCl水溶液を用いて24時間浸漬させたのち、ドライヤーを用いた40±10℃の乾燥を60時間実施するのを1サイクルとしている。本論文で



写真-1 促進試験の状況

は塩温水乾湿繰返しの凡例を DW と記載する。

(2) 塩水噴霧の概要

塩水噴霧は、室内に静置している試験体に対して、露出させた PC 鋼線に噴霧器を用いて 1 週間に 3 回 3%NaCl 水溶液を 10cc 噴霧している。本論文では塩水噴霧の凡例を CM と記載する。

(3) 無負荷(ブランク)条件

室内に静置している試験体に水や塩水が接触しないように、露出させた PC 鋼線をビニールで覆って静置している。本論文では無負荷の凡例を BL と記載する。

2.3 調査項目

調査項目は、表-2 に示すように、①PC 鋼線の腐食状態の目視確認、②PC 鋼線径、③PC 鋼線の張力変動とした。①および②の測定調査項目については、1 ヶ月に 1 回の頻度で計測を行った。③の張力変動はデータロガーにより 1 時間に 1 回のインターバル計測とした。

①および②の測定位置は、腐食対象 100mm の範囲で 3 ヶ所を測点と設定し、測定位置が常に同じになるようにしている。また、PC 鋼線の直径は 1 ヶ所につき 0 度と 90 度の向きを変えて 2 点測定している。測定状況を写真-2 から写真-4 に示す。

表-2 調査項目および方法

項目		試験方法	測定頻度
①	PC 鋼線の目視観察	デジタルカメラおよび CCD カメラ 50 倍による PC 鋼線表面状態の確認	1 ヶ月に 1 回
②	PC 鋼線径	マイクロメータを用いた除錆前後における PC 鋼線径の計測	1 ヶ月に 1 回
③	PC 鋼線の張力変動	ロードセルを用いて連続計測	1 時間ごと

3. 試験結果

本論文では、腐食試験開始から 442 日間実施し得られた結果について、項目ごとに記載する。なお、図に用いる値は塩温水乾湿繰返し (DW) および塩水噴霧 (CM) では緊張あり 12 試験体、緊張なし 3 試験体、無負荷 (BL) は緊張あり 3 試験体、緊張なし 3 試験体の平均値を用いている。

3.1 PC 鋼線の目視観察

PC 鋼線の表面を観察した結果を写真-5 に示す。なお、写真は錆を除去した後に撮影を行っている。DW 試験体では、促進試験開始後 7 日目から腐食が発生した。この結果は緊張の有無による違いは見られなかった。その後、48 日目から孔食が確認された。301 日目以降ではより孔食が顕著になってきている。



写真-2 目視観察状況

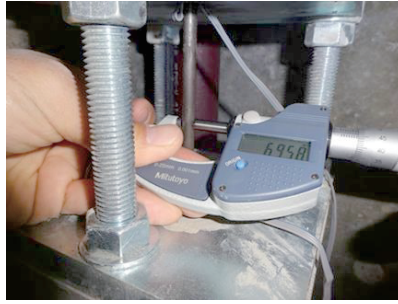


写真-3 鋼線径の測定状況



写真-4 張力の測定状況



a) 塩温水乾湿繰返し (DW)
(試験開始 329 日目)



b) 塩水噴霧 (CM)
(試験開始 442 日目)



c) 無負荷 (BL)
(試験開始 442 日目)

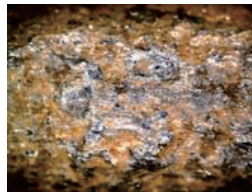
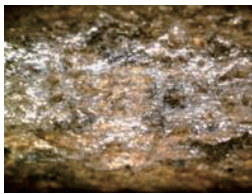


写真-5 PC 鋼線の腐食状況

この時点で、緊張なしの試験体では、緊張ありと比較して孔食は少ない結果となった。CM 試験体では、塩温水乾湿繰返しと同様に促進試験開始 7 日目から腐食が確認され、48 日目に孔食が確認された。その後、腐食が進展し、孔食が多く確認されている。なお、緊張の有無による違いは確認されなかった。BL 試験体については、48 日目で点錆は確認されたが、その後の腐食進展は確認されなかった。実構造物の環境を考えると、CM の方が実環境に近いと思われる。

したがって、緊張力の有無による腐食の違いは考慮しなくて良いものと考えられる。

3.2 PC 鋼線径および断面積

腐食促進試験開始から 442 日間経過までの PC 鋼線径を測定した結果から、PC 鋼線の断面減少率を算出した結果を図-2 に示す。この図からも分かるように、BL 試験体は緊張の有無に関わらず PC 鋼線の径に変化が見られなかった。一方で、腐食を促進させている DW と CM は初期に PC 鋼線の径が大きくなっているが、これは錆が生じて除去が完全でなかったことが理由として考えられる。その後、DW では促進試験 200 日以降で断面が小さくなり始め断面減少率は 90% 程度になった。CM においては DW に遅れて断面が減少する結果となった。断面減少率は 85%~90% まで減肉する結果となった。また、緊張力の有無については、DW と CM の結果が異なった。上述したように実環境に近い CM を想定する

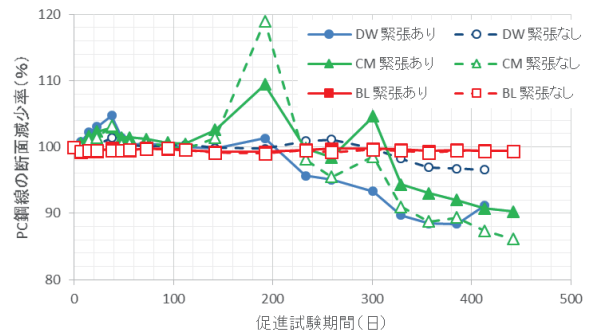


図-2 PC 鋼線の断面減少率

と緊張力の有無による腐食の違いは無いと考えられる。

3.3 PC鋼線の張力変動

ロードセルを設置した各条件の試験体3体の張力結果を図-3に示す。DW試験体は促進試験中にPC鋼線が破断(DW-2:346日, DW-3:376日)した。PC鋼線が破断する直前まで張力に大きな変化は見られないことが判明した。このことから、張力をモニタリングしPC鋼線破断の前兆をとらえることが困難であることが考えられる。ただし、本試験ではPC鋼線で実施していることから、複数の鋼線で組み合わせているPC鋼より線については素線の破断に伴い、張力が変動することが考えられる。したがって、別途検討をする必要があると考えられる。CMおよびBL試験体については、本試験期間中に破断は生じていない。

BL試験体はPC鋼線が腐食していないことから、PC鋼線のリラクゼーションとコンクリートのクリープや乾燥収縮の影響で張力が低下したものと考えられる。したがって、各促進試験体の張力とBL試験体の張力の差分をとることで腐食の影響による張力変動を捉えることができる。図-4に腐食の影響による張力変動の結果を示す。なお、DW試験体については、破断する直前までのデータで比較している。その結果、腐食がもっとも激しいDW試験体の張力変動が大きいことが判明した。腐食が進行した200日以降で概ね0.8kNから1.0kN程度の減少が確認された。また、CM試験体についても、BL試験体より張力が低下することが判明した。CM試験体についても、120日以降から張力の減少が確認された。DW試験体、CM試験体ともに、断面減少が生じる前から徐々に張力の差が生じ始めていることが確認された。以上のことから、PC鋼線の腐食により張力が低下する結果となった。

3.4 PC鋼線断面積と張力の関係

腐食によりPC鋼線の断面積が減少した場合の張力低下量との関係を図-5に示す。PC鋼線断面積は錆を除去した後測定した直径を用いて算出し、張力低下量は各試験結果からブランクを差分した値を用いている。その結果、DW試験体はPC鋼線の断面積が減少につれて張力低下量が大きくなる関係が確認された。両者の相関が約0.6であった。また、CM試験体についてもDW試験体と同様にPC鋼線の断面積が減少することで、張力低下量が大きくなることが確認された。両者の傾きに違いがある

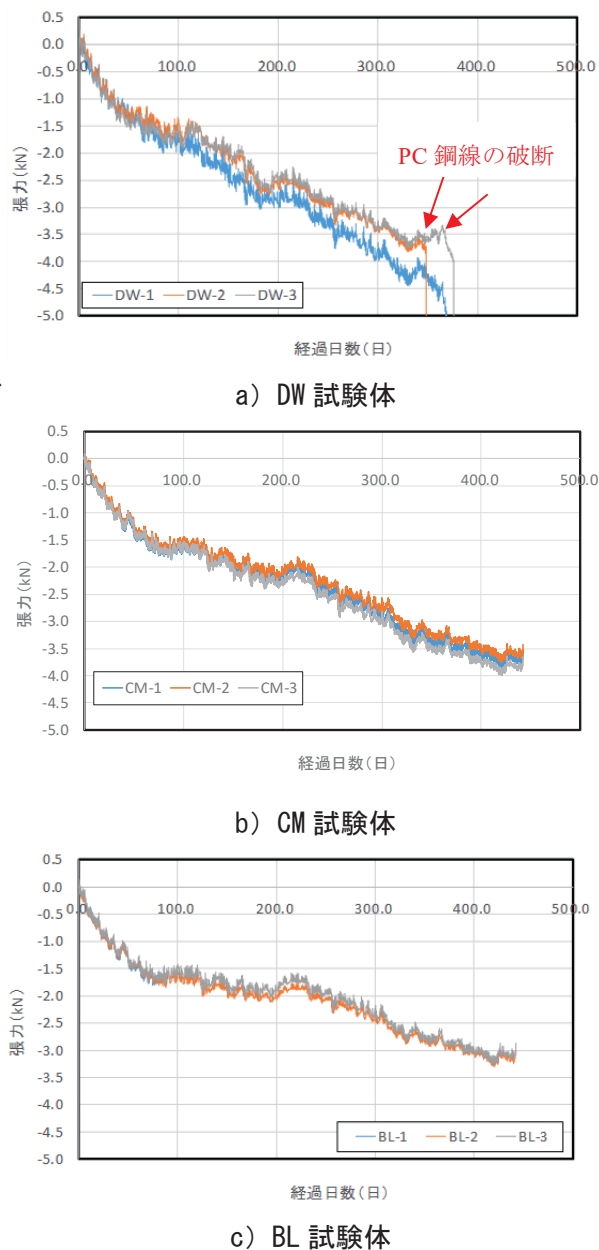


図-3 各試験体の張力変動

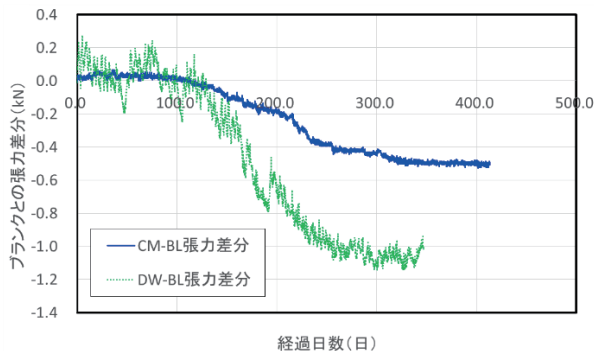


図-4 腐食の影響による張力変動

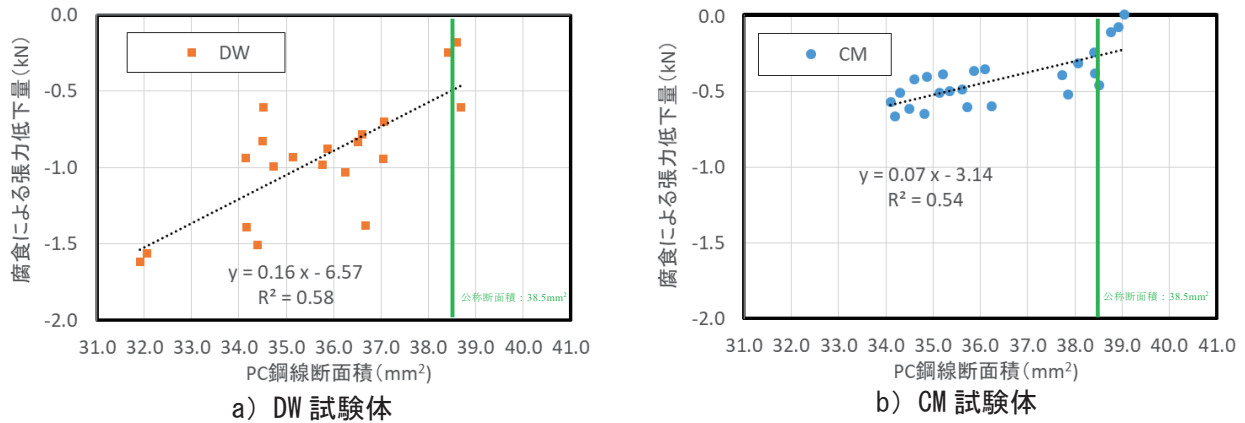


図-5 PC 鋼線断面積と張力低下量の関係

のは、腐食の速度が違うことが要因として考えられる。上述したように実構造物はCMに近いと想像できることから、腐食による張力の低下は生じるが、その影響は小さいものと考えられる。

以上のことから、腐食が生じてPC 鋼線の断面積が減少することで張力が低下することが分かった。なお、張力が低下するのは、PC 鋼材が伸びたことが要因として考えられる。

4. まとめ

本論文ではPC 鋼線の腐食に伴う張力変動について検討を行った結果、以下の結果が得られた。

- 1) PC 鋼線の腐食に伴う断面積減少の進行過程については、実構造物と想定されるCMにおいては緊張力の有無による影響は確認できなかった。
- 2) PC 鋼線の破断直前における張力にはその前兆を捉えられる変動は見受けられなかった。したがって、張力をモニタリングしながらPC 鋼線の破断前兆をとらえることは非常に困難であることが判明した。ただし、本試験ではPC 鋼線での結果でありPC 鋼より線の場合については別途検討を行う必要がある。
- 3) 梁供試体による実験において、PC 鋼線の腐食による張力の低下を確認することができた。PC 鋼線のリラクゼーションやコンクリートのクリープ・乾燥収縮以外にも腐食により導入した張力は低下することを明らかにした。
- 4) PC 鋼線の断面積と張力低下量の関係について検討した結果、両者には相関があることが判明した。したがって、鋼材の断面積を測定することで、ある程度の張力は把握することが可能である。

以上のことから、PC 鋼線が腐食している場合、腐食していないものよりは張力が低下しているものの、破断していなければ、ある程度の張力を維持することが可能となることを確認した。したがって、PC 鋼線の腐食が生じているものの破断していない場合は、PC グラウト再注入による対策を早期に実施し、PC 鋼線を腐食から保護することが対策として有効であると考えられる。また、あわせて、PC 鋼線の破断についての経過観察を実施する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 三浦尚, 西川和廣, 見波潔, 上坂康雄: 暮坪陸橋の塩害による損傷と対策 (2) PC 鋼材の腐食とその補強対策, 橋梁と基礎, Vol.27, No.12, pp.37-40, 1993.12
- 2) 小林憲一, 大平英生, 登石清隆, 羽田伸介: 妙高大橋のPC ケーブル破断調査と対策, 橋梁と基礎, Vol.45, No.9, pp.32-38, 2011.9