

切欠きを有する PC 鋼線の塩化物水溶液環境下での破断特性の評価

神戸大学大学院 学生会員 ○河原 康平 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 美濃 智広 神戸大学大学院 正会員 森川 英典
 神鋼鋼線工業（株） 山本 賢治

1. 研究目的

凍結防止剤使用環境下の既設 PC 道路橋において、PC 鋼線の腐食および脆性的な破断が問題となっているがそのメカニズムは未だ解明されていない。これに対し既往研究¹⁾²⁾では、硝酸アンモニウム水溶液および塩化物水溶液を用いた応力腐食割れ試験を実施し、腐食 PC 鋼線が脆性的に破断することを確認した。この破断には応力集中が大きな影響を与えていると考えられるが、腐食 PC 鋼線は複雑な形状を有しており、正確な応力集中係数、最大応力による評価が困難であった。また、塩化物応力腐食割れ試験²⁾では、初期荷重 25kN から 2kN ずつ漸増させる条件としていたが、試験開始時の PC 鋼線の応力分布が、実橋梁の PC 鋼線緊張時の応力分布と異なっていた。そこで、本論文では、応力集中係数が明確な形状の切欠きを導入した切欠き PC 鋼線に対し、応力分布がより実条件に近づくように荷重条件を変更した塩化物応力腐食割れ試験を行い、応力集中、荷重条件の違いが PC 鋼線の破断に与える影響を評価した。

2. 実験概要

PC 鋼線はφ7mm の B 種(JIS G 3536)を用い、ワイヤ一放電加工によって図-1 のような切欠きを導入した。各パラメータの値は表-1 に示す。応力集中係数(以降、 α)は形状および寸法のみによって定まるパラメータであり、今回は美濃¹⁾の式(1)によって算出した。

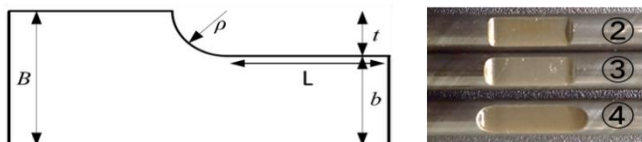


図-1 切欠き形状概要(左)と実際の様子(右)

表-1 切欠き形状のパラメータ一覧

鋼線名	L (mm)	t (mm)	ρ (mm)	α	切欠き部断面積(mm ²)
切欠き①	5	1.0	0.5	2.57	35.1
切欠き②	5	1.0	1.0	2.03	35.1
切欠き③	5	1.0	1.7	1.74	35.1
切欠き④	5	1.0	5.0	1.37	35.1
健全	—	—	—	1.00	38.5

$$\alpha = \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2.8 \frac{B}{b} - 2} \cdot \frac{t}{\rho} \right)^{0.65} \right\} \times \beta \quad (1)$$

ここで、 α ：応力集中係数、 B ：段差がない部分の部材厚さ(mm)、 b ：段差がある部分の部材厚さ(mm)、 t ：段違い量(mm)、 ρ ：曲率半径(mm)、 β ：補正係数 ($L > 0.5\text{mm}$ のとき、 $\beta = 1.1023 - 0.0088\rho - 0.0028t$)

また、断面積減少ではなく α による破断への影響を評価するため、曲率半径(以降、 ρ)のみを変化させ、異なる α を有する切欠き PC 鋼線を用意した。

これらの切欠き PC 鋼線に対し、引張試験、塩化物応力腐食割れ試験を実施した。塩化物応力腐食割れ試験は、PC 鋼線を 143°C-42wt% の MgCl_2 水溶液に浸漬し、載荷荷重は 1 日 1 回ずつ、破断するまで漸増させる条件で実施する。荷重条件は 2 種類設け、初期荷重 25kN の場合は 1 日 1 回+2kN ずつ、初期荷重 0kN の場合は 1 日 1 回+5kN ずつとした。初期荷重 0kN の条件は実橋梁での PC 鋼線緊張時に断面方向で応力分布が一定である状態を再現したものである。なお、PC 鋼線にどちらの載荷条件を実施したのかを区別するため、鋼線名の後ろに+2 または+5 を記した。

3. 試験結果および考察

切欠き PC 鋼線の α と引張試験における破断荷重残存率低下量を図-2 に示す。引張試験で破断した PC 鋼線はほぼ全て破断荷重残存率と破断前断面積残存率が 1:1 の比例関係にあることが既往研究²⁾で分かっており、塩化物応力腐食割れ試験の破断荷重残存率がこの直線から低下した量を、破断荷重残存率低下量とする。つまり、破断荷重残存率低下量は塩化物応力腐食割れ試験での PC 鋼線の破断が引張破断と比べてどの程度脆性的であったかを示す指標と考えることができる。

切欠き②から順に切欠き③、④と破断荷重残存率低下量が低下しており、切欠き②から④は α と相関があ

キーワード PC 鋼線、応力腐食割れ、局部腐食、応力集中、塩化物

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

る。つまり切欠き②～④の破断は応力集中の影響を受けていたことを意味している。切欠き①に関しては、 $\rho=0.5\text{mm}$ であり、切欠き端部で非常に局所的に応力が集中するため、破断荷重にほとんど影響を及ぼさなかったものと考えられる。つまり、塩化物水溶液環境下においては、 $0.5\text{mm} \leq \rho \leq 1.0\text{mm}$ を満たすどこかの ρ を境として、応力集中が PC 鋼線の引張破断に影響するかどうかを判断できる可能性が示された。また、塩化物応力腐食割れ試験においても同様に切欠き①のみ応力集中係数と破断荷重残存率低下量に相関が見られない傾向が確認された。

PC 鋼線の破断荷重残存率低下量と仮想最大応力 σ_{max} の関係を図-3 に示す。先述したように切欠き①のみ破断の傾向が異なるため、図中では切欠き①と切欠き②～④は区別している。仮想最大応力は次の式(2)で表される。

$$\sigma_{max} = \sigma_{ave} \times \alpha \quad (2)$$

ここで、 σ_{max} ：仮想最大応力、 σ_{ave} ：平均応力、 α ：応力集中係数

切欠き PC 鋼線については、引張試験では PC 鋼線ごとの仮想最大応力の差が大きく、破断荷重残存率低下

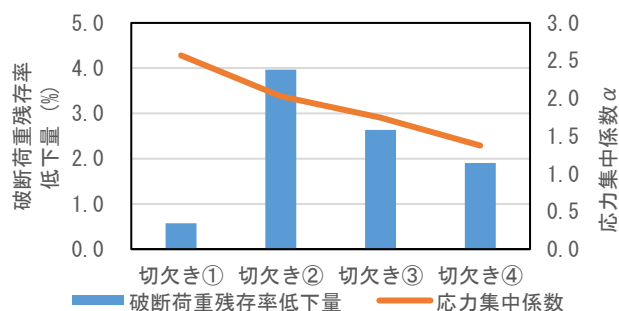


図-2 切欠き PC 鋼線の α と引張試験における破断荷重残存率低下量

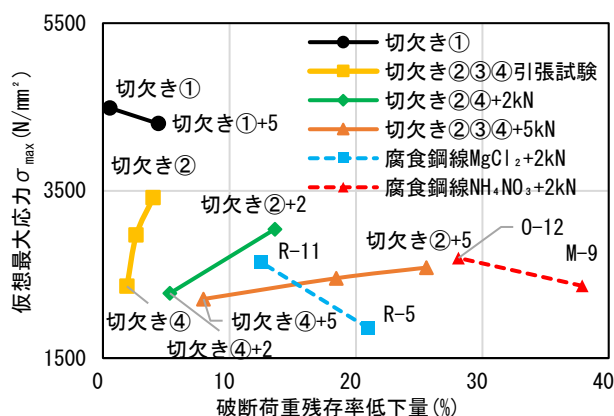


図-3 PC 鋼線の破断荷重残存率低下量と仮想最大応力 σ_{max}

量は差が小さい、つまり引張試験での破断では応力集中の影響が支配的であったのに対し、塩化物応力腐食割れ試験では、仮想最大応力の差が小さく、破断荷重残存率低下量の差は大きい、つまり塩化物による脆化の影響が支配的であったことがグラフの傾きとして表れている。また、漸増荷重が+2kN の試験と+5kN の試験では+5kN の方がグラフの傾きが緩やかであり塩化物による脆化の影響が強かったことがわかる。ただし、その傾きは全て正であった。

一方、腐食 PC 鋼線については、グラフの傾きが負になっていた。特に、切欠き PC 鋼線と腐食 PC 鋼線に対して同じ+2kN の試験条件を実施した結果によると、同じ試験条件であっても、その傾きは全く異なっており、腐食 PC 鋼線には応力集中係数とは別の何らかの形状的な要素が破断に影響している可能性がある。

4. まとめ

切欠き PC 鋼線に引張試験、塩化物応力腐食割れ試験を実施した結果、破断荷重は推定引張破断荷重よりも低下し、脆性的に破断した。また、この切欠き PC 鋼線は曲率半径 ρ のみ異なることから、 $0.5\text{mm} \leq \rho \leq 1.0\text{mm}$ を満たす ρ を境として、応力集中が脆性的な破断に影響するか判断できる可能性を示した。また、破断荷重残存率低下量と仮想最大応力の関係によると、試験時の荷重条件によって鋼線の脆化に与える度合いが異なり、それはグラフの傾きとして表すことができた。その一方で、同じ試験条件で切欠き PC 鋼線と腐食 PC 鋼線を破断させると、まったく逆の傾向が表れたことから、腐食 PC 鋼線には、切欠き PC 鋼線には存在しない何らかの表面形状的な要素があり、それが実橋梁における PC 鋼線の脆性的な破断に影響を与えている可能性がある。

参考文献

- 1)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。
- 2)黒野承太郎，美濃智広，森川英典，河村睦：塩化物水溶液環境下での応力腐食割れに基づく 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，第 18 巻，pp.697-700，2018。