

第V部門

塩化物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

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） 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、 NH_4NO_3 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、 NH_4NO_3 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。

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。

写真-1 PC 鋼線の破断¹⁾

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せず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 MgCl_2 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

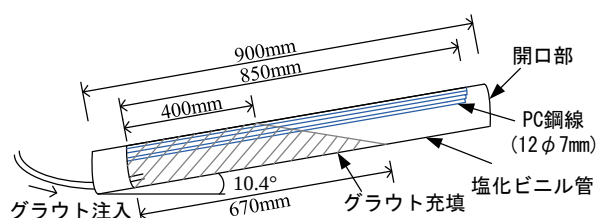


図-1 グラウト充填不良境界模擬供試体概要図

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_4NO_3	100℃	20%

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 N-3 から R-11 までは今回の試験結果であり、腐食 44 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、破断前断面積残存率は健全鋼線の破断前の断面積を 1 とした値である。破断時間は、各応力腐食試験で鋼線の破断に要した時間である。表-3 の破断前断面積残存率と破断荷重との関係を図-2 に示す。図-2 の凡例について説明する。

Jyotaro KURONO, Hidenori MORIKAWA, Tomohiro MINO and Akira KAWAMURA

174t115t@stu.kobe-u.ac.jp

“引張”とは引張試験で破断させた鋼線であり、用いた鋼線は、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 (N-3～P-12)、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)、健全鋼線 (健全 1) である。“ MgCl_2 ”とは促進腐食した鋼線を MgCl_2 応力腐食割れ試験中に破断させた鋼線 (R-3～R-11) である。“ NH_4NO_3 ”とは促進腐食した鋼線を NH_4NO_3 応力腐食割れ試験中に破断させた鋼線 (腐食 44～腐食 52) である。“健全”と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鋼線 (健全 2) である。

表-3 および図-2 によると, “引張”の鋼線は応力腐食割れ試験時に用いた水溶液の種類に因らず, 破断前断面積の低下にほぼ比例して破断荷重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が低下した。さらに, その低下量は用いた水溶液の種類に因って異なり, MgCl_2 の場合は約 5～20kN, NH_4NO_3 の場合は約 20～25kN ほど低下した。したがって, 水溶液に接しながら荷重がかか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, 水溶液の種類により低下量に違いが発生することから, 破断荷重低下には各水溶液による反応が関係しているといえる。

次に, ほぼ同じ破断前断面積の腐食 51 および R-11 の破断箇所近傍を写真-2 に示す。 NH_4NO_3 で試験した腐食 51 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。

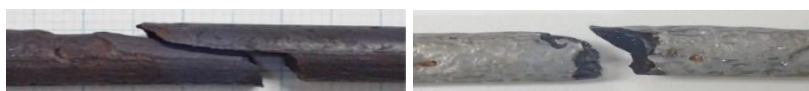


写真-2 鋼線破断箇所近傍の様子 (左: 腐食 51, 右: R-11)

表-3 試験結果

破断の仕方	応力腐食割れ試験水溶液	鋼線名	破断前断面積	破断前断面積残存率	破断時間	破断荷重
			mm ²	%	h	kN
引張試験で破断	CaCl_2	N-3	32.5	84.5	—	57.3
		Q-9	24.4	63.4	—	42.1
		Q-11	30.1	78.2	—	53.5
	MgCl_2	Q-1	22.4	58.2	—	38.7
		Q-2	26.8	69.6	—	38.6
	NaCl	Q-12	26.1	67.8	—	46.0
		L-6	34.7	90.0	—	60.8
	NH_4NO_3	P-12	30.4	78.9	—	52.6
		O-11	31.8	82.5	—	57.4
	応力腐食割れ試験実施無し	Q-5	25.8	67.0	—	45.3
		Q-8	28.2	73.2	—	47.5
		健全1	38.5	100.0	—	67.6
応力腐食割れ試験中に破断	MgCl_2	R-3	33.3	86.5	454	47.0
		R-5	24.3	63.1	192	37.5
		R-9	29.9	77.7	141	31.0
		R-11	30.0	77.9	283	41.3
	NH_4NO_3	腐食44	34.5	89.6	73	35.0
		腐食45	34.8	90.5	170	39.0
		腐食47	35.5	92.2	132	36.0
		腐食49	35.9	93.4	145	34.0
		腐食50	35.9	93.3	147	36.0
		腐食51	30.8	79.9	17	35.0
		腐食52	34.5	89.7	119	35.0
		健全2	38.5	100.0	145.3	49.7

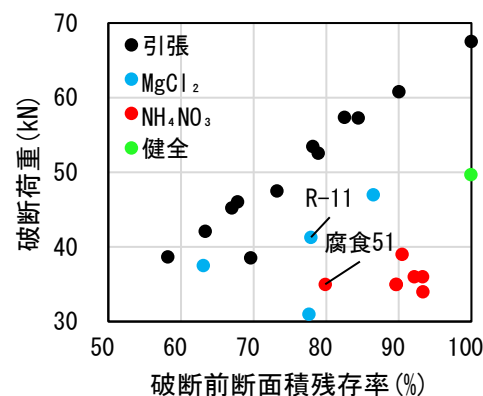


図-2 断面積と破断荷重の関係

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が約 5～25kN 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発生している既設 PC 道路橋を考えると, 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.