

第 V 部門

PC 鋼線の応力集中が活性溶解型応力腐食割れに及ぼす影響の評価

神戸大学大学院 学生会員 ○金 微淵
神戸大学大学院 正会員 森川 英典

神戸大学大学院 学生会員 河原 康平
神鋼鋼線工業(株) 山本 賢治

1. 研究目的

PC 橋に使われている PC 鋼線は、硬く脆い組織であるセメント相と柔らかく延性に優れたフェライト相の層状の多相組織であるパーライト組織で形成されている。そのため、軸直角方向の亀裂進展に対して強い抵抗性を持っている。しかし既設 PCT 桁橋においては、PC 鋼線が脆性的に破断した事例が報告されている。その破断した PC 鋼線の一部は長手方向への滑り破断がある。

これに対し既往研究¹⁾では、硝酸アンモニウム水溶液を用いた応力腐食割れ試験を実施し、切り欠きを有する PC 鋼線の長手方向への脆性的な破断現象が報告されている。本論文では、曲率半径の異なる 5 種類の切り欠き PC 鋼線を作り、硝酸アンモニウム水溶液を使った応力腐食割れ試験を行い、応力勾配及び荷重条件の違いが 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、ワイヤー放電加工によって図-1 のような切欠きを施した。

ここで、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)，L：切り欠き部分の円弧部分と円弧部分の間の直線部分の長さ(mm)の 2 分の 1 である。

切り欠きを有する PC 鋼線を 100℃-20wt%の硝酸アンモニウム水溶液に浸漬した状態で定荷重を作用し

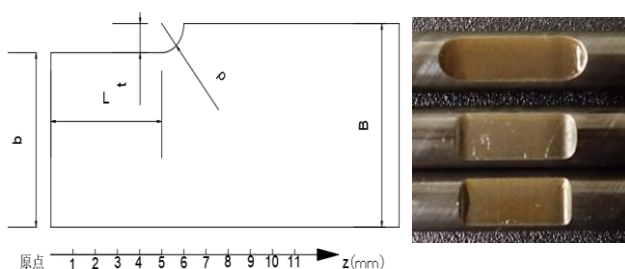


図-1 切り欠き加工した PC 鋼線

た。各パラメータの値は表-1 に示す。実験から得た各 PC 鋼線の破断時間を用いてパラメータの間の関係を分析した。

また、FEM 解析を用いて切り欠きを有する PC 鋼線と同じサイズ、形状のモデルを作成し、引張試験から得た材料特性を与え、弾塑性解析を行った。

3. 試験結果および考察

応力腐食割れ試験から得た破断時間と仮想最大応力の関係を図-2 に示す。仮想最大応力は美濃¹⁾の式(1)式(2)によって計算した。

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

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

ここで、α：応力集中係数、β：補正係数(L>0.5mm のとき、β=1.1023-0.0088ρ-0.0028t)、σ_{max}：仮想最大応力、σ_{ave}：平均応力。

図-2 は既往研究と同じように仮想最大応力が大きいほど破断時間が短くなる。そして仮想最大応力が 2000N/mm² 以下になると仮想最大応力が同程度でも破断時間のばらつきが非常に大きくなる。原因については、引張試験で得た PC 鋼線の降伏応力(0.2%耐力)は 1523.26N/mm² であるため、破断時間のばらつきが大きい。

表-1 各 PC 鋼線のパラメーター一覧

サンプル番号	実荷重条件(kN)	曲率半径ρ(mm)	応力集中係数α	仮想最大応力(N/mm ²)
D-1, D-2, 追加①	40.5	0.5	2.58	2945
D-3, D-4, 追加②	50.8	1	2.04	2945
D-5, D-6, 追加③	40.5	1	2.04	2325
D-7, D-8, 追加④	53.4	3	1.54	2325
D-9, D-10, 追加⑤	40.2	3	1.54	1754
D-11, D-12	44.5	5	1.39	1754
D-13, D-14	40.2	5	1.39	1585
D-15, D-16	49.3	15	1.13	1585

い PC 鋼線はまだ弾塑性状態（弾性状態から塑性状態への遷移状態）であると推測した。

FEM 解析から得た, Mises 応力最大値と破断時間の関係を図-3 に示す. Mises 応力最大値が 1600 N/mm^2 以上になると Mises 応力最大値が大きくなるほど破断時間が短くなる, そして 1600 N/mm^2 以下でも同じ傾向が見える。

Mises 応力最大値が 1600 N/mm^2 を境に傾向が変わる原因を調べるため, 各 PC 鋼線の Mises 応力勾配 (実 PC 鋼線での亀裂発生場所の z 軸方向の Mises 応力の変化量) と Mises 塑性ひずみ勾配を比較した. 例として図-4 に D-7, D-8 のグラフと図-5 に D-11, D-12 のグラフを

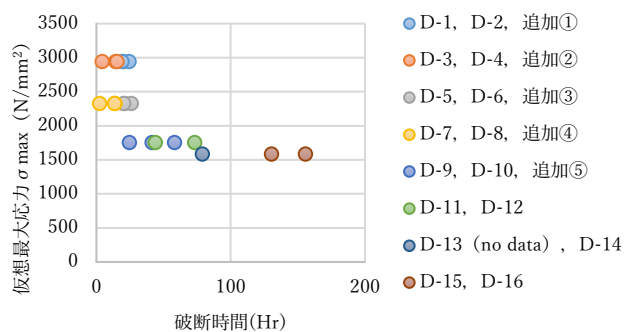


図-2 仮想最大応力と破断時間の関係図

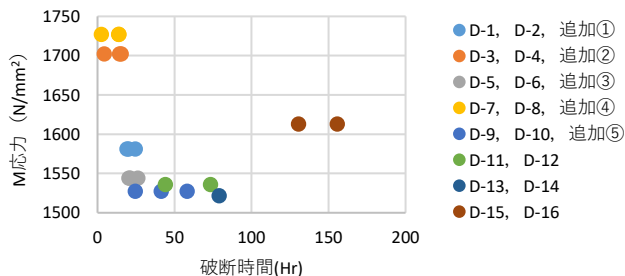


図-3 Mises 応力最大値と破断時間の関係図

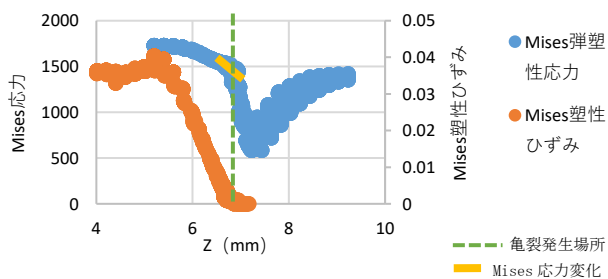


図-4 D-7, D-8 応力と塑性ひずみの対照グラフ

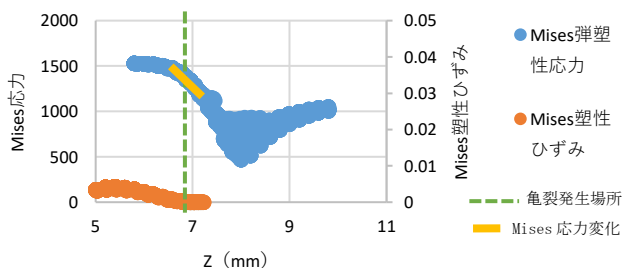


図-5 D-11, D-12 応力と塑性ひずみの対照グラフ

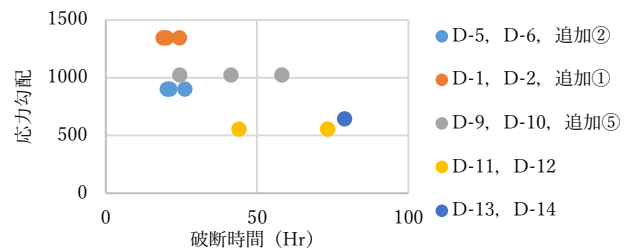


図-6 弾塑性状態の応力勾配と破断時間の関係

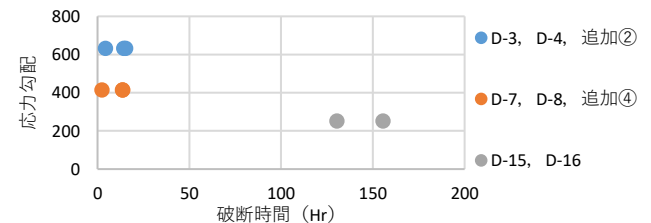


図-7 塑性状態の応力勾配と破断時間の関係

示す, 横軸の方向は図-1 と同じ向きであり, 原点は切り欠き部分の円弧部分の間の直線部分の中心である. D-7, D-8 の横軸の原点からの距離 5 mm 位置での塑性ひずみが大きい, D-11, D-12 の横軸の原点からの距離 5 mm 位置での塑性ひずみが 0 に近い. 他の PC 鋼線も同じような傾向があり, Mises 応力 1600 N/mm^2 は使用した PC 鋼線の降伏応力 1523.26 N/mm^2 に近いので, 最大 Mises 応力は 1600 N/mm^2 を弾塑性域と塑性域の境界線と推測した。

上記の推測を用いて図-6 に弾塑性域のサンプルの応力勾配と破断時間の関係及び図-7 塑性域のサンプルの応力勾配と破断時間の関係を示す. PC 鋼線は弾塑性域で応力勾配が大きくなるほど破断時間が短くなる. 塑性域でも応力勾配と破断時間の関係は類似しているが, D-7, D-8, 追加④と D-3, D-4, 追加②の破断時間が逆の傾向があり, サンプル少ないため, 関係は明確でない。

4. まとめ

切り欠きを有する PC 鋼線が硝酸アンモニウム水溶液環境で定荷重が作用し, 破断する場合, 荷重条件によって弾塑性状態の PC 鋼線と塑性状態の PC 鋼線が存在する. 弾塑性状態のまま破断する PC 鋼線は応力勾配が大きくなるほど破断時間が短くなる. 塑性状態の PC 鋼線の応力勾配と破断時間の関係は明確でない。

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.