

セメントグラウトされたケーブルの腐食に関する実験

大阪大学工学部 正 員 松井繁之 (株)NKK 正 員 〇三輪恭久
大阪大学工学部 学生員 金本圭史 大阪大学工学部 正 員 福本湧士

1. はじめに 斜張橋は、景観上の考慮が必要な場合によく採用されている。しかしながら、斜張橋の生命線ともいえるケーブルが、近年になって海外の各所で大きな問題を引き起こしている。西ドイツのUlrich Finsterwalderは、2年間にわたる実態調査を行い、ここ数10年で世界に建設された200橋近い斜張橋のほとんどにおいてケーブルの腐食が発生しており、それも建設後比較的早い時期であると報告している。ケーブルの防錆には種々のものがあるが、ほとんどは、ケーブル鋼材を鋼管やポリエチレン管などで被覆し、その空隙をセメントミルク等でグラウトする方法である。実橋梁において腐食が発生した原因として、被覆管が施工時の取り扱いやグラウト注入時の高い圧力等によって、また、施工後の急激な温度変化や激しい振動によって亀裂が発生し、そこから外気や雨水が進入し、鋼材の腐食が発生すると説明されている。しかし、ケーブルの腐食は施工後かなり早期に発生しており（実橋梁調査によれば、建設後3年でケーブルを取り替えた例もある）、被覆管が破壊されてない場合も多いと考えられる。

2. 密閉ケーブルモデルによる温度サイクル実験 上記の後者の場合、腐食の原因となる酸素や水は、被覆管外部から供給されるのではなく、内部にそれらを供給する機構が存在していることが考えられる。そこで以下のような2点の直接要因と温度変化が原因していると推定した。

(1)グラウトが、ケーブルの鋼索線間を完全に充填できず、その空隙に酸素が残存している。また、グラウト中に酸素が溶存する。これにより腐食のための酸素が供給可能である。

(2)セメント系グラウトは、注入時の流動性を考慮し水セメント比を若干高めに配合しているため、余剰水が多く含まれている。これにより腐食のための水分の供給が可能である。

(3)ケーブルは昼間太陽の直射日光を受けて60℃程度に上昇するが、これにより、グラウト中の余剰水が水蒸気となり鋼索線間に充満する。そして、夜間の冷却によって鋼索線表面に結露し下方へ流下する。この繰り返しの空隙中の残存酸素により錆が発生すると考えられる。さらに、グラウト材の流動性が不足することによって被覆管内を完全に充填できない、あるいはグラウトが硬化後に、乾燥収縮、ケーブルの伸縮・振動などによりクラックが発生する等の理由で大きな空隙が生じた場合にはその位置に錆が集中すると予想される。今回、上記の考えの妥当性を確認するために、鋼材、グラウト材、被覆管に種々の変化をもたせたケーブル模型を作製し、温度の繰り返し

表-2 温度、湿度の設定

設定項目	設定値	所要時間
温度	5℃	1時間15分保持
	5～60	45分で上昇
	60	1時間15分保持
	60～5	45分で下降
湿度	65%	一定

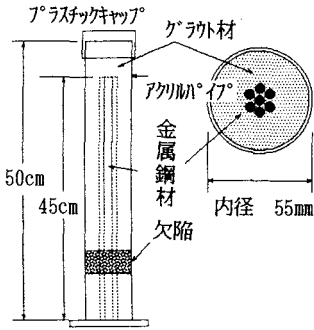


図-1 供試体

表-1 供試体の種類、個数

パイプ、鋼索		パイプ=5.0cm				パイプ=9.0cm			
		φ=5mm		φ=7mm		φ=5mm		φ=7mm	
グラウト、条件	特殊条件	垂鉛メッキあり	垂鉛メッキなし	垂鉛メッキあり	垂鉛メッキなし	垂鉛メッキあり	垂鉛メッキなし	垂鉛メッキあり	垂鉛メッキなし
モルタル	充填なし	2	2	3	3	2	2	3	3
	乾燥状態	2	2	3	3	2	2	3	3
	条件なし	2	2	3	3	2	2	3	3
	シス内充填なし	2	2	2	2				
	シス内充填あり	2	2	2	2				
	パイプに欠陥あり							3	3
PAGRE-GRAND ECLAIR	充填空隙あり			2	2			3	3
	条件なし			2	2				
	条件なし			2	2				
ポリウレタン	条件なし			2	2			2	2
	条件なし			2	2			2	2
鋼索合計		12	8	17	13	2	2	13	13
パイプ合計		50				30			

を与える試験槽に入れ、内部鋼材の腐食に関する実験を行った。供試体は斜張橋ケーブルを想定して、鋼材をアクリルパイプ内に入れ、セメントグラウトを充填したものである。アクリル管端部の片方は、アクリル板を接着剤で固定し、もう片方は、プラスチック製のキャップで覆った。供試体の形状寸法等を図-1に示す。供試体の種類は表-1に示すようにケーブル鋼材の種類、充填グラウトの配合、充填度の違い、被覆管の欠損の有無等の要因を考慮し、80本用意した。試験槽は、タバイエスベック製恒温恒湿器PR-4FPを用いた。温度、湿度の設定条件については表-2に示す。

3. 実験結果と考察 ほとんどの供試体は2本ずつ用意したので、温度サイクル数の違いについて調査するため、110サイクルを与えた後と、300サイクルを与えた後の2種に分けて解体し、鋼材の腐食状況について調査した。PWS中心素線における錆発生面積率の測定結果、および錆の程度の外観観察記録を、表-3～6に示す。今回の実験より、完全密閉された斜張橋ケーブル内部のケーブル鋼材が熱サイクルを受けるだけで発錆することが明確になった。その錆の程度は内的、外的欠陥があるものほど悪化するが、まったく正常な状態で施工されたケーブル鋼材でも錆が発生することも実証された。これは、数本の鋼材を束ねることのできる空隙に残存した酸素、水蒸気、グラウト中の溶存酸素や自由水が熱サイクルを受けて蒸発、結露を繰り返したことによるものと考えられる。ほとんどの供試体において、鋼材下部よりも鋼材上部の方が錆の発生量が多いという結果からもこれを裏

付けているといえる。さらに、水セメント比が小さいほど腐食・劣化が著しいこと、シースの内部を充填しなかった供試体において激しい錆が発生したこと、故意にグラウト中に空隙を与えたものにおいてその部分に錆が集中したこと、等の結果から、ケーブル内部の空隙量が腐食・劣化の程度を支配すると考えられる。なるべく、空隙が少なくなるような工夫、施工が肝要であると結論できる。また、PC構造でのPC鋼材の腐食・劣化に対しても、本研究の成果が応用できるものと思われる。ケーブル鋼材に亜鉛メッキを施すと大幅に発錆を遅らせることができる。また、グラウト材としてポリウレタン樹脂は、抜群の防錆効果があることが確認された。

参考文献

太田哲司：海外文献紹介、橋梁と基礎、pp.48,1989-7,& pp.55,1989-1

表-3 PWS中心鋼素線の錆発生面積率 (110CYCLE)

パイプ、充填材料 条件、鋼種	特殊条件	パイプ長=50cm				パイプ長=90cm			
		φ=5mm		φ=7mm		φ=5mm		φ=7mm	
		亜鉛メッキあり	なし	亜鉛メッキあり	なし	亜鉛メッキあり	なし	亜鉛メッキあり	なし
モルタル	充填なし	乾燥状態	0	88.9	0	44.4	0	90.0	0
	V/C=0.4	条件なし	0	65.6	0	44.4	0	90.0	0
		シス内充なし	1.1	100	7.8	100			
		シス内充あり	0	58.9	0	16.7			
		パイプに欠陥あり						0	22.9
		充填空洞あり			0	17.8		0	41.8
	0.3	条件なし		100		42.2			43.5
	0.5	条件なし		12.2		4.4			
	PPアラジン	条件なし			0	25.6		0	25.3
	ポリウレタン	条件なし						0	

表-4 鋼材の腐食程度 (110CYCLE)

パイプ、充填材料 条件、鋼種	特殊条件	パイプ長=50cm				パイプ長=90cm			
		φ=5mm		φ=7mm		φ=5mm		φ=7mm	
		亜鉛メッキあり	なし	亜鉛メッキあり	なし	亜鉛メッキあり	なし	亜鉛メッキあり	なし
モルタル	充填なし	乾燥状態	A	C		A	D	A	D
	V/C=0.4	条件なし	A	C	A	D		A	D
		シス内充なし	B	E	B	E			
		シス内充あり	A	C	A	C			
		パイプに欠陥あり						A	C
		充填空洞あり			A	C		A	D
	0.3	条件なし		D		D			
	0.5	条件なし		C		C			
	PPアラジン	条件なし			A	C		A	C
	ポリウレタン	条件なし							

(注) A: 鋼材に変化の見られないもの
B: 鋼材に色変がみられるもの
C: 鋼材に錆がみられるもの (軽程度: 浮き錆、表面錆)
D: 同上 (中程度: 体積膨張を伴うもの)
E: 同上 (重程度: Dがさらに進行したもの、断面欠損を含む)

表-5 PWS中心鋼素線の錆発生面積率 (300CYCLE)

パイプ、充填材料 条件、鋼種	特殊条件	パイプ長=50cm				パイプ長=90cm			
		φ=5mm		φ=7mm		φ=5mm		φ=7mm	
		亜鉛メッキあり	なし	亜鉛メッキあり	なし	亜鉛メッキあり	なし	亜鉛メッキあり	なし
モルタル	充填なし	乾燥状態	0	32.2	0	50.0	0	84.1	0
	V/C=0.4	条件なし	0	0	7.8			0	35.9
		シス内充なし	3.3	100	31.1	100			
		シス内充あり	0	45.7	0	15.6			
		パイプに欠陥あり						0	14.7
		充填空洞あり			0	24.4		0	31.8
	0.3	条件なし		88.9		53.3		0	40.6
	0.5	条件なし		76.7		0			
	PPアラジン	条件なし			0	46.7		0	35.4
	ポリウレタン	条件なし			0			0	0

表-6 鋼材の腐食程度 (300CYCLE)

パイプ、充填材料 条件、鋼種	特殊条件	パイプ長=50cm				パイプ長=90cm			
		φ=5mm		φ=7mm		φ=5mm		φ=7mm	
		亜鉛メッキあり	なし	亜鉛メッキあり	なし	亜鉛メッキあり	なし	亜鉛メッキあり	なし
モルタル	充填なし	乾燥状態	A	D	A	C		B	D
	V/C=0.4	条件なし	C	E	C	E			
		シス内充なし	B	C	A	C		A	C
		シス内充あり						A	C
		パイプに欠陥あり						A	C
		充填空洞あり			A	D		A	D
	0.3	条件なし		D		D			
	0.5	条件なし		C		B			
	PPアラジン	条件なし			A	C		A	C
	ポリウレタン	条件なし			A	A		A	A