

論文

[1129] コンクリート中鉄筋の電気防食における通電システムに関する研究

石川光男 *1・堺 孝司 *2・大越 威 *3・峰松敏和 *4

1. まえがき

外部電源方式によるコンクリート中の鉄筋の電気防食には、通電の仕方により電圧を一定にして通電する方式と電流を一定にして通電する方式、いわゆる定電圧方式と定電流方式のいずれかが採用されている。この2方式にはそれぞれ以下のような特徴があるとされてきた。

①定電圧方式：概ね鉄筋の腐食程度に応じた防食電流が供給され、大きい電流が必要な時には大きな電流が流れ、小さな電流で十分な時には小さな電流が流れる傾向にある。

②定電流方式：初期の通電調整時に求めた防食電流を環境の変化に拘わらず一定に供給する。

しかし、①の方式は環境変化（温度、水分量、塩分量、コンクリート抵抗率等）に追従出来ない場合に防食電流に過不足を生じ、②の方式は環境変化により必要な防食電流密度が変化した場合には防食電流に過不足が生じる。凍結融解試験、RC及びPC供試体試験および実橋試験等においても、通電方式により鉄筋の分極量に大きな差が見られ、分極現象が単純ではないことが分かった。そこで、これらの試験結果を解析し通電方式の検討を行ったので報告する。

2. 試験方法の概要

電気防食試験は外部電源方式である導電性被覆電極方式とチタンメッシュ方式を採用した。これらの方式の施工概要を図1、2に示す。各供試体には電位モニタ用の照合電極を埋設した。

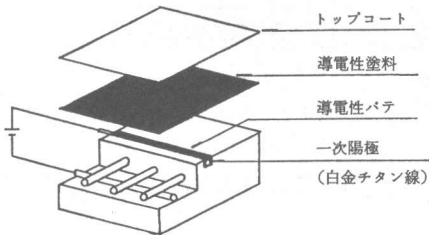


図1 導電性被覆電極方式

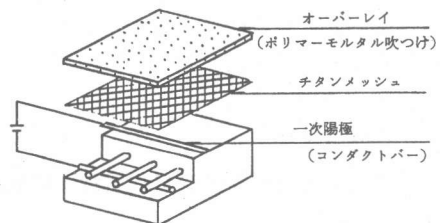


図2 チタンメッシュ方式

2. 1 凍結融解試験

(1) 供試体

供試体作製に用いたコンクリートの配合を表1に示す。供試体の寸法は300×300×85mmであり、D13(6本)またはD16(10本)

の鉄筋を格子状に配筋した2種類の供試体（前者をTY1、後者をTY2）を作製した。

(2) 凍結融解条件

凍結融解試験機内に各供試体を設置し、1サイクル6時間として490サイクルの試験を行った。

*1 日本防蝕工業（株）技術研究所 課長（正会員）

*2 北海道開発局開発土木研究所 構造部材料研究室 室長 工博（正会員）

*3 北海道開発局開発土木研究所 構造部材料研究室 副室長

*4 住友セメント（株）中央研究所セメントコンクリート研究所商品開発室 主任研究員 工博（正会員）

表1 RC供試体用コンクリートの配合

スラブ c m	W/C %	単位量 (Kg/m ³)			
		C	S	G	Cℓ ⁻
9	50.5	299	737	1112	4.5

供試体の凍結は気中で、また融解は散水（水道水）により行った。気中温度の最高及び最低の平均値は、それぞれ17℃及び-24℃であった（供試体内では約4℃及び-15℃）。

(3) 通電方式

定電流方式を基本とし、一部定電圧方式を採用し電気防食試験を行った。

2.2 RC供試体の暴露試験

(1) 供試体

供試体作製に用いたコンクリートの配合は基本的には表1と同じものである。供試体の寸法は300×1200×130mmであり、D13の鉄筋を格子状に組んでシングル配筋及びダブル配筋とした2種類の供試体（前者をRC1、後者をRC2）を作製した。

(2) 暴露条件

暴露試験場は北海道留萌の海岸で気温は-20～30℃のいわゆる積雪寒冷地で、日本海に面することから季節風や気象条件により飛来塩分の多い場所である。（平成2年9月より暴露）

(3) 通電方式

定電流方式を基本とし、一部定電圧方式を採用し電気防食試験を行った。

2.3 PC供試体の暴露試験

(1) 供試体

供試体作製に用いたコンクリートの配合を表2に示す。供試体は表2に示す配合コンクリートを打設後、PC鋼材に緊張力32.94ton（有効プレストレス63～75%）を導入し、固定部を無収縮モルタルで打継いだ。図3はPCケーブルが2本の供試体であるが、他にPCケーブルが0、1本のものも作製した。

表2 PC供試体用コンクリートの配合

スラブ (cm)	Air (%)	W/C (%)	単位量(Kg/m ³)				
			W	C	S	G	Cℓ
8.0	5.0	35.6	160	449	683	1009	4.5

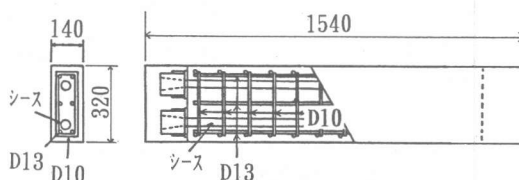


図3 PC桁供試体

(2) 暴露条件

RC供試体と同様留萌の暴露試験場に暴露した。（平成3年9月より暴露）

(3) 通電方式

定電流方式を基本とし、一部定電圧方式を採用し電気防食試験を行った。

2.4 ポステンPC桁の暴露試験

(1) 供試体

供試体は図4に示すような実構造物に使用されるPC桁と同様の形状とした。供試体は表3に示す配合のコンクリートを打設後、PC鋼材に緊張力40.68ton（有効プレストレス87%）を導入し、固定部を無収縮モルタルで打継いだ。

表3 ポステンPC桁用コンクリートの配合

スラブ (cm)	Air (%)	W/C (%)	単位量(Kg/m ³)				
			W	C	S	G	塩分
8.0	5.0	37.0	174	469	777	919	4.5

(2) 暴露条件と通電方式

PC供試体と同様であるが、特に初期の通電特性を詳細に検討した。（平成4年9月より暴露）

2.5 実橋試験

(1) 橋梁の概況

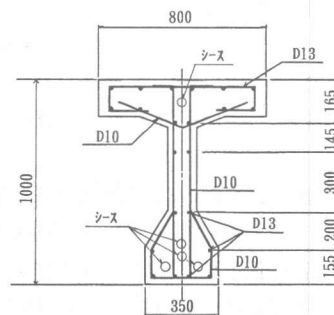


図4 供試体(長さ:4m)

- (i) E道路橋：北海道の積丹半島で海岸より約20mに位置する道路橋で、日本海に面し塩害と凍結融解作用を受ける。防食対象は桁とスラブで約40m²にチタンメッシュ方式の電気防食を施工した。(平成2年9月より定電圧方式で電気防食開始)
- (ii) K道路橋：北海道の最北端に近い日本海に面したRC橋であり、海岸から約200mの位置に設置され塩害と凍結融解作用を受ける。防食対象は主桁と横桁で約30m²に導電性被覆膜電極方式の電気防食を施工した。(平成3年10月より定電圧方式で電気防食開始)

3. 試験結果の概要

3.1 凍結融解試験[1],[2]

定電流方式による凍結時および融解時の鉄筋電位は、一定電流で防食しているにも関わらず凍結時は融解時に比べ約100~150mV程度陰分極が大きくなった。また、約2カ月後に、定電圧方式による数サイクルの通電を行った。その時の特性を表4に示す。防食電流は低温時に低下しているが、鉄筋電位の変化は小さかった。

3.2 RC供試体の暴露試験

図5に鉄筋電位の経時変化の一例を示す。電位は季節の変化に対応し、冬季に卑な値になり、夏季に貴な値となった。また、電源電圧の定性的な測定ではあるが、約0.5Vから1V以上の値へと増加していた。

3.3 PC供試体の暴露試験[3],[4]

鉄筋電位はRC供試体と同様季節変化し、電源電圧は季節変化との経時的な増加が見られ、数百mV変化した。シースがあるもので若干供給電流が大きい、特にRCと顕著な差はなかった。

3.4 ポステンPC桁供試体の暴露試験

本供試体では、特に通電初期の電源電圧と通電特性を検討した。分極試験により得られた電流密度となるよう電源電圧を調整し鉄筋電位、防食電流の変化を求めた。その結果を図6に示す。電流は通電1分後の電流30.6mAから大幅に低下し、17時間後には約1/3の値になった。その時の鉄筋電位は目標値の-431mVから-407mVへ変化しシフト量が少なくなった。

その後、定電流方式に変更し防食試験を開始した(約17mA、2.12mA/m²)。その時の測定結果の経時変化を表5に示す。電源電圧と陽極電位は同様に急速に大きくなり初期値よりも約0.5V以上高くなっている。

表4 1サイクル内の変動

供試体の種類	RC1	RC2	
電源電圧 (V)	0.830	0.906	
防食電流 (mA)	融解	0.218	0.722
	凍結	0.168	0.563

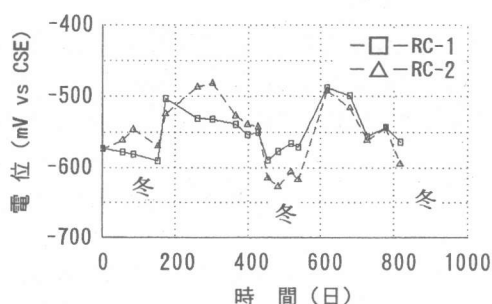


図5 鉄筋電位の経時変化

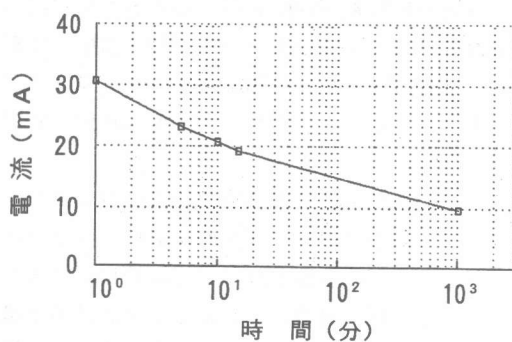


図6 防食電流の経時変化

表5 電源電圧の変化(電位は飽和硫酸銅基準)

時間(日)	0	1	21	49	90
電源電圧(V)	0.60	0.69	1.02	1.19	1.22
鉄筋電位(mV)	-431	-432	-433	-410	-449
陽極電位(V)	0.14	0.25	0.57	0.65	0.76

3. 5 実橋試験[5][6]

定電圧方式で通電しているE道路橋における電源電圧、防食電流密度、鉄筋電位の変化は供試体試験と同様、鉄筋電位は気温、陽極電位などの影響を受けて変動した。ほぼ2年間の本方式での電気防食特性が把握できたので、上記理由も含め定電圧方式から定電流方式に変更した。

定電圧方式で通電しているK道路橋における防食電流密度と陽極電位を表6に示す。陽極電位は経過時間とともに大幅に上昇した。この陽極電位の変化と温度低下により鉄筋電位、防食電流密度は大きく変化し、鉄筋の分極量は約半年後に不足してきた。それ以降、電源電圧を上げて鉄筋の分極量を維持するようにしたが、陽極電位の上昇は少なくなっているが未だ安定しないので、鉄筋の分極量が再び不足する恐れがあり、359日以降は定電流方式に変更した。

表6 防食電流密度と陽極電位

時 間 (日)	0	142	359	380
電流密度(mA/m ²)	2.20	0.34	0.95	1.00
陽極電位 (V)	0.19	0.38	0.89	0.92

4. 考察

上記試験結果をもとに定電圧方式及び定電流方式における防食特性を理論的に考察する。

防食回路に流れる電流Iは電源電圧V_D、陽極電位E_a、陰極電位E_c、陽-陰極間のコンクリートの抵抗R_cで決定される。これらの間には次式が成立する。

$$V_D = E_a - E_c + I \cdot R_c \quad (1)$$

ここで、E_a、E_cは電流Iの関数である。

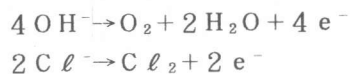
コンクリート環境において通電を行うと、陰極(鉄筋)での電極反応は主に酸素還元反応であるが、鉄筋表面に多量のさびが存在する場合には鉄筋の電気防食下において初期には鉄さびを還元する反応も起こる。また、過防食にすると水素発生反応も起こる。

空気中の酸素が鉄筋表面に達するためにはコンクリート中を拡散して行く必要がある。その拡散速度はコンクリート中の水分量や温度に依存し、水分量が多いほど小さく、温度が高いほど大きくなる。従って、陰極反応はコンクリートが低温かつ湿潤状態で鉄筋腐食の小さい時に防食電流密度も小さく、高温かつやや乾燥状態で鉄筋腐食が大きくなる時に防食電流密度も大きくなる。即ち、

- (a) 鉄筋に対して腐食性が高いコンクリートほど防食電流密度は大きい。
- (b) 鉄筋に対して腐食性が高いコンクリートほど抵抗率は低く電流が流れやすい。
- (c) 環境の温度が高いほど鉄筋に対する腐食性は高い。
- (d) 環境の温度が高いほどコンクリート抵抗率は低く電流が流れやすい。

等の傾向があり、防食回路には定電圧方式で鉄筋の電気防食を行うと、鉄筋の腐食状況に応じて防食電流が供給できると考えられていた。(1)式で見れば、E_aはほとんど変化なく、E_cの変化に応じてIが変化し、半自動的に鉄筋の電位(分極量)を最適値に維持すると考えられていた。

一方、陽極には主にOH⁻、Cl⁻の陰イオンが引き寄せられ、陽極反応は酸素発生あるいは塩素発生となる。その反応式と生成物の化学反応を以下に示す。



酸素発生反応では陽極周囲のpHに依存し、E a と pH の関係は (2) 式、塩素発生反応では pH の影響はないが塩素イオンの活量 a_{Cl} (濃度に関係) に依存し (3) 式のようになる。

$$E a^{\circ} = 1.23 - 0.059 (pH) \quad (2)$$

$$E a^{\circ} = 1.36 - 0.059 \lg n (a_{Cl}) \quad (3)$$

コンクリートの pH を 13、7、3 として E a^o を計算すると、それぞれ水素電極基準で 0.463V、0.817V、1.053V (硫酸銅電極基準で 0.147V、0.501V、0.937V) となり、コンクリートの pH に大きく依存することが分かる。通電初期は陽極周囲のコンクリートの pH は 12~13 となっているが、電解反応に伴う OH⁻ の減少から pH が低下する。この結果陽極電位は通電とともに貴化する。

また、塩素イオンの活量を 0.01~2 (概ね 0.01~3 mol/l の濃度に相当) に対する E a^o を計算すると、水素電極基準で 1.63~1.32V となる。

これら E a の値から、陽極反応は大部分が酸素発生となり、(1) 式の関係から、V_D = 一定の定電圧方式で通電を行っている場合には、コンクリート抵抗が一定であれば通電と共に防食電流は減少する。

コンクリートの抵抗率はコンクリート中の水分、塩分濃度及び温度に依存するが、作製されたコンクリート供試体や電気防食されたコンクリート構造物ではコンクリート中の水分、塩分濃度が大きく変動しないので、コンクリート抵抗は温度の影響が最も大きくなる。文献のデータを解析すると、温度 T と抵抗率 ρ の関係は次のような式で現せる [7]。

$$\rho_T = \rho_0 (1 - 0.02T) \quad (4)$$

北海道の積雪寒冷地を考えた場合、-20~30℃の温度変化に対するコンクリートの抵抗率は 0℃の値に対し 1.4~0.4 倍の変動が見込まれる。即ち、両極間のコンクリート抵抗 R_c は夏季に比べて冬季では約 3.5 倍の大きさになり防食電流を減少させる原因になる。ただし、コンクリート内にある程度の塩分が存在しないと、コンクリートが凍結しその抵抗率は数十倍以上にもなる。

コンクリート抵抗 R_c はコンクリート抵抗率と陽極と陰極 (鉄筋) の距離 (かぶりに相当) に大きく依存する。通常鉄筋の電気防食が必要な環境において、コンクリート抵抗率は 10000~20000 Ω・cm が多い。かぶり厚を 2~5 cm とすると 1 m² 当たりのコンクリート抵抗は (鉄筋と陽極が 1 対 1 とする) 2~10 Ω となる (2~3 の供試体で 1 m² 当たり 2~3 Ω であった)。そして、防食電流密度は大きくても 20~30 mA/m² であるから、これらの積である IR 降下は 40~300 mV となる。

鉄筋の陰分極に対する温度の影響も大きく、夏季の高温時に所要防食電流密度は大きく、冬季の低温時に所要防食電流密度は小さい。即ち、夏季はコンクリート抵抗が小さく、所要防食電流密度は大きく、冬季は逆となるので、両者の積である IR 降下は互いに相殺し大きく変化しないことになる。大部分の試験結果もこのような状況になっており、その値は数十 mV 程度となっていることから、IR の変動は 100 mV 以下と考えられる。

これまでの変動要因とその範囲を試験結果も考慮してまとめると以下のようになる。

陽極電位：0~800 mV

陰極電位：100~200 mV

IR降下：100mV

従って、定電圧方式で通電を行った場合、通電により変化する最も大きな因子は陽極電位となる。即ち、電気防食前の通電調整の結果に基づいて所定の電流密度になるよう定電圧方式で電気防食を開始した場合、時間と共にE_aが上昇することにより防食電流密度の低下とE_cシフト不足が生じるのは当然のことであり、定電流方式の方が適していると考えられる。しかし、E_aの上昇はpHの変化が平衡状態になると収まり、電流変化も小さくなるので、長時間経過後は定電圧方式においても防食管理は容易になると考えられる。各試験の通電状況を見ても、電源電圧の上昇は長時間経過したものではその上昇巾が少なくなり安定化しつつある。

また、今回の試験では問題となっていないが、コンクリートによっては低温時にコンクリートが凍結するあるいはコンクリート中の水分の変動が大きくなるような場合がある。この場合には、定電流方式では過防食になる可能性があり、PC鋼材が使われたコンクリート構造物ではむしろ定電圧方式が適しているため、状況に応じて通電方式を選定するのが好ましい。

5. まとめ

以上の試験結果及び考察結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 通電方式によらず通電当初の陽極電位は0.1V台の値を示したが、時間と共に上昇し、ポステンPC桁供試体の90日後で0.76V、K橋の380日後で0.92Vになった。
- (2) 定電圧方式で通電した場合、陽極電位が上昇することにより防食電流密度は大幅に低下し、目標の鉄筋の分極量が得られなくなり、鉄筋の分極量に応じて通電調整が必要となった。しかし、陽極電位が安定した後は電流変化が小さくなった。
- (3) 定電流方式で通電した場合、陽極電位の変化、温度の変動に影響されることなく鉄筋の防食が達成されやすい。
- (4) 一定期間以上の定電流方式により通電し、陽極電位が安定した後、あるいは過防食の危険がある場合には、維持管理上定電流方式よりも定電圧方式が好ましい。

6. 文献

- 1) 堺 孝司、大越 威、峰松敏和、川俣孝治：積雪寒冷地におけるチタンメッシュ方式による鉄筋の電気防食、土木学会第46回学術講演会講演概要集 第5部、pp372~373, 1991
- 2) 堺 孝司、大越 威、石川光男、竹田定雄：積雪寒冷地における導電性塗料方式による鉄筋の電気防食、土木学会第46回学術講演会講演概要集 第5部、pp374~375, 1991
- 3) 堺 孝司、大越 威、峰松敏和、川俣孝治：積雪寒冷地におけるプレレストコンクリートのチタンメッシュ方式による電気防食、土木学会第47回学術講演会講演概要集 第5部、pp416~417, 1992
- 4) 堺 孝司、大越 威、石川光男、竹田定雄：積雪寒冷地におけるプレレストコンクリートの導電性被覆電極方式による電気防食、土木学会第47回学術講演会講演概要集 第5部、pp420~421, 1992
- 5) 堺 孝司、大越 威、峰松敏和、川俣孝治：積雪寒冷地における鉄筋コンクリート構造物への電気防食法の適用、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.13, No.1、pp567~572, 1991.
- 6) 堺 孝司、大越 威、石川光男、山本 悟：積雪寒冷地におけるRC桁橋への導電性被覆電極方式による電気防食の適用、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.14, No.1、pp803~808, 1992.6
- 7) S.G.Millardほか：Reinforced Concrete resistivity measurement techniques, Proc. Insin Civ. Engrs, Part2, pp71~88, 1991