

## 既設 PC 道路橋の PC 鋼線の遅れ破壊メカニズムに関する考察

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) 河村 睦

### 1. はじめに

凍結防止剤使用環境下の既設 PC 道路橋において、グラウト充填不良部での局部腐食が確認されている。PC 構造物の場合、PC 鋼線に緊張力が作用しているため、遅れ破壊（応力腐食割れ、水素脆性割れ）により脆性的な破断に至る可能性が指摘されている。本研究では、PC 鋼線の遅れ破壊実験を実施するとともに、既設 PC 道路橋にて実際に確認された破断事例と、既設コンクリート内部に位置する PC 鋼線の環境条件を踏まえ、既設 PC 道路橋の PC 鋼線の遅れ破壊メカニズムに関して考察を行った。

### 2. PC 鋼線の遅れ破壊実験および実橋での破断事例

局部腐食の発生した PC 鋼線が、応力腐食割れ、水素脆性割れにより破断した場合の破断性状を比較するために、電食切欠きにより局部腐食を模擬した PC 鋼線を用いて、活性溶解型応力腐食割れ試験および水素脆性割れ試験を実施した。活性溶解型応力腐食割れ試験については、ガラス管の中に 100℃に熱した 20wt%の硝酸アンモニウム水溶液を入れ、そこに PC 鋼線を浸漬することで実施した。また、水素脆性割れ試験については、50℃に熱した 20wt%のチオシアン酸アンモニウム水溶液を使用した。試験荷重は 0.6Pu（Pu:実引張荷重）である 40.1kN とした。

活性溶解型の応力腐食割れ試験で破断した PC 鋼線の状況を写真-1 に示す。伸線加工を施した PC 鋼線および PC 鋼より線は、硬く脆い組織であるセメント相と軟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鋼で形成されている。活性溶解型の応力腐食割れの亀裂は、活性溶解型応力腐食環境において PC 鋼線に引張応力が作用し、フェライト相で鉄が溶出することにより亀裂が発生・進展し、その亀裂の進展をセメント相が阻止し、セメント相に沿って向きを変え、PC 鋼線の長手方向に亀裂が進展することが知られている<sup>1)</sup>。一方、水素脆性割れ試験で破断した PC 鋼線の状況を写真-2 に示す。水素脆性割れの破断性状はマクロ的にみると、ガラス棒が割れたような破断面となることが知られている<sup>2)</sup>。

PC 鋼線における、実構造物での遅れ破壊事例を写真-3～写真-5 に示す。

いずれの事例においても、PC 鋼線の長手方向に亀裂進展している様子が確認できることより、これらの PC 鋼線では、活性溶解型の応力腐食割れが発生していたものと推察することができる。

### 3. PC 鋼線の遅れ破壊メカニズム

構造物内部の PC 鋼線周辺に凍結防止剤等の塩化物イオンが存在し、腐食による破断に至るメカニズムは、まず、PC 鋼線が腐食環境におかれた場合、不動態皮膜が破壊され、鋼材の地肌が外気にさらされる。このとき酸素が供給される環境にあると、酸化還元反応によって鋼材表面から腐食が進展する。不動態皮膜が破壊された箇所ではアノード・カソード反応が起こり、孔食が形成・進展する。孔食が進展し、PC 鋼線断面が減量することで PC 鋼線自身が有する引張強度を超え、破断に至るケースがある。これが延性破壊である。

キーワード PC 鋼線, 遅れ破壊, 応力腐食割れ, 水素脆性割れ, 破断性状

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



(a) 両側電食 1mm



(b) 両側電食 40mm



(c) 片側電食 1mm

写真-1 活性溶解型応力腐食割れ試験後の破面写真



(a) 両側電食 1mm



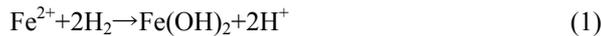
(b) 両側電食 40mm



(c) 片側電食 1mm

写真-2 水素脆性割れ試験後の破面写真

また、孔食内部において以下の式(1)の加水分解作用が生じることにより水素イオンが発生する<sup>6)</sup>。



Fe- H<sub>2</sub>O 系の酸化物系を対象にした酸化・還元反応の平衡電位と溶液の pH との関係を図-1 に示す。線で囲まれた領域は、図-1 に記載される物質が熱力学的に安定であることを示している。図-1 の線①,②は H<sub>2</sub>O の安定領域を示すもので、線①は水素発生線、線②は酸素発生線と呼ばれる。水素発生線①は以下の式(2)のようになる。



図-1 および化学式(1)より、鋼材表面には局部腐食による錆の発生によって水素が吸着する。その大部分は化学式(2)により水素分子となって空气中へ放出されるが、一部の水素は鋼材内に侵入し、鋼材を脆化させ、水素脆性割れを生じさせる。表-1 に示される元素を含む化合物は水素侵入を促進する水素侵入促進剤(触媒)であることが知られており、それら水素侵入促進剤が存在した場合には、水素の鋼材内部へ侵入量が増加する<sup>7)</sup>。しかし、水素侵入促進剤が存在しない場合、水素侵入量が極めて少なく水素脆性割れが発生し難い。従って水素脆性割れより先に活性溶解型の応力腐食割れが発生すると推察することができる。

表-1 に示される水素侵入促進剤は、一般的な環境下における既設 PC 道路橋のコンクリートおよび PC 鋼線の内部にはほとんど存在しない元素である。このことから、それらの元素が存在しうるような特殊な環境下におかれている場合を除き、既設 PC 道路橋における PC 鋼線の遅れ破壊メカニズムにおいては、水素脆性割れは起こり難いと考えられる。

**4. まとめ**

PC 鋼線の遅れ破壊は、活性溶解型の応力腐食割れ、水素脆性割れの可能性が考えられるが、実橋梁破断事例での PC 鋼線亀裂進展状況、および一般的な環境下での既設 PC 道路橋では水素脆性割れが生じる可能性は低いと考えられること等より、一般的な環境下における既設 PC 道路橋の PC 鋼線において生じる遅れ破壊は、活性溶解型の応力腐食割れであるものと推察できる。

**参考文献**

- 1) プレストレストコンクリート, Vol.27, No.1, pp.117, 1985
- 2) 高井健一:金属材料の水素脆性克服に向けた分析技術の重要性・新展開, SCAS NEWS, 2009-II 号, Vol.30, pp3-6, 2009.
- 3) 土木学会:PC 構造物の現状の問題点とその対策, 2003.
- 4) 日経 BP 社:日経インストラクション, 2011 年 12 月 12 日号, pp.54-58, 2011.
- 5) 小林憲一,大平英生,登石清隆,羽田伸介:妙高大橋の PC ケーブル破断調査と対策,橋梁と基礎, Vol.45, No.9, pp32-38, 2011.
- 6) 南雲道彦:水素脆性の基礎(水素の振る舞いと脆化機構), 内田老鶴圃, pp.132-158, 2008.
- 7) 松山晋作:遅れ破壊, 日刊工業新聞社, pp.1-6, 1989.



写真-3 PC 鋼線破断事例<sup>3)</sup>



写真-4 PC 鋼線破断事例<sup>4).5)</sup>



写真-5 PC 鋼線破断事例<sup>4)</sup>

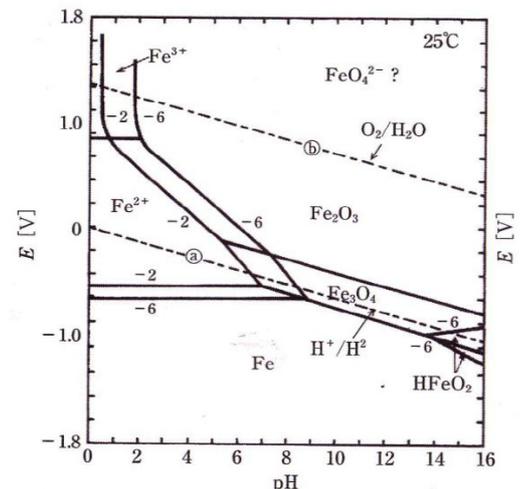


図-1 Fe-H<sub>2</sub>O 系の電位と pH の関係 (25°C)<sup>6)</sup>

表-1 水素侵入促進剤としての効果がある元素<sup>6)</sup>

14 族	15 族	16 族
	P	S
	As	Se
Sn	Sb	Te
Pb	Bi	