

セメントグラウトされた斜張橋ケーブルの温度繰り返しによる腐食に関する研究

Corrosion of Grouted Cables of Cable Stayed Bridge due to Thermal Repetition

松井 繁之* 福本 晴士*

By Shigeyuki MATSUI and Yuhshi FUKUMOTO

Corrosion of stay cables grouted cement mortar in Cable Stayed Bridges and PC tendons in Prestressed Concrete Members is one of serious problems world wide. Until now, those damages were considered due to cracking of cement grout and breaking of the covers of cables and water penetration into the cables or ducts. In several cases those damage were found in very short period after the constructions. In those cases, it is very difficult to say that the cause is due to breaking of covers.

The authors have dropped the eyes on the thermal effect for the corrosion. There seems to be moisture and oxygen in the cement mortar and voids between steel wires and also in some grouting defect points. To prove the idea, the authors have carried out a series of environmental tests giving thermal repetition on the cement grouted cables. As expected, corrosion has occurred by only thermal repetition.

1. まえがき

斜張橋は、幾何学的構造が美しく、長大橋および歩道橋に近年頻繁に採用される形式である。しかしながら、比較的新しい形式である斜張橋の生命線ともいえる斜張ケーブルが、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ことが報告された¹⁻³⁾。

この報告を行ったのは、西ドイツのUlrich Finsterwalderである。この世界的規模の斜張橋の実態調査は2年間にわたって行われ、それによると、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が斜張ケーブルの腐食によってかなり危険な状態にあり、そして、建設後比較的早い時期にケーブルが腐食しているのが見受けられことも多いようである。

このような斜張ケーブルには様々な防錆工事⁴⁾がなされていて、このうちのほとんどは、ケーブル鋼材を鋼管やポリエチレン管などで被覆し、その間にセメントミルク等でグラウトするものである。この防錆工が機能しなかった原因として、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破損することによって考えられている。この場合には、ケーブ

* 工博 大阪大学教授 工学部土木工学科 (〒565 吹田市山田丘2-1)

ル鋼材位置まで外気や雨水が容易に進入し、鋼材の腐食が発生すると説明できる。しかし、ケーブルの腐食は施工後かなり早期に発生している場合（上記の報告によれば、建設後 3年でケーブルを取り替えた例もある。）、被覆管が破損していないと考えるのが妥当であろう。この場合、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することが考えられる。

そこで著者らは、以下のような2点の直接要因に太陽熱による温度変化が原因し、次のような機構で錆が発生すると着眼した。

- (1) まず、グラウトがケーブルの素線間の隙間にまでは充填されず、その隙間に空気が残存しており、さらに、グラウト中にもわずかに空気が入っており、腐食のための酸素の供給源となっている。
- (2) セメント系グラウトの水セメント比は、注入時の流動性を確保するために大きめに設定されているので、自由水が多く含まれている。ちなみに、モルタル中の全セメントが完全に化合物になる必要十分な水の量は理論的に17%といわれるが、実際には40%程度となっている。よって、 H_2O も十分にある。
- (3) このような状況下にあつてケーブルは昼間太陽の直射日光を受けて60℃程度に上昇すると、グラウト中の自由水が水蒸気になり、鋼線間の隙間が飽和される。そして、夜の冷却によって鋼線表面に結露する。もし、素線間の隙間が大きい場合には結露水が流下する。このような繰り返しのうちに、残存酸素が鋼材と反応し錆が発生する。さらに、グラウト材が、被覆管内に完全に充填されなかったり、硬化後にケーブルの伸縮・振動や乾燥収縮等によってひびわれが発生する等の理由で大きな空隙が生じる場合には、そこに水と酸素が集中し激しい錆が発生させることになる。

今回、上記の考えの妥当性を確かめるために、PC鋼棒、PWS、PCより線を使用して、セメントグラウトに種々の変化を持たせた斜張橋ケーブル模型を作製し、温度変化を繰り返し与える試験槽に入れ、これら鋼材の発錆の実験を行った。そして、耐久性のある防錆材、あるいは、防錆方法を見いだすため、鋼材の表面処理、グラウト材等をパラメーターにした。実験は2種の試験装置によって行われた。その1つは簡易な熱サイクル装置で、供試体の冷却を水道水の噴霧によつたもので冷却後の温度は約20℃であつた。他の1つは冷却後の温度を5℃程度にできる高性能の装置である。

2. 簡易熱サイクル環境促進装置による実験 (実験Ⅰ)

2.1 供試体

斜張ケーブルを想定して、鋼線などの鋼材をアクリルパイプ内に入れ、セメントグラウトを流し込んだ。アクリル管端部の下方は、アクリル板を接着剤で固定し、上方は、ゴムカバーで覆った。供試体の形状寸法等を、図-1に示す。被覆管にアクリル管を使用したのは、与える温度サイクルに対して十分な耐久性を期待するためである。

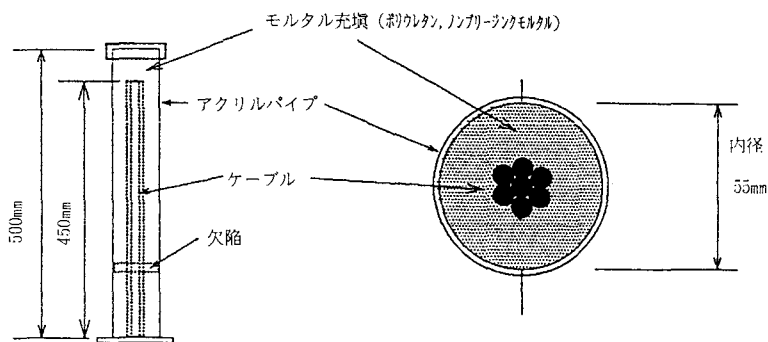


図-1 ケーブルモデルの供試体形状

供試体の種類は、ケーブル鋼材の種類、充填グラウトの配合の違い、充填度の違い、被覆管の欠陥の有無、等の要因を表-1のように組み合わせて表-2のような多数となった。各要因の概要は以下のとおりである。

- ① PWSとロックドコイルが斜張ケーブルの主流であるが、前者は細い円断面の鋼素線を束ねたものであり、必然的に鋼素線間に空隙が生ずる。後者は4辺形の素線を用い空隙を少なくしている。前者に対しては7本の素線を束ねたものでモデル化し、後者については鋼より線を代用した。比較のためにPC鋼棒1本のもも用意した。なお、PWSについては亜鉛メッキのものが最近使用されており、この効果についても比

較することにした。鋼より線については、全断面積中の空隙の比率を変えるために直径の違う2種類の鋼素線のものを用意した。

② 水セメント比の違う3種類のグラウトをグラウト材に使用して、余剰水の影響を比較した。この3種で流動性がことなり、充填性が異なることになる。また、セメントグラウトを行わず、パイプ中に水を満たしたもの、全く何もない空気だけのものも用意し比較することにした。

③ グラウト材の充填度が悪く、空洞ができたことを想定するため、故意に空隙を想定したものを用意した。すなわち、空洞想定部分に発砲スチロールの薄片を挿入した。ただし、長さ方向で部分的に想定したもの（横空隙あり）と、長さ方向に連続しているのを想定したもの（縦空隙あり）の2種とした。

④ 仮説に基づき被覆管が破壊されていないことを基本としているが、その損傷の影響を見るため、予め被覆管の側面にドリルで穴を開けたものも用意した。また、上側の蓋をせず、空気、水の浸入を許すものを加えた。

2.2 実験方法

図-2に示す独自の設計による簡易熱サイクル装置によって実験した。この装置の概要は次のようである。供試体を納めて気密にできる環境促進室に、熱風器より熱風を送り、供試体を加熱する。所定の上限温度（60℃）まで上昇すると、送風を停止し、水道水を室内に給水して、供試体を水道水の温度（約20℃）まで冷却する。供試体内部の温度が水道水温度まで低下すると、満たされた水が排水され、同時に熱風器により再び加熱される。以上を繰り返すものである。水道水からの給水口および室内からの排水口には電磁弁を用い、熱風器、給排水をサーモスタットとタイマーで自動制御する。これらの作動過程は表-3のとおりである。

環境促進室は鉄製の箱で製作され、温

表-1 供試体の変化因子

ケーブル の種類	PC鋼棒		B	PWS 7-φ5			C
	鋼より線1T12.4		R1	鋼より線1T15.2			R2
ケーブル の処理	なし		0	錆有り			CO
	亜鉛メッキ		Zn	樹脂コーティング			E
グラウト材	水セメント比 30%		G3	40%	G4	50%	G5
	水	PW	アルカリ水	AW		空気	AR
グラウト充填度	縦空隙有り		VV	横空隙有り	VL	なし	VO
蓋の開閉	上部開放		OP		上部閉塞		CL
アクリル管	穴有り		BR		なし		NB

表-2 供試体の名称と本数

PC鋼棒	本	鋼より線	本	PWS	本
B-0-G4-VO-CL-NB	2	R1-0-G4-VO-CL-NB	2	C-0-G4-VO-CL-NB	2
B-0-G4-VO-CL-BR	1	R1-0-G4-VO-CL-BR	1	C-0-G4-VO-CL-BR	1
B-0-PW-VO-CL-NB	2	R1-0-PW-VO-CL-NB	2	C-0-G4-VO-CL-NB	2
B-Z-G4-VO-CL-NB	3	R1-0-G4-VV-CL-NB	2	C-0-PW-VO-CL-NB	2
B-Z-PW-VO-CL-NB	2	R1-0-G5-VO-CL-NB	2	C-0-AW-VO-CL-NB	2
B-E-G4-VO-CL-NB	3	R2-0-G4-VO-CL-NB	3	C-0-AR-VO-CL-NB	2
B-E-PW-VO-CL-NB	2	R2-0-G4-VV-CL-NB	2	C-0-G4-VO-OP-NB	2
		R2-0-G5-VO-CL-NB	2	C-0-G4-VV-CL-NB	2
				C-0-G3-VO-CL-NB	2
				C-0-G5-VO-CL-NB	2
				C-0-G4-VL-CL-NB	2

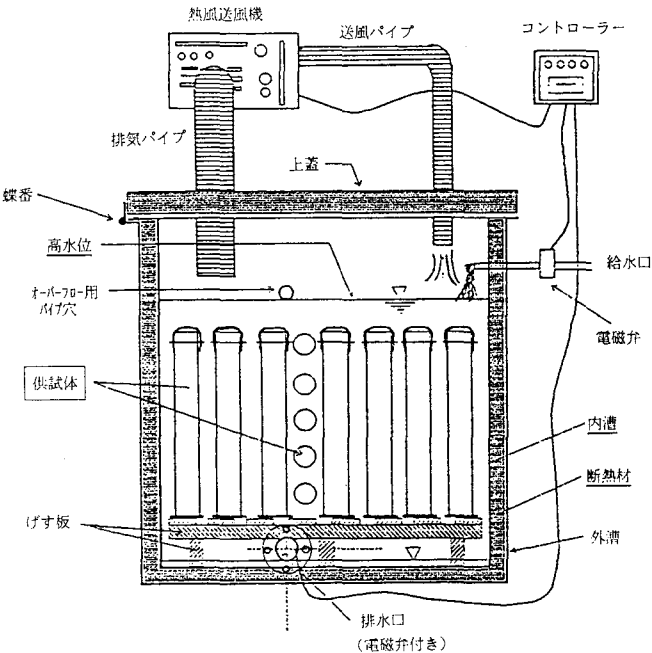


図-2 簡易熱サイクル装置の概要

度が、上部、側面のおよび底面から逃げないように、厚さ5cmの発泡スチロールとベニヤ板で覆った。促進室の天板上に熱風器を据え付け、アルミホースで天板の給気口から熱風を送り込んだ。また、熱風器の効率を向上させるため、天板に排気口を設け排気を熱風器の吸気口へアルミホースで導いた。温度センサーは、供試体C-0-G4-VV-0P-NB-2の空隙に挿入されており、供試体内部の温度を感知できるようにした。

2.3 実験結果

ほとんどの供試体は2体ずつ実験したので、熱サイクル数の違いを見るため、180回の熱サイクルを与えた後と、370回の熱サイクルを与えた後の2種に分けて解体し、鋼材の錆状況を観察した。結果は以下にまとめて示すが、結論として、「グラウト充填した斜張橋ケーブルは、被覆管の破損が無くても、熱サイクルだけで充分錆を発生する」ということが明らかになった。

表-4に、試験後、供試体を解体し錆の発生状況を観察した結果を定性的に評価したものである。これらを影響因子毎に比較すると以下のとおりであった。

① 熱サイクル数の違い

定量的評価は困難であるが、180回の熱サイクルを受けた供試体より、370回のサイクルを与えた供試体の方が腐食がより進んでいた。ただし、2倍程度であるとの状況ではなく、サイクル数とは比例関係はないようであった。鋼材の錆はサイクルの早期に発生し、その後は徐々に進行するものと思われる。これは、水分および酸素が消費されるためであろう。

② 鋼線の種類・直径の影響

鋼線の種類によって比較してみると、PWSと鋼より線R2（鋼線が太いもの）における錆の発生状況は同程度であったが、鋼より線R1（鋼線が細いもの）では、それよりも少なかった。PC鋼棒においては亜鉛メッキ・樹脂コーティングとも破壊されておらず、錆の発生も見られなかった。以上の比較から、鋼素線間の空隙が大きいものほど錆がよく発生すると言える。PC鋼棒では空隙が無いため、従来の認識どおりセメントで完全に被覆された鋼材は錆ないことが確認できた。また、鋼材に何らかの表面処理を行うことは腐食に対して有効であると言える。

③ 水セメント比の影響

水セメント比が30%・40%のものでは錆が発生していたが、50%のものでは錆は発生しなかった。30%のものと40%のものを比較すると30%のものの方が錆が多く発生していた。水セメント比が低いものは流動性が悪いいため、素線間にセメント水が浸入せず空隙が残存しやすくなり、錆がよく発生したのではないかと考えられる。水セメント比が高いほど、セメント水がよく浸入したことが、素線に残存接着しているセメント量の多

表-3 熱サイクル環境促進装置の作動過程

段階	供試体の温度	熱風器	給水弁	排水弁	制御方法
1	20℃～60℃	作動	閉塞	閉塞	
2	60℃	停止	開放	閉塞	サーモスタート
3	60℃～20℃	停止	開放	閉塞	
4	20℃	作動	閉塞	開放	サーモスタート

(注) 20℃になると排水弁が開放されるが、タイマーにより5分間で自動的に閉塞されるようになっている。

表-4 実験Ⅰの錆、変色等の試験結果

	PC鋼棒 (O)	PC鋼棒 (Z)	PC鋼棒 (E)	PWS	鋼より線 (R1)	鋼より線 (R2)
W/C 30%				◎ ◎		
W/C 40%	×	×	×	変色2 ◎	変色1 ○	変色2 ◎
W/C 50%				変色2 変色2 変色2 変色2	変色1 変色1 変色1 △	変色2 変色2 変色2 ◎
縦空隙有り (W/C=40%)				◎ ◎		
横空隙有り (W/C=40%)				◎ ◎		
上部開放				◎ ◎		
7カ所管に ドゥル穴				◎	○	

(注) 縦にグラウトの影響、横に鋼線の影響を表す。
空欄は、供試体がないことを表す。
2段になっているのは、上が180回後、下が370回後の結果を表す。
◎、○、△は錆の発生量の大きさを表す。
変色したもののうち、軽いものは1、重いものは2とした。
×は全く異常が無いものである。

いことから評価できる。ただし、グラウト後1時間経過後のブリージング量を観察すると水セメント比の大きいものから順に大きく、50%の供試体では約25mm程度もあった。実橋では、このブリージングによる影響は別途考える必要がある。実験に用いた供試体の大きさでは、グラウト中の溶存酸素の影響は出なかったものと思われる。

④ 空隙の影響

故意に空隙を作ったものにおいて、縦方向に空隙を作ったものでは、その空隙が鋼材に接触したものは影響があったようであるが、ほとんどの供試体では鋼線との接触がなく、空隙の影響は見られなかった。横空隙があるものではその空隙の位置に錆が集中し、非常に激しく錆が発生した。その部位において、水分および酸素が集中したためである。

⑤ アクリル管破損・供試体の上部開放の影響

アクリル管に穴を開けた供試体（BR）と、上部を開放した（OP）の供試体では、錆が発生したが、その発生状況は、管が完全なものとあまり変わらなかった。

⑥ 表面に最初から錆を発生させた供試体では、中心鋼素線においては、錆がさらに進行していたが、グラウトと接触している部分では、錆の進行が止まっていた。グラウト材によって錆の進行が抑えられたと考えられる。

⑦ グラウトを行わず、PWSのみをアクリル管内に密封して、熱サイクル環境促進装置内に入れた供試体では、外側の表面に大量の錆が発生していたが、上部を開放して室内に放置した供試体には、錆が発生していなかった。アクリル管内の空気中の水蒸気が、熱サイクルを受けて、水蒸気－結露を繰り返し、酸素を消費して錆が発生したものと思われる。

3. 恒温恒湿サイクル試験機による実験（実験Ⅱ）

3.1 実験方法

2での実験では、低温側は水で冷却するということでほぼ20℃程度であったが、この温度では被覆管内部で結露しない可能性があり、錆の発生が若干緩慢になる恐れがある。よって、より低い低温側の熱サイクルを与える装置で再度実験することにした。この装置は恒温恒湿サイクル試験機（株式会社エス・エス・エス製）と呼ばれるもので、温度は-20～100℃の範囲で実験が可能である。ここでは、5～60℃の範囲で実験することにした。温度サイクルの条件は表-5のとおりで、1サイクル4時間とした。

今回作製した供試体の形状寸法は2のものと同様であるが、内部に入れる鋼材は全てPWSとした。パイプ長さを90cmのものも追加し、長さの影響、すなわち、残存酸素量の違いがあるか否かを調べることにした。PWSは7本の鋼材で構成され、中心の1本を他の6本が取り囲む形で針金で緊結した。針金から錆が発生することが考えられるため、すべてビニールで被覆してある針金を使用した。実験後の観察において、この針金には全く錆が発生していないことは確認した。

アクリル管端部を、一方はアクリル板を用いて、もう一方はプラスチック製のキャップを用いてそれぞれ密封処理した。

この実験の着目点を次のような諸点とした。

- ① PWSの太さの違いによる腐食状況の違い
- ② PWSに施した亜鉛メッキの効果
- ③ グラウト材の違いによる腐食状況の違い
- ④ 充填グラウトの水セメント比が鋼材の腐食に与える影響
- ⑤ シースの影響
- ⑥ グラウト中に存在する空洞が鋼材の腐食に与える影響
- ⑦ 試験片長さの影響

表-5 実験Ⅱでの温度サイクル条件

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分で降下
湿 度	65%	一定

供試体はこれらの因子を組み合わせて表-6のように用意した。

鋼材1本の太さは5mmおよび7mmとし、普通表面のものと亜鉛メッキしたものの2種類を用いた。充填材料は普通グラウト、ノンブリージングモルタル、ポリウレタンの3種とし、比較のために充填なしのものも加えた。グラウトの水セメント比は30%、40%、50%に変化させた。ケーブルの欠陥が劣化に及ぼす影響を調査するため、グラウト打設時に発砲スチロールの破砕片をアクリル管内の一部に注入

表-6 実験Ⅱにおける供試体

		パイプ長 50cm				パイプ長 90cm			
		$\phi=5\text{mm}$		$\phi=7\text{mm}$		$\phi=5\text{mm}$		$\phi=7\text{mm}$	
充填材料	特殊条件	亜鉛メッキ		亜鉛メッキ		亜鉛メッキ		亜鉛メッキ	
		あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし
充填なし	乾燥状態	1	1						
セメント グラウト	条件なし	2	2	3	3	2	2	3	3
	シース内充填なし	2	2	2	2				
	シース内充填あり	2	2	2	2				
	ハイクに欠陥							3	3
	充填空洞あり			2	2			2	2
	W/C=0.3 条件なし		2		2				
	W/C=0.5 条件なし		2		2				
	ノンブリージング			2	2			1	1
	ポリウレタン			1	2			2	2

し、グラウト中に空洞を作った供試体を用意した。その他、一般にPC部材で用いられているシースを、今回試験的にアクリルパイプとケーブル鋼材の間に入れた。そして、シースの内部にグラウトを充填したものと、内部には充填せずに空洞のままにした2種類を用意した。これらはPC構造物中の鋼材の発錆が問題になっており、グラウトの充填度の影響をも調べることにした。

3.2 実験結果

実験Ⅱでは110サイクル経過時と約3倍の300サイクル後に解体し錆の発生状況を観察した。表-7、9に錆の外観観察結果をまとめた。錆の状況を記号A～Eで分類したが、錆の程度の状況は表の下に記したとおりである。また、1つの定量的試みとして、7本の素線の内、中心に配置した素線を5mm 間隔に区分し、各区間の錆の発生の有無を観察し、錆のある区間数を全区間に対する比で評価した。これらの結果を表-8、10に示す。また、主な条件における錆の発生状況を写真-1～8に示した。写真-7はシース内にグラウトを充填しなかった300サイクル経過後のもので、パイプからPWSを取り出した時は、下から約3cmの部位で激しい錆が発生しており、錆を含めた直径はもとのPWSの約1.5倍程度になっていた。この錆を除去した結果がこの写真であり、深さ2mm 程度の断面欠損が起こっていたものである。写真-8はポリウレタンを充填材としたもので、ポリウレタンはゴム状であり、その中の鋼線は全く新品同様であることを示すものである。写真-1～6は他の試験条件のもので、白黒写真のため識別が困難と思われるが、一部明確な錆が発生している状況を示している。以下に、各パラメーター毎に錆の発生状況をまとめる。

(1) ケーブル鋼材の太さの違い

今回の実験では細い鋼材 ($\phi=5\text{mm}$) を用いた供試体の方が同一条件下の太い鋼材を用いた供試体に比べ発錆面積率が高かったが、5段階に区分した発錆状況においてはほとんど差は無かった。ただし、メッキなしの鋼材では水セメント比 40%の特殊条件なしの供試体において、発錆面積率は細い方が高いものの、局所的に見た錆の程度は太い方が進行していた。また亜鉛メッキ鋼材のシース充填なし供試体においては、太い鋼材を使用した供試体にわずかではあるが錆の発生が見られたのに対し、細い鋼材を使用した供試体にはほとんど錆は見られなかった。よって、今回の数少ないデータであるが、ケーブル素線の太いほうが若干錆易いようである。やはり素線間の空隙が若干大きいと思われる。ただし、この違いは他の要因の影響に比べて小さいものであると言える。

(2) 亜鉛メッキの効果

亜鉛メッキ鋼材はシース充填なしの供試体以外は全く錆の発生は見られなかった。唯一錆の発生が確認された供試体においても、錆の発生量および程度は同条件の普通鋼材に比べかなり軽度のものであり、今回の実験で亜鉛メッキ鋼材の防錆性能について十分確認できたと考えられる。

(3) グラウト材の違い

普通セメントグラウト、ノンブリージングモルタルおよびポリウレタンの3種の比較が行える。まず、ポリウレタンを充填したものであるが、鋼材には全く変化がなく、新品同様であり、紡錆材として非常にすぐれたものである。しかし、200サイクル程度経過後から、アクリルパイプに多数の亀裂が発生し、膨張性が高いことが実用上若干問題点となるであろう。

セメント系の2種の結果を次に比較する。先にも述べたように亜鉛メッキ鋼材を使用した供試体はいずれのグラウトにおいても錆の発生は見られなかった。メッキなしの鋼材ではどちらのグラウトでも錆の発生が見られるが、ノンブリージングモルタルを使用した方が錆は軽度であり、発錆面積率も低い。これはブリージングとして発生する余剰水がケーブル鋼材腐食に大きく影響しているものと断定できる証拠といえる。ノンブリージングモルタルは鋼材の防錆という観点からかなり有効なグラウト材料であると言える。

(4) 充填グラウトの水セメント比による影響

今回用意した供試体は水セメント比30%, 40%, 50%の3種類であった。水セメント比50%の供試体は、 $\phi = 5\text{mm}$, 7mm のいずれの供試体においても一部錆の発生は認められるものの比較的健全な状態であった。逆に、水セメント比が30%の供試体においては多量の錆の発生が見られた。これより水セメント比の下降につれ腐

表-7 実験Ⅱにおける錆発生状況の結果(110サイクル後)

パイプ長、鋼線		パイプ長 50mm				パイプ長 90mm			
充填材料、特殊条件		$\phi = 5\text{mm}$		$\phi = 7\text{mm}$		$\phi = 5\text{mm}$		$\phi = 7\text{mm}$	
充填材料	特殊条件	亜鉛メッキ		亜鉛メッキ		亜鉛メッキ		亜鉛メッキ	
		あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし
充填なし	乾燥状態	A	C	—	—				
モルタル	W/C 0.4 条件なし	A	D	A	D	A	C	A	C
	シース充填なし	B	E	B	E				
	シース充填あり	A	D	A	C				
	ハイクに欠陥							A	C
	空洞あり	—	—	A	D			A	D
	0.3 条件なし	—	D	—	D				
	0.5 条件なし	—	C	—	C				
ノンブリー ジング		—	—	A	C			A	C

(注) A: 鋼材に全く変化の見られないもの(問題なし)

B: 鋼材に変色が見られるもの(健全)

C: 浮き錆が見られるもの(軽程度)

D: 明らかな錆で、錆に体積がある(中程度)

E: 断面欠損が目視できる重度の錆(重程度)

表-8 実験Ⅱにおける錆発生状況の結果(300サイクル後)

パイプ長、鋼線		パイプ長 50mm				パイプ長 90mm			
充填材料、特殊条件		$\phi = 5\text{mm}$		$\phi = 7\text{mm}$		$\phi = 5\text{mm}$		$\phi = 7\text{mm}$	
充填材料	特殊条件	亜鉛メッキ		亜鉛メッキ		亜鉛メッキ		亜鉛メッキ	
		あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし
モルタル	W/C 0.4 条件なし	A	D	A	D	A	C	B	C
				A	C			B	D
	シース充填なし	C	E	C	E				
	シース充填あり	B	C	A	B				
	ハイクに欠陥							A	C
	空洞あり	—	—	A	D			A	D
	0.3 条件なし	—	D	—	D				
	0.5 条件なし	—	C	—	B				
ノンブリー ジング		—	—	A	D			A	C
ポリウレタン				A	A			A	A
				A				A	A

(注) A: 鋼材に全く変化の見られないもの(問題なし)

B: 鋼材に変色が見られるもの(健全)

C: 浮き錆が見られるもの(軽程度)

D: 明らかな錆で、錆に体積がある(中程度)

E: 断面欠損が目視できる重度の錆(重程度)

食状態が悪化しているといえる。これは鋼材の腐食面積率においても同様である。この傾向は予想と反するものであった。水セメント比が低いほどグラウトの流動性が悪くなり、鋼材間の空隙に空気が残存しやすくなるが、逆に柔らかいと空隙にセメント水が満たされ、空気が追い出されたためであると考えられる。

(5) グラウト中に存在する空隙の影響

今回供試体でも、グラウトの充填性、あるいは、ひびわれの発生が錆と相関があるのかを調べるため、あらかじめ空隙を生じさせたものを用意し、空隙位置と鋼材の腐食位置・腐食程度との関連性を調査した。その結果、空隙のある供試体では、空隙位置以外での腐食程度は他の同条件の供試体と同様であったが、空隙位置に腐食度の高い錆の発生が見られ、空隙に酸素および水が集中することが明らかになった。

(6) シース内の充填度の影響

シースの内部にもグラウトを充填したものと、充填しないものの2種類を用意した。ただし、パイプとシースの間はグラウトは行われている。結果として、シース内を充填をしなかったものは、鋼材の太さに関わらず全面に錆が見られた。その程度もかなり重度のもので鋼材の表面形状を変えるほどであった。特に 300 ϕ の温度繰り返しを与えたものは写真-7に示したように深さ2mm程度の孔食状の断面欠損を呈していた。シース内充填を行ったものは錆は抑えられ、シースなしのものと同様の錆状況であった。シース内部に充填をしないと、鋼材への酸素供給量が多くなり、また、水蒸気の発生量が多くなり、低温時の結露による水の量が多くなって下方に流下したようである。これは、鋼材の下部での発錆が多くなったことで理解できる。以上のことから、通常のP.C構造物でもシース内へのグラウト施工が不十分であると、外部からの水の供給が無くても鋼材が錆びることが予想される。

(7) 供試体長さの影響

実験Ⅱでは供試体パイプの長さを50cmのものと、90cmのものの2種を用意した。長さが倍になれば残存空気量が倍になり、錆の度合が大きくなると予想したが、表-7と8、表-9と10を比較して明らかなように、長くなれば腐食面積率が若干大きくなる傾向はあるようであるが、全般的に大差が無いようである。た

表-9 実験Ⅱの中心鋼材の錆発生面積率 (110 ϕ 材後)

パイプ長、鋼線		パイプ長 50mm				パイプ長 90mm			
充填材料、特殊条件		$\phi=5$ mm		$\phi=7$ mm		$\phi=5$ mm		$\phi=7$ mm	
充填材料	特殊条件	亜鉛メッキ		亜鉛メッキ		亜鉛メッキ		亜鉛メッキ	
		あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし
充填なし	乾燥状態	0	88.9	—	—				
モルタル	W/C = 条件なし	0	65.6	0	44.4	0	90.0	0	28.8
	シース充填なし	1	100	8	100				
	シース充填あり	0	58.9	0	16.7				
	ハイクに欠陥							0	22.9
	空洞あり	—	—	0	17.8			0	42.6
	0.3 条件なし	—	100	—	42.2				
	0.5 条件なし	—	12.2	—	4.4				
ノンブリー ジング		—	—	0	25.6			0	25.3

(注) 5mm間隔に分けた全区間中の発錆区間数である。

表-10 実験Ⅱの中心鋼材の錆発生面積率 (300 ϕ 材後)

パイプ長、鋼線		パイプ長 50mm				パイプ長 90mm			
充填材料、特殊条件		$\phi=5$ mm		$\phi=7$ mm		$\phi=5$ mm		$\phi=7$ mm	
充填材料	特殊条件	亜鉛メッキ		亜鉛メッキ		亜鉛メッキ		亜鉛メッキ	
		あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし
モルタル	条件なし	0	32.2	0	60.0	0	84.1	0	60.0
				0	7.8			0	35.9
	シース充填なし	3.3	100	31.1	100				
	シース充填あり	0	46.7	0	15.6				
	ハイクに欠陥							0	14.7
	空洞あり			0	24.4			0	31.8
	0.3 条件なし	—	88.9	—	93.3				
	0.5 条件なし	—	76.7	—	0				
ノンブリー ジング		—	—	0	46.7			0	39.4
ポリウレタン				0	0			0	0
				0				0	0

(注) 5mm間隔に分けた全区間中の発錆区間数である。

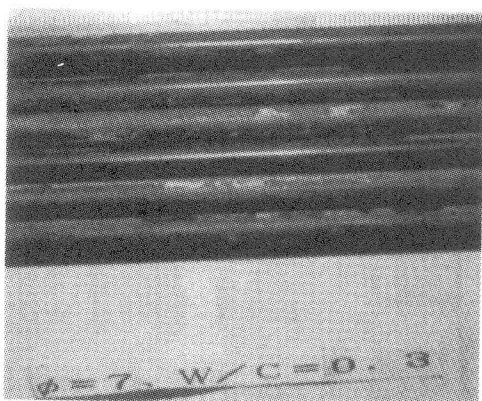


写真-1 $\phi 7$, $W/C=0.3$ の発錆状況

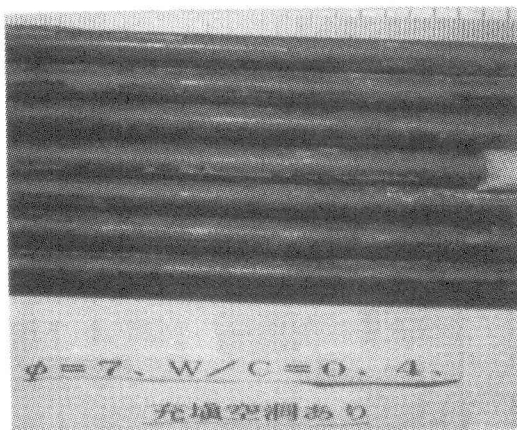


写真-4 $\phi 7$, $W/C=0.4$, 空洞ありの発錆状況

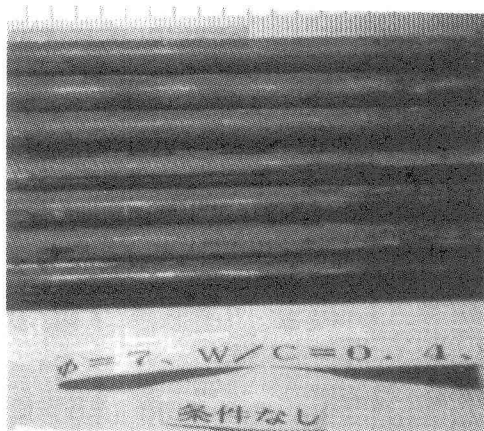


写真-2 $\phi 7$, $W/C=0.4$ の発錆状況

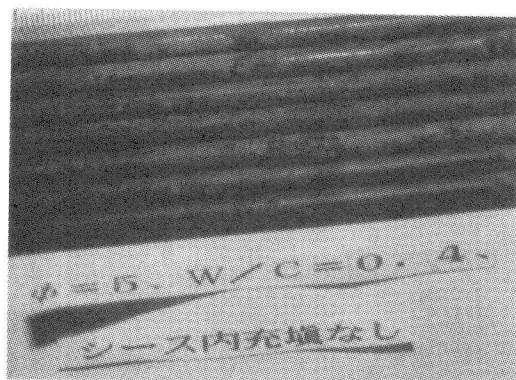


写真-5 $\phi 7$, $W/C=0.4$, シース内充填なしの発錆状況

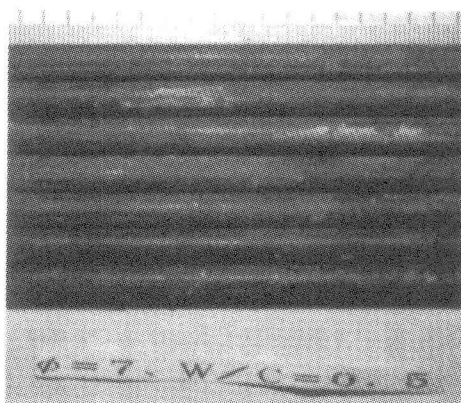


写真-3 $\phi 7$, $W/C=0.5$ の発錆状況

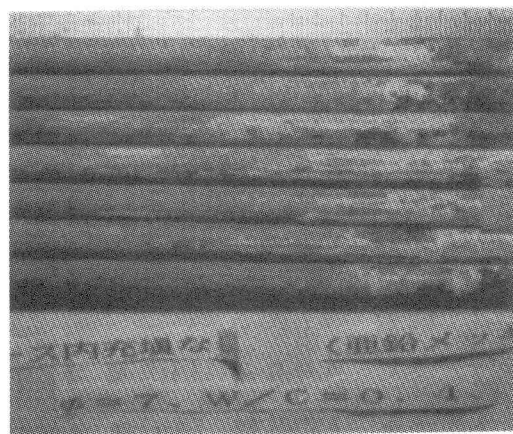


写真-6 $\phi 7$ (亜鉛メッキ), $W/C=0.4$ シース内充填なしの発錆状況

だし、実橋のようにさらに大きくなると違いが現れるものと予想される。

(8) サイクル数の影響

やはり300サイクル与えたものは、110サイクルのものより若干腐食程度、腐食面積率が若干上がったような傾向は認められる。ただし、あまり顕著ではない。これについては実験Ⅰでも同様であり、錆が発生するときは早期に発生し、その後は、残存酸素量が減少するため進展が緩慢になるためである。亜鉛メッキされたものは早期に腐食が発生せず、亜鉛層の劣化が徐々に進行するので、サイクル数の違いは現れているようである。

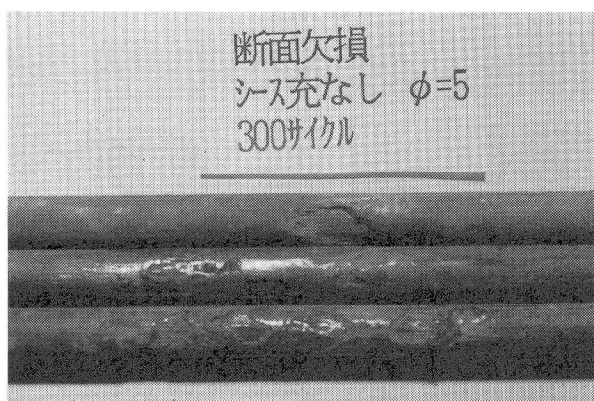


写真-7 シース内充填なしの素線の断面欠損状況

4. 結 論

以上、2回にわたる熱サイクル試験から、セメントグラウトされたケーブル鋼材は完全密封されていても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。これは、複数本の素線を束ねることのできる空隙に残存した酸素とグラウト中の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である。ほとんどの供試体において、鋼材下端よりも鋼材上端における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。

錆の程度はグラウトの内的欠陥があるものほど悪化する傾向が認められたこと、水セメント比が小さいほど錆率が大きくなったこと、シース内を充填しなければ激しい錆が発生したこと、等の結果から、ケーブルパイプ中の酸素量が錆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。

ケーブル鋼材に亜鉛メッキを施すと大幅に発錆が遅らすことができるようである。また、ノンブリージングモルタルも防錆に効果があるようである。ポリウレタンなどの高分子材料は防錆材として非常に優れたものと言えるが、膨張性の影響について今後調査が必要であろう。

近年は、ノングラウトタイプのケーブルが多く架設されるようになったが、この場合にも本研究のような実験を行い、安全性を検証されることを期待したい。

本研究は平成2年度の文部省科学研究費補助金・一般研究(A)(代表者:大阪大学工学部教授 福本湧士)の補助金を受けて行われたものである。ここに付記して、謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 太田哲司: 海外文献紹介(Civil Engineering, pp.38-41, April 1988)、橋梁と基礎、pp55、1989-1.
- 2) 太田哲司: 海外文献紹介(Civil Engineering, pp.46-49, Oct, 1988)、橋梁と基礎、pp48、1989-7.
- 3) Editor of Structural Engineering International: Durability of Cable-Stayed Bridges, Structural Engineering International, pp.60-62, 1/1991.
- 4) 田辺末信、大塚昭夫: 斜張橋用ケーブルの防錆、道路、pp54-57、1989-9.

(1991年9月30日受付)



写真-8 ポリウレタン充填した健全なケーブル