

マルテンサイト系 PC 鋼棒の水素脆化感受性に関する基礎的研究

大成建設株式会社	正会員	○小松原 裕
中日本高速道路株式会社	正会員	村中 誠
株式会社日本ピーエス	非会員	天谷 公彦
京都大学	正会員	高谷 哲

1. 背景

近年、老朽化したコンクリート構造物の劣化が問題となっており、劣化検知手法や評価手法を含む適切な維持管理手法の確立が課題とされている。特に、四方を海に囲まれており、凍結防止剤を散布する山間部も多い我が国では、コンクリート中の鋼材の腐食が深刻な課題となっている。

コンクリート構造物の中でも、ポストテンション方式の PC 構造物では、PC 鋼材とシース管との隙間に生じるグラウト充填不足部での鋼材腐食が問題となっている。また、高強度鋼材においては水素脆化による遅れ破壊が課題となっている。水素脆化は、高い鋼材強度、継続的な応力の付与、水素吸蔵の 3 つの要因により発生すると考えられており、グラウト未充填部を有する PC 鋼材はこれらの要因を満たすため、水素脆化リスクが高いとされている。

そこで本研究では、水素脆化感受性が高いと考えられるマルテンサイト系 C 種の PC 鋼棒を対象として水素脆化感受性評価試験を行い、水素脆化メカニズムならびに水素脆化感受性に関する基礎的な検討を行った。

2. 試験概要

2.1 引張試験

試験体は $\Phi 9.2\text{mm} \times 300\text{mm}$ のマルテンサイト系 PC 鋼棒 (C 種) である。水素吸蔵方法は酸浸漬法とし、10mass%硫酸水溶液 (10% $\text{H}_2\text{SO}_4\text{aq}$) に 24 時間浸漬した。その後、試験体表面の溶液を洗い流し、万能試験機を用いて引張試験を行った。引張試験では、つかみ部 50mm、チャック間距離 200mm、クロスヘッド速度 1mm/min として、試験体が破断するまで試験を行った。

酸浸漬ならびに引張試験の様子を図 1 に示す。引張試験終了後は、走査電子顕微鏡を用いて破断面の観察を行った。

2.2 定荷重試験

試験体は $\Phi 11\text{mm} \times 2500\text{mm}$ のマルテンサイト系 PC 鋼棒 (C 種) である。定荷重試験では、FIP 試験と同様に、試験体を 50°C の 20mass%チオシアン酸アンモニウム水溶液に浸漬させながら、引張強度の 70~80%の応力を付与し続けた。

FIP 試験は国際プレストレストコンクリート連盟で国際的に規格化された試験であり¹⁾、PC 鋼材の品質管理等に活用されている。FIP 試験では、本試験と同様の条件で鋼材に緊張力を与え、破断までの時間を測定する試験である。浸漬溶液がチオシアン酸アンモニウム水溶液であるため、実際の腐食環境を模擬しているわけではないが鋼材の水素脆化感受性を評価することができる試験である。

本研究で行った定荷重試験の様子を図 2 に示す。試験後、試験体が破断した場合は、走査電子顕微鏡を用いて破断面の観察を行った。

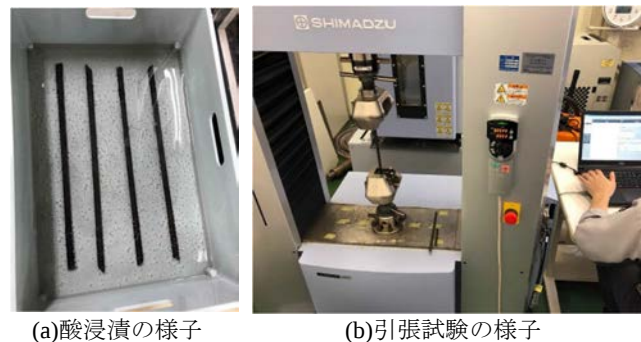


図 1 酸浸漬ならびに引張試験の様子

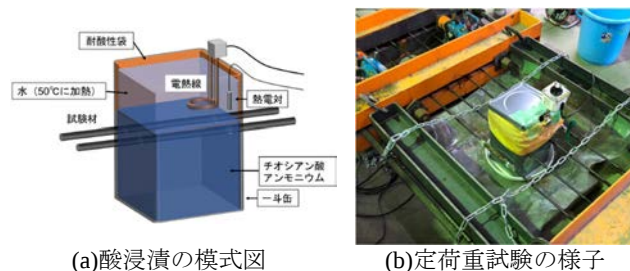


図 2 定荷重試験の様子

キーワード 水素脆化, 鋼材腐食, PC 鋼棒

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 新宿センタービル 大成建設株式会社 TEL 03-5381-5419

3. 試験結果

3.1 引張試験結果及び考察

2.1 の引張試験で破断した試験体の破断面を図 3 に示す。全体図では、図中の赤丸で示すクレーターのような凹凸が確認された。高倍率像では、破断面内側部では主に①に示す等軸ディンプルが、破断面外側部では主に②に示す伸長ディンプルが確認され、マクロな視点では引張試験において典型的な延性破壊が生じたと考えられる。

一方、低倍率像で確認されたクレーターのような箇所の高倍率像(③, ④)では第二相粒子が存在したと思われる箇所を中心とした円状の領域に、ディンプルとは異なる脆性的な破面形態(粒内脆性破壊と記載)が確認された。

以上より、マクロ的な破壊挙動としては延性破壊となるが、断面内では水素の影響と思われる脆性的な破面形態が認められ、部分的な塑性変形能の低下(水素脆化)が生じていたと考えられる。

3.2 定荷重試験結果及び考察

2.2 の定荷重試験の結果、試験開始から 136 時間後に試験体の破断が確認された。定荷重試験で破断した試験体ならびに破断面を図 4 に示す。図 4(a)より破断部には顕著な塑性変形の痕跡はなく、水素の影響により脆性的な破壊が生じたと考えられる。

図 4(b)で楕円形に示した領域では、腐食による破断面の損傷が認められたが部分的に粒界破面(粒界割れ)に類似した破面形態が観察された。それ以外の領域では主に等軸ディンプルが確認された。破面解析により、①周辺で発生したき裂が楕円形領域内に拡大後、ディンプルが観察された箇所を最終破断部として破壊していることが確認された。破壊に至るまでのメカニズムは、①周辺に存在した応力集中箇所に水素が集積して水素脆化割れ(微小き裂)が発生し、割れ先端部にさらに水素が集積することで割れが拡大した後に、最終破断したと考えられる。

本試験結果より、FIP 試験のように定荷重で行う試験では、転位等の欠陥だけでなく表面の微小な傷も水素の集積箇所となりうることから、表面の傷部から水素脆化割れが生じる可能性があることが考察される。

以上の結果から、マルテンサイト系 PC 鋼棒は、水素の吸蔵条件によっては、水素脆化割れに起因する破断が起きるリスクがあると考えられる。

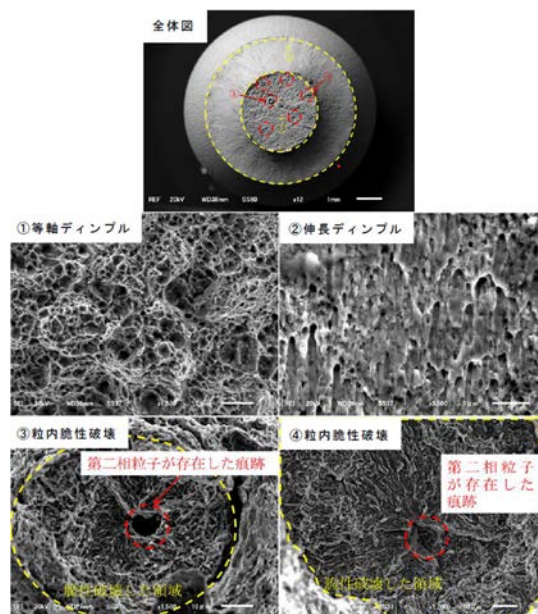
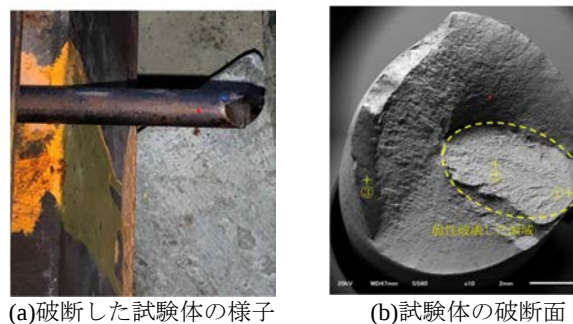


図 3 引張試験終了後の破断面



(a)破断した試験体の様子

(b)試験体の破断面

図 4 定荷重試験で破断した試験体ならびに破断面

4. 結論

- (1) 引張試験での PC 鋼棒の破断は、マクロ的な破壊挙動としては延性破壊となるが、断面内では水素の影響と思われる脆性的な破面形態が認められ、部分的な塑性変形能の低下(水素脆化)が生じていたと考えられる。
- (2) 定荷重試験での PC 鋼棒の破断は、応力集中部に集積した水素による水素脆化割れ(微小き裂)が生じ、微小き裂先端の応力集中箇所に水素が集積しやすくなることで、さらに水素脆化割れが生じるというメカニズムにより割れが拡大した結果、定荷重に耐えられなくなり最終破断したと考えられる。
- (3) 実構造物においては、マルテンサイト系 PC 鋼材には、鋼材表面からの水素脆化割れを要因として、FIP 試験に近い脆化が生じる可能性があると考えられる。

謝辞：本研究を行うに当たり大阪産業技術研究所の濱田真行氏に多大なる協力をいただいたことに心より感謝します。

参考文献

- 1) Fédération Internationale de la Précontrainte, Report on Prestressing Steel 5, Sep., 1 (1980)