

論文 コンクリート中における電気浸透流に関する基礎的研究

大塚 邦朗*1・岩波 光保*2・千々和 伸浩*3

要旨: コンクリートは補修や試験など様々な場面で電圧を印加されることがあり、その際に電気浸透流が起こる可能性は十分にある。電気浸透流とは、毛細管内が電解液で満たされているときに電圧が印加されると毛細管内で流れが生まれる現象である。しかし、コンクリート中における電気浸透流についての研究は多くはない。本研究はコンクリートにおいて起こる電気浸透流の影響を実験的に検討した。それにより、コンクリート中の電気浸透流は低電圧(15, 30V)ではほとんど起こらないこと、高電圧(60, 80V)では起こることがわかった。また W/C は、電気浸透流量に影響することがわかった。

キーワード: コンクリート, 電気浸透流, W/C, 骨材, 遷移帯領域, 塩化物イオンの実効拡散係数試験

1. はじめに

コンクリートにはエントラップドエアやエントレインドエア、毛細管空隙やゲル空隙などの空隙が存在し、それらはコンクリートの強度や耐久性などの様々な特性に深く関わっている。今回着目する毛細管空隙はコンクリートの耐久性に影響する。コンクリートの重大な劣化は毛細管空隙内を劣化因子が移動することで起こると考えられる。

毛細管内を物質が移動する現象として電気浸透流¹⁾がある。毛細管内が液体で満たされているときに外部から電圧が印加されると、内部の液体が電極に向かって動く現象である。この現象はマイクロ流体機械や化学分析などの他分野では広く用いられているものである。

コンクリートには材料試験や補修などの様々な場面で電圧が印加される。例えば、土木学会規準に規定される電気泳動試験(JSCE-G571)や ASTM C1202 に規定される電気化学的手法などではコンクリートの塩化物イオンの拡散係数を測ることができる。脱塩工法では腐食の原因となるコンクリート内部の塩分を外部へ除去できる。再アルカリ化工法では中性化したコンクリートを再度アルカリ化させ、鉄筋腐食抵抗性を向上させることができる。

コンクリートは毛細管空隙を有すること、電圧が印加されることがあるため、コンクリートにおいて電気浸透流が起こる可能性は十分にある。既往の研究では、セメントペーストやモルタルにおける電気泳動試験において、電気浸透流が起こることが示唆されている²⁾が、コンクリート中における電気浸透流の発生に関する研究は多くない。コンクリート中において発生する電気浸透流は先に述べたような材料試験や補修に影響を与える可能性があり、コンクリート中における電気浸透流についての知見を得ることは実用上実務上必要なことであると考えられる。さらに、得られた知見から電気浸透流を用いた新

たな材料試験や補修の方法を開発できる可能性がある。

本研究の目的は、コンクリート中で起こる電気浸透流の測定方法を考案し、それを用いてコンクリート中の電気浸透流の特性について実験的に検討することである。

2. コンクリート中の電気浸透流の測定方法の考案

既往の研究²⁾では、土木学会規準に示されている電気泳動試験においてモルタルやセメントペースト中で電気浸透流が起こることがわかっている。本実験においては、コンクリート中で電気浸透流が起こるかどうかなを確認するため、JSCE-G571 と同一にしてコンクリートに電圧を印加することとした。図-1 に示すようにアクリルセルにコンクリート試験体を設置し、陽極側と陰極側セルともに NaOH 溶液で満たす。ここで電圧を印加すると、電気浸透流と電気分解が起こる。電気浸透流によって液体は陽極側セルから陰極側セルに流れるため、陽極側セルでは溶液の体積が減少し、陰極側セルでは溶液の体積が増加する。各極での電気分解は式(1)と式(2)に示すような反応が起こり、両極とも体積が増加する(図-1)。

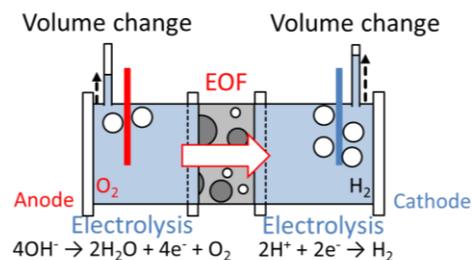
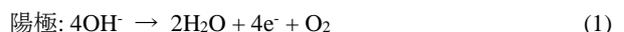


図-1 電気浸透流の測定方法の模式図



以上から、各セルにおける体積変化は式(3)と式(4)で示すようになり、各セルでの体積変化を測定するとともに、

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 准教授 博士(工学) (正会員)

電気分解量を理論的に算出することで、電気浸透流の量が求められる。

$$\text{陽極: 体積変化量} = \text{電気分解量} + \text{電気浸透流量} \quad (3)$$

$$\text{陰極: 体積変化量} = \text{電気分解量} + \text{電気浸透流量} \quad (4)$$

体積変化量はシリンダーを用いて水頭の変化を測ることで 1 秒間あたりの体積変化量[mm³]を求めるため、単位は[mm³/s]となる。また、電気分解量の算出にはファラデーの電気分解の第二法則を用いる (式(5))。

$$n = \frac{It}{zF} \quad (5)$$

ここで、
 $n[\text{mol}]$: 物質数 $t[\text{s}]$: 時間
 $I[\text{A}]$: 電流 z : イオン価数
 $F[\text{C/mol}]$: ファラデー定数=9.65×10⁴

電気分解量についても 1 秒間あたりの変化量を求めるため、単位は[mm³/s]となる。ここで電気分解によって消費・生成される水分子についてはその体積が発生する気体とくらべて非常に小さいため、無視する。水の電気分解の化学反応式を式(6)に示す。水 1mol の体積は 0.018L、水素と酸素はどちらも気体であるため 1mol の体積は 22.4L であり、水 0.018L を分解すると水素が 22.4L、酸素が 11.2L 生成される。



本実験で求まる電気浸透流量の単位は[mm³/s]とし、以下の式(7)と式(8)で算出する。得られた陰極側と陽極側セルの電気浸透流量の絶対値はその仮定から等しくなる。

$$\text{陽極: 電気浸透流量} = \text{電気分解量} - \text{体積変化量} \quad (7)$$

$$\text{陰極: 電気浸透流量} = \text{電気分解量} - \text{体積変化量} \quad (8)$$

3. コンクリート中の電気浸透流の特性に関する検討

3.1 実験パラメーター

電気浸透流に影響を与えるパラメーターとして、コンクリートの空隙構造や内部性状、表面性状が影響すると考え、コンクリートの W/C や印加電圧、材齢、表面性状、骨材の影響の 5 種類を検討した。W/C は 60, 45, 30(%) の 3 水準について検討した。各 W/C の配合については表-1 に示したものとし、試験開始時の材齢は 1 週間のものを用いた。印加電圧は 15, 30, 60, 80(V) の 4 水準とし、各 W/C について検討した。材齢は試験開始時の材齢について 1 週間と 4 ヶ月の 2 水準とし、各 W/C について検討した。表面性状は W/C=45% について切断面と型枠面の 2 水準を検討した。骨材の影響は粗骨材の有無を検討し、W/C=45% についてコンクリートとモルタルの 2 水準を検討した。コンクリートが電圧を印加される状況は主に長時間印加であるため、測定時以外にも電圧 30V を印加し続け、電気浸透流の測定を 1 日おきに行った。

試験体は、室温 20℃、相対湿度 60% の環境で打設した後、1 日後に脱型し、所定の材齢まで水中養生した。

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	Unit(kg/m ³)			
		W	C	S	G
30	45	165	550	725	914
45	45	165	367	794	1000
60	45	165	275	828	1043

※C:普通ポルトランドセメント (比重 3.16) S:陸砂(表乾比重 2.60, 吸水率 1.48%), G:砕石(表乾比重 2.68, 吸水率 0.61%, G_{max}=20mm)

表-2 検討したパラメーターのまとめ

パラメーター	試験体		
	30%	45%	60%
W/C	30%	45%	60%
印加電圧	15, 30, 60, 80 (V)		
材齢	1 週間, 4 ヶ月		
表面性状	切断	切断-型枠	切断-切断
骨材の有無	有り	有り, 無し	有り

3.2 W/C と印加電圧が電気浸透流量に及ぼす影響

W/C=60, 45, 30% について、電圧 15, 30, 60, 80(V) における各セルでの電気浸透流量(ΔEOF)と時間の関係をそれぞれ図-2~4 に示す。凡例は W/C(30/45/60%)_電圧(15/30/60/80V)_セル(Anode/Cathode)を意味する。

図-2 から W/C=60% について印加電圧 15, 30, 60, 80(V) による影響を考察する。電圧 15, 30(V) について陰極と陽極のセルで起こった電気浸透流量はほとんど 0 であった。以上から、電圧 15, 30(V) では電気浸透流がほとんど起こらなかったと考えられる。次に電圧 60, 80(V) について両極のセルで起こった電気浸透流量は陰極側では正に、陽極側では負になる傾向がみられ、両極のセルにおける電気浸透流量の値は等しくなった。以上から、電圧 60, 80(V) では電気浸透流が起こったと考えられる。電圧 60, 80(V) での電気浸透流量について比べると、電圧 60V では陰極側と陽極側セルでの電気浸透流量が約 1mm³/s に対して、電圧 80V では陰極側と陽極側セルでは約 2mm³/s であった。以上から、コンクリート中で起こる電気浸透流量は電圧に影響されることがわかった。

図-3 から W/C=45% について印加電圧 15, 30, 60, 80(V) による影響を考察する。W/C=45% においては W/C=60% と同様に電圧 15, 30(V) では電気浸透流量がほとんど 0 であり、電圧 60, 80(V) では電気浸透流量が陰極側では正に、陽極側では負になる傾向が見られ、陰極と陽極のセルにおける電気浸透流量の値はほぼ等しくなった。電圧 60, 80(V) での電気浸透流量について比べると、電圧 60V では陰極側と陽極側セルでの電気浸透流量が約 1mm³/s に対して、電圧 80V では陰極側と陽極側セ

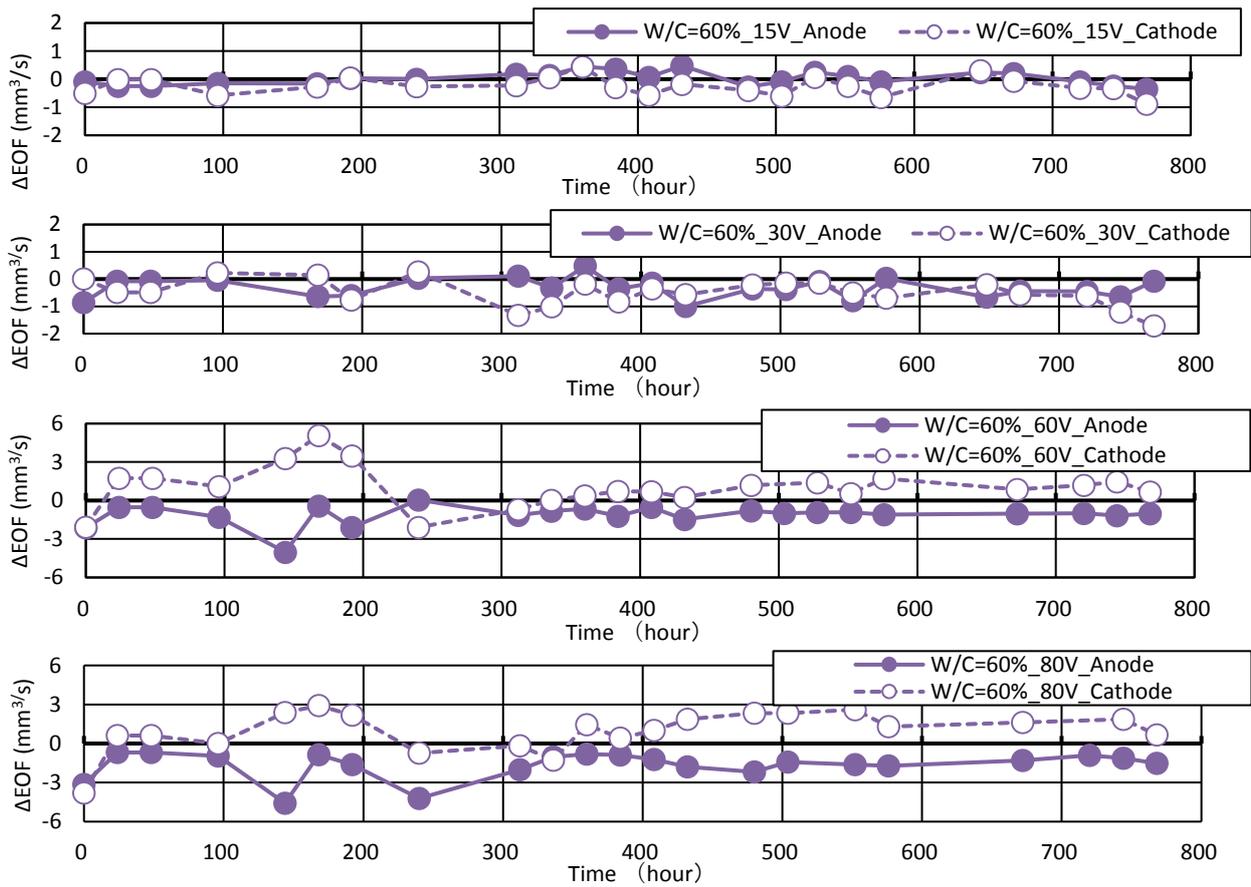


図-2 電圧 15, 30, 60, 80(V)における W/C=60%の各セルでの電気浸透流量と時間の関係

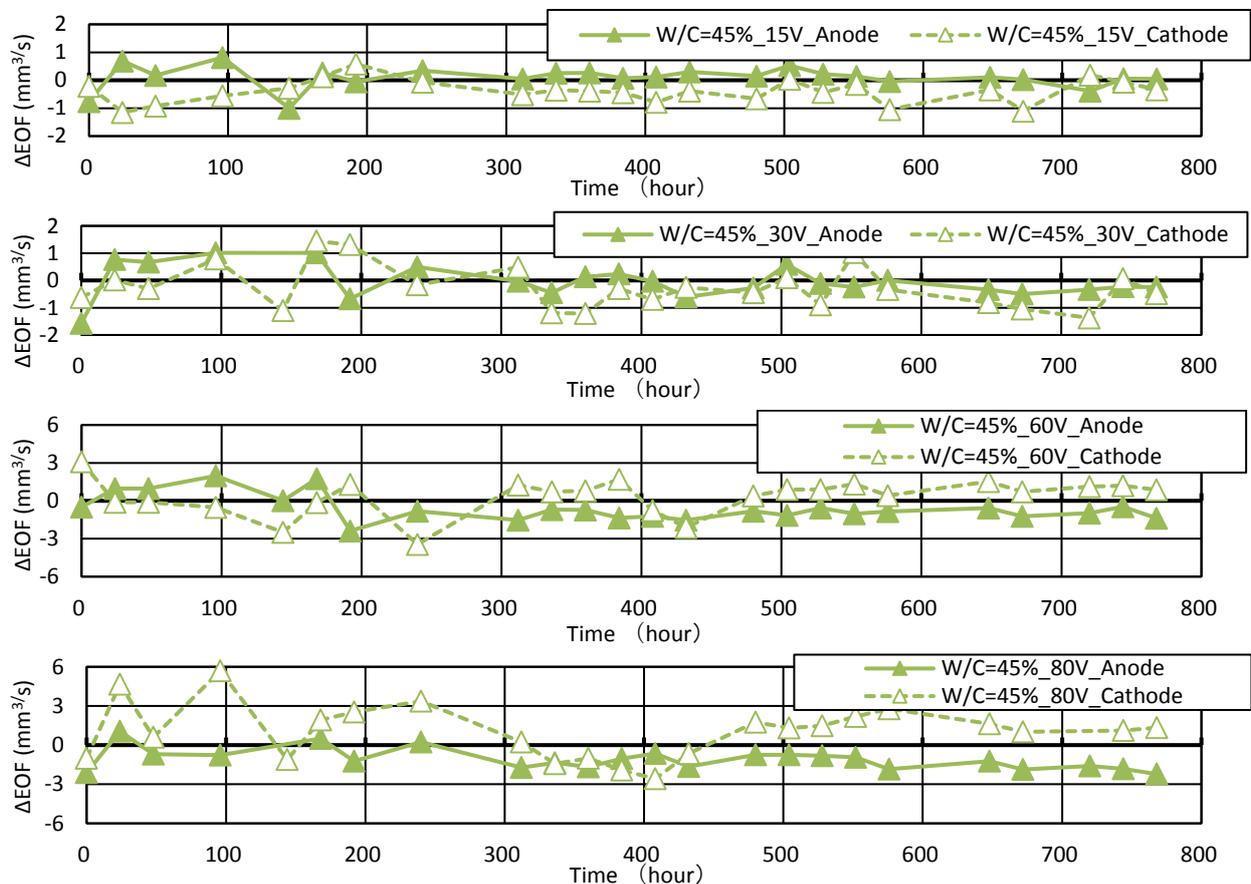


図-3 電圧 15, 30, 60, 80(V)における W/C=45%の各セルでの電気浸透流量と時間の関係

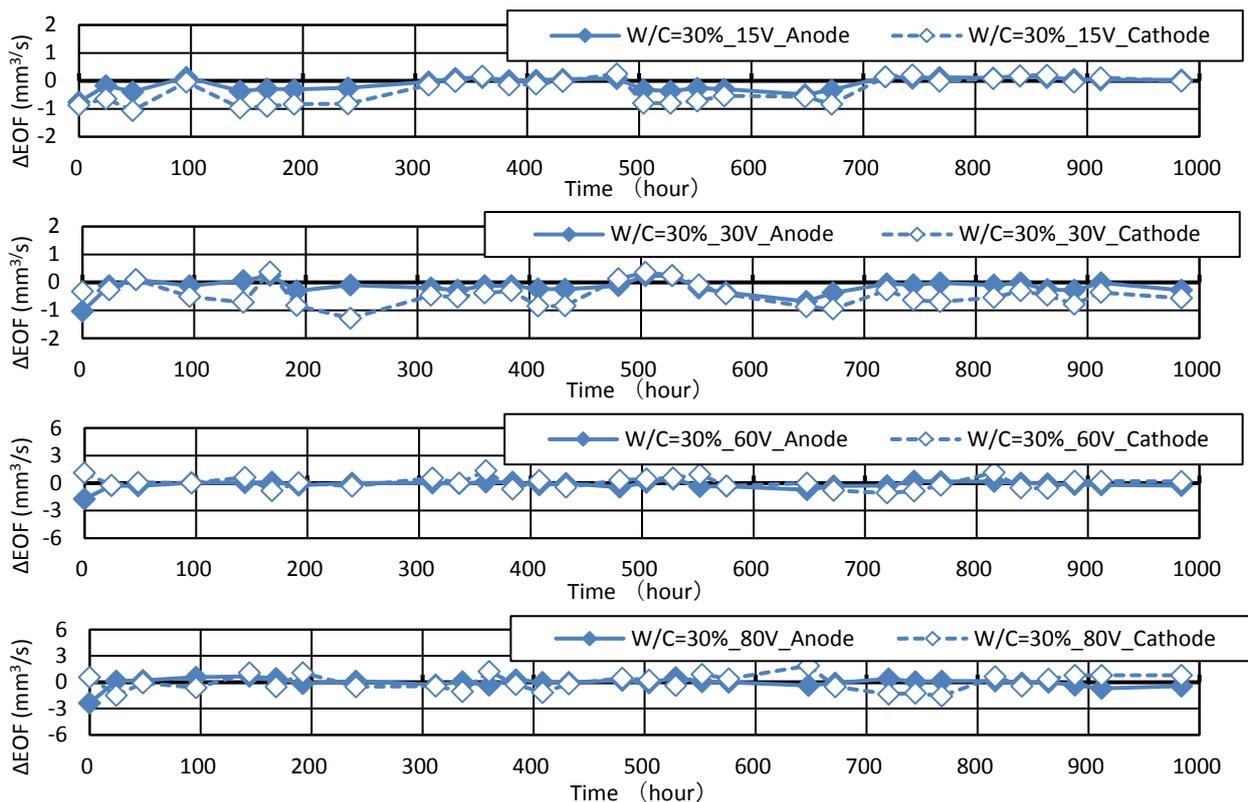


図-4 電圧 15, 30, 60, 80(V)における W/C=30%の各セルでの電気浸透流量と時間の関係

ルでの電気浸透流量が約 $2\text{mm}^3/\text{s}$ であった。

図-4 から W/C=30%について印加電圧 15, 30, 60, 80(V)による影響を考察する。W/C=30%でも、同様に電圧 15, 30(V)では電気浸透流量がほとんど 0 であり、電圧 60, 80(V)では電気浸透流量が陰極側では正に、陽極側では負になる傾向が見られ、陰極と陽極のセルにおける電気浸透流量の値はほぼ等しくなった。電圧 60, 80(V)のそれぞれの電気浸透流量について比べると、電圧 60V では陰極側と陽極側セルでの電気浸透流量が約 $0.25\text{mm}^3/\text{s}$ に対して、電圧 80V では陰極側と陽極側セルでの電気浸透流量が約 $0.5\text{mm}^3/\text{s}$ であった。

W/C=60, 45, 30(%)における電気浸透流量を比べると、W/C=60, 45%ではほぼ等しくなり、W/C=30%では小さくなった。このことから、ある W/C を境に電気浸透流量の大小が決まると考えられる。W/C はコンクリートの内部構造に影響を与えることが報告されている³⁾。内部構造によって物質移動抵抗性などが決まるため、電気浸透流も同様に影響されたと考えられる。

3.3 材齢が電気浸透流量に及ぼす影響

電圧 80V, W/C=60, 45, 30(%)について、材齢が異なる場合の各セルでの ΔEOF と時間の関係をそれぞれ図-5 に示す。図中における凡例は W/C(30/45/60%)_電圧(80V)_セル(Anode/Cathode)を意味する。

材齢 1 週間の試験体では W/C=60, 45(%)において電気浸透流量が $2\text{mm}^3/\text{s}$ となった。材齢 4 ヶ月の試験体では

どの W/C においても電気浸透流量が $0.5\text{mm}^3/\text{s}$ となった。以上から、水和反応の進行によって細孔構造が緻密化したことから電気浸透流量が減少したと考えられる。

3.4 切断面と型枠面が電気浸透流量に及ぼす影響

電圧 80V, W/C=45%について、表面性状が異なる場合の各セルでの ΔEOF と時間の関係をそれぞれ図-6 に示す。図中における凡例は表面性状(Cut/Cast)_W/C(45%)_電圧(80V)_セル(Anode/Cathode)を意味する。

型枠面-切断面の試験体は JSCE-G571 を参考に $\phi 10 \times 20\text{cm}$ の円柱底面から 5cm を切断して作製した。型枠面を陽極側セルに、切断面を陰極側セルに設置した。図-6 から、型枠面(陽極)の電気浸透流量は切断面(陰極)と比べて小さいことがわかる。両面が切断面における結果の図-3 と比べても、図-6 の型枠面(陽極)でのみ電気浸透流量が小さくなった。以上から、コンクリート中における電気浸透流は表面性状に影響されることがわかる。

既往の研究では、切断面と型枠面の細孔構造に大きな差がないこと⁴⁾や型枠面と切断面についての塩化物イオン浸透性状について有意な差がないこと⁵⁾が報告されている。しかし、本実験の結果はこれらの報告とは異なる結果である。このことは電気浸透流には細孔構造や物質移動抵抗性以外の要因も関わってくることを示唆している。切断面では骨材が露出し溶液に接していたことから、骨材の有無が電気浸透流量に影響したと考えられる。次項のモルタルとの結果とあわせて後で考察する。

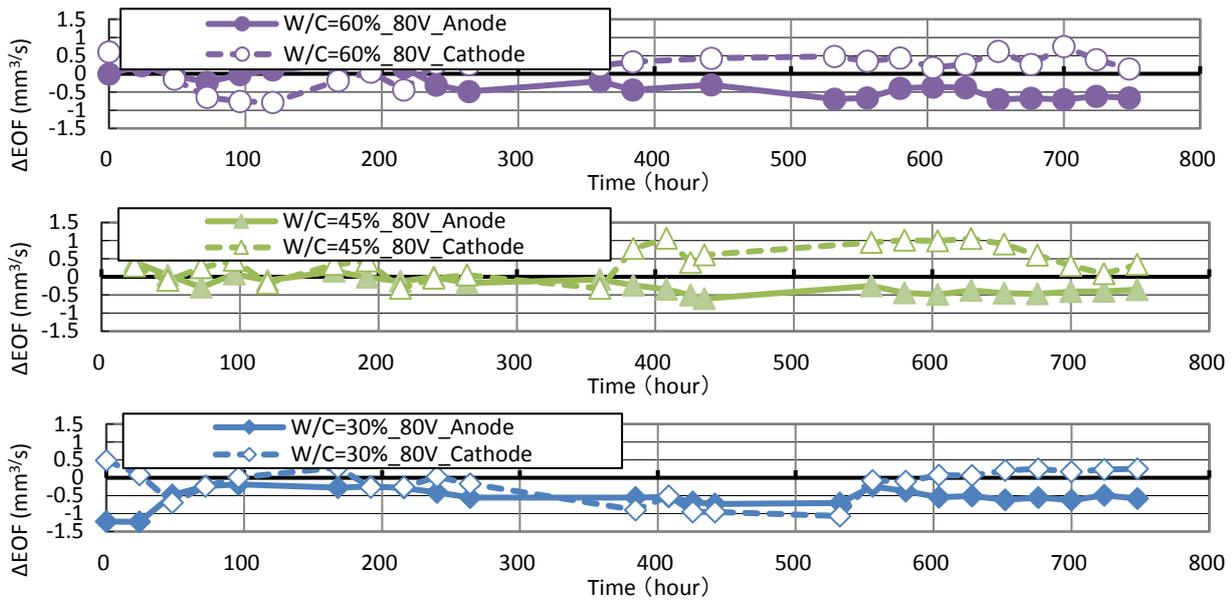


図-5 材齢4ヶ月における電圧80(V)でのW/C=60, 45, 30(%)の各セルでの電気浸透流量と時間の関係

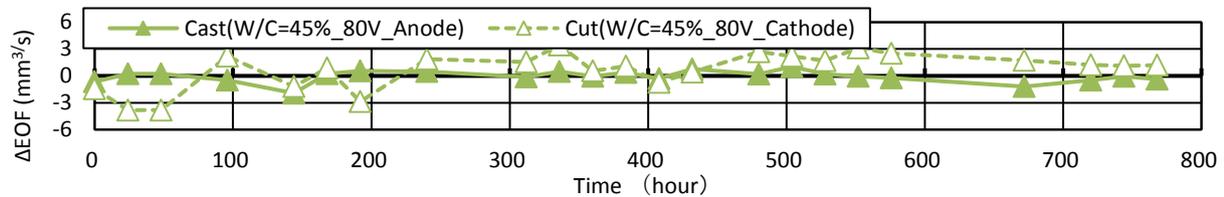


図-6 切断面型砕面(電圧80V-W/C=45%)の各セルでの電気浸透流量と時間の関係

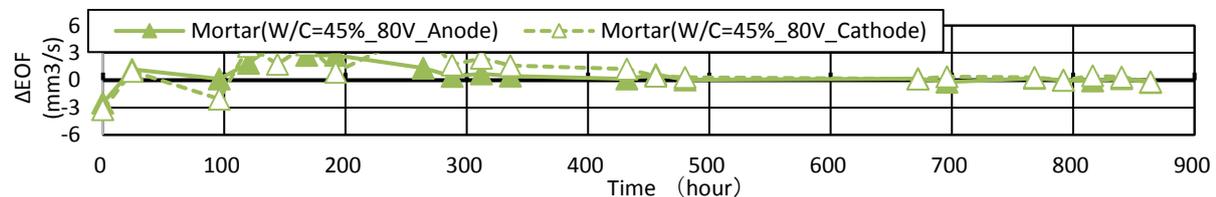


図-7 モルタル(電圧80V-W/C=45%)の各セルでの電気浸透流量と時間の関係

3.5 骨材が電気浸透流量に及ぼす影響

電圧80V, W/C=45%について、モルタルとコンクリートによる各セルでの ΔEOF と時間の関係をそれぞれ図-7に示す。図中における凡例はW/C(45%)_電圧(80V)_セル(Anode/Cathode)を意味する。

モルタル試験体について、図-7において電気浸透流量が起こった際にみられる陰極と陽極のセルでの電気浸透流量が正負にわかれる傾向が見られず、モルタル試験体における電気浸透流量はほぼ0に等しい値となった。

モルタルとコンクリートは粗骨材の有無が大きな違いとなる。以上から、コンクリートとモルタルにおける電気浸透流量がそれぞれ異なる値となった理由として、粗骨材の有無が考えられる。粗骨材を有するコンクリートの方において電気浸透流量が大きくなったことから、電気浸透流には粗骨材が重要な要素になると考えられる。

3.6 コンクリート中の電気浸透流と遷移帯領域について

型砕面と切断面を比べた結果とコンクリートとモルタルを比べた結果から、ごく表層の粗骨材の有無がコンクリート中における電気浸透流量に特に影響を与えることがわかった。粗骨材の存在がコンクリートに与える影響として遷移帯領域が考えられる。遷移帯領域とは骨材とセメントペースト界面部分に存在する直径50nm以上の粗大な空隙が多く存在する領域である。遷移帯領域の存在はコンクリートの物質移動抵抗性への影響があると考えられている⁹⁾。実験から得られた結果について、以下に示した遷移帯領域の特徴⁹⁾に着目して考察する。

- 1) 遷移帯は材齢3日以降から発現し、材齢7日においてその厚さが最大となり、それ以降は次第に減少する。
 - 2) 遷移帯はW/C=40%前後を境に、低W/Cでは形成されにくく、高W/Cでは形成されやすい。
- 1)について、材齢による電気浸透流量の差を再度検討

する。本実験では材齢1週間と4ヶ月の試験体について電気浸透流量の測定を行った。各材齢におけるそれぞれのW/Cについて電気浸透流量に差が見られ、材齢1週間の試験体の電気浸透流量は概ね材齢4ヶ月の試験体の電気浸透流量よりも大きくなった。材齢1週間の試験体においては遷移帯領域が最も大きくなり、電気浸透流量が大きくなったと考えられる。

2)について、W/Cによる電気浸透流量の差を再度検討する。実験から得られた結果を見ると、W/C=30%においては電気浸透流量が小さく、W/C=45, 60%においては電気浸透流量が大きくなった。これはW/C=30%では遷移帯領域がほとんど形成されず電気浸透流が起こらなかったが、W/C=45, 60%においては遷移帯領域が形成され電気浸透流が起こったと考えられる。以上から、遷移帯領域において電気浸透流量が最も大きくなると考える。

遷移帯領域において電気浸透流量が増加する理由を検討する。遷移帯領域は主に水酸化カルシウムの結晶から構成されており、セメントペースト部と比べてイオン量が多くなると予想される。電気浸透流量にはpHが影響すると言われており⁷⁾、このことから遷移帯領域において電気浸透流量が大きくなったと考えられる。遷移帯領域は連続的な空隙構造を持つことから、コンクリートの物質移動抵抗性に影響すると考えられ、電気浸透流も同様に影響されると考えられる。また、骨材においても電気二重層が形成されると報告されており⁸⁾、骨材周辺で電気浸透流が起こる可能性は十分にある。以上から、遷移帯領域において電気浸透流量が増加したと考えられる。

4. 電気浸透流がコンクリートに与える影響について

コンクリート中における電気浸透流が材料試験や補修に与える影響について、本実験の結果から検討する。

材料試験について、例えばコンクリートの塩化物イオンの実効拡散係数試験では電圧はJSCE-G571において15V、ASTM C1202やNT BUILD 492において60Vを印加する。電圧15Vでは電気浸透流が発生しているが、その量は極僅かであるためその影響は無視できると考える。しかし、電圧60Vでは電気浸透流量が大きいため、その影響は無視できないと考える。本実験の結果からW/C=45, 60%では電気浸透流量が大きくなったが、W/C=30%では小さくなった。以上から、印加する電圧が60Vの試験ではW/Cによる電気浸透流量の差が起こり、実効拡散係数を正しく評価できないと考えられる。

補修について、例えば脱塩工法や再アルカリ化工法では印加する電圧が30Vであるため、電気浸透流が発生してもその量は僅かであることから、無視できると考える。また、補修は概ね高材齢のコンクリートに用いられることから、電気浸透流の影響は小さくなると考えられる。

5. 結論

本研究の結果を以下にまとめる。

- ・コンクリート中での電気浸透流の測定方法を考案し、コンクリート中で電気浸透流が起こることを確認した。
- ・電圧について15, 30, 60, 80(V)を検討した結果、15, 30(V)では電気浸透流が起こらず、60, 80(V)で起こった。
- ・W/Cについて30, 45, 60(%)を検討した結果、45, 60(%)で電気浸透流が起こり、30%では起こらなかった。
- ・材齢について1週間と4ヶ月を検討した結果、1週間で電気浸透流が起こり、4ヶ月では起こらなかった。
- ・コンクリートの表面性状について切断面と型枠面を検討した結果、切断面で電気浸透流が起こり、型枠面では起こらなかった。
- ・粗骨材の影響についてコンクリートとモルタルを検討した結果、コンクリートで電気浸透流が起こり、モルタルでは起こらなかった。以上から、電気浸透流は遷移帯領域に影響されることがわかった。
- ・電気浸透流がコンクリートに与える影響について検討した結果、電圧60Vで行う材料試験は電気浸透流に影響される可能性があることがわかった。また、電圧15Vで行う材料試験や30Vで行う補修では電気浸透流が影響しないと考えられる。

参考文献

- 1)玉虫伶太：電気化学，東京化学同人，pp.183-187, 1967.
- 2)菊地道夫，金沢貴良，佐伯竜彦，齋藤豪：電気泳動法における塩化物イオン移動性状に対して電気浸透流が及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.68, pp.360-366, 2014
- 3)後藤孝治，魚本健人：硬化体の細孔構造に及ぼすセメントの水和反応の影響，土木学会第49回年次学術講演会概要集，第5部，pp.1022-1023, 1994.
- 4)遠藤裕丈，田口史雄，嶋田久俊：透水性型枠を使用したコンクリートのスケーリング特性について，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.617-622, 2003.
- 5)葛西康幸，河野広隆，渡辺博志：コンクリート供試体の浸透面処理方法が急速塩分浸透性試験結果に及ぼす影響について，土木学会第58回年次学術講演会概要集，第5部，pp.7-8, 2003.
- 6)内川浩：セメントペーストと骨材の界面の構造・組織がコンクリートの品質に及ぼす影響，コンクリート工学，Vol.33, No.9, pp.5-16, 1995.
- 7)中村慶子，水津晋吾，田畑仁彦，井上義朗，平田雄志：電気浸透流に及ぼすイオン吸脱着現象の影響，化学工学会第37回秋季大会，I309, 2005.
- 8)福田禮一郎：骨材の電気化学的性質—流動電位—，日本建築学会論文報告集，151巻，pp.1-6, 1968.

