

論文 塩害により腐食した PC 鋼線の腐食性状と機械的性質

木村哲士*¹, 河野広隆*², 田中良樹*³

要旨：塩害により劣化した PC 桁の残存耐力を正確に評価するためには、腐食した PC 鋼材の腐食性状と機械的性質の変化を確認しておく必要がある。本研究では、34 年間供用された PC 桁から採取した PC 鋼線を用いて腐食量調査と引張試験を行った。この結果、腐食によって破断伸びが著しく低下することがわかった。次に、この性能低下の原因の調査をするため、種々の形状の欠損を設けた PC 鋼線の引張試験を行った。これらの結果、腐食した PC 鋼線における破断伸びの低下は、断面減少に伴う応力集中の影響によるところが大きいことを明らかにした。

キーワード：塩害, PC 鋼線, 質量減少率, 断面減少率, 引張強度, 破断伸び

1. はじめに

塩害を受けた既設のプレストレストコンクリート橋 (PC 橋) の維持管理を行っていく上でその破壊までの挙動や、残存耐力を把握しておくことが必要である。

筆者らは幾つかの塩害を受けた桁の載荷試験^{1) 2)}を行っている。その中に PC 鋼線の伸び性能の低下により低い靱性で終局に至った桁があった¹⁾。この塩害 PC 桁から採取した PC 鋼材は、見た目の腐食の程度が小さくても伸び能力が著しく低下していた。この点から塩害 PC 桁の挙動を適切に評価するためには、PC 鋼線の腐食程度を把握するとともに、その程度が引張強度、破断伸び等の機械的性質におよぼす影響について把握しておくことが重要である。

腐食した鉄筋や PC 鋼材の引張試験の事例として、電食や塩水噴霧等による促進試験で腐食させた PC 鋼線の試験³⁾、載荷試験・解体調査時の材料試験⁴⁾、暴露試験時の引張試験^{3) 5)}等の報告がある。これらの文献では、鉄筋や PC 鋼材が腐食すると強度が低下するとともに、著

しい伸び能力の低下が見られていた。しかし、腐食の程度と破断伸び低下の関係やその原因については、まだ明確であるとは言い難い。特に PC 部材の適度な靱性を確保するために PC 鋼線の伸びは重要であるが、PC 鋼線についての実験データはまだ少ない状況である。

破断伸び低下の原因としては断面減少、孔食による応力集中、腐食による水素脆化等が考えられる。本研究では断面減少と応力集中による PC 鋼線の性能低下について検討することとした。そこで、塩害により著しく劣化したために撤去となったポストテンション PC 桁の PC 鋼線を用いて、腐食量調査と引張試験を行った (シリーズ 1)。また、人工的に欠損を設けた試験片の引張試験を行い、腐食した PC 鋼線の破断伸び低下の原因を調査した (シリーズ 2)。

2. 実験方法

2.1 腐食した PC 鋼線引張試験 (シリーズ 1)

(1) 試験片

試験片に用いる PC 鋼線は、海岸部で 34 年間

*1 国土交通省土木研究所 コンクリート研究室 交流研究員 工修 (正会員)
 *2 国土交通省土木研究所 コンクリート研究室 室長 工修 (正会員)
 *3 国土交通省土木研究所 コンクリート研究室 研究員 (正会員)

表-1 基準 PC 鋼線引張試験結果

試験片	ヤング係数	降伏点荷重	最大点荷重	破断点伸び
	kN/mm ²	kN	kN	%
シリーズ1*	195.2	31.8	34.1	7.05
シリーズ2	201.9	32.0	35.6	8.39
規格値		27.9以上	31.9以上	4以上

試験結果は3本の平均値 *は採取による試験片

供用されたポストテンションPC橋から採取した。採取箇所にはいずれもグラウトが充填されていた。腐食していないPC鋼線の引張試験結果を表-1に示す。腐食のないPC鋼線は桁端付近から採取し、できるだけ黒皮が残っているものを選択した。PC鋼線は、φ5のSWPR1A相当品であった。腐食していない鋼線は、どれも規格を満足していた。

質量減少率および形状計測時の試験片長さは330mmとし、引張試験時は約70mmを切断して260mmとなるようにした。

(2) 実験方法

実験は図-1に示す流れに従って行った。図-2に試験片採取の概要を示す。採取はコアボーリングで行い、コンクリートやシースとともにPC鋼線を採取した。1シース44本中の10~40本について、JCI-SC1の3.3に準じて除錆した。質量減少率は式(1)を用いて計算した。

$$\text{質量減少率} = (W_s - W_c) / W_s (\%) \quad (1)$$

W_s: 腐食前のPC鋼線質量 ただし、線径と実測のPC鋼線長から計算した。

線径の規格値は 5±0.02 (実測値: 5±0.02mm) であるので、計算上5mmで計算した。

W_c: 除錆後のPC鋼線質量

また、質量減少率を測定したPC鋼線のうち無作為に選んだ40本についてPC鋼線軸方向の形状をレーザー変位計で計測した。軸方向の計測は、PC鋼線1本につき15測線(24度間隔)とした。除錆したPC鋼線のうち110本のPC鋼線について、JIS Z 2241に準じて、引張試験を行った。標点距離は100mmとし、

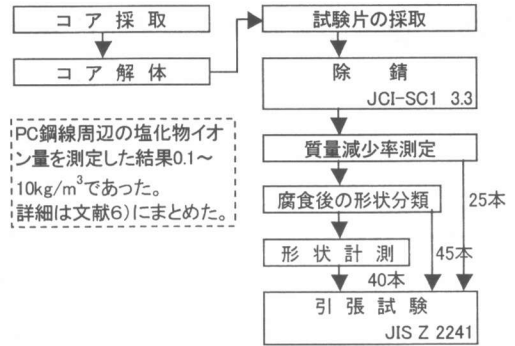


図-1 シリーズ1の実験概要

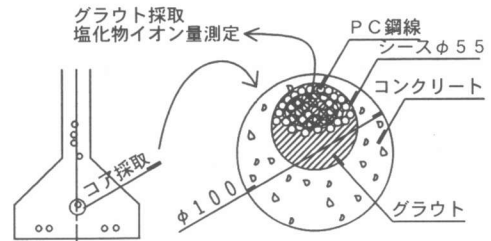


図-2 試験片の採取概要図

伸び計を用いて破断まで伸びを測定した。

2. 2 欠損を設けた PC 鋼線引張試験 (シリーズ 2)

(1) 試験片

試験片は、表-2に示す計15タイプとした。試験片の形状を図-3に示す。加工するPC鋼線は前述の腐食したPC鋼線と同規格のφ5のSWPR1Aを使用した。表-1に加工前のPC鋼線の引張試験結果を示す。試験本数は各タイプ3本とし、計45本の試験片を準備した。加

表-2 試験片一覧 (シリーズ2)

試験片名		欠損半径 (mm)	欠損長 (mm)	最小断面積 (mm ²)
T1	R1	1	2	18.2
	R2	2	4	14.4
	R3	3	6	9.2
T2	R1	L5	5	18.2
	R2	L5	5	14.4
	R3	L5	6	9.2
	R1	L10	10	18.2
	R2	L10	10	14.4
	R3	L10	10	9.2
T3	R1	L15	15	18.2
	R2	L15	15	14.4
	R3	L15	15	9.2
	R1	-	全長	18.2
	R2	-	全長	14.4
	R3	-	全長	9.2

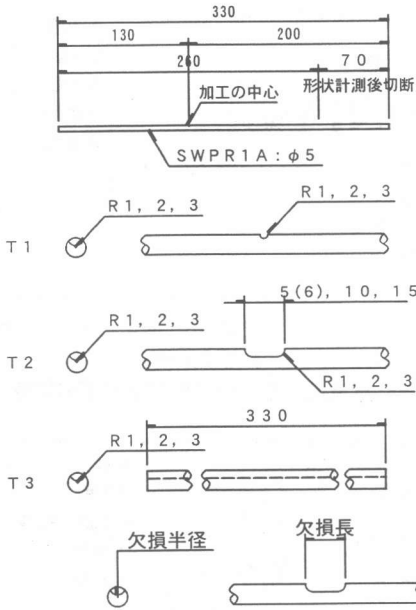


図-3 試験片形状 (シリーズ2)

工はマシニングセンターとボールエンドミルによる機械加工で行った。欠損部の断面積は実測の最大深さと欠損半径R(表-2に示す仕様値)を用いて求めた。

(2) 実験方法

引張試験はシリーズ1と同様に行った。

3. シリーズ1の実験結果

3.1 PC鋼線の腐食性状

筆者らはシリーズ1の塩化物イオン量と質量減少率の関係について調査^{6) 7)}しており、塩化物イオン量が増えると質量減少率が大きくなることを確認しているが、ここでは割愛する。

図-4に質量減少率と最大欠損深さの関係を示す。ここで、PC鋼線の腐食の断面形状は表-3に従って分類した。

この図を見ると質量減少率が大きくなるに従って最大欠損深さは増加し、質量減少率5%程度までに1mm程度になった。孔食の場合、他の形状のものより低い質量減少率で最大欠損深さが大きくなっている。

形状計測を行った40本のうち質量減少率5%

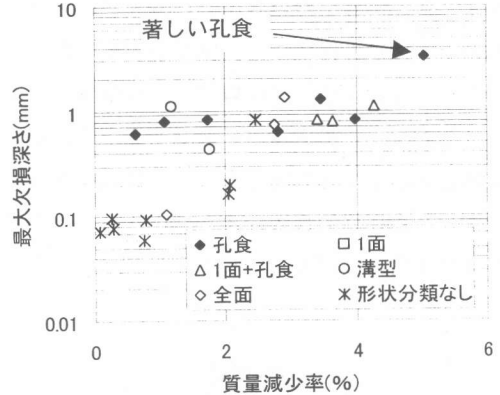


図-4 質量減少率と最大欠損深さの関係

表-3 PC鋼線断面形状の分類

形状	分類	分類基準
	孔食	一般的に孔の径より孔の深さが大きいものをいうがここでは孔状に見えるものを孔食とした。
	1面	ある1方向から腐食していると思われるもの
	1面+孔食	上記に孔状の腐食がみられるもの
	溝型	鋼材長手方向に溝状の腐食が認められるもの
	全面	上記以外で全面的に腐食が認められるもの

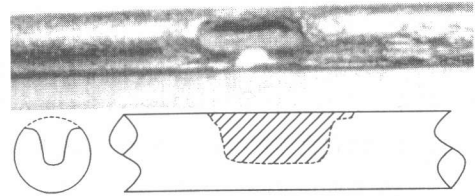


写真-1 著しい孔食の例

以上のPC鋼線は少なく、質量減少率24%で1面のもの1本と同34%で1面+孔食のもの1本があった。この2本の最大欠損深さはいずれも1.4mm程度であった。

形状計測を行った40本中の最大欠損深さの最大値は約3.2mmであった。この鋼線は著しい孔食が生じていた。写真-1にこの鋼線の腐食状況を示す。孔食部分以外の腐食は少ないことから、1部分のみ腐食のしやすい環境にあり、この部分のみで腐食が進んだものと思われる。

3.2 荷重伸び曲線

図-5に腐食したPC鋼線の荷重伸び曲線を示す。例として孔食のある場合の荷重伸び曲線

を示した。腐食のない基準PC鋼線（以下基準鋼線という）と比較して、質量減少率 2%以下のPC鋼線の荷重伸び曲線は、弾性限界にあまり変化がなく、最大荷重を記録するまでは基準鋼線と同じような軌跡であった。質量減少率が大きくなるに従い最大荷重が低下するとともに最大荷重時の伸びも著しく低下した。

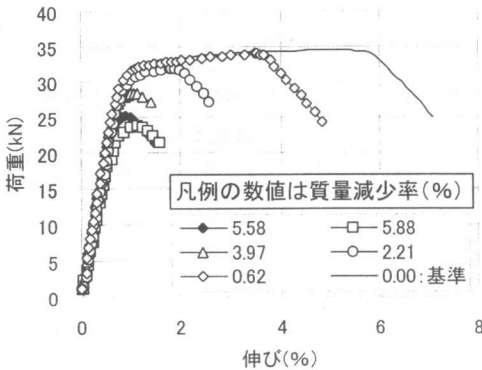


図-5 荷重伸び曲線（シリーズ1：孔食）

3. 3 引張強度の低下

図-6に質量減少率と引張強度残存率の関係を示す。引張強度残存率は、実測引張強度を基準鋼線の引張強度で除したものである。ただし引張強度は腐食の程度にかかわらず最大荷重を健全時の断面積で除した値である（以下同様とする）。なお、質量減少率は試験片の平均的な断面減少量を表しているものであり最小断面での断面減少量ではない。

引張強度残存率は孔食および1面+孔食のものを除いて質量減少率と相関が見られた。たとえば、質量減少率10%で引張強度が基準鋼線の80%程度であった。孔食がある場合には、引張強度残存率の低下が更に著しかった。

3. 4 質量減少率と破断伸びの低下

図-7に質量減少率と破断伸び残存率の関係を示す。破断伸び残存率は、実測破断伸びを基準鋼線の破断伸びで除したものである。これを見ると、破断伸びは質量減少率1~2%の範囲で著しく低下することがわかる。特に孔食がある

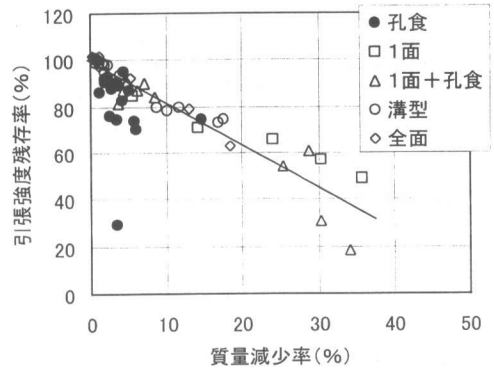


図-6 質量減少率と引張強度残存率の関係

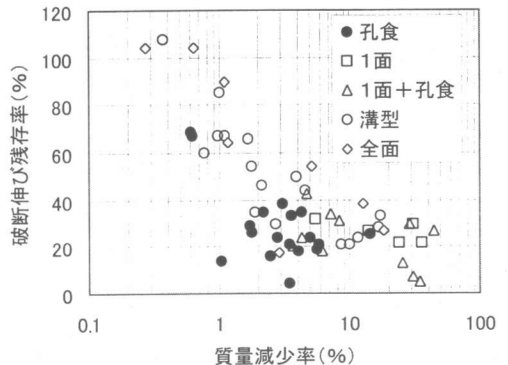


図-7 質量減少率と破断伸び残存率の関係

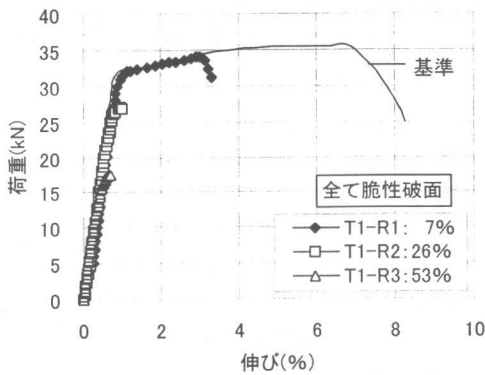
場合には、破断伸びの低下が更に著しい。

4. シリーズ2の実験結果

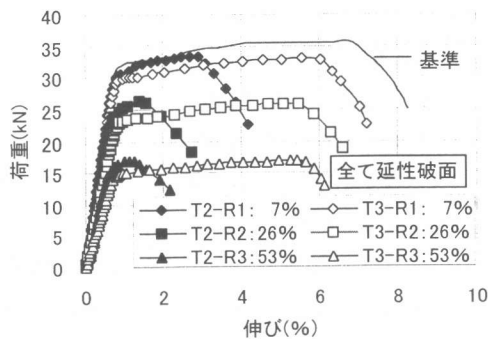
4. 1 荷重伸び曲線

図-8にはT1, 図-9にはT2, T3の荷重伸び曲線を示す。ここで、断面減少率は欠損部の最小断面の断面減少量を元の断面積で除したものである。T1, T2の破断伸びは、基準鋼線と比較して大きな低下があった。T1, T2と応力集中のないと考えられるT3の破断伸びは断面減少率が同じでもT1, T2の方が小さかった。一方、T1, T2とT3の最大荷重は、同じ断面減少率であればほぼ同じであった。これより破断伸びの低下は断面積の減少が主要因でないことがわかる。また、T1とT2, T3を比較するとT2, T3の方がT1に比べて最大荷重後の荷重降下量が大きく、破断伸びが大きかった。T2, T3

が延性破面であったのに対して、荷重降下の小さかった T1 では、全てに脆性破面が確認された。



注) 凡例の数値は断面減少率
 図-8 荷重伸び曲線(シリーズ2 : T1)



注) 凡例の数値は断面減少率
 T2 は欠損長 15mm の結果
 図-9 荷重伸び曲線(シリーズ2 : T2, T3)

4. 2 引張強度の低下

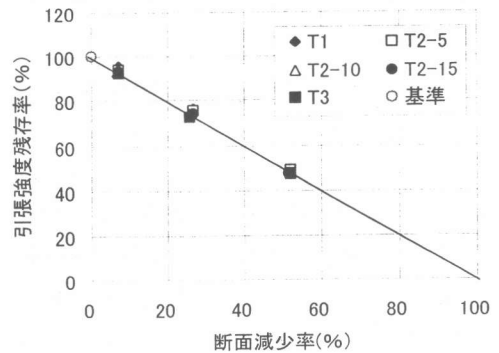
図-10 に欠損を設けた P C 鋼線の断面減少率と引張強度残存率の関係を示す。断面減少率と引張強度の間には非常に良い相関があり、例えば断面減少率 20% で引張強度は 20% 低下している。これより、引張強度には応力集中による影響が小さいことが確認できた。

4. 3 断面減少率と破断伸びの低下

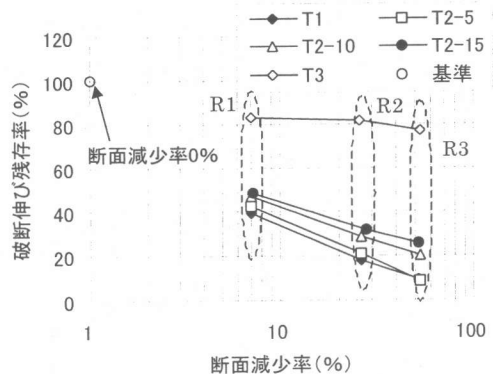
図-11 に断面減少率と破断伸び残存率の関係を示す。シリーズ1と同様に、断面減少率が大きくなると破断伸びが小さくなることがわかる。

基準鋼線と比較すると T1 と T2 タイプは破断

伸びの低下が著しかったが、T3 は断面減少率が同じであるにもかかわらず破断伸びの低下が小さかった。一方、T1, T2-5, 10, 15 をそれぞれ比較すると断面減少率が同じ場合に、欠損長によって破断伸びが違い、欠損長が長いほど破断伸びの低下が小さくなった。



注) 図中には同一タイプ3本の
 平均値をプロットした。
 図-10 断面減少率と引張強度残存率の関係



注) 図中には同一タイプ3本の
 平均値をプロットした。
 図-11 断面減少率と破断伸び残存率の関係

5. 破断伸びの低下についての考察

シリーズ2では、断面減少率と引張強度残存率の間に非常に良い相関が得られた。そこで、この相関に基づきシリーズ1の結果について各鋼線の断面減少率を式(2)で求めた。

$$Ra = 100 - Rts \quad (2)$$

Ra : 引張強度から求めた断面減少率

Rts : 腐食した鋼線の引張強度残存率

これを用いてシリーズ1の実験結果を考察する。

図-12に断面減少率と破断伸び残存率の関係を示す。比較のため、シリーズ2の結果も示した。シリーズ1の結果はT1, T2の実験結果とよく一致していた。断面減少率と破断伸び残存率の間には、負の相関が認められた。シリーズ1の引張強度から求めた断面減少率で整理した方が、質量減少率で整理した場合(図-7)よりも相関が強い。また、この図においても孔食の方が他の腐食断面形状よりも破断伸び残存率が小さい傾向がある。

図中の①に示すT1, T2とT3の違いは、応力集中の有無による違いであると考えられる。また、T1, T2の結果における破断伸び残存率の差(図中の②)は、応力集中の程度の差である。これを考慮してシリーズ1の結果を考察すると塩害を受けたPC桁中のPC鋼線(シリーズ1)の破断伸びの低下は、断面減少に伴う応力集中の影響によるところが大きいと推察される。また、同程度の断面減少率における破断伸び残存率の差は応力集中の程度の差であると考えられ、その差は小さいことがわかる。

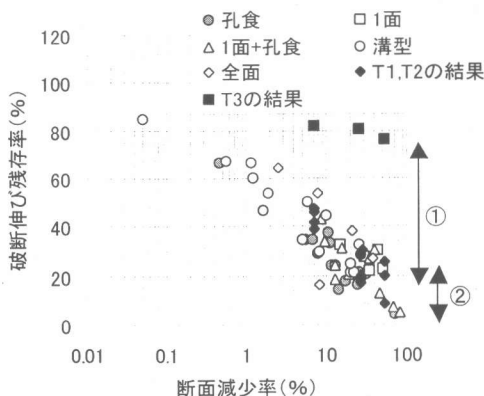


図-12 断面減少率と破断伸び残存率の関係
※腐食したPC鋼線の断面減少率は式(2)による

6. まとめ

- (1) 腐食したPC鋼線の引張強度から求めた断面減少率は破断伸びと相関がある。
- (2) PC鋼線の破断伸びの低下は、応力集中が生じない断面欠損を有する場合(T3)に

おいては比較的軽微であるが、T1, T2あるいは腐食したPC鋼線のように応力集中を伴う断面欠損を有する場合には、破断伸びの低下が顕著に見られた。

- (3) 孔食と溝型腐食の違いなど、欠損の形状による破断伸びの差は比較的小さいことを確認した。

謝辞

試験片の採取には、塚田幸広前所長、高橋孝男前建設監督官、横山修司建設監督官をはじめ建設省酒田工事事務所、同鶴岡国道維持出張所の皆様のご協力を得ました。この場を借りて関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 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
- 2) 田中良樹, 河野広隆, 渡辺博志, 木村哲士: 塩害を受けたポストテンション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
- 3) 倉内実: PC鋼材の腐食: コンクリート工学, Vol.25, No.7, pp.32-36, 1987
- 4) 小尾稔, 堺孝司: 補修補強を施したPC橋の劣化および耐荷力(第2報), 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第5部, pp.394-395, 1991
- 5) 富田勝信ほか: 曝露腐食によるPC鋼線の疲れ強さの低下, プレストレストコンクリート, Vol.6, No.4, pp.50-54, 1964
- 6) 塩害を受けたPC橋の耐荷力評価に関する研究(Ⅲ) - 塩害により損傷を受けたPC鋼材の機械的性質 -, 土木研究所資料第3810号, 国土交通省土木研究所, 2001.3
- 7) 木村哲士ほか: 塩害を受けたPC鋼材の腐食性状と伸び性能, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集第V部, pp.724-725, 2000