V-108　定常および非定常状態におけるコンクリート中の塩化物イオンの電気的泳動

群馬大学大学院　学生会員　堀内　全
群馬大学工学部　正会員　杉山　隆文
群馬大学工学部　正会員　辻　幸和

1．はじめに

コンクリート中における塩化物イオンの拡散性を迅速に評価するための試験方法として、電気的にイオンを移動させる電気化学的手法がある。しかし、電位勾配を受けてコンクリート中を移動する塩化物イオンの移動機構については、移動量と電流の大きさとの関係などまだ不明な点が多く、解明すべき事項が残されている。

本研究は、コンクリート中で電気的泳動する塩化物イオンの定常状態および非定常状態における、移動量および泳動速度に関して解析的に考察を行なった。塩化物イオンの移動量は、ファラデーの法則を拡張した考え方に基づいて、電流値から算定した。また、コンクリート中の塩化物イオンの濃度分布についても検討を行った。

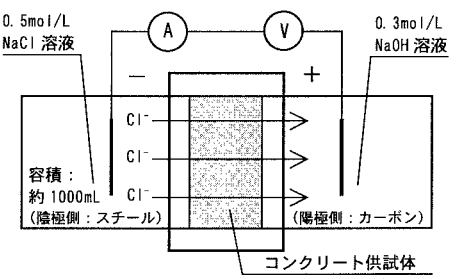
2．実験概要

2．1供試体の作製

コンクリートの配合および諸性状を表－1に示す。粗骨材および細骨材は、ともに渡良瀬川産の川砂利および川砂を使用した。標準の円柱型枠（直径：100mm、高さ：200mm）を用いて作製した供試体は、所定の水中養生後、ダイヤモンドカッターで厚さ 50mm の円盤状に切断し、その円周面をエポキシ系樹脂でコーティングした。その後、AASHOTO T-277 に準拠して真空水中養生を行い、電気化学的試験に供した。

2．2促進試験の概要

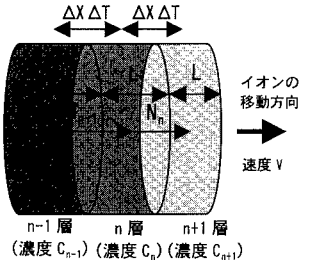
実験装置の概略図を図－1に示す。電位勾配がコンクリート供試体の両端面に作用すると、負電荷を持つ Cl^- は、コンクリートの細孔溶液中を通り、陽極側に向かって電気的泳動を起こす。本実験では、直流定電圧 15V を電極間に印加した。主な測定項目としては、陽極側の塩化物イオン濃度、電流値および供試体中の全塩分量分布である。試験期間は、Cl^-の電気的泳動が定常状態に達するまでとした（１２日程度）。供試体中の全塩分量は、移動方向に約 10mm 間隔で輪切りにして、各片を JCI-SC4 に準拠して測定した。同様に、試験開始２日および４日後で終了して（非定常状態）、各供試体中の全塩分量を測定した。なお、陰極側および陽極側の溶液は適宜新しい溶液と交換した。実験は恒温恒湿室内（温度：25℃、湿度：55%）で行った。



図－1　電気的手法を用いた試験方法

3．イオンの移動解析

コンクリート供試体中の各イオンの移動量は、図－2に示すように各層ごとに算定した。イオンは、単位時間ΔT 後にｎ－１層からｎ層へ単位距離ΔX 移動すると仮定した。その時の移動量、N_{n-1}(mol)は、ファラデー則に従い電流値に比例すると仮定した。したがって、ｎ層における各イオン濃度は、式（１）で算定した：



図－2　イオンの移動解析モデル

表－1　配合および諸性状

W/C (%)	Gmax (mm)	S/a (%)	単位量 (Kg/m³)				スランプ (cm)	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm²)
			水	セメント	細骨材	粗骨材			
55	25	48.8	189	344	878	920	8.5	2.0	46.1

キーワード：塩化物イオン、電気的泳動、定常状態、非定常状態、ファラデーの法則
連絡先：〒376-8515　群馬県桐生市天神町 1-5-1　TEL 0277-30-1613　FAX 0277-30-1601

$$C_n' = C_n + C_{nin} - C_{nout} = C_n + (N_{n-1} - N_n) \times \frac{1}{AL\varepsilon} = C_n + \left(\frac{t_{c(n-1)} I \Delta TA}{ZF} - \frac{t_{cn} I \Delta TA}{ZF} \right) \times \frac{1}{AL\varepsilon} \qquad (1)$$

ここで、C_n'：T+ΔT 秒後のｎ層の濃度（mol/L）、C_n：T 秒後のｎ層の濃度（mol/L）、C_{nin}：ｎ層に流入する濃度(mol/L)、C_{nout}：ｎ層から流出する濃度（mol/L）、N_{n-1}：ｎ－１層からｎ層へ移動してくるイオン量（mol）、N_n：ｎ層からｎ＋１層へ移動していくイオン量（mol）、$t_{c(n-1)}$：ｎ－１層のイオンの輸率、Ｆ：ファラデー定数（96500C）、I:電流密度（A/cm²）、ΔT：経過時間（s）、A:供試体断面積（cm²）、Ｚ：イオンの電荷数、ε：供試体の空隙率

単位時間当たり（ΔT）のイオンの移動距離（ΔX）は、次式に示す移動速度から算定した：

$$V = UE = \alpha U_0 E \qquad (2)$$

ここで、

U:細孔溶液中の各イオンの移動度（cm²/Vs）、E:電位勾配（V/cm）、

α：細孔構造がイオンに与える影響を考慮し設定した係数、

U_0：希薄溶液中の各イオンの移動度（cm²/Vs）

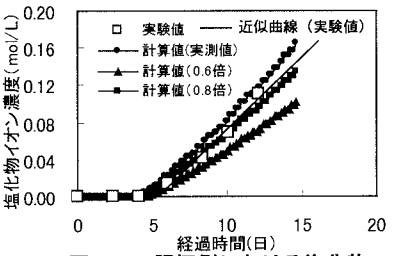
解析のパラメータとして、供試体における細孔溶液中の各イオンの初期濃度は表－２に示すように仮定した。また、固定される塩化物イオン量は、単位セメント量の 0.4％と仮定した。

表－２　細孔溶液中の各イオンの初期濃度（仮定値）[1)]

各種イオン	Na^+	K^+	Ca^{2+}	OH^-	Cl^-
濃度(mol/L)	0.28	0.29	0.0004	0.57	0.0

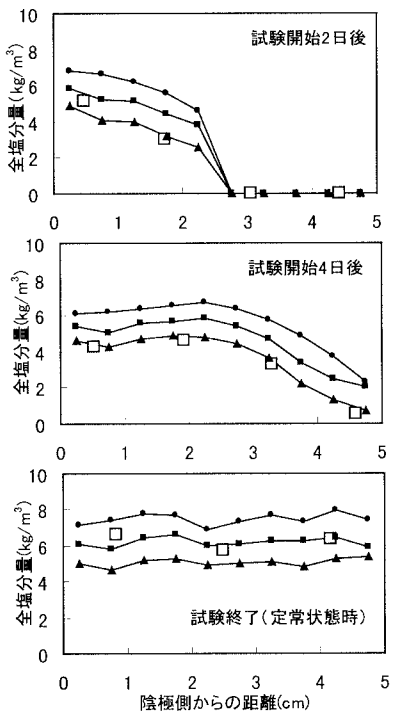
４．実験結果および考察

図－３は、陽極側における Cl^- 濃度の経時変化である。各々のグラフは、移動量の計算において電流の大きさを３種類に変化させて（実測値、実測値の 0.6 および 0.8 倍）、実験値と比較したものである。電流の大きさを変えた理由は、電極間に働く電流が全て細孔溶液中におけるイオン電導によるものでなく、何割かはセメント水和物部分が負担すると考えたからである。計算値は、定常状態に達するまでの時間は実験値と概ね一致している。また、単位時間当たりの Cl^- 濃度の増加に関しては、実測電流の 0.8 倍を使用したグラフが最も実験値に近い形状を示している。



図－３　陽極側における塩化物イオン濃度の経時変化

図－４は、非定常状態および定常状態の供試体における Cl^- の浸透状況である（図－４の凡例は図－３と対応）。試験時間が経過するに従い、Cl^- の移動が陽極側に向かって進み、定常状態には Cl^- の分布がほぼ一様になっていることが分かる。試験開始 2 日および 4 日後（非定常状態）においては、実測電流の 0.6 倍を使用した解析結果が最も実験値と一致しており定常状態においては、図－３の結果同様に実測電流の 0.8 倍を使用した結果が実験値と概ね一致している。このことより、コンクリートの細孔溶液中に存在するチャージキャリヤーの種類やその濃度によって、細孔溶液中を流れる電流の大きさは異なり、非定常状態から定常状態になるに従い徐々に大きくなると推察される。しかし、本解析では、塩化物イオンの固定化量を通常の自然拡散から得られる 0.4％に統一しており、この影響も含めて、今後検討する必要があると思われる。



図－４　全塩分量分布

５．まとめ

（１）コンクリート中の塩化物イオンの電気的泳動が定常状態に達するまでの時間は、解析結果と実験値は概ね一致していた。

（２）本解析では、非定常状態においては実測電流の 0.6 倍、定常状態においては実測電流の 0.8 倍を使用した解析値が最も実験値と近い結果が得られた。

【参考文献】１）石井浩司ほか「電流を印加したセメントペーストの導電経路と物性変化に関する研究」、土木学会論文集 No. 514, pp. 1-8, 1995. 5