電気泳動試験による高強度フライアッシュ人工骨材 (HFA 骨材) コンクリートの塩分浸透評価[†]

杉 山 隆 文^{*} 辻 幸 和^{*}

Evaluation of Chloride Ingress into the HFA Concrete by Steady-State Chloride Migration Test

by

Takafumi SUGIYAMA^{*} and Yukikazu TSUJI^{*}

Chloride ingress into concrete with high strength lightweight aggregate made of fly ash (HFA aggregate) as the coarse aggregate was evaluated by a steady state migration test and chloride ponding test. It was found that the migration coefficient obtained from the migration test could represent appropriate ranking on chloride ingress into the concrete with different W/Cs. The effect of HFA aggregate on the chloride ingress was negligible and a similar migration coefficient to that of normal weight aggregate was given. In addition, an observation using EPMA showed no chloride ion present in the HFA aggregate itself after the migration test. Chloride ponding test also exhibited same ranking providing increased apparent chloride diffusion coefficients with increased W/C. Migration coefficients might be related quantitatively to the apparent diffusion coefficient with chloride binding isotherm being properly considered.

Key words : High strength lightweight aggregate made of fly ash, Chloride ingress, Migration test, Migration coeff., Chloride ponding test

1 緒 言

石炭灰の有効利用を目的に、粗骨材として最近開発された高強度フライアッシュ人工骨材（以後、HFA 骨材と称する）は、骨材強度や吸水率などの各種品質において、普通骨材と比較して遜色がないとされている。^{1), 2)} また、絶乾密度が $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ 程度と軽量であるため、普通骨材コンクリートを 10 ~ 15% 軽量化できる材料でもある。つまり、HFA 骨材は、普通骨材と人工軽量骨材の両面の品質を有する。

一方、高強度フライアッシュ人工骨材コンクリート（以後、HFA 骨材コンクリートと称する）は、普通骨材コンクリートの代替材料としての一般的な利用のほかに、浮体構造物の安定性確保や海洋構造物の曳航・製造時喫水の低減などの観点から、特に海洋コンクリートに適用されることも考えられる。³⁾ また、軽量化の特色を生かして、長大スパンの橋梁の実現や地震力の影響の軽減、軟弱地盤や支持層が深い場合の対策、施工重機の負荷の軽減などを目的に使用されることも期待される。そのため、海水や特に寒冷地の道路橋上部工に散布される凍結防止剤による塩化物イオンの浸透に対して十分な抵抗性が要求される。

本研究は、電気泳動法によって、HFA 骨材コンクリートの塩化物イオン浸透性を迅速に評価することを目的にした。HFA 骨材の絶乾密度の減少は、製造時の発泡過程における骨材内部の空隙の増加による。²⁾ 従来の人工軽量骨材よりも発泡は意図的に抑制されているものの、この

ことが塩化物イオンの浸透性にどの程度影響を及ぼすかの検討が必要である。電気泳動法は、直流定電圧を供試体に印加して、塩化物イオンを電気的に移動させる試験^{4), 5), 8)} であり、HFA 骨材コンクリートの塩化物イオン拡散係数（本論文では、拡散係数（電気泳動）と定義する）を評価指標とした。また、実験室内において1年間塩水浸漬試験を実施して、電気泳動試験から求めた拡散係数（電気泳動）と見掛けの拡散係数を比較し、電気泳動試験の適用性についても考察を加えた。

2 実験方法

2・1 使用材料

普通ポルトランドセメントを使用して、細骨材は陸砂を使用した。粗骨材は、最大寸法が 20 および 15mm の 2 種類の HFA 骨材を使用した。また、比較のために碎石も使用した。各種骨材の物理的性質を Table I に示す。

HFA 骨材は、主原料であるフライアッシュに副原料として炭酸カルシウム粉末やベントナイトなどを加えて、造粒、焼成して製造される比較的密実な非発泡型骨材である。²⁾ 碎石と比較して、絶乾密度が $1.8\text{g}/\text{cm}^3$ 程度と小さく、24 時間吸水率は 2.4 ~ 2.6% と大きい。碎石の規格値 (3% 以下) を満足する。

2・2 供試体の配合

HFA 骨材コンクリートの配合を Table II に示す。W/C が 30 ~ 60% の 4 水準および W/C が 50% の普通骨材コンクリートを作製した。各配合において、単位粗骨材かさ容積が $0.61 \sim 0.65\text{m}^3/\text{m}^3$ となるようにした。なお、

[†] 原稿受理 平成 14 年 1 月 28 日 Received Jan. 28, 2002

^{*} 正 会 員 群馬大学工学部建設工学科 〒376-8515 桐生市天神町, Dept. of Civil Eng., Gunma Univ., Tenjin-cho, Kiryu, 376-8515

Table I. Physical characteristics of aggregates.

Types	G _{max} (mm)	Density SSD (g/cm ³)	Absorption (%)	Unit solid vol. (%)
HFA	15	1.85	2.4	63.0
	20	1.85	2.6	63.0
NA ^{*1}	15	2.63	0.6	58.6
S ^{*2}	5	2.61	1.6	68.5

*1:Crushed stone, *2: Land sand as fine aggregate for all mixtures

W/C が 30% の配合は、粉体量が多く $0.56\text{m}^3/\text{m}^3$ である。また、そのフレッシュ性状をスランプフローで管理した。

Fig. 1 は、HFA 骨材コンクリートの断面図で、HFA 骨材とモルタルとの界面の性状である。HFA 骨材中には空隙も見られる。界面性状は、物質移動に影響を及ぼす場合があるが、図を見る限り HFA 骨材の界面性状は比較的良好で、特に空隙が多いなどの遷移体の存在は確認

Fig. 1. Interfacial transition zone between the HFA and mortar.

できない。HFA 骨材については明確ではないが、人工軽量骨材の場合、界面に移動した練混ぜ水が骨材中にある程度吸水されると遷移体が形成され難い場合もある。

2・3 電気泳動試験

(1) 試験概要⁴⁾

電気泳動法の原理は、コンクリートに直流定電圧を印加して、コンクリートの細孔溶液中で負電荷を持つ塩化物イオン（以後、 Cl^- 略記する）を電気泳動させることに基いている。したがって、 Cl^- は、拡散による移動よりも短期間にコンクリート中を移動し、定常状態に達する期間が著しく減少される。

実験装置の概略図を Fig. 2 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、陰極側溶液は 0.51mol/l (3%) NaCl 溶液、陽極側溶液は 0.3mol/l NaOH 溶液である。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 として、 Cl^- の電気泳動が定常状態になるまで連続して通電した。

(2) 測定項目

測定項目は、両溶液の Cl^- 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。また、試験終了後の供試体中の全 Cl^- 量も測定した。

Fig. 3 は、陽極側における Cl^- 濃度の増加と陰極側における Cl^- 濃度の減少を同軸上の同一方向に模式的に表している。このように、両極の濃度変化を同軸方向で示

Fig. 2. Schematic view of the steady state migration test.

Table II. Mixture proportions and compressive strength.

Mix No.	Gmax (mm)	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				Adm. ^{*2} (C×%)	f _c '-28days (N/mm ²)
						W	C	S	G		
30FA20	20	50 ^{*1}	4.5	30	42.5	166	553	681	677	1.8 ^{*3}	72.4
30FA15	15				41.4	172	573	649	653	1.8 ^{*3}	70.4
40FA20	20	12		40	37.7	166	415	648	758	0.4 ^{*3}	50.4
40FA15	15				39.6	172	430	669	723	0.4 ^{*3}	48.0
50FA20	20			50	43.3	156	312	775	746	0.25	41.5
50FA15	15				44.3	162	324	799	711	0.25	41.9
50NA15	15				45.5	170	340	804	971	0.25	42.8
60FA20	20			60	43.7	156	260	818	746	0.25	35.4
60FA15	15				45.9	160	267	852	712	0.25	34.0

*1:Slump flow, *2:Water reducing and air entraining admixture,

*3:High range water reducing and air entraining admixture

Fig. 3. Schematic explanation of the change of chloride concentration in cathode and anode compartments.

すことで、コンクリート中の全 Cl^- 量（固定化 Cl^- + 自由 Cl^- ）が直接的に把握できる。陰極側の Cl^- は、電気泳動と固定化を経て（非定常状態）陽極に蓄積し、その濃度変化が一定に達した段階で、コンクリート中の電気泳動が定常状態に達したと考え、次式から流束を計算した。

$$J_{\text{Cl}} = \frac{V^{\text{II}}}{A} \frac{\Delta c_{\text{Cl}}^{\text{II}}}{\Delta t} \quad (1)$$

J_{Cl} : Cl^- の流束 ($\text{mol}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$), V^{II} : 陽極側の溶液体積 (l), A : 供試体断面積 (cm^2), $\Delta c_{\text{Cl}}^{\text{II}}$: 陽極側 Cl^- 濃度の増加量 (mol/l), Δt : 経過時間 (s)

試験期間中、定期的に両極の溶液を採取して、 Cl^- 濃度を自動電位差滴定装置で測定した。なお、両極の溶液を適宜全量交換して、陰極での Cl^- 濃度をできるだけ一定に維持し、陽極では移動して蓄積した Cl^- 量を小さく、かつ高アルカリ性を維持した。そのために塩素ガスは発生しなかった。芦田ら⁶⁾は、アルカリ雰囲気では塩素ガスや次亜塩素酸イオンの発生を防止できるとしている。

電流および pH の経時変化は、通電回路に接続されている電流計および採取した溶液を pH 計からそれぞれ測定した。温度センサーを溶液中に差し込み、温度変化も調べた。また、電位差は、簡便法として端子を直接溶液中に差し込み、その電位差を測定した。実験は恒温室内（設定温度：25℃）で行った。

(3) 電気泳動法からの拡散係数（電気泳動）の計算

直流定電圧を印加して、塩化物イオンが定常状態である場合の拡散係数（電気泳動）の計算方法は、Andradeら⁷⁾によって、ネルンスト・プランク式を修正した式が提案されている。これを参考に、著者らは次式により、拡散係数（電気泳動）を計算することにした。⁴⁾

$$D_{\text{el}} = \frac{J_{\text{Cl}} R T L}{Z_{\text{Cl}} F c_{\text{Cl}} (\Delta E - \Delta E_e)} \quad (2)$$

D_{el} : 拡散係数（電気泳動）(cm^2/s), R : 気体定数, T : 絶対温度, Z_{Cl} : 塩化物イオンの電荷, F : ファラデー定数, c_{Cl} : 陰極側の塩化物イオン濃度 (0.51mol/l), ΔE : 電位差, ΔE_e : 電極における接触電位, L : 供試体厚さ

ネルンスト・プランク式は、希薄電解質溶液中におけるイオン種の移動に関するものであり、本来電位勾配は

拡散電位に基づいている。なお、大即、久田ら^{8), 9)}は、定電流法に基づく電気泳動法から拡散係数を計算する手法を提案している。本研究では、式 (2) から計算されるものを拡散係数（電気泳動）と定義している。

(4) 電気泳動試験用供試体の準備

標準の円柱型棒（直径：100mm、高さ：200mm）を用いて作製した供試体を 24 時間後に脱型し、20℃の水中で養生した。養生後、上下端から 30mm 程度除いた残りの中央部分から、ダイヤモンドカッターで厚さ 50mm の円盤型にスライスして、その円周面をエポキシ系樹脂でコーティングした。引き続き、供試体を減圧吸水させて、⁴⁾試験開始日の材齢が 28 日および 91 日で試験を実施した。

2・4 塩水浸漬試験

供試体は、長さが 400mm、高さが 100mm、幅が 100mm の角柱供試体を用いた。打込み後 24 時間で脱型し、材齢 14 日まで水中養生して、その後 28 日間室内で気中養生した。そして浸漬面（打込み面）のレイタンスを除去後、側面および底面をエポキシ系樹脂でコーティングして、室内浸漬試験を開始した。

3% の NaCl 溶液を水位を一定に保持して、打込み面を浸漬させた。浸漬期間が 91 日および 365 日後に、直径 50mm の円柱を浸漬方向にコア抜きして、約 10mm 間隔を目安に厚さ方向にスライスした。そして、JCI-SC4 による測定方法を参考に、加熱煮沸した硝酸溶液中へ塩化物イオンを抽出させ、次式から全塩化物イオン量を供試体の単位体積当りで計算した。

$$c_t = \frac{35.5}{1000} \cdot \frac{c_f^* \cdot V_s}{M_c} \cdot \rho_s \quad (3)$$

c_t : 全塩化物イオン量 (kg/m^3), c_f^* : 抽出した塩化物イオン濃度で自動電位差滴定装置を用いて測定 (mol/l), V_s : 抽出後溶液の定容量 (l), M_c : 粉末試料量 (kg), ρ_s : コンクリートの密度 (kg/m^3)

3 実験結果

3・1 電気泳動試験結果

(1) 塩化物イオンの電気泳動

Fig. 4 は、28 日養生の結果 ($G_{\text{max}} = 20\text{mm}$) であり、陽極側の Cl^- 濃度の増加と陰極側の Cl^- 濃度の減少を、溶液交換を考慮して、経時的な積算値で示している。

W/C が大きいほど、定常状態に達するまでの時間は減少し、定常状態においては両極の Cl^- 濃度の経時変化は大きい。また、図中の両極における Cl^- 濃度差をコンクリート中に存在する全 Cl^- 量とすると、W/C が大きいコンクリート中の全 Cl^- 量は小さい。Fig. 4 には、W/C および G_{max} が同一な HFA 骨材コンクリートと普通骨材コンクリートの結果も示した。両極の Cl^- 濃度の経時変化の傾向は似ている。

Fig. 5 (a) および (b) は、 G_{max} が 15mm で 28 日養生の供試体に関する電流および電位差の経時変化である。電位差は、電極間に印加した 15V よりも小さく、12 ~ 13V で一定に推移している。電位差の減少は、電極と溶液の接触電位のためである。特に、陰極溶液の pH は、

Fig. 4. Results of the migration test on HFA aggregate concrete with different W/Cs (28 days cured) and comparison with normal aggregate concrete of an equal W/C of 50%.

試験開始前の約 7.5 から 3 時間経過後に約 11 まで増加しており、還元反応による OH^- の発生が確認できた。溶液温度は、室温の 25°C 前後を常時示していた。

電流は、経時的に変化しており、W/C の増加で電流は増加する傾向にある。これは、 Cl^- の電気泳動が定常状態にあることを考慮すると、他の共存イオン種の電気泳動や特に陰極で発生する OH^- の電気泳動が、電流の増加をもたらしたと考えられる。¹⁰⁾ しかし、W/C が 30% の場合、試験期間中の水和の進行による細孔構造の緻密化で、逆に電流は減少する傾向を示したと考えられる。

(2) 拡散係数（電気泳動）による塩分浸透性の評価

式 (1) および (2) から、各供試体の拡散係数（電気泳動）を計算して、Table III に示す。

拡散係数（電気泳動）は、 $2.8 \sim 16.8 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ の範囲にあり、W/C の影響が顕著である。また、粗骨材の最大寸法や養生日数の増加による影響は小さい。W/C への依存は、著者らが普通骨材を用いてこれまでに報告した結果と整合する。^{4), 11)} このように、拡散係数（電気泳動）は、工学的に重要なコンクリートの水セメント比の影響を良く反映しており、電気泳動試験から塩分浸透性が適切に評価できる。つまり、拡散係数（電気泳動）の減少は、細孔構造における空隙率の減少や屈曲度の増加と密接に関係していると言える。¹²⁾

関ら¹³⁾ は、コンクリートの緻密性は、その比抵抗である程度推定できるとしている。そこで、電気泳動試験を

実施する直前および直後の各コンクリートに対して、比抵抗を測定し、Fig. 6 に示すように拡散係数（電気泳動）と比較した。図中の曲線は、次式で表される両者の関係であり、電気泳動する Cl^- の輸率によって異なる。

$$D_{el} = \frac{RT}{Z_{Cl}^2 F^2} \frac{t_{Cl}}{\rho} \quad (4)$$

ρ : 比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)、 t_{Cl} : Cl^- の輸率

コンクリート中の電流は、細孔溶液に存在するすべてのイオン種が Charge-carrier として電気泳動する結果として生じるものであり、その際に輸率は、特定のイオン種の carrier としての寄与度を定量化したものである。

Fig. 6 から、拡散係数（電気泳動）の減少は、比抵抗の増加に相関しており、コンクリートの緻密性の増加が、電気泳動する Cl^- の移動を阻害している要因であることが明らかになった。試験後の比抵抗と拡散係数（電気泳動）との関係から、 Cl^- の輸率は、 $0.4 \sim 0.6$ であり、定常状態において電流の 5 割程度が Cl^- の電気泳動によるものと推察される。

(3) HFA コンクリート中の全塩化物イオン量 (c_{el})

泳動試験終了後の供試体中に含まれる全 Cl^- 量を、厚さ方向 (Cl^- の移動方向) にスライスして式 (3) から測定した。Fig. 5 (c) には、28 日養生の HFA 骨材コンクリートおよび普通コンクリートの結果も示している。陰極側からの距離に関わらず、 c_{el} は一定であり、 Cl^- の移動が定常状態であったことを意味していると考えられる。

Fig. 5. Results of the migration test : (a) Change of current flow with time, (b) Change of electrical potential drop with time, (c) Total chloride content in concrete after migration test (28 days cured).

Fig. 6. Related resistivity to migration coefficient.

Table IIIには、各供試体について平均した c_{el} も示している。 c_{el} は、W/C が小さいほど増加しており、空隙量が逆に減少することを考えると、 Cl^- の固定化量 (c_b) と関連がありそうである。つまり、コンクリートの単位体積中 (V_{CONC}) に占める固定化に寄与するセメント水和物量が大きいためである。配合から推定したセメントペースト占有率 ($(V_w+V_c)/V_{CONC}$) は、W/C が 30, 40, 50, 60% と増加すると、それぞれ 0.34, 0.30, 0.26, 0.24 と減少する。すなわち、ペースト占有率に相関している。なお、 c_{el} は、Fig. 4 で示した Cl^- 濃度の陰極側と陽極側の差からも推定でき、W/C の減少で、その差は大きくなっており、供試体中の Cl^- 量は大きいことが伺える。

W/C が 50% で同一の HFA 骨材コンクリートと普通コンクリートとを比較すると、 c_{el} はほぼ同じである。つまり、 Cl^- が HFA 骨材中を移動することはないと考えられる。このことを確認するために、泳動試験終了後の断面に対して、EPMA を用いて水和組織部の元素の面分析を行った。Fig. 7 は、 Cl^- に関する分析結果である。HFA 骨材中に Cl^- は存在していないことが確認できた。

以上のことより、拡散係数（電気泳動）、電流の経時変化および全 Cl^- 量を総合すると、HFA 骨材の吸水率が大きいことによる悪影響は少ないと判断できる。

3・2 室内塩水浸漬試験結果

(1) 塩分浸透性状

Fig. 8 は、塩水浸漬期間が 91 および 365 日後の c_t の分布状況を示している ($G_{max} = 15mm$)。また、同図の点線は、拡散係数（電気泳動）、 D_{el} (28 日養生) と次式の Fick の拡散方程式の解から予測した c_t の分布性状である。

Fig. 7. No chloride ion present in the HFA aggregate in spherical shape that is characterized with black in color.

$$c_t = c_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_{el}t}} \right) \right] \quad (5)$$

x : 表面からの距離 (cm), c_0 : 表面の c_t 濃度 (kg/m^3),
 t : 経過時間 (sec.)

室内浸漬試験では、W/C の増加で、 Cl^- は内部にまで拡散していることが明らかである。また、同一の W/C である普通コンクリートと HFA 骨材コンクリートでは、拡散性状はほとんど差がない。このように、前述した拡散係数（電気泳動）は、室内塩水浸漬試験の結果を良く反映している。さらに、浸漬期間に関わらず、拡散係数（電気泳動）と式 (5) を用いた予測は、実測値よりも大きい。

ここで、式 (5) 中の表面の c_t 濃度 (c_0) は、Table III の c_{el} 濃度としたが、逆解析から見掛けの拡散係数 (D_{ap}) も計算した。浸漬期間が 365 日である時の各供試体の見掛けの拡散係数の計算結果も Table III に示す。

(2) 拡散係数（電気泳動）と見掛けの拡散係数との関係

見掛けの拡散係数は、拡散係数（電気泳動）よりも小さく、その比 (D_{el}/D_{ap}) は、W/C が増加するほど小さい。つまり、Fig. 8 より、W/C が増加するほど、予測値は実測値に近づいている。電気泳動後の全 Cl^- 量の大小関係を考慮すると、見掛けの拡散係数では考慮されている固定化の影響が、拡散係数（電気泳動）には考慮されていないことが、その理由の一つとして考えられる。

Table III. Summary of results for migration tests and chloride ponding.

Mix. No.	Steady-state chloride migration test			Chloride ponding test ^{*1}	Binding
	Migration coeff. ($D_{el} \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)			Apparent diffusion coeff. ($D_{ap} \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$)	coefficient γ , Eq. (7)
	28 days	91 days	c_{cl} : kg/m ³ -concrete		
30FA20	2.8	3.2	19.5	0.8	4.2
30FA15	3.4	-	19.5	0.8	4.7
40FA20	5.9	6.9	15.4	1.4	4.6
40FA15	6.7	-	18.7	1.6	4.6
50FA20	10.9	10.5	13.9	4.0	3.1
50FA15	8.7	-	11.6	3.4	2.8
50NA15	6.9	-	12.9	3.9	1.9
60FA20	14.0	15.2	11.2	13.2	1.9
60FA15	16.8	-	11.2	7.9	1.3

*1: After 1 year

Fig. 8. Chloride profiles for HFA concrete and normal concrete of an equal W/C (Gmax : 15mm).

拡散係数 (電気泳動) は、空隙率を用いて細孔中の移動を考慮した有効拡散係数 (電気泳動) (D_p) に変換できる。つまり、見掛けの拡散係数、有効拡散係数 (電気泳動)、拡散係数 (電気泳動) は、次式で表せる。¹⁴⁾

$$D_{ap} = \frac{\varepsilon D_p}{\alpha} = \frac{D_{el}}{\alpha} \quad (6)$$

ε : 空隙率, α : 次式のキャパシティーファクター

$$\alpha = \varepsilon + (1 - \varepsilon)\gamma \quad (7)$$

γ : 固定化の定数で固定化 Cl^- と自由 Cl^- の比 (c_b/c_f)

α は、 D_{el}/D_{ap} が既知であるため、式 (7) から固定化の係数 γ が計算される。Table III にその結果を示す。

γ は、液相中の Cl^- 濃度、セメント水和物量やその比表面積、アルミナ成分などによって異なるために、本研究では平均的な見掛け上の固定化の定数である。しかし、 γ を比較することで、固定化される Cl^- 量を、W/C 間で相対的に推定できる。W/C の増加で、 γ は減少する傾向にあり、固定化される Cl^- 量は小さいことを示している。

したがって、拡散係数 (電気泳動) を用いて式 (5) から Cl^- の拡散性状を予測する場合、セメント水和物量などに応じた固定化定数を適切に設定することが重要である。

4 結 言

本研究の範囲で次のことが明らかになった。

(1) HFA 骨材コンクリートの塩分浸透性は、水セメント比の影響を大きく受ける。また、HFA 骨材の吸水率が、普通骨材よりも大きいことによる悪影響は認められない。

(2) 電気泳動試験における HFA 骨材中への塩化物イオンの侵入は認められない。HFA 骨材コンクリート中の全塩化物イオン量は、水セメント比が小さいほど増加し、セメントペースト占有率に相関する。

(3) 拡散係数 (電気泳動) は、塩水浸漬試験の結果を良く反映しているが、見掛けの拡散係数よりも大きい。そして、固定化される塩化物イオン量が多い低水セメント比ほど、その比 (D_{el}/D_{ap}) は大きい。

本研究の遂行にあたり、曾根徳明氏 (株太平洋コンサ

ルタント) に供試体の作成および EPMA 面分析をして頂いた。また、土木学会コンクリート委員会 高強度人工骨材コンクリート調査研究小委員会 (委員長 梅原秀哲 名古屋工業大学大学院教授) における活発な議論が参考になった。実験には本学大学院生 井上大輔君および卒業生 高見 満君の協力を得た。ここに記して関係者の方々に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 土木学会, コンクリートライブラリー 106, 高強度フライアッシュ人工骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針 (案) (2001).
- 2) 曾根徳明, コンクリート工学, **36**, 3 (1998).
- 3) 日本コンクリート工学協会, 高性能軽量コンクリート研究委員会報告書, 140 (2000).
- 4) 杉山隆文, 長岡 覚, 辻 幸和, 橋本親典, コンクリート工学年次論文報告集, **18**, 981 (1996).
- 5) 鳥居和之, 佐藤健一, 川村満紀, セメント・コンクリート論文集, **51**, 126 (1997).
- 6) 芦田公伸, 京都大学学位論文 (2000).
- 7) C. Andrade, Cem. and Con. Res., **23**, 724 (1993).
- 8) 大即信明, 久田 真, 大谷隆之, 丸山俊夫, 土木学会論文集, **39**, 97 (1998).
- 9) 久田 真, 東京工業大学学位論文 (1997).
- 10) 杉山隆文, Proceedings of the 2nd RILEM Workshop-Testing and Modelling the Chloride Ingress into Concrete, 51 (2000).
- 11) 杉山隆文, 辻 幸和, T. W. Bremner, Magazine of Concrete Research, **53**, 13 (2001).
- 12) 堀内 全, 杉山隆文, 辻 幸和, 橋本親典, コンクリート工学年次論文報告集, **20**, 203 (1998).
- 13) 関 博, 宮田克二, 北峯博司, 金子雄一, 土木学会論文集, **17**, 49 (1992).
- 14) A. Atkinson and A. K. Nickerson, Journal of Materials Science, **19**, 3068 (1984).