

## 論文 単位水量の増加がコンクリートの塩分浸透性に及ぼす影響

杉山 隆文<sup>\*1</sup>・高見 満<sup>\*2</sup>・RITTHICHAUY Worapatt<sup>\*3</sup>・辻 幸和<sup>\*4</sup>

**要旨**：水セメント比が一定で、単位水量が異なるコンクリートの塩化物イオン浸透性を調べた。電気泳動法より求めた塩化物イオンの実効拡散係数は、単位水量を 153~202kg/m<sup>3</sup> の範囲で増加させると、増加する傾向が認められた。この傾向は、水セメント比が 65%と大きい場合に顕著であった。鉄筋の腐食時期を Fick 式を用いて模擬計算した結果、単位水量の影響を受けるが、水セメント比の影響がより顕著であることを示した。また、単位水量が増加すると材料分離が生じ易くなることを確認し、その結果、材料分離が生じた表層部(約 20mm)の全塩化物イオン濃度が増加することを、422 日間の長期塩水浸せき試験から明らかにした。

**キーワード**：単位水量、塩化物イオンの実効拡散係数、電気泳動法、浸せき試験、材料分離

## 1. はじめに

コンクリート構造物の塩害は、耐久性を著しく低下させる劣化現象の一つである。コンクリートの塩化物イオンの浸透に対する抵抗性を向上させるためには、フライアッシュやシリカフェームなどの鉱物質混和材の使用および低水セメント比の配合などが有効である<sup>1,2)</sup>。また、施工時のひび割れや材料分離などの初期欠陥を生じさせないことも重要である。コンクリート標準示方書[施工編]<sup>1)</sup>では、塩害に対処するために、水セメント比の影響を考慮した性能照査型の配合設計手法が示されている。

一方、水セメント比が同一でも単位水量が異なる場合には、塩化物イオンの浸透性が異なると考えられるが、これに関する研究はほとんど行われていない。性能照査型の耐久設計が導入される以前は、海洋コンクリートに対して水セメント比の上限値に加えて単位セメント量の下限値が規定されていた。最近では、生コンクリートの品質保証に関連して単位水量を現場で測定する傾向が強まることが見られ<sup>3)</sup>、塩化物イオンの浸透性に及ぼす単位水量やこれに関連し

た初期欠陥などの影響を調べておくことがこれまで以上に重要になる。

本研究では、水セメント比が一定で、単位水量が異なるコンクリートの塩化物イオン浸透性を調べた。塩化物イオン浸透性は、電気泳動法より求めた塩化物イオンの実効拡散係数を用いて評価した。水セメント比は 45, 55, 65%の 3水準で変化させて、単位水量は水セメント比によって異なるが、153~202kg/m<sup>3</sup>の範囲で増加させた。また、水セメント比が 45%のコンクリートに対して、打込み方法を同一条件で作製した角柱供試体を用いて塩水浸せき試験を行い、固定化および材料分離が塩化物イオンの浸透分布に及ぼす影響を調べた。なお、本論文では、これまでに著者らが報告したデータ<sup>4,5)</sup>を単位水量に関して再整理したものに、新たな実験データを加えて単位水量の影響を考察する。

## 2. 実験概要

## 2.1 供試体の作製

## (1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントである。

\*1 群馬大学 工学部建設工学科助教授 Ph.D (正会員)

\*2 群馬大学大学院 工学研究科修士課程 (学生会員)

\*3 群馬大学大学院 工学研究科博士課程 工修 (学生会員)

\*4 群馬大学 工学部建設工学科教授 工博 (正会員)

表-1 コンクリートの配合表

配合名	スランブ (cm)	air (%)	W/C	G <sub>max</sub> (mm)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 (C × %)
						W	C	S	G	
N45-153	8.0±2.5	4.5±1.5	45	20	45	153	340	818	1104	1.8**
N45-163	8.0±2.5	4.5±1.5	45	20	44	163	362	781	1097	1.2**
N45-173	8.0±2.5	4.5±1.5	45	20	43	173	384	744	1088	1.0**
N45-189*	8.0±2.5	2.0±0.5	45	20	41	189	420	702	1035	0
N55-161*	8.0±2.5	2.0±0.5	55	25	31	161	293	585	1338	0
N55-165	8.0±2.5	4.5±1.5	55	20	45	165	300	844	1116	1.4
N55-179*	18±2.5	4.5±1.5	55	20	44	179	325	772	988	0.25
N55-189a*	8.0±2.5	2.0±0.5	55	20	43	189	344	763	1029	0
N55-189b*	8.0±2.5	2.0±0.5	55	25	49	189	344	878	920	0
N55-198*	8.0±2.5	2.0±0.5	55	15	48	198	360	843	911	0
N55-202*	8.0±2.5	2.0±0.5	55	25	58	202	367	998	742	0
N65-175	8.0±2.5	4.5±1.5	65	20	45	175	269	844	1116	1.0
N65-185	18±2.5	4.5±1.5	65	20	41	185	285	747	1080	0.25
N65-189*	8.0±2.5	2.0±0.5	65	20	45	189	291	818	1025	0

\*川砂利および川砂を使用した配合, \*\*高性能 AE 減水剤を使用

粗骨材には、川砂利（密度：2.64～2.66g/cm<sup>3</sup>，吸水率：1.12～1.35%，最大寸法：15～25mm）または碎石（密度：2.86 g/cm<sup>3</sup>，吸水率：0.73%，最大寸法：20mm）の2種類を用いた。また、細骨材には、川砂（密度：2.60～2.61g/cm<sup>3</sup>，吸水率：2.22～2.68%）または陸砂（密度：2.61～2.63 g/cm<sup>3</sup>，吸水率：1.35～1.65%）の2種類を用いた。これは、供試体を作製する時期によって、入手できた骨材の種類が異なるためである。化学混和剤は、目標スランブや空気量に応じて、高性能 AE 減水剤または AE 減水剤と空気量調整剤の併用を使い分けて使用した。

## (2) 配合

配合表を表-1に示す。水セメント比と単位水量の2つで配合名を表した。水セメント比は、45, 55, 65%の3水準である。W/Cが45%の場合の単位水量の範囲は、153～189kg/m<sup>3</sup>であり、55%の場合161～202 kg/m<sup>3</sup>、65%の場合175～189 kg/m<sup>3</sup>である。また、目標スランブは、8および18cmの2水準であり、18cmのスランブに対しては化学混和剤を使用した。また、空気量は、2

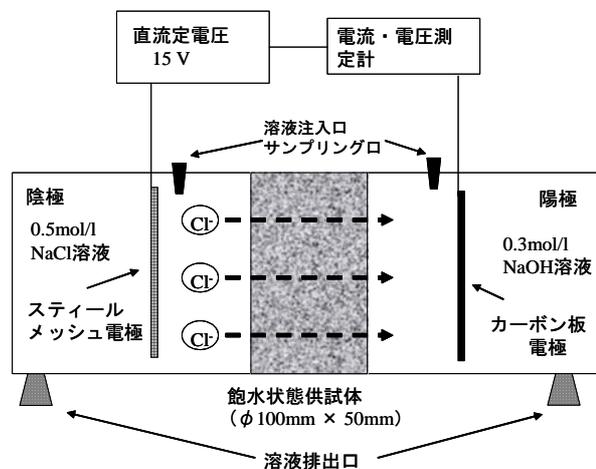


図-1 電気泳動試験の概要

および4.5%の2水準であり、4.5%の空気量に対して化学混和剤を使用した。

## 2.2 実験方法

### (1) 電気泳動試験

実験装置の概略図を図-1に示す。供試体の形状寸法は、直径が100mmで厚さが50mmの円盤型供試体である。なお、供試体は高さが200mmの円柱供試体から切り出した後、円周面をエポキシ樹脂で塗布し、乾燥後に減圧吸水させて試

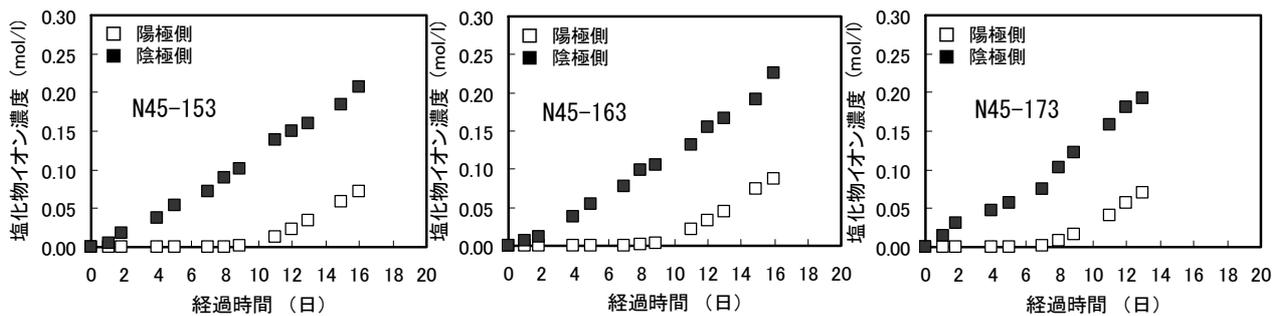


図-2 電気泳動試験の結果：両極溶液中の塩化物イオン濃度の経時変化で陽極側は増加，陰極側は減少である。

験に供した。切り出しは、円柱供試体の上下端部から 30mm 程度除いた中央部から行った。

電極は、陰極側がステンレスメッシュで、陽極側が直径 80mm、厚さ 0.1mm の炭素板である。電極間に印加する直流定電圧は、温度上昇の影響を除くために 15V とし、塩化物イオンの電気泳動が定常状態になるまで連続して通電した。なお、供試体の前準備および試験溶液や印加電圧は、JSCE G571-2003<sup>6)</sup>に準拠している。

主な測定項目は、両溶液の塩化物イオン濃度の経時変化、溶液温度、電流の経時変化、電位差、pH である。このうち、本論文では塩化物イオンの経時変化に基づく試験結果について考察した。そして、塩化物イオン濃度の経時変化が一定に達した段階で、コンクリート中を電気泳動する塩化物イオンの移動は定常状態に達したと考えると、その時の流束から、JSCE G571-2003<sup>6)</sup>に準拠して、実効拡散係数を計算した。

また、W/C が 45% の供試体に対しては、定常状態に達する前の試験開始から 1 日および 3 日後に、試験を終了したケースも含めた。そして、電気泳動セルから供試体を取り出し、直ちに割裂して、割裂面に硝酸銀溶液を噴霧し、塩化物イオンの移動距離を調べた。

### (2) 塩水浸せき試験

W/C が 45% で単位水量を 153,163,173kg/m<sup>3</sup> とし、塩水浸せき試験を行った。供試体は、100×100×400mm の角柱供試体であり、コンクリートを上面 (100mm×400mm) に打込み、JIS A1132 附属書 1 を参考に内部振動機を用いて、3 配合を同一時間だけ締め固めた。水中養生後に打込み

面のレイタンスを除去して、側面と底面にエポキシ樹脂を塗布し、乾燥後に打込み面を 3% の NaCl 溶液に浸せきさせた。つまり、打込み方向と塩化物イオンの浸透方向が同一である。また、浸せき試験では、打込み面からの表層部を除去していないので、材料分離が発生した場合、その影響を直接受けることになる。同一条件で締め固めた場合、単位水量が増加するほど材料分離が発生し易いと思われた。

塩水浸せき後、適宜新しい塩水に取り替えて、422 日間経過後に直径が 50mm で高さが 100mm のコアを浸透方向に 2 本ずつ取り出した。そして、7~10mm 間隔でスライスし、JCI SC-4 を参考に全塩化物イオン濃度を計算した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 電気泳動試験結果

#### (1) 実効拡散係数による評価

図-2 は、W/C が 45% で単位水量が 153, 163, 173kg/m<sup>3</sup> の場合の電気泳動試験結果である。陰極側と陽極側での塩化物イオン濃度の経時変化を同一軸上で示している。定常状態において両者はほぼ平行であり、セメント水和物による固定化は終了していると判断された。

各配合に対して、定常状態の流束を用いて実効拡散係数を計算し、単位水量で整理した結果を、図-3 に示す。単位水量の増加によって、実効拡散係数は増加することが明確に表れている。水セメント比によってその増加傾向は異なり、65% は 45% や 55% と比較して、顕著な増加を示している。実効拡散係数は、コンクリートの細

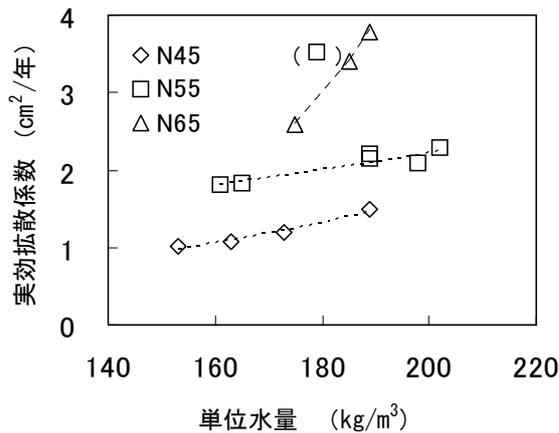


図-3 単位水量と実効拡散係数との関係

表-2 鉄筋腐食が発生するまでの期間の比較

W/C \ W	160	170	180
	(kg/m <sup>3</sup> )		
0.45	1.0	0.9	0.8
0.55	0.4	0.4	0.4
0.65	0.2	0.2	0.1

W=160kg/m<sup>3</sup>, W/C=0.45を1.0とした場合の比  
かぶり:50mm, 表面の全塩化物イオン濃度:9kg/m<sup>3</sup>

孔構造の物理的な指標にも密接に関連している。したがって、単位水量の増加による実効拡散係数の増加は、塩化物イオンの移動経路に関係していると推察される。W/Cが65%の場合には、単位水量の増加によって、特に骨材とセメントペーストマトリックスの界面での移動が相対的に増大したことが原因の一つと思われる。

W/Cが55%で単位水量が179kg/m<sup>3</sup>の配合の実効拡散係数は3.53cm<sup>2</sup>/年と極端に増加した。この配合は、同一W/Cでは唯一目標スランプが18cmであり、比較的軟らかいものである。しかし、明確な理由は今後の課題として残る。

一方、単位水量の増加による影響よりも水セメント比の増加による影響が大きいことがわかる。したがって、これまでに報告されているように、塩化物イオンの浸透を抑制するためには、水セメント比を小さくすることがより効果的であることが確認された。

### (2) 圧縮強度と実効拡散係数との関係

図-4は、圧縮強度と実効拡散係数との関係である。空気量は、4.5%または2%と2水準であるので、圧縮強度に影響を及ぼす。しかし、実

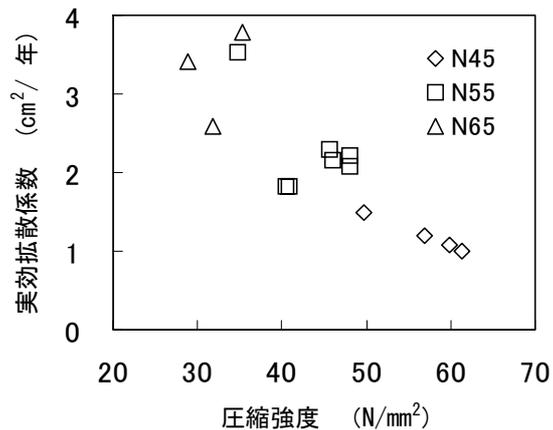


図-4 圧縮強度と実効拡散係数との関係

効拡散係数は、結合材の種類の影響をより大きく受けられるので、普通ポルトランドセメントだけを用いた本研究では、強度の増加と拡散係数の減少がよく相関していた。

### (3) 鉄筋腐食に及ぼす影響

図-3に示した実効拡散係数を用いてJSCE G571-2003附属書<sup>6)</sup>に基づいて見掛けの拡散係数へ変換し、単位水量が鉄筋腐食の発生時期に及ぼす影響を計算によって考察した。示方書[施工編]<sup>1)</sup>に従って、鉄筋位置における全塩化物イオン濃度が腐食発生限界濃度の1.2kg/m<sup>3</sup>に達する時期を計算した。なお、表面塩化物イオン濃度は9.0kg/m<sup>3</sup>(汀線位置の構造物が対象)で安全係数は全て1.0として計算した。

表-2に鉄筋腐食の発生時期を比で示す。同一のW/Cであっても、単位水量が20kg/m<sup>3</sup>増加すると腐食発生時期が短縮される場合もある。また、W/Cが65%に増加すると、腐食発生時期の比は著しく小さく、前述したようにW/Cの影響がより顕著である。なお、今回の見掛けの拡散係数への変換方法は、W/Cにだけ依存し、単位セメント量の増加による固定化される塩化物イオン量の増加の影響は、考慮されていない。

## 3.2 塩水浸せき試験結果

### (1) 塩化物イオンの浸透分布

図-5は、W/Cが45%で単位水量を153~173kg/m<sup>3</sup>の範囲で増加させた場合の浸透分布である。単位水量が173kg/m<sup>3</sup>の供試体は、1層目と2層目の全塩化物イオン濃度が比較的大きい。

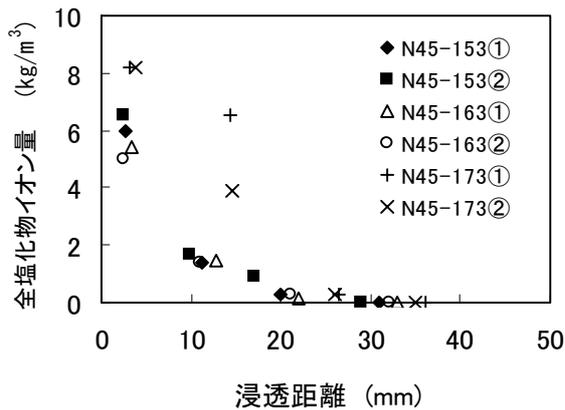


図-5 塩水浸せき試験結果

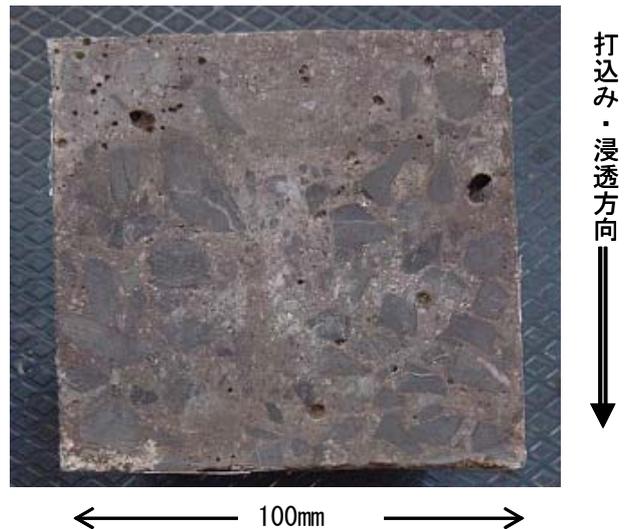


写真-1 材料分離の様子 (W=173kg/m³)

計算結果は示していないが、Fickの拡散方程式の解を用いて逆解析した見掛けの拡散係数は、大きくなることが判明した。

しかし、単位セメント量が増加すると塩化物イオンを固定化する水和物量も増加するので、移動が可能な自由な塩化物イオン濃度は減少して、逆に浸透性は抑制される場合も考えられる。

そこで、浸透方向に各供試体を切断して切断面を調べた。写真-1は、単位水量が173kg/m³の供試体の様子である。打込みに伴う材料分離が生じており、浸透面(打込み面)から約20mmまでの表層部では、粗骨材の量が減少している。他の2配合では、材料分離は認められなかった。したがって、表層部で全塩化物イオン濃度が増加した理由は、粗骨材量が極端に減少したために、コンクリート単位体積あたりの濃度が大きく計算されたことにある。一方、表面からの距離が20mm以上の内部の塩化物イオンの浸透状況は、他の2配合と同様であることから、材料分離が生じた表層部を除いて、塩化物イオンの浸透性の相違は小さいと判断できる。

## (2) 電気泳動する塩化物イオンの移動距離からの考察

塩水浸せき試験と同配合の供試体を使用して電気泳動試験を1日および3日間実施した。

写真-2は、電気泳動試験開始3日後の供試体を割裂して、硝酸銀を噴霧したときの変色状況である。陰極側から塩化物イオンが電気泳動し

て、移動した距離に応じて塩化物イオン濃度がある一定値以上の場合に、写真で判断できるような白色な領域が表れる。

電気泳動による塩化物イオンの移動分布は、拡散とは異なる移動分布を示す<sup>7)</sup>ために、このように明確に区別できる。ここでは、白色に変化した領域を移動フロントと呼ぶことにする。

図-6は、移動フロントを比較した結果である。1日試験後では3配合ともに差は認められないが、3日試験での差は明確であり、単位水量が173kg/m³の移動フロントが29mmと最も大きい。

電気泳動する塩化物イオンは、固定化と電気泳動を繰り返して陽極側へ移動する。著者らは、非定常状態における塩化物イオンの固定化は、時間依存性を示し、試験開始から3日では十分に塩化物イオンの固定化が終了していないことを報告した<sup>7)</sup>。したがって、移動フロントの結果は、必ずしも塩水浸せき試験の結果を反映するものではないが、ある程度固定化の影響が含まれていると思われる。しかし、図-6の結果を見る限り、固定化の影響よりも、実効拡散係数が大きくなったことから判断された細孔構造の物理的な影響が大きいと言える。

W/Cが45%の圧縮強度は、単位水量の増加で減少していた(図-4)。このことより細孔構造の影響を受けていたことがある程度推察できる。

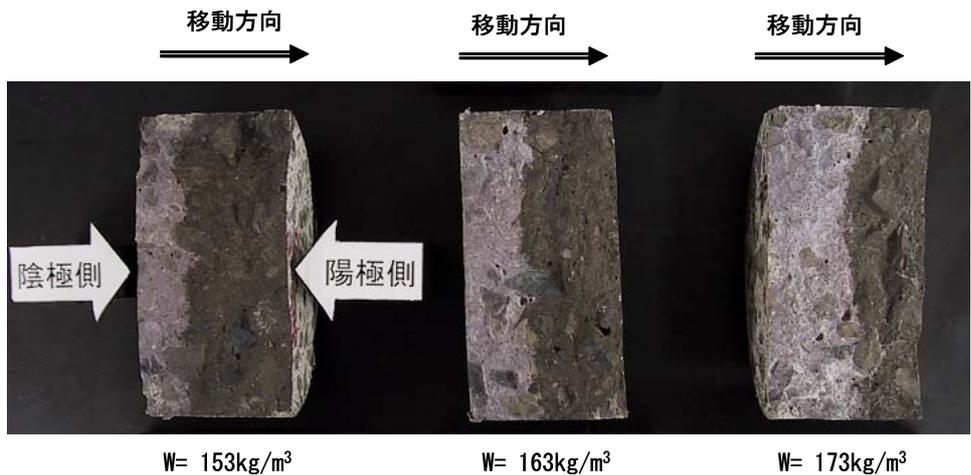


写真-2  
電気泳動試験における  
移動フロント  
(3日間経過後に割裂面に硝酸銀水溶液を噴霧)

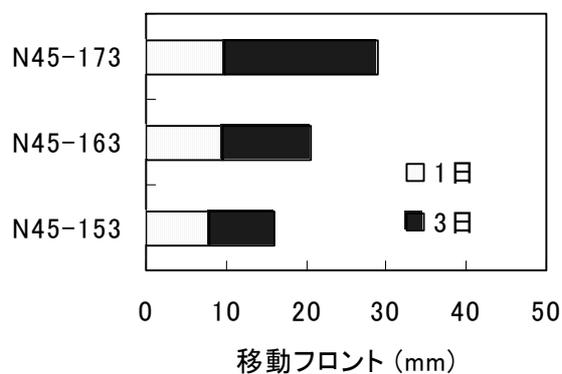


図-6 異なる単位水量での移動フロントの比較

#### 4. まとめ

単位水量の影響を調べた本研究の範囲内で次のことが明らかになった。

- (1) 単位水量の増加で実効拡散係数は増加したが、その増加程度は水セメント比が65%の場合に顕著であった。
- (2) 計算から求めた鉄筋腐食発生時期は、単位水量の増加の影響を受ける場合もあるが、水セメント比の増加による影響をより顕著に受ける。
- (3) 単位水量が増加すると材料分離が生じ易くなることを確認し、その結果、材料分離が生じた表層部(約20mm)の全塩化物イオン濃度が増加することを塩水浸せき試験から明らかにした。
- (4) 単位水量の増加で電気泳動する塩化物イオンの移動フロントは大きくなった。

#### 参考文献

- 1) コンクリート標準示方書[施工編]-2002年制定

- 2) Sorn, V., 山田義智, 杉山隆文, 大城 武 : フライアッシュを細骨材の一部として代替したコンクリートの遮塩性評価, 日本建築学会構造系論文集, No.560, pp.17~25, 2002.10
- 3) (社)日本コンクリート工学協会 : フレッシュコンクリートの単位水量迅速測定方法及び管理システムに関するシンポジウム 論文集, 2002.12
- 4) 杉山隆文, Sorn VIRA, 辻 幸和, 大城 武 : フライアッシュコンクリートの塩分浸透性の迅速評価に関する電気泳動法の適用, 土木学会論文集, No. 711/V-56, pp.191~203, 2002.8
- 5) T. Sugiyama, Y. Tsuji, T. W. Bremner : Relationship between coulomb and migration coefficient of chloride ions for concrete in a steady-state chloride migration test, Magazine of Concrete Research, 53, No. 01, pp.13~24, Feb. 2001
- 6) 土木学会 : コンクリートの塩化物イオン拡散係数試験方法の制定と規準化が望まれる試験方法の動向, コンクリート技術シリーズ 55, 2003.9
- 7) 杉山隆文, 前原 聡, Ritthichauy Worapatt, 辻 幸和 : 電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの移動に関する考察, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第3巻, pp.247~250, 2003.10