

論文 通電を施したコンクリート中の電位分布および導電経路に及ぼす諸要因の影響

久田 真¹・大即信明²・網野貴彦³・Tarek Uddin MD.⁴

要旨：近年、コンクリートに電場を作用させることにより、構造物の維持管理ならびに機能回復を図った工法が注目を集めている。本論文は、このような電場が作用している鉄筋コンクリートにおける電位の分布状況と導電経路に関する基礎的な検討を行ったものである。検討にあたっては、通電条件(電流密度、通電形式、通電期間)、コンクリートの中性化、粗骨材の有無を要因として取りあげ、これらが電位分布と導電経路に与える影響について、供試体の電位およびCl⁻の移動量等を測定することにより、考察を行った。

キーワード：イオン移動、Cl⁻、電位分布、中性化、脱塩工法

1. はじめに

通電を施した鉄筋コンクリート構造物の維持管理技術は、コンクリート内部鉄筋の腐食の抑制を目的としたもの(電気防食等)と、既にコンクリート内部に進入した有害イオンを除去、あるいは溶出イオンを再びコンクリート内部へ浸透させることを目的としたもの(脱塩工法、再アルカリ化工法等)に大別される。特に、脱塩工法などの比較的大きな電流を施すものは、電極反応や、陰極近傍でのアルカリイオンの集中などが生じ、現象が極めて複雑である。また、鉄筋コンクリートに通電を施す場合、コンクリート内部のほとんど全てのイオンが移動するため、イオン濃度の分布の観点からは、通電後のコンクリートは必ずしも均質材料として扱うことはできないと考えられる。また、このようなイオンの移動により、電場でのコンクリートの電位の分布が経時的に変化することが予想されるが、これについての既往の研究は極めて少ないのが現状である。これらの状況を鑑みて、本研究では、電場が作用している鉄筋コンクリート中での電位の分布とイオンの移動との関係、ならびに通電の形式の違いがコンクリート中の電位の分布に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、これと併せて通電時のコンクリート中の導電経路についての比較検討も行った。

2. 実験概要

本研究においては、鉄筋コンクリート部材に電場を与える通電形式として、①内部鉄筋を陰極とし、陽極を部材外部に設置する方法(以下、内部電極方式とする)、②陰極、陽極とも外部に対峙して設置する方法(以下、対峙電極方式とする)、③陰極、陽極とも同じ側面に隣り合わせて設置する方法(以下、隣接電極方式とする)、の3つの方法を設定した。以下に本研究の概要を示す。

2.1 使用材料、配合、練混ぜならびに養生

本実験で用いたセメントの物理的、化学的性質を表-1に示す。骨材は、千葉県小櫃産山砂(比重:2.62、吸水率:1.17%、F.M.:2.20)および東京都奥多摩産砕石(比重:2.61、F.M.:6.65)を使用した。各供試体の配合は、モルタルに関してはすべてW/C=0.5、S/C=2.5とし、コンクリートに関しては、中性化の進行が顕著なモデルとしてW/C=0.7とし、表-2に示す配合とした。なお、各供試体には、1m³あたり10kgのNaClを練混ぜ時に添加した。モルタルの練混ぜは、2lホバート型モルタルミキサーを用いて

*1 東京工業大学 工学部 助手 (正会員)

*2 東京工業大学 工学部 教授 (正会員)

*3 東京工業大学 大学院 理工学研究科

*4 東京工業大学 大学院 国際コース

表-1 セメントの主な物理的、化学的性質

種類	物理的性質						化学成分 (%)								
	比重	比表面積 (cm ² /g)	圧縮強さ (MPa)				L.O.I.	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl	Na ₂ Oeq.
			1d	3d	7d	28d									
普通	3.17	3320	—	18.7	29.5	42.9	0.6	21.0	5.3	2.6	64.6	2.0	2.0	0.018	0.58
早強	3.14	4500	15.2	28.5	38.3	48.8	1.1	—	—	—	—	1.5	2.9	0.004	0.55

表-2 コンクリートの示方配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	混和剤
20	8.0±1	4.0±1	70	45	165	236	838	1032	445.5

*ナフタレン系 AE 減水剤 (ml/kg³)

JIS A 5201 に準じて行った。コンクリートの練混ぜは、50l パン型強制練りミキサを用い、セメント、細骨材を 30 秒間空練りした後、水を加え、一旦ミキサを停止して練り上がったモルタルをかき均し、粗骨材を投入した後、再びミキサを起動して 120 秒間練り混ぜた。なお、養生はいずれも湿空養生とし、養生期間は普通セメントを用いた供試体については 28 日間、早強セメントを用いた供試体については 7 日間とした。また、鉄筋は、円柱供試体については φ16mm-SR235、板状供試体については φ10mm-SR235 の丸鋼で、打設前にサンドペーパーにて磨いたものを用いた。

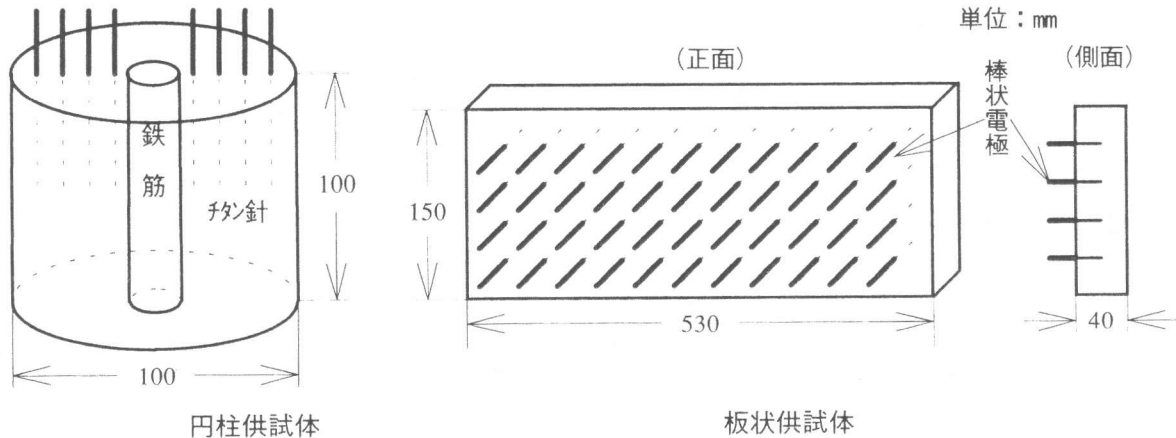


図-1 各供試体の概略

2.2 供試体

供試体の寸法の概略を図-1 に示す。通電時の電位分布を測定する供試体については、市販のチタンメッシュを棒状に切断し、これを埋め込み長さが一定となるように各供試体に埋設した。なお、板状供試体については、φ10mm みがき丸鋼を分割し、各々の丸鋼の両端にリード線を接続したものを、かぶり高が 5cm となるような位置に埋設したものを、および無筋のものを作成した。また、中性化を促進させた供試体は、20℃、R.H.50%、CO₂ 濃度 10% の促進中性化槽に曝露し、フェノールフタレイン 1% エタノール溶液を噴霧して中性化深さがおおよそ 20mm となったものを用いた。

2.3 通電方法

各供試体の通電は、供試体表面積あたりの電流値が一定となるように設定した。なお、電源は、一定の電流値を精度良くコントロールすることが可能な市販のポテンショスタット・ガルバノスタット (容量：1A、200V) を用いた。各供試体の通電条件一覧を表-3 に示す。

表-3 各供試体の通電条件一覧(○印が実施した条件)

供試体種類	鉄筋	通電形式			電流密度** (A/m ²)	通電			
		内部電極	対峙電極	隣接電極*		直後	2週	4週	
円柱	モルタル	φ16mm	○			○	○	○	
	コンクリート		○			○	○	○	
板状	モルタル	φ10mm (深さ方向)	○			1.0	○		
				○		1.0	○		
					○	1.0	○		
	なし			○	0.5、1.0、2.0	○			

* 極板間隔：5 mm、極板幅：130 mm、 ** 供試体曝露表面積あたりの電流密度

2.4 検討項目

(1) 供試体の電位分布

棒状のチタンメッシュを埋設した供試体を用いて通電を施している間に、市販のテスターにてそれぞれのメッシュ端部と陽極との電位差を測定し、これを各点における電位とした。また、板状供試体については、通電時間が経過するにつれて電位分布が変化する可能性があるため、1 供試体につき通電開始後おおよそ 30 分以内に各点の電位測定を完了した。

(2) 外部溶液中の Cl⁻ 濃度

各供試体に通電を施すにあたっては、全ての供試体で外部溶液として Ca(OH)₂ 飽和水溶液を用いた。また、Cl⁻ 濃度は、所定の材齢時に 0.01ml の溶液を採取し、これを電位差滴定法にて測定した。

(3) 供試体内部の Cl⁻ 濃度

円柱供試体については、供試体内部の Cl⁻ 濃度の分布を測定した。測定に用いた試料は、通電終了後の供試体をハンマーで砕き、アセトンに浸漬してセメントの水和を停止させたものを、乳鉢にてほぼ全量が 150μm 以下になるまで粉碎したものである。Cl⁻ 濃度は、粉碎試料を 10g はかりとったものを 100g の蒸留水中で攪拌し、濾過した上澄み液を用いて、電位差滴定法により測定を行った。

3. 鉄筋入り円柱供試体における Cl⁻ の移動と電位分布の経時変化

3.1 供試体にかかる電位の経時変化

図-2 に、コンクリートの円柱供試体に通電を施した場合の供試体中の電位分布の経時変化を示す。これによれば、通電開始直後において陰極である鉄筋近傍の電位の変化が著しく大きいことがわかる。これは、アルカリ雰囲気中における鉄筋表面の不動態が存在していること、あるいは通電によって陰極部分で電極反応が生じ、これにより電位降下が生じたためと考えられる。また、図-2 によれば、通電期間が長くなる程、陰極近傍の電位の変化が緩やかになり、逆に陽極に近い供試体表層部分では電位勾配が大きくなっており、しかもこれらの範囲は通電期間とともに拡大してい

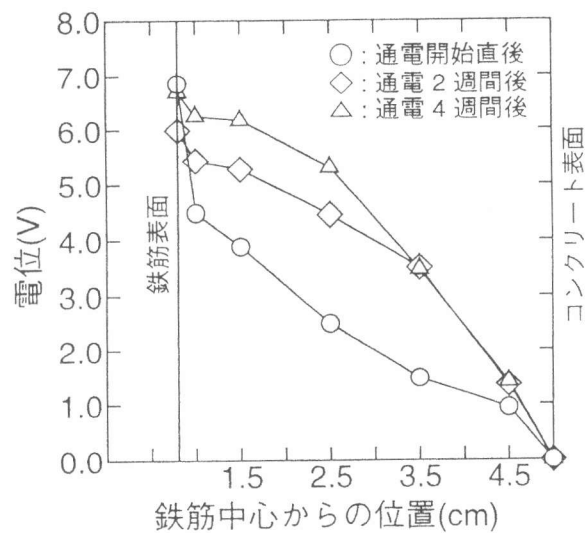


図-2 円柱供試体の電位分布の経時変化

ることがわかる。これらの現象とイオンの移動とを関連づけて考察すると、以下のような解釈が可能である。すなわち、陰極近傍では、通電を施すことにより、上田ら[1]が指摘しているようなアルカリイオンの集積、あるいは電極反応によって OH^- が陰極において生成するため、 Cl^- の減少にもかかわらず鉄筋近傍における硬化体単位体積あたりに含まれるイオン量が増大し、電気抵抗が低いことを示していると考えられる。一方、陽極側の供試体表層部では、電場の作用によってイオンが移動するものの、これらのイオンは陰極近傍のように集積されず、陰イオンについては外部溶液中へ放出され、外部溶液から供給される陽イオンも通過するのみであるため、硬化体単位体積あたりに含まれるイオン量が減少し、電気抵抗が高いことを示していると考えられる。

3.2 コンクリートの中性化が供試体の電位分布に及ぼす影響

図-3 に、予め促進中性化を行った円柱供試体に通電を施した供試体中の電位分布の経時変化を示す。

これによれば、供試体中に作用する電位の分布状況は、鉄筋近傍は中性化していない供試体の場合と同様であるものの、中性化の境界付近で変化しており、中性化部分の電位勾配は未中性化部分の電位勾配に比べて大きくなっていることがわかる。一般に、電場 E における荷電粒子 q に作用する力 F は、 $F=qE$ となり、電圧に比例した力となるため、イオンを荷電粒子として考えると、中性化部分に存在するイオンに作用する電場の力は、未中性化部分に存在するイオンに作用する力に比べると大きくなるものと考えられる。

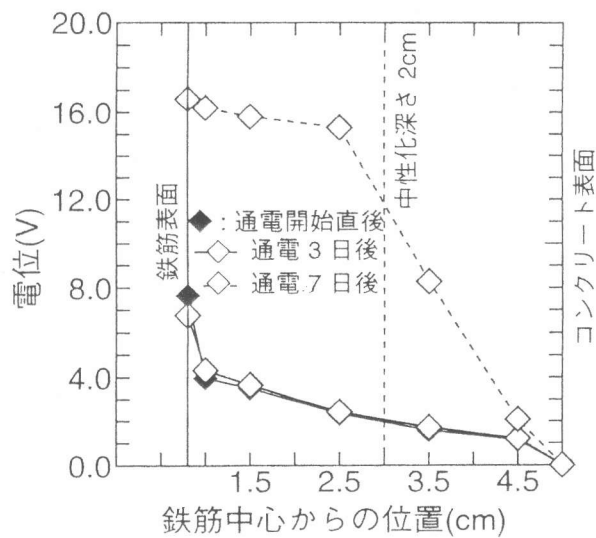


図-3 中性化供試体の電位分布

3.3 Cl^- 濃度の移動に関する検討

図-4 に、内部電極方式によって円柱供試体に通電を施した場合の、外部溶液の Cl^- 濃度の経時変化を示す。これによれば、中性化していない供試体の場合、外部溶液中の Cl^- 濃度の変化は、通電開始直後から、経時的に緩やかになっていることがわかる。一方、中性化している供試体では、 Cl^- の濃度変化が通電開始後数日の間に急激に起こり、通電開始後約 9~10 日目以降からは外部溶液中の Cl^- 濃度の変化は非常に少ない。図-5 に、内部電極方式によって通電を施した円柱供試体内部の Cl^- 濃度の経時変化を示す。これによれば、中性化していない供試体において、陰極である鉄筋近傍の Cl^- 濃度は、通電開始 1 週間後で既に大きく低下しており、表層部

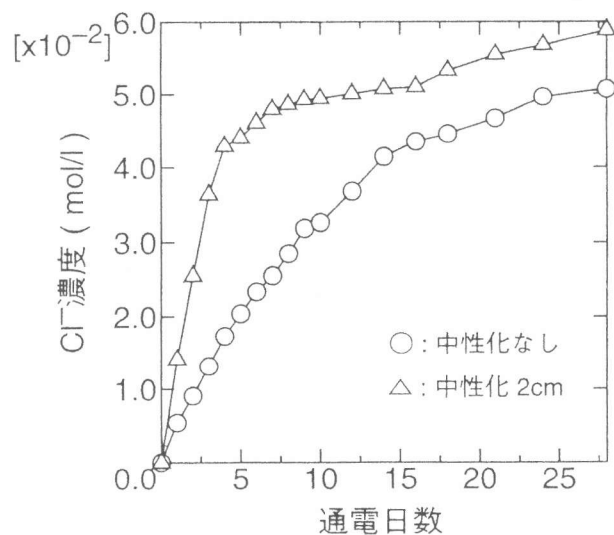


図-4 外部溶液の Cl^- 濃度の経時変化

に近づくにしたがい濃度が高くなっている。また、中性化している供試体に関しては、中性化部分である供試体表層部の Cl^- 濃度の低下が著しい。この結果と、供試体中の電位分布の結果を併せると、鉄筋コンクリートに通電を施した際の Cl^- は、通電時において電位の変化の大きい部分、すなわち電位勾配が大きい部分ほど移動しやすいと考えることができる。

4. 種々の要因が電場におけるセメント硬化体中の電位分布および導電経路に及ぼす影響

前述の検討により、通電を施した場合の鉄筋コンクリート中の Cl^- の移動の程度は、コンクリート中の電位の分布により定性的に把握することが可能であると考えられる。したがって、本章では、粗骨材の有無、通電形式および電流密度の違いがセメント硬化体中の電位分布ならびに導電経路に及ぼす影響についての検討を行った。

モルタルの円柱供試体を用いて通電を施した直後の、供試体の電圧の測定結果を図-6に示す。図-2と比較すると、供試体中に作用する電圧は全体的に低い傾向を示している。このことは、コンクリートの場合、粗骨材により、イオンの移動が抑制されたために、電位が全体的に高くなったと

考えられるが、粗骨材のイオンの移動に及ぼす影響については、骨材-ペースト界面の影響も含めて、今後さらに詳細な検討を行う必要がある。板状供試体を用い、各々の通電形式で通電を施した場合の、供試体の電圧の測定結果を図-7に示す。これによれば、通電形式の違いにより、供試体中で最も電位変化が激しくなる部分が異なり、仮に通電によって塩分を除去する場合、通電形式を工夫することでより効率的な脱塩が可能であると考えられる。図-8に、隣接電極方式を用い、電流密度を変化させた場合の板状供試体の電位分布を示す。これによれば、電流密度が大きいほど供試体中で最も電位勾配が大きくなる部分が表面より深く及ぶことが確認できる。海洋構造物において、 Cl^- イオンがまだ鉄筋まで到達せず、かぶりの部分まで浸透している場合などでは、このような隣接電極方式で、電流密度、極板間隔、極板面積等をコントロールすれば、効率よく脱塩を行うことができる可能性があると考えられる。

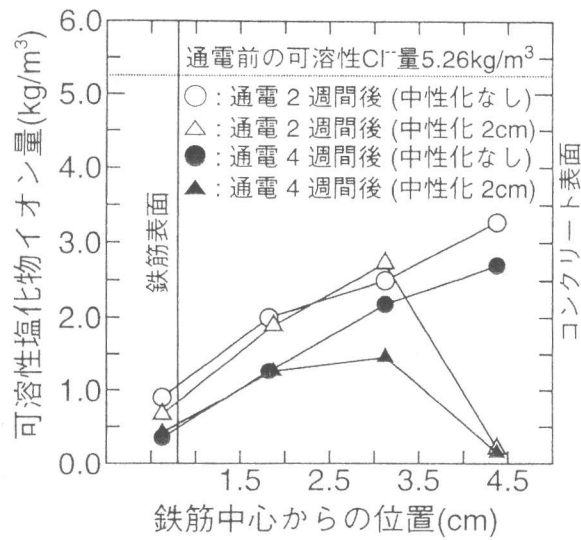


図-5 供試体内部の Cl^- 濃度の経時変化

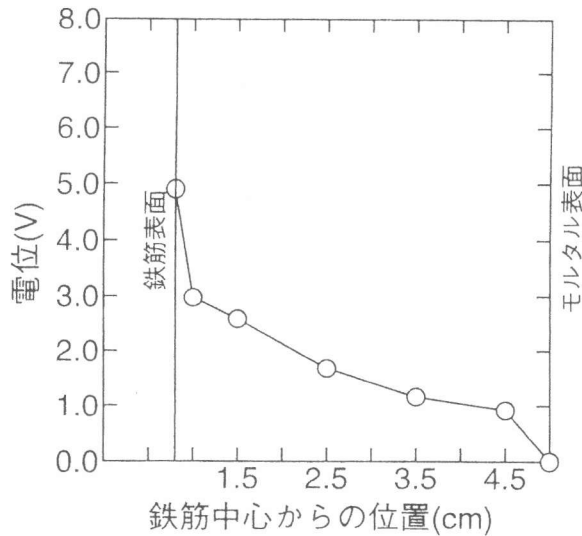
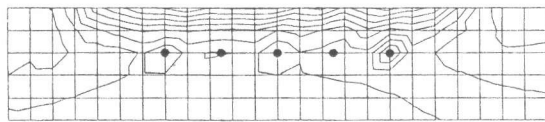
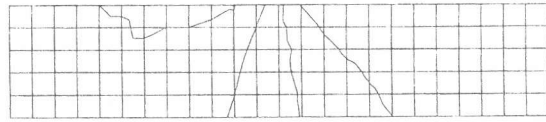


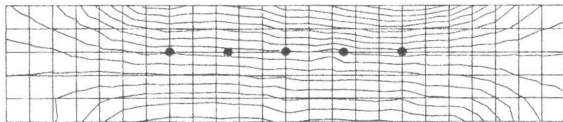
図-6 モルタル供試体の電位分布



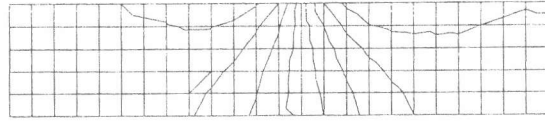
(内部電極方式、1.0 A/m²)



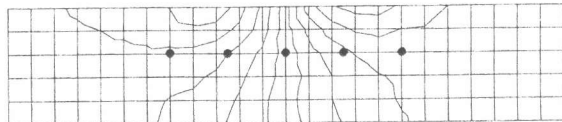
(隣接電極方式、0.5 A/m²、無筋)



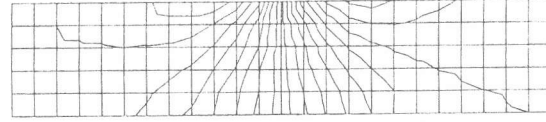
(対峙電極方式、1.0 A/m²)



(隣接電極方式、1.0 A/m²、無筋)



(隣接電極方式、1.0 A/m²)



(隣接電極方式、2.0 A/m²、無筋)

図-7 通電形式の違いが供試体の
電位分布に及ぼす影響

図-8 電流密度が供試体の
電位分布に及ぼす影響

- 注) 1. 隣り合う2本の曲線間の電圧は全て0.25Vである。
2. メッシュ間隔は2cm、鉄筋間隔は5cmである(●は鉄筋位置を示す)。

5. まとめ

本研究を通じて得られた主な所見を以下に示す。

- (1) 通電を施した場合の鉄筋コンクリート中の各部分の電位は、通電期間が長くなるにしたがって変化し、内部電極方式を用いた場合、陰極近傍での電位は経時的に緩やかになり、コンクリート表層部では経時的に急激になる。
- (2) 電場における中性化したコンクリート部分の電位勾配は、未中性化部分の電位勾配よりも大きい。このため、電流密度を一定として通電を行った場合、中性化したコンクリート中に含まれる Cl^- は移動しやすいと考えられる。
- (3) 脱塩を念頭に置いた場合、通電を施している際の鉄筋コンクリート中の電位分布を測定することにより、 Cl^- イオンの除去の程度が定性的に把握することが可能であると考えられる。

謝辞：本研究を実施するにあたり、電位分布の測定等で東京工業大学岡本匡史氏(学部学生)のご助力を得ました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- [1] 上田隆雄、宮川豊章、藤井 學、芦田公伸：デサリネーションが鉄筋の付着挙動に与える影響、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.1007-1012、1994