吊橋ケーブル用高強度亜鉛めっき鋼線の遅れ破壊特性試験

本州四国連絡橋公団　正会員　○秦　健作
本州四国連絡橋公団　木村　一也
㈱神戸製鋼所　穐山　正幸

1. はじめに

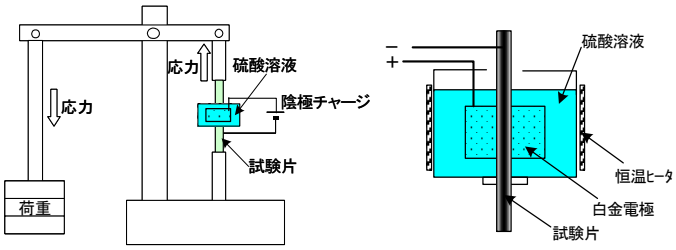
現在進められている超長大吊橋の検討では、建設費の縮減を図る観点から、設計のさらなる合理化を行ってケーブル用ワイヤの安全率を見直し、より高応力状態で使用することが検討されている。高強度ワイヤを高応力度で使用する場合の問題点の一つとして、遅れ破壊発生の可能性の有無を検討する必要性が指摘されている。

明石海峡大橋に 180kgf/mm^2（1760N/mm^2）強度を有する高強度亜鉛めっき鋼線を採用するに当たっては、従来から適用され実績のある 160kgf/mm^2（1570N/mm^2）強度を有する亜鉛めっき鋼線との対比試験を行い、遅れ破壊特性が同等であることを確認している。

筆者らは高強度ワイヤをより高応力度で使用する検討の一環として、遅れ破壊が発生する限界状態および実環境下で遅れ破壊が発生する可能性の有無を把握するために、遅れ破壊現象の直接的因子であるワイヤの水素吸蔵量（拡散性水素量）そのものに着目して、1)遅れ破壊促進試験、2)大気暴露下での拡散性水素量測定試験を行い、その拡散性水素量の定量的比較から遅れ破壊に対する安全性の評価を行った。

2. 遅れ破壊促進試験

試験は、明石海峡大橋用に製作した線径 5.23mm の 180kgf/mm^2（1760N/mm^2）強度ワイヤを供試体として用い、めっきを剥がし、表面平滑材と周囲にノッチ（深さ 0.5mm、角度 60°、切欠き底半径 0.1mmR）付与材に、引張り応力（100～150kgf/mm^2（980～1470N/mm^2））を負荷した状態で水素を陰極チャージし、チャージ電流およびチャージ時間と、遅れ破壊の関係を得た。図-1 に遅れ破壊促進試験装置の概念図を示す。



試験温度：30℃　　試験溶液：ｐH3･H2SO4+0.01mol/ｌ-KSCN

図-1　遅れ破壊促進試験装置概念図

一方、めっきを剥がしたワイヤチップ（約 1gf）を用い、同様の水素チャージ条件を再現し、チャージ電流およびチャージ時間と、ワイヤ内の拡散性水素量の関係を得た。拡散性水素量の分析は、大気圧イオン化質量分析計 API-MS（Atmospheric Pressure Ionization Mass Spectrometer）により行い、遅れ破壊に直接影響する第 1 ピークの拡散性水素量と、遅れ破壊に直接影響しないと言われている第 2 ピークの拡散性水素量に分類した。

表面平滑材の遅れ破壊促進試験結果を表-１、ノッチ付与材の遅れ破壊促進試験結果を表-2 に示す。また、チャージ電流 60、100、200 mA/cm^2 で 100 時間チャージした時の水素量測定グラフを図-2 に示す。

表-1　表面平滑材の遅れ破壊促進試験結果

負荷応力 kgf/mm^2(N/ mm^2)	ﾁｬｰｼﾞ電流 mA/cm^2	破断の有無/破断時間 Hr	拡散性水素量　ppm	
			第 1 ﾋﾟｰｸ	第 1+第 2 ﾋﾟｰｸ
120 (1180)	400	破断無　137Hr 以上	>1.19	>1.77
135 (1320)	400	破断無　141Hr 以上	>1.19	>1.77
150 (1470)	100	破断無　138Hr 以上	1.06	1.61
	200	破断無　140Hr 以上	1.19	1.77
	400	破断無　138Hr 以上	>1.19	>1.77

キーワード　：吊橋ケーブル、亜鉛めっきワイヤ、遅れ破壊
＊ 連絡先　　：〒651-0088 神戸市中央区小野柄通 4-1-22　TEL 078-291-1071 FAX 078-291-1362

表-2　ノッチ付与材の遅れ破壊促進試験結果

負荷応力 kgf/mm²(N/ mm²)	ﾁｬｰｼﾞ電流 mA/cm²	破断の有無/破断時間 Hr	拡散性水素量　ppm	
			第 1 ﾋﾟｰｸ	第 1+第 2 ﾋﾟｰｸ
100 （980）	59.6	破断無　100Hr 以上	1.04	1.55
	200	破断無　163Hr 以上	1.19	1.77
	400	破断無　216Hr 以上	>1.19	>1.77
120 （1180）	59.8	破断無　100Hr 以上	1.04	1.55
	200	破断無　137Hr 以上	1.19	1.77
	400	破断無　216Hr 以上	>1.19	>1.77
135 （1320）	10	破断無　240Hr 以上	0.81	1.33
	30	破断無　145Hr 以上	(0.90)	(1.42)
	59.6	57.6Hr 破断	0.81	0.96
	59.6	破断無　162Hr 以上	1.04	1.55
	100	破断無　142Hr 以上	1.06	1.61
	100	破断無　164Hr 以上	1.06	1.61
150 （1470）	10	2.4Hr 破断	<0.52	<0.65
	30	2.4Hr 破断	0.52	0.65
	59.6	7.0Hr 破断	1.04	1.55
	200	0.6Hr 破断	1.19	1.77

水素チャージの結果、表-1、-2 および図-2 に見るようにチャージ電流 60 mA/cm²･チャージ時間 100Hr で第 1 ピーク拡散性水素量はは 1.04ppmとなり、チャージ電流を増加させてもその増加は微小で、ほぼ飽和の域に達していると想定される。

遅れ破壊促進試験の結果、表面平滑材では負荷応力 150kgf/mm²（1470N/mm²）においても遅れ破壊が発生しなかった。また、ノッチ付与材では負荷応力 150kgf/mm²（1470N/mm²）で明確な遅れ破壊が生じ、負荷応力 135kgf/mm²（1320N/mm²）で遅れ破壊が発生する可能性が認められた。

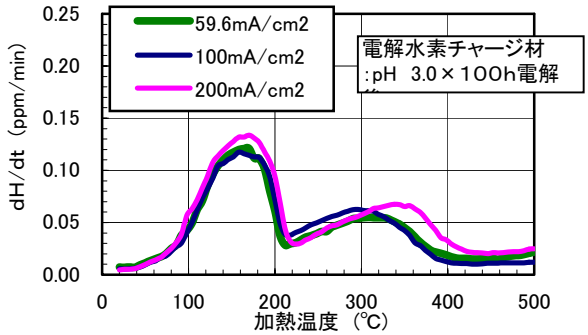


図-2　拡散性水素量測定結果

3. 大気暴露下での拡散性水素量測定試験

試験は、促進試験と同じく、明石海峡大橋用に製作された高強度ワイヤを用いた。ワイヤの亜鉛めっきを剥がし、明石海峡大橋の補剛桁内に暴露し、1 ヶ月後、3 ヶ月後、1 年後の拡散性水素量を測定した。測定結果を表-3 に、1 年後の水素量測定グラフを図-3 に示す。

表-3　大気暴露下の拡散性水素量測定結果

		1 ヶ月暴露	3 ヶ月暴露	1 年暴露
拡散性水素量 ppm	第 1 ﾋﾟｰｸ	0.06 (0.03～0.08)	0.06 (0.04～0.09)	0.11 (0.08～0.13)
	第 2 ﾋﾟｰｸ	0.18 (0.16～0.19)	0.08 (0.04～0.10)	0.17 (0.13～0.23)

大気暴露下での拡散性水素量は、1 年後においても 0.11ppm 程度で微小なレベル値であった。3 ヶ月後と比べるとわずかな増加傾向があるが、明確な第 1 ピークが見られず拡散性水素量が蓄積される状態にないと判断される。

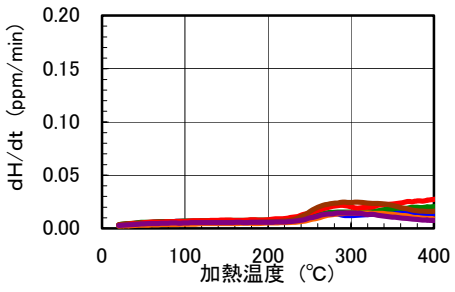


図-3　1 年暴露後の拡散性水素量

4．結論

1）高強度亜鉛めっき鋼線は、高応力度状態においても優れた遅れ破壊特性を有している。

2）大気暴露下で鋼線に浸入する拡散性水素量は小さい。

3）現在検討中の設計応力レベルにおいては、高強度亜鉛めっき鋼線の遅れ破壊は生じないと考えられる。