

塩化物水溶液環境下での応力腐食割れ試験に基づく PC 鋼線の破断特性の検討

神戸大学大学院 学生会員 ○黒野 承太郎 神戸大学大学院 正会員 森川 英典
神戸大学大学院 正会員 美濃 智広 神鋼鋼線工業（株） 正会員 河村 睦

1. 研究目的

凍結防止剤使用環境下の既設 PC 道路橋におけるグラウト充填不良箇所において、PC 鋼線（以下、鋼線）が著しく腐食および脆性的に破断する事例（写真-1¹⁾）が報告されている。美濃²⁾は、NH₄NO₃ 水溶液を用いた活性溶解型応力腐食割れ試験の結果から破断原因が活性溶解型応力腐食割れである可能性を指摘している。しかし、NH₄NO₃は通常の既設 PC 道路橋での環境条件としては想定し難いものである。



写真-1 PC 鋼線の破断¹⁾

本論文では、健全または腐食鋼線に対して、塩化物水溶液を用いた応力腐食割れ試験で破断させた結果と、応力腐食割れ試験後に引張試験で破断させた結果などを比較することで、凍結防止剤に由来する塩化物イオンによる鋼線の脆性破壊への影響について検討した。

2. 実験概要

本研究で使用した鋼線の規格を（表-1）に示す。まず、この鋼線を用いて既設 PC 道路橋のグラウト充填不良境界を模擬した図-1 の供試体を作成し、3～8 ヶ月の塩水を用いた促進腐食試験により局部腐食を有する鋼線を作成した（詳細な試験方法は既往の報告³⁾を参照）。促進腐食期間終了後、供試体を解体し 10wt%クエン酸二アンモニウム水溶液で鋼線を除錆した。このとき、局部腐食発生箇所毎に電子ノギスまたは 3D スキャンで断面積を計測し、破断後でも破断前の断面積を確認できるようにした。得られた鋼線のうち鋼線名 R から始まる鋼線以外は、表-2 の条件で 200h の応力腐食割れ試験を実施した。応力腐食割れ試験の試験時間 200h 以内に破断しなかった鋼線は、静的引張試験で破断させた。なお、比較のため応力腐食割れ試験を経ずに引張試験で破断させた鋼線も用意した。鋼線名 R から始まる鋼線は、応力腐食割れ試験中に破断させることを目的として、試験荷重 25kN から 1 日に一回 2kN ずつ階段状に荷重を増加させ、破断するまで試験した。使用した水溶液の種類は表-2 中の MgCl₂ とした。

表-1 PC 鋼線の規格

線径 (mm)	公称断面 積(mm ²)	0.2%永久伸びに 対する試験力 (kN)	最大 試験力 (kN)
7	38.48	54.9	62.3

表-2 水溶液の種類と条件

塩化物の種類	温度(℃)	濃度(%)
MgCl ₂	143	42
CaCl ₂	80	30
NaCl	80	5
NH ₄ NO ₃	100	20

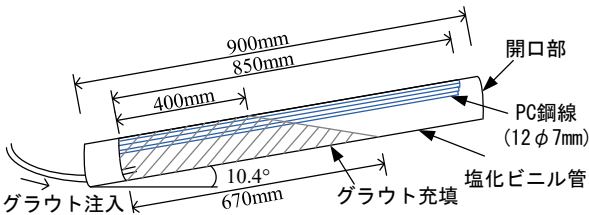


図-1 グラウト充填不良境界模擬供試体概要図

3. 試験結果および考察

引張試験結果および応力腐食割れ試験結果を表-3 に示す。鋼線名健全 1 から R-11 まだが今回の試験結果であり、M-9 から健全 2 までは同規格の鋼線を使用し、同じ促進腐食試験をした美濃²⁾の報告から参照した。なお、ここでの残存率とは健全 1 の値を 100%としたものである。表-3 の破断前断面積残存率と破断荷重残存率との関係を図-2 に示す。図-2 の凡例について説明する。“引張試験破断”とは引張試験で破断させた結果であり、用いた鋼線は、

キーワード PC 鋼線, 脆性破断, 塩化物, 引張試験, 応力腐食割れ試験

連絡先 〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町 1-1 TEL 078-803-6027

健全鋼線（健全 1），促進腐食試験後に応力腐食割れ試験をせずに引張試験した鋼線（O-11～Q-8），促進腐食試験後に応力腐食割れ試験 200h 実施した後に引張試験した鋼線（Q-2～P-12）である．“応力腐食割れ試験破断”の結果は，健全 2 を除いて促進腐食させた鋼線を， $MgCl_2$ または NH_4NO_3 の応力腐食割れ試験で破断させた鋼線（R-3～健全 2）であり，図-2 では用いた水溶液によって分類した．また，凡例内の“ $(MgCl_2 \cdot \text{錆有})$ ”は，他の鋼線とは異なり，クエン酸二アンモニウム水溶液による除錆をせず，そのまま応力腐食割れ試験を実施した鋼線（R-3，R-9）の結果である．健全 2 は，腐食や切り欠きのない健全鋼線を NH_4NO_3 応力腐食割れ試験中に破断させた結果である．

表-3 および図-2 によると，“引張試験破断”の鋼線は応力腐食割れ試験時に用いた水溶液の種類によらず，破断前断面積残存率の低下にほぼ比例して破断荷重残存率が低下していることがわかる．次に，同程度の破断前断面積残存率の鋼線で引張試験結果と応力腐食割れ試験結果を比較すると，応力腐食割れ試験中に水溶液内で破断した鋼線のほうが破断荷重残存率が低下した．その低下率は水溶液の種類によって異なり， $MgCl_2$ の場合は約 1～3 割， NH_4NO_3 の場合は約 3～4 割低下した．したがって，水溶液環境下で高い応力が作用することが鋼線の破断荷重低下に影響を及ぼしていると考えられる．そして，水溶液の違いで低下率が異なることから，破断荷重低下には水溶液による作用も影響していることが考えられる．

次に，ほぼ同じ破断前断面積残存率の O-12 および R-11 の破断箇所近傍を写真-2 に示す． NH_4NO_3 で試験した O-12 は長手方向に亀裂が進展しており，既設 PC 道路橋で破断した写真-1 の破断面の様子と似ている．一方で， $MgCl_2$ で試験した R-11 は長手方向の亀裂進展が顕著ではなかったが，その傾向は確認できた．

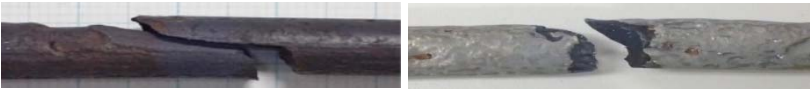


写真-2 鋼線破断箇所近傍の様子（左：O-12，右：R-11）

4. まとめ

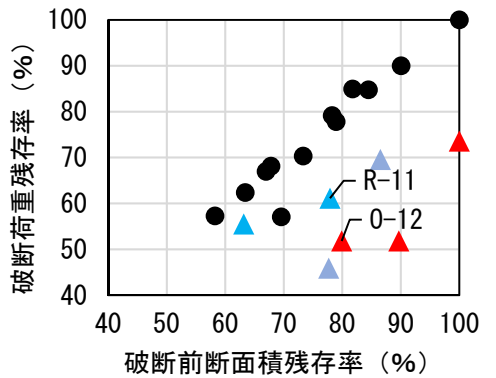
応力腐食割れ試験中に破断した鋼線は，引張試験で破断させる場合よりも破断荷重残存率が約 1～4 割程度低下した．この低下は用いた水溶液が NH_4NO_3 と $MgCl_2$ のいずれの場合でも発生した．しかし，実際に脆性的な破断が確認されている既設 PC 道路橋の環境を考えると， NH_4NO_3 の存在は想定し難いため，凍結防止剤に含まれる $MgCl_2$ などの塩化物が脆性破断に関係している可能性が示された．

参考文献

1)日経 BP 社：日経コンストラクション 2011 年 12 月 12 日号，pp.54-58，2011.
2)美濃智広：「塩害劣化した既設 PC 道路橋の構造安全性評価および維持管理の信頼性向上に関する研究」，博士論文，神戸大学大学院工学研究科，pp.99-150，2016.
3)黒野承太郎，美濃智広，森川英典，河村睦：塩化物イオン水溶液環境下での応力腐食割れ試験を用いた PC 鋼線の破断特性の検討，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.17，pp.7-12，2017.

表-3 試験結果

破断の仕方	応力腐食割れ試験の水溶液	鋼線名	破断前断面積 (mm ²)	破断前断面積残存率 (%)	破断荷重 (kN)	破断荷重残存率 (%)
引張試験で破断	応力腐食割れ試験実施無し	健全1	38.5	100	67.6	100
		O-11	31.5	81.8	57.4	84.9
		Q-5	25.8	67.0	45.3	67.0
		Q-8	28.2	73.3	47.5	70.3
	NaCl	Q-2	26.8	69.6	38.6	57.1
		Q-12	26.1	67.8	46.0	68.1
	CaCl ₂	N-3	32.5	84.5	57.3	84.8
		Q-9	24.4	63.4	42.1	62.4
		Q-11	30.1	78.3	53.5	79.2
	MgCl ₂	Q-1	22.4	58.2	38.7	57.3
	NH ₄ NO ₃	L-6	34.7	90.0	60.8	90.0
		P-12	30.4	79.0	52.6	77.8
応力腐食割れ試験で破断	MgCl ₂	R-3(錆有)	33.3	86.5	47.0	69.6
		R-9(錆有)	29.9	77.7	31.0	45.9
		R-5	24.3	63.2	37.5	55.5
		R-11	30.0	77.9	41.3	61.1
	NH ₄ NO ₃	M-9	34.5	89.7	35.0	51.8
		O-12	30.7	79.9	35.0	51.8
		健全2	38.5	100	49.7	73.6



- 引張試験破断
- ▲ 応力腐食割れ試験破断 ($MgCl_2 \cdot \text{錆有}$)
- ▲ 応力腐食割れ試験破断 ($MgCl_2$)
- ▲ 応力腐食割れ試験破断 (NH_4NO_3)

図-2 断面積と破断荷重の関係