

論文

[1127] コンクリート中の鋼材の電気防食に及ぼす各種要因の影響

峰松敏和\*1・堺 孝司\*2・福手 勤\*3・武若耕司\*4

1. はじめに

1960年代に米国の多くの州で採用された完全除雪道路政策 (Bare Road Policy)により、道路に散布される凍結防止材の量が大幅に増加し、塩害によるコンクリート橋梁床版中の鉄筋の腐食が大きな社会問題となった。その対策として、断面修復等による補修が実施されたが、再劣化が生じ、問題解決には至らず、この問題に対処する方法として実用化された技術がコンクリート構造物の電気防食法である。コンクリート構造物への電気防食法は、1973年に米国で実施された本格的な適用から約20年が経過し、欧米では、ほぼ確立された技術として位置付けられ、100 万m<sup>2</sup>近くの施工実績が報告されている。

一方、我が国におけるコンクリート構造物の電気防食は、海洋または海岸構造物における飛来塩化物による塩害対策として研究が開始された。1986年に実構造物への適用実験が実施されるなど、各方面での実用化に向けた研究・開発が行われ、これまでに20件程度の施工実例が報告されている。これらの施工例は、非常に多岐にわたっており、これらを解析・検討することで電気防食に及ぼす各種要因の影響をある程度、把握することが可能と考えられる。

本文は、このような観点に基づき、これらの施工実例のうち、メッシュ陽極方式による電気防食の施工例並びに暴露実験を検討の対象として、これらを各種要因別に整理し、施工にともない確認した防食電流密度等に及ぼす影響を明らかにすることで、コンクリート構造物の電気防食に及ぼす諸要因を把握することを目的としたものである。

2. 検討対象構造物および検討項目の概要

2. 1 検討対象構造物

コンクリート構造物中の鋼材の電気防食法に及ぼす各種要因の影響の検討対象とした施工事例を表-1にとりまとめて示す。

これらの施工事例は、防食電流を供給するための陽極として、エキスパンドメタル状に加工した高純度チタンメッシュにルテニウム等の特殊酸化貴金属を焼付けコーティングした陽極 (以下、メッシュ陽極と呼ぶ) またはリボン状に加工した高純度チタンバーに特殊酸化貴金属を焼付けコーティングした陽極 (以下、リボン陽極と呼ぶ) を使用した電気防食の方式である。通常、メッシュ陽極は、防食対象とするコンクリート表面に固定し、これをコンクリート又はモルタル等で被覆し用いられており、リボン陽極は、一定間隔で線状に配置し、コンクリートで一体打設したりメッシュと同様にモルタルで被覆して適用されている。この方式による電気防食は、現在世界的に最も広く適用されており、その総適用面積は、50万m<sup>2</sup>以上にのぼっている。

なお、本研究においては、表-1の施工事例並びにこれらと平行して実施している暴露試験の結果も検討対象として取り上げた。

\* 1 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)

\* 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 運輸省 港湾技術研究所 構造部 材料研究室 室長、工博 (正会員)

\* 4 鹿児島大学 工学部 海洋土木工学科 助教授、工博 (正会員)

表-1 検討対象とした施工事例

事例	施工対象構造物	適用部位	所在地	面積 (m <sup>2</sup> )	施工 年月	防食 回路	電源 数量	通電方式		目標 分極量	暴露 有○	参考 文献
								当初	現在			
A	生コン工場建屋	柱、壁	沖縄	30	89.5	2	2	V	A	100mV	○	[1]
B	港湾コンテナ棧橋	桁、スラブ	関東	150	89.11	4	4	V	A	100mV	○	[2]
C	高速道路PC橋梁	桁	北陸	9	89.12	1	1	A	A	100mV		[3]
D	一般道路橋梁	桁、スラブ	北海道	40	90.8	1	1	V	A	100mV	○	[4]
E	高速道路高架橋	橋脚	沖縄	30	90.12	2	1	A	A	100mV		[5]
F	港湾フェリー棧橋	桁	四国	30	91.1	1	1	A	A	100mV		
G	港湾ビル棧橋	桁、スラブ	シンガポール	100	91.2	5	5	A	A	100mV	○	[6]
H	生コン工場建屋	柱、壁	沖縄	30	91.5	2	2	V	A	100mV	○	[1]
I	港湾工場PC棧橋	桁(新設)	四国	50	91.9	3	1	A	A	150mV		[7]
J	鉄道橋梁	桁、スラブ	中国	60	91.12	2	2	A	A	150mV		
K	高速道路高架橋	橋脚	沖縄	120	92.1	4	4	A	A	100mV		
L	一般道路PC橋梁	桁	沖縄	70	92.2	3	3	A	A	150mV		
M	一般住宅車庫	天井スラブ	九州	20	92.10	1	1	A	A	150mV		[8]

\*通電方式におけるVは定電圧通電方式、Aは定電流通電方式

## 2.2 検討項目

我が国における塩害劣化原因の大部分は、飛来塩化物に起因するものであるため、表-1に示した施工事例の大部分は、橋梁や棧橋の下面での側面または下面からの施工であったが、構造物の種類や適用環境条件、使用材料等で分類すると非常に多岐にわたっている。

これらの施工事例をそれぞれの条件別に分類・整理すると図-1となる。この分類結果に基づき、電気防食に及ぼす各種要因の影響を検討した結果、次章以降で述べるようなことが明らかとなった。

なお、本報告においては、検討項目以外の諸要因は、できるだけ同一条件で検討することを基本としたが、事例自体が非常に少ないため、全体的な傾向として把握することとした。

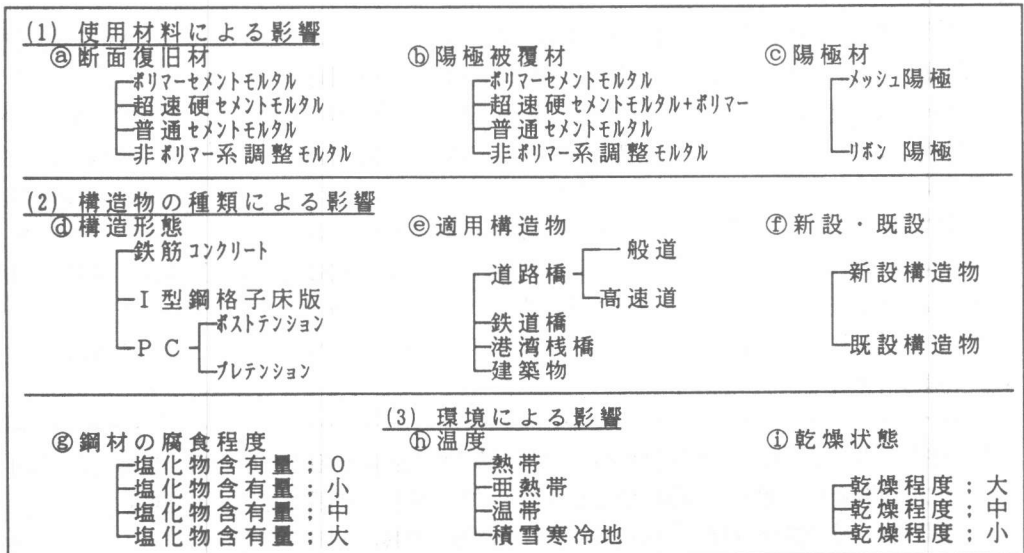


図-1 施工事例の各種条件別分類

### 3. 使用材料による影響

#### 3.1 断面復旧材及び陽極被覆材

表-2は、事例A、B、D、Hにおいて実施した電気防食施工時の断面復旧材料や陽極被覆材の構成とE-logI試験結果に基づく所要防食電流密度との関係を示したものである。

これらのうち、事例Bにおける断面復旧材へのポリマーセメントモルタルの使用並びに事例Aにおける断面復旧材と陽極被覆材へのポリマーセメントモルタルの適用結果から、断面復旧材へのポリマーセメントモルタルの利用は、所定のシフト量を得るために必要な防食電流密度を増加させる傾向を有することが明らかであり、電気防食における断面復旧材へのポリマーの利用は、あまり好ましくないと判断される。これはポリマーの添加により電解質の連続性が損なわれることやポリマー自体の添加剤の影響等が考えられる。また、事例DおよびHの暴露供試体の事例に基づいて陽極被覆材の違いが防食電流密度に及ぼす影響を判定すると、断面修復材の場合と同様にポリマーの使用により防食電流密度が大きくなる傾向が認められる。しかしながら、その差は断面復旧材の場合よりかなり小さく、ポリマーの種類や添加量による影響を把握した上で耐久性の向上を目的として陽極被覆材にポリマーを使用することは、ある程度可能と判断される。

図-2は、表-2の事例において、一定期間防食電流を供給した後に通電を停止し、その復極量を試験した結果の一例である。試験結果によると、断面復旧材へのポリマーの使用や新旧コンクリートの付着性を確保することを目的としたプライマーの使用は、復極に要する時間を非常に長くすることが明らかである。これは、電気防食における復極速度がコンクリートの有する酸素の拡散速度に大きく影響されることに起因しており、ポリマーやプライマーの使用により拡散速度が小さくなるためと考えられる。この復極速度の遅延は、防食効果自体への影響は殆どないと考えられるが、復極量に基づく防食管理を行う場合、管理に要する通電停止期間が非常に長くなり管理上あまり好ましくないと考えられる。なお、防食管理基準として防食電位による管理を実施する場合は、このような問題は殆どないと判断される。

#### 3.2 陽極材

表-3は、事例Gにおいて実施した陽極種類の違いによる影響をとりまとめたもので、事例Iのリボン陽極を使用した新設PC桁への適用例も併記した。事例Gにおける結果より、陽極とし

表-2 使用材料の構成が所要防食電流密度に及ぼす影響

事例	断面復旧材	プライマー	陽極被覆材	所要電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )		
				100mV	150mV	200mV
B	①アクリル系ポリマーセメントモルタル (グラウト施工)	なし	超速硬セメントモルタル + アクリル系プライマー	82.7	130	—
	②超速硬セメントモルタル (吹付け施工)	なし	超速硬セメントモルタル + アクリル系プライマー	25.5	44.2	80.3
D	①超速硬セメントモルタル + ガラス繊維補強吹付け	アクリル系プライマー	超速硬セメントモルタル + アクリル系プライマー	27.6	—	—
	②普通コンクリート (暴露供試体)	なし	超速硬セメントモルタル + アクリル系プライマー	8.2	17.4	—
	③普通コンクリート (暴露供試体)	なし	非ポリマー調整モルタル (吹付け + 左官)	9.3	12.1	17.3
A	①アクリル系ポリマーセメントモルタル (左官施工)	なし	アクリル系ポリマーセメントモルタル (左官施工)	58.0	—	—
	②普通セメントモルタル (左官施工)	なし	普通セメントモルタル (左官施工)	30.9	48.3	67.5
	③導電性調整モルタル (左官施工)	なし	非ポリマー調整モルタル (左官施工)	29.2	43.8	65.8
H	④普通コンクリート (暴露供試体)	なし	アクリル系ポリマーセメントモルタル (左官施工)	9.9	14.2	21.3
	⑤普通コンクリート (暴露供試体)	なし	非ポリマー調整モルタル (左官施工)	5.8	10.8	19.4

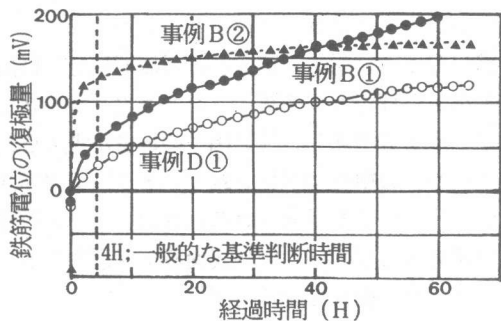


図-2 復極量試験結果の一例

てメッシュを用いた場合とリボンを用いた場合とでは、所要防食電流密度はリボン陽極の方が若干小さくなる傾向が伺えるが、事例が少なくこれを結論付けることはできない。一方、電源電圧は、リボン陽極の方が非常に大きくなっている。これは、リボン陽極は線状に設置するため、メッシュ陽極と比較して防食対象までの電気抵抗が大きくなり、防食電流密度の均一性に欠けるためと判断され、電気防食の開発初期に適用されていた溝方式と同様な傾向となること

が確認された。なお、この電源電圧の増大は、防食に必要な電力量を増加させるが、防食効果自体に影響を及ぼすことは殆どないとされている。一方、事例 I においてリボン陽極を10cm間隔で設置した新設構造物においては、電流密度、電源電圧の双方とも非常に小さく、設置間隔を小さくすることで防食電流密度の均一性の確保がある程度可能となると推察される。

#### 4. 構造物の種類による影響

##### 4. 1 構造形式及び構造物種類

表-4は、構造形式や構造物の種類による分類に基づき適用事例をとりまとめた結果である。この結果から、構造形式や構造物の違いにより所定のシフト量を得るために必要となる防食電流密度が異なることがわかる。この一因と考えられる因子が構造形式等に違いに基づく鋼材量である。表-4には、コンクリート面積

に対する鋼材表面積並びに鋼材表面積当りに換算した電流密度を示した。この結果より、確かに鋼材表面積当りに換算するとコンクリート面積当りの場合より、防食電流密度の差は小さくなるが、不十分であり、他の因子の影響が考えられる。例えば、コンクリート中の鋼材の腐食程度の違いやその構造物が置かれている環境条件等は、防食に必要な電流密度を増減させる因子として作用していると推察される。なお、この検討結果に基づくと、電気防食における防食電流密度の表示方法としては、鋼材表面積で管理するか、これを併記する方が望ましいと考えられる。

##### 4. 2 鋼材の腐食程度

表-5は、コンクリート中の鋼材の腐食程度と所要防食電流密度との関係を検討するための手段として、塩化物含有量と所要防食電流密度との関係を示したものである。この表に基づくと、コンクリート中の含有塩化物量は、電気防食における防食電流密度に

表-3 適用陽極の種類が電気防食に及ぼす影響

事例	回路 No	使用陽極	設置間隔 (cm)	通電電流密度	電源電圧 (V)	
					当初	現状
G	1	メッシュ陽極	全面	40	2.04	3.64
	3	メッシュ陽極	全面	30	2.12	2.97
	4	リボン陽極	30	20	13.66	16.70
	5	リボン陽極	20	20	13.67	12.81
I	-	リボン陽極	10	2.57	0.80	1.08

\*通電は全て定電流、電流密度はmA/m<sup>2</sup> (対コンクリート)

表-4 構造形式および構造物の種類、鋼材量が電気防食に及ぼす影響

事例	構造形式	構造物の種類	設定シフト量 (mV)	所要電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )		鋼材表面積 (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
				対コンクリート	対鋼材	
B	鉄筋コンクリート	港湾栈橋	100	10.0	15.2	0.66
	I型鋼格子床版	港湾栈橋	100	25.5	26.6	0.96
D	鉄筋コンクリート	橋梁	100	27.6	46.0	0.60
	鉄筋コンクリート	供試体	150	17.4	67.7	0.26
	鉄筋コンクリート	供試体	150	26.0	50.0	0.52
H	鉄筋コンクリート	建築建屋	100	54.0	87.0	0.62
	鉄筋コンクリート	擁壁	100	29.2	64.9	0.45
C	P C (ボステン)	橋梁	100	20.0	33.9	0.59
I	P C (九テ)	新設 港湾栈橋	150	2.57	3.57	0.72

表-5 コンクリート中の塩化物量が電気防食に及ぼす影響

事例	構造形式	構造物の種類	含有塩化物量 (kg/m <sup>3</sup> )	設定シフト量 (mV)	所要電流密度 (mA/m <sup>2</sup> )		鋼材表面積 (m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> )
					対コンクリート	対鋼材	
D	鉄筋コンクリート	道路橋梁	3.2	100	27.6	46.0	0.60
	鉄筋コンクリート	供試体	4.5	150	18.0	69.2	0.26
	鉄筋コンクリート	供試体	9.0	150	25.0	96.2	0.26
	P C (ボステン)	実大供試体	0	100	2.65	3.40	0.78
G	鉄筋コンクリート	供試体	0	200	2.19	3.08	0.71
	鉄筋コンクリート	供試体	15.0	200	43.4	61.1	0.71
I	P C (九テ)	新設 港湾栈橋	0	150	2.57	3.57	0.72

非常に大きな影響を及ぼすと判断できる。すなわち、塩化物を含有しない場合には、所要防食電流密度は非常に小さく、腐食臨界量の塩化物を含有する場合には含有しない場合の10倍（対コンクリート）程度の防食電流密度が必要となっている。この傾向に基づくと、塩害による腐食程度が大きなものほど所要防食電流密度も大きくなると判断できる。また、現在、電気防食法は、塩害による構造物の補修対策としての適用が主であるが、新設への適用は、非常に小さな電流密度で効率的な防食が可能と判断でき、新設への適用も検討する価値を有していると考えられる。

## 5. 環境の影響

### 5.1 温度

表-1の事例は、積雪寒冷地である北海道から亜熱帯地域である沖縄までの我が国の全ての地域が包含されており、さらに、国際協力事業団により実施され、熱帯地域にあるシンガポールでの事例も含まれている。これらの事例から得られた結果を温度環境別にとりまとめて表-6に示す。これらの結果に基づくと、所定の防食効果を得るために必要となる防食電流密度は、暖かい地域ほど大きくなる傾向が伺え、これは、温度が高い場合ほど、鋼材の腐食反応速度が大きくなることと密接に関連しているためと判断される。

また、図-3は、積雪寒冷地における電気防食において、定電圧方式で通電した場合の防食電位と電流密度の変化を示したものであり、この結果より、積雪寒冷地では、冬期の温度低下に伴うコンクリートの電気抵抗の増加に基づくと考えられる電流密度の低下が認められ、これに伴う電位の貴化傾向が確認できる。一方、これを定電流方式で通電した場合、防食電位が夏期より冬期により卑化する傾向が認められ、また、電源電圧は、冬期に増加する傾向が認められた。これは、低温時には鋼材の腐食反応速度が小さくなるため、同一電流密度で大きな分極量が得られ、電源電圧の増加は、コンクリートの凍結による抵抗の増加に起因していると考えられる。

### 5.2 乾燥程度

表-1の事例において、港湾栈橋は比較的湿潤状態に常時置かれており、橋梁はその設置環境により比較的湿潤状態にある

表-6 施工環境（温度）が電気防食に及ぼす影響

事例	施工環境	構造物の種類	目標シフト量 (mV)	平均電流密度	
				当初	現状
G	熱帯	RC栈橋	100	32.0	28.0
H	亜熱帯	RC建物	100	60.0	41.4
K	亜熱帯	RC橋脚	100	32.5	32.5
L	亜熱帯	PC橋梁	100	9.7	9.7
B	温帯	RC栈橋	200	19.2	3.0
C	温帯	PC橋梁	100	20.0	5.0
F	温帯	RC栈橋	150	24.5	12.9
I	温帯	PC栈橋	150	2.6	2.6
J	温帯	RC橋梁	150	17.5	17.5
M	温帯	RC建物	150	15.0	15.0
D	積雪寒冷地	RC橋梁	100	27.6	2.0

\*平均電流密度は、対コンクリート当りの全回路の平均 (mA/m<sup>2</sup>)  
\*積雪寒冷地の当初電流密度は、夏期の試験結果に基づく

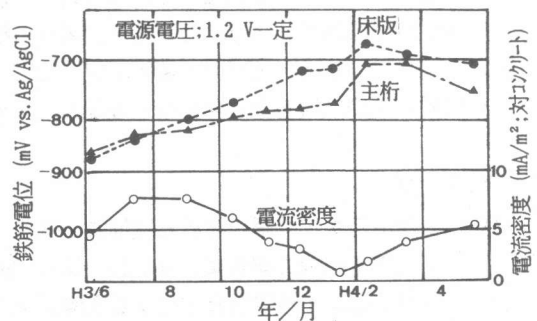


図-3 鉄筋電位及び電流密度の季節変化（寒冷地）

表-7 施工環境（乾燥程度）が電気防食に及ぼす影響

事例	乾燥程度	施工環境	構造物の種類	目標シフト量 (mV)	平均電流密度		電源電圧 (V)		
					当初	現状	当初	現状	
H	乾燥	大	亜熱帯	RC建物	100	60.0	41.4	2.46	2.82
K	乾燥	大	亜熱帯	RC橋脚	100	32.5	32.5	1.98	4.35
C	乾燥	中	温帯	PC橋梁	100	20.0	5.0	-	-
D	乾燥	中	寒冷地	RC橋梁	100	27.6	2.0	1.67	1.58
J	乾燥	中	温帯	RC橋梁	150	17.5	17.5	2.46	2.63
M	乾燥	中	温帯	RC建物	150	15.0	10.0	1.72	2.02
F	乾燥	小	温帯	RC栈橋	150	24.5	12.9	1.80	2.56
L	乾燥	小	亜熱帯	PC橋梁	100	9.7	9.7	1.54	1.96
B	乾燥	小	温帯	RC栈橋	200	19.2	3.0	2.70	3.45

\*平均電流密度は、対コンクリート当りの全回路の平均 (mA/m<sup>2</sup>)  
\*H：建物は外壁、M：建物は室内、

場合から乾燥状態まで幅広い環境にある。また、建築物は乾燥しやすい環境にある場合が多く、これらの乾燥状態と所要防食電流密度との関係を表-7に示す。この結果に基づくと、乾燥状態の激しいものほど防食電流密度が大きくなる傾向が認められ、また、同一目標シフト量で比較した場合の電源電圧も大きくなる傾向が伺える。これらの傾向のうち、電源電圧の増加は、乾燥によるコンクリート抵抗の増加に起因するものであるが、所要防食電流密度の増加は、コンクリート中の鋼材の腐食反応速度が酸素の拡散速度に影響され、高温かつ、やや乾燥状態での腐食反応が非常に活発となることに起因していると考えられる。

図-4は、E-logI試験時のEon電位とEoff電位との関係を湿潤状態の場合と乾燥状態の場合とで比較したものであり、この結果より、乾燥状態にある構造物は、コンクリートの乾燥による電気抵抗の増加により、IRドロップが非常に大きくなることが把握できる。このことは、コンクリート構造物の防食管理の方法として、海中鋼構造物等で実施されているEon電位での管理が不適当であることを示唆していると判断できる。

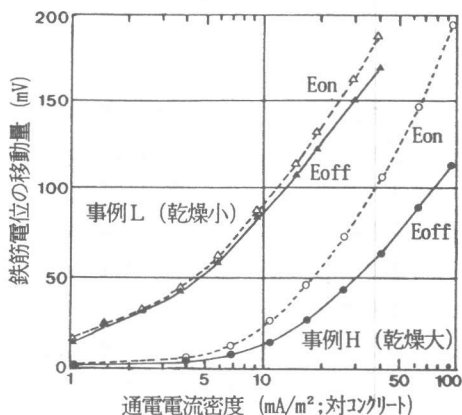


図-4 乾燥状態がIRドロップ量に及ぼす影響

## 6. まとめ

これまでに実施したコンクリート構造物の電気防食の施工事例を解析・検討することで電気防食に影響を及ぼす各種要因を明らかにしたが、検討対象とした施工事例も少なく、今後は、事例の増加並びに実験等により、これらを定量的に把握できる様、検討を進める必要があると考えられる。なお、ここで述べた影響因子以外にも、通電による鋼材自体の再不導態化や塩化物イオンの移動等の環境改善効果が影響を及ぼし、今後、これらについても明らかにする計画である。

## <参考文献>

- [1] 川俣孝治ほか：沖縄における鉄筋コンクリート建築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.15、1993（投稿中）
- [2] 川俣孝治ほか：電気防食法による港湾コンクリート構造物中の鋼材の防食、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.511-516、1990.6
- [3] 新野孝紀ほか：道路橋における電気防食試験施工、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.366-367、1991.9
- [4] 堺孝司ほか：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、pp.567-572、1991.6
- [5] 根本正幸ほか：チタン陽極法を適用した道路橋の電気防食実験、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.368-369、1991.9
- [6] 福手勤ほか：熱帯地域における港湾コンクリート構造物の電気防食法の検討、土木学会第46回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp.370-371、1991.9
- [7] 竹谷正造ほか：新設プレレスト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.15、1993（投稿中）
- [8] 武若耕司ほか：中性化により鉄筋腐食をおこしたRC製ガレージへの電気防食の適用実験について、平成4年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集、pp.790-791、1993.3