

土木研究所資料

AEコンクリートの透過性に関する基礎的研究

昭和63年3月

建設省土木研究所
地質化学部コンクリート研究室

Copyright © (1 9 8 8) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

AEコンクリートの透過性に関する基礎的研究

コンクリート研究室室長 小林 茂 敏
コンクリート研究室部外研究員 長 岡 誠 一*

要 旨

コンクリートを作る場合、耐凍害性を向上させるためにAE剤を使用することが一般的となっているが、連行される空気により、水や空気の透過性が大きくなり耐久性が低下するとの疑問が生じている。本報告では、空気量を2%から8%まで変化させたAEコンクリートについて、中性化促進試験、塩分浸透試験を行い、透過性の面から考察を加え、通常の連行空気量の範囲では、耐凍害性には効果があり、透過性には影響ないことを明らかにしている。

キーワード：AE剤，空気量，透過性，中性化，塩分浸透，耐久性

Synopsis:

Although it is general to use an air-entraining agent when concrete is mixed for preventing the damage by freezing and thawing, but it is questionable whether the permeability of concrete is not enlarged and then the durability of concrete is decreased by the air taken in the concrete. For clarifying these problems the authors carried out carbonization tests and chloride penetration tests of the air-entrained concrete which was changed air content from 2% to 8%, and discussing the result from the point of view on the permeability of concrete.

They concluded that although it increase the freezing and thawing resistance, the normal amount of entrained air (around 4%) does not affect to the permeability of the air entrained concrete.

ま え が き

近年、コンクリート構造物の早期劣化が大きな関心事となり、建設省においても、総合技術開発研究プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」を設置し問題の解決に当たっている。

多くの劣化事例の検討の中でA E剤により空気を連行したA Eコンクリートが、空隙の増大による透過性の悪化から、中性化速度の増大、塩分浸透性の増大といった耐久性の低下が起こるのではないかという疑問が生じた。

この問題の解明に当たっては、当研究室に郊外研究員として在席した長岡誠一君が実験的検証を行ってくれた。本報告は、それらの検討結果が得られた成果を報告するものである。

コンクリート研究室室長

小 林 茂 敏

目 次

1. は じ め に	1
2. コンクリートの透過機構	2
3. コンクリートの透過性を評価する指標	3
4. セメントペーストの透過性と空隙組織	6
4-1 透 水 性	6
4-2 透 気 性	11
4-3 イオンの拡散	11
4-4 気体の拡散	12
5. AEコンクリートとブレンコンクリートの透過性の比較	15
5-1 既応の研究による検討	15
5-2 実験による検討	18
6. お わ り に	35
参 考 文 献	36

1 は じ め に

我が国にA Eコンクリートの情報がもたらされたのは1947年(昭和22年)であり、この約1年後より研究が始められ、その優れた特性が認識されるにつれA Eコンクリートは急速に普及し、今日では各種の工事においてほとんど例外なく利用されている。特に、JIS A 5308 "レデーミクストコンクリート"においては標準品は全てA Eコンクリートとし、プレーンコンクリートは特注品として扱われている。

このA Eコンクリートの有する優れた特性としては、凍結融解に対する抵抗性を筆頭に、ワーカビリティの向上、ブリージングの減少などが挙げられ、これらに対しては数多くの研究報告および実績があり疑いを差しはさむ余地はない。さらに、A Eコンクリートは水密性を向上させるといわれており、土木学会RC示方書においては『水密コンクリートには、良質のA E剤、減水剤、A E減水剤または良質のボゾラン等を用いるのがよい』とされている。

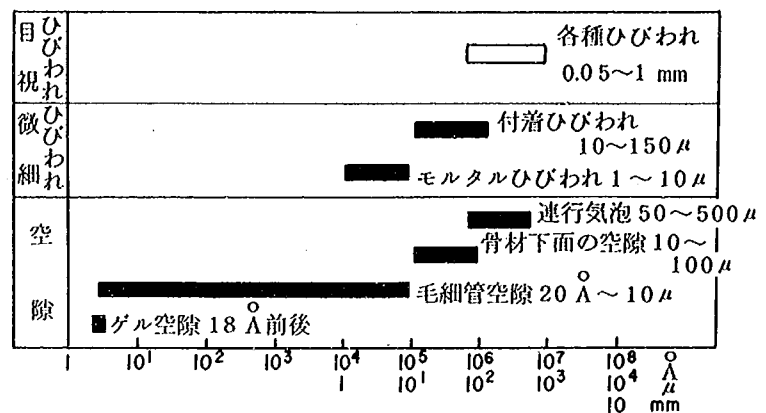
このコンクリートの水密性は透水性により評価されており、透水性は透気性とともコンクリートの耐久性と密接な関係がある。しかしながら、A Eコンクリートが水密性を向上させる理由としては、いずれの専門書においても、エントレインドエアーによって空隙が増大するが、ワーカビリティが改善され、水セメント比を低く抑えることができるので、その効果が空隙の増加による透水性の増加を補い、水密性はかえって改善されるという概念的な説明の範囲にとどまっている。さらに、最近のコンクリートの透気性に関する研究においては、比較的高い水圧が作用しなければ水途となりえなかった空気泡も、コンクリートが乾燥することにより圧力が高くない場合においても空気の通路になるという報告¹⁾もあり、透水性や透気性に代表されるコンクリートの透過性に関するA Eコンクリートの特性については十分明らかにされていない。

本報告は、A Eコンクリートの透過性を対象とし、コンクリート中の物質移動の基本的な性状および空隙組織との関係について調査するとともに、コンクリートの透過性に及ぼす連行空気の影響について検討したものである。

2. コンクリートの透過機構

コンクリートのような毛細管や気泡などの空隙組織を有する材料の相対する二つの面に、圧力、濃度、温度、電圧などの差が与えられると、圧力（あるいは濃度など）の高い方から低い方向に向かって物質の移動が生ずる。コンクリートの内部組織には図1²⁾に示すように、 10Å 程度のゲル空隙から数マイクロ程度の半径を有する毛細管空隙に至るまで種々の大きさの空隙が含まれている。さらに、骨材下面の空隙、連行気泡および微細なひびわれなどがあり、コンクリートの内部空隙組織は一様ではない。したがって、コンクリート中での液体あるいは気体の透過現象は種々の機構のもとに生じ、コンクリートの透水・透気性は空隙率の単純な関数で表示できるのではなく、含まれる空隙の大きさと分布ならびにそれらの連続性に依存するといわれている。

一般に、圧力勾配のあるところでは、流体の移動は管路流、粘性流、分子流あるいは拡散流の法則のもとに行われる。溶解物質の濃度の勾配があれば、拡散効果によって液体あるいはその中に溶解している物質の移動が生じ、電位差があれば、電気浸透あるいは電気透析現象によって物質の移動が生ずる。



温度勾配下での液体の移動は、熱質量移動の法則に従う。

図1 コンクリート中の各種空隙およびひびわれの寸法

ひびわれのないコンクリートを対象とした場合、上記の全ての物質移動の機構が問題となる。例えば、大きな気泡を含んだコンクリートでは、水の透過は管路流の法則のもとに行われる。マシブな普通コンクリートあるいは軽量コンクリート構造物では、層状粘性流の法則のもとに透水が起こる。さらに水密コンクリートでは、毛管流あるいは拡散流による透水がみられることもある。化学工業で使用されるコンクリート製の薬品貯蔵槽や輸送管などでは、拡散、浸透、透析などの原因で水が浸透する。電気透析現象は、コンクリートを絶縁体として用いる場合あるいは大きな電位差のあるところで使用する場合に生ずる。コンクリートを加熱養生する場合やコンクリート部材に温度勾配が作用する場合には、熱質量移動が起こる。

3. コンクリートの透過性を評価する指標

既往のコンクリートの透過性に関する研究を概観すると、多くの場合、コンクリートの透過性は透水係数または透気係数を用いて評価されている。それらの研究では、試験方法の相違および供試体の形状・寸法の相違などから透水・透気係数 K の算定式は異なっているものの、大部分はダルシー (D'Arcy) が実験的に導き出した式、

$$Q = KA\Delta P / \mu L \quad \dots\dots\dots(1)$$

を基本としている。ここで Q (cm^3/s) は粘性係数 μ の流体が、断面積 $A \text{ cm}^2$ 、厚さ $L \text{ cm}$ の多孔体中を圧力差 $\Delta P (= P_1 - P_2)$ dyne/cm^2 の下で定常状態で透過する量である。また、1 cp の粘性流体の流量 $1 \text{ cm}^3/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ を透過率の単位として 1 darcy という。

しかし、気体のような圧縮性流体を用いた測定では、測定条件、例えば寸法形状、測定時の圧力、圧力差の違いにより、(1) 式の K 値は変化する。そこで、最近の透気性に関する研究では、(1) 式において空気の圧縮性を考慮した(2)式³⁾または(3)式⁴⁾により透気係数を求め、透気性を評価している。

$$K = \frac{2LP_2}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$K = \frac{2LP_2 r_A}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \quad \dots\dots\dots(3)$$

(r_A ; 空気の単位容積重量)

これら透水・透気係数は加圧状態あるいは負圧状態での透過性を評価する指標である。これらに対し、通常コンクリート構造物が置かれている大気圧下でのコンクリート中への流体の透過現象は、濃度差による拡散があるので、この場合の透過性は拡散係数によって評価されている。また、この拡散係数を求めるには、フィック (Fick) の拡散法則がよく用いられている。

拡散セルを用いたイオンや酸素の拡散の研究においては、拡散セルの両側の濃度差が一定となったときを定常状態とし、フィックの第一法則により求めた(4)式⁴⁾または(5)式⁵⁾などにより、見掛けの拡散係数や平均拡散係数を求めている。

$$D_m = \frac{\Delta Q_m}{\Delta t} \cdot \frac{L}{\Delta C_m} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ここで、 D_m ; 見掛けの拡散係数、 ΔQ_m ; 透過速度が一定になってから時間 Δt の間に透過する m イオン量、 L ; 試験体の厚さ、 ΔC_m ; 試験体両面の m イオンの濃度差

$$D_n = \frac{Q \cdot L}{S \cdot \Delta C} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 D_n ; 平均拡散係数、 Q ; 1 気圧での試験体を通る酸素の流量、

L ; 試験体の厚さ, S ; 試験体の面積, ΔC ; 試験体両面の酸素濃度差

一方, 海洋構造物における塩分の浸透などは非定常状態の拡散であるとして, フィックの第2法則として知られている(6)式なる拡散方程式が適用されている。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots (6)$$

この場合, 拡散係数は(6)式の解である(7)式を用いて求められている。

$$C = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right] \dots\dots\dots (7)$$

ここで, x ; 表面からの距離, C ; x での濃度, C_0 ; $x = 0$ での C ,
 t ; 経過時間, D_c ; 拡散係数, erf ; 誤差関数

さらに, (1)式で求めた透水・透気係数は流入量と流出量が等しい定常流の場合であったが, 透過の初期においては流入のみの場合がある。この場合の透過性も拡散係数で評価されている。例えば, 供試体に水を圧入してその浸透深さから透水性を求める方法(インプット法)では, (8)式を用いて拡散係数を求めるようになっている。

$$\beta i^2 = \alpha \frac{D_m^2}{4 t \xi^2} \dots\dots\dots (8)$$

ここで, βi^2 ; 拡散係数, D_m ; 平均浸透深さ, t ; 水圧を加えた時間,

α ; 水圧を加えた時間に関する係数, β ; 水圧に関する係数

なお, (8)式もフィックの第2法則(6)式)を基として, 実験により導かれたものである。⁶⁾

また, コンクリートの透過性は透水・透気係数あるいは拡散係数などを求めずに, 現象論的に, 例えば中性化深さなどによって評価されることもある。

コンクリートの中性化は炭酸ガスの単純な拡散によって生ずると仮定し, 中性化深さ x は時間 t の平方根に比例するという(9)式が導かれている。これは, 通常 $\sqrt{t}$ 則と呼ばれ, 最も一般に用いられている。また, これは実験的にもほぼ成立することが確かめられている。

$$x = A\sqrt{t} \dots\dots\dots (9)$$

ここで, A は中性化速度係数と呼ばれ, 各種の要因によって定まるものである。さらに, かぶり a cm のコンクリートが中性化するのに必要な時間はほぼ(10)式⁷⁾で表わすことができるといわれている。

$$t = \frac{m_0 a^2}{2 D C_0} \dots\dots\dots (10)$$

ここで, t ; 厚さ a cm のかぶりが中性化されるのに要する時間, m_0 ; 単位体積当りのコンク

リートが吸収する炭酸ガスの量, C_0 ; 空気中の炭酸ガス濃度,

D ; 炭酸化したコンクリート中における炭酸ガスの拡散係数

したがって、コンクリートの中性化深さを測定することも、炭酸ガスの拡散を評価する一指標
考えることができる。

4. セメントペーストの透過性と空隙組織

コンクリートにひびわれなどが無い場合、その透過性はコンクリートを構成するセメントペーストおよび骨材粒の透過性に左右される。しかし、一般に、骨材粒はセメントペーストで包まれているので、十分に締め固められたコンクリートにおいては、透過性に最も大きい影響を及ぼすのはセメントペーストの透過性である。また、セメントペーストの透過性も、その空隙組織と密接な関係がある。

セメントペーストの空隙組織を示すものとしては、細孔量（空隙率）、平均細孔径、細孔径分布などがある。全細孔量の測定方法としては、全ての空隙中に水が満たされるよう脱気しながら飽水させ、水中で重量（ W_1 ）を測り、その試料の飽水重量（ W_2 ）、乾燥重量（ W_3 ）を測定して求める方法（アルキメデスの方法）がある。ここで、 $W_3 - W_1$ は水中で受ける浮力であり、水の比重を 1 とすれば試料の実質部の体積を与える。 $W_2 - W_3$ は同様に試料の空隙部を与える。

空隙率は $(W_2 - W_3) / (W_2 - W_1)$ で与えられる。また 細孔径分布の測定方法としては、広範囲の細孔径分布が比較的簡単に測定できる「水銀圧入法」が最もよく用いられている。水銀は圧力 1 kg/cm^2 では半径 $7.5 \mu\text{m}$ まで、 $1,0000 \text{ kg/cm}^2$ では半径 $75 \text{ \AA}$ の細孔径まで侵入するので、一般に水銀圧入法ではこの範囲の細孔径分が測定されている。これは、前掲の図 1 より毛細管空隙の分布範囲とほぼ等しいことが明らかである。一方、 $75 \text{ \AA}$ よりも小さい毛細管空隙やゲル空隙の測定においては、半径 $300 \text{ \AA}$ から $10 \text{ \AA}$ ぐらいまで測定できる気体の吸着と凝縮を利用した「ガス吸着法」が用いられている。

これらの方法により測定されたセメントペーストの空隙組織と各種透過性との関係は、次のようである。

4-1 透水性

セメントゲルは 28% の空隙を有しているが、その透水性はおおよそ $7 \times 10^{-16} \text{ m/s}$ にすぎない。⁸⁾ これは、硬化したセメントペーストの極めて密な組織によるものである。したがって、水は、より小さいゲル空隙を通るより、毛細管空隙を通しての方がずっと流れやすい。すなわち、セメントペーストの透水性は、図 2⁸⁾ に示すように毛細管空隙率に左右されることになる。

毛細管空隙は、水セメント比が大きくなれば増加し、セメントの種類、特に水和活性と養生条件の組み合わせによって変化する。すなわち、同じ、水セメント比で十分な水中養生が行われ、セメントの水和が完全に行われるような

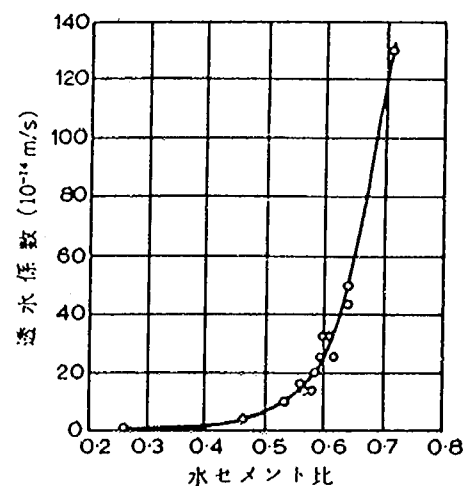


図 2 セメントペーストの毛細管空隙率と透水性との関係

場合は、セメントペースト中の毛細管空隙率はセメントの種類によってはあまり影響されず、水セメント比がその性質に著しい影響を与える。さらに、毛細管空隙の連続性も、水セメント比と湿潤養生期間の組み合わせによって変化する。普通ポルトランドセメントにおいて、毛細管空隙が不連続となる場合の、水セメント比と水和の程度の関係は図3⁹⁾に示すようである。したがって、同程度に水和したセメントペーストにおいては、その透水性は、水セメント比に左右されることになる。

図4¹⁰⁾は、セメントの93%が水和したセメントペーストについて得られた水セメント比と透水性の関係を示したものである。これより、同程度に水和したセメントペーストにおいては、水セメント比の小さいものほど透水性が低いことが明らかである。また、その線の傾きは、毛細管空隙が不連続な状態になっていると考えられる(図3参照)水セメント比60%程度で大きく変化している。

さらに、最近の研究においては、セメントペーストの透水性は水セメント比に依存する全細孔量に大きく影響されるが、全細孔量だけでなく細孔径分布も重要な原因の1つであることが報告されている。例えば、後藤ら¹¹⁾は27℃と60℃で養生したセメントペーストでは、同一水セメント比では養生温度60℃のものは27℃のものにくらべてアルキメデスの方法で測定した全細孔量は少ないが(図5)、半径の大きな細孔が多いので(図6)、その透水性は図7に示すように1桁以上大きくなると報告している。

また、Mehta¹²⁾らは水銀圧入法による細孔径分布(図8)と透水率との関係を、threshold diameter(TD)あるいはmodified diameter(MTD)とpermeability coefficient(K)との関係として、

$$\ln k = 2.851 \ln TD - 18.51$$

$$\ln k = 10.91 MTD - 3.38$$

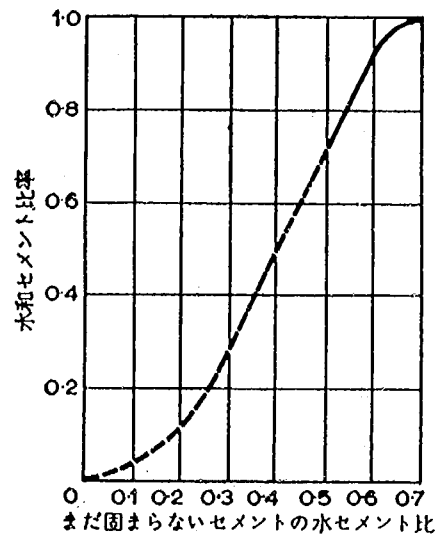


図3 毛管が分裂される時の熟成度を得るのに要する概略時間

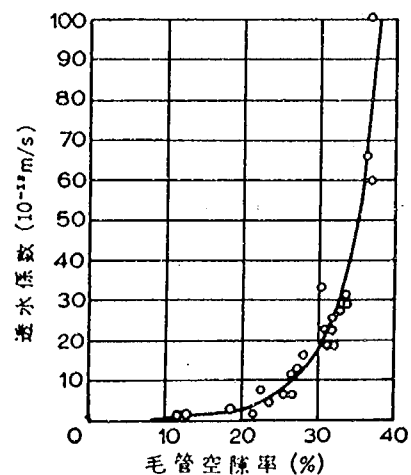


図4 熟成セメントペーストの水セメント比と透水性との関係

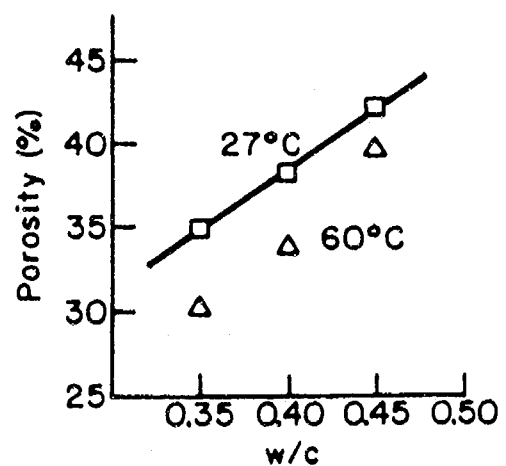


図5 全細孔量と水セメント比の関係

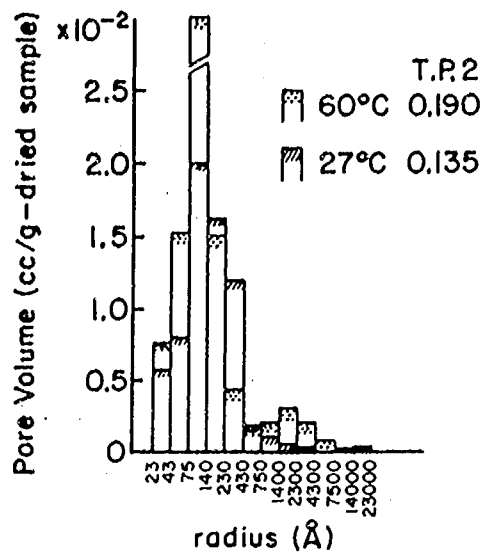


図6 硬化セメントペーストの
細孔径分布 (W/C = 0.4)

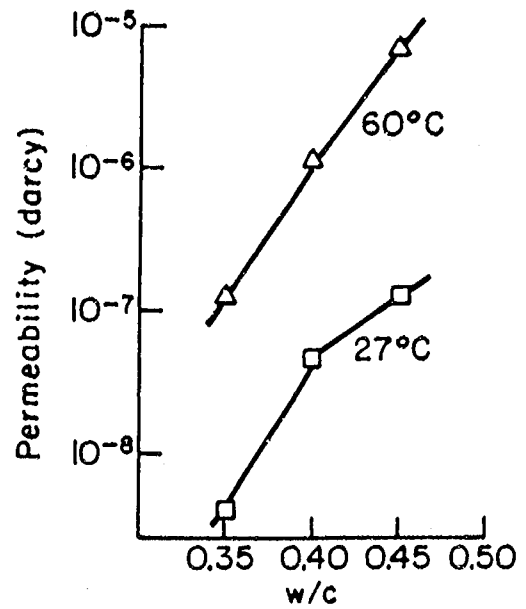


図7 透過性と水セメント比との関係

で表わすことができると報告している。同様に, Nyame ら¹³⁾ は透水係数 K は maximum continuous pore radius r_{∞} (図10) により,

$$K = 1.684 \cdot r_{\infty}^{3.284} \times 10^{-22}$$

の式で表わせる (図11) と述べている。

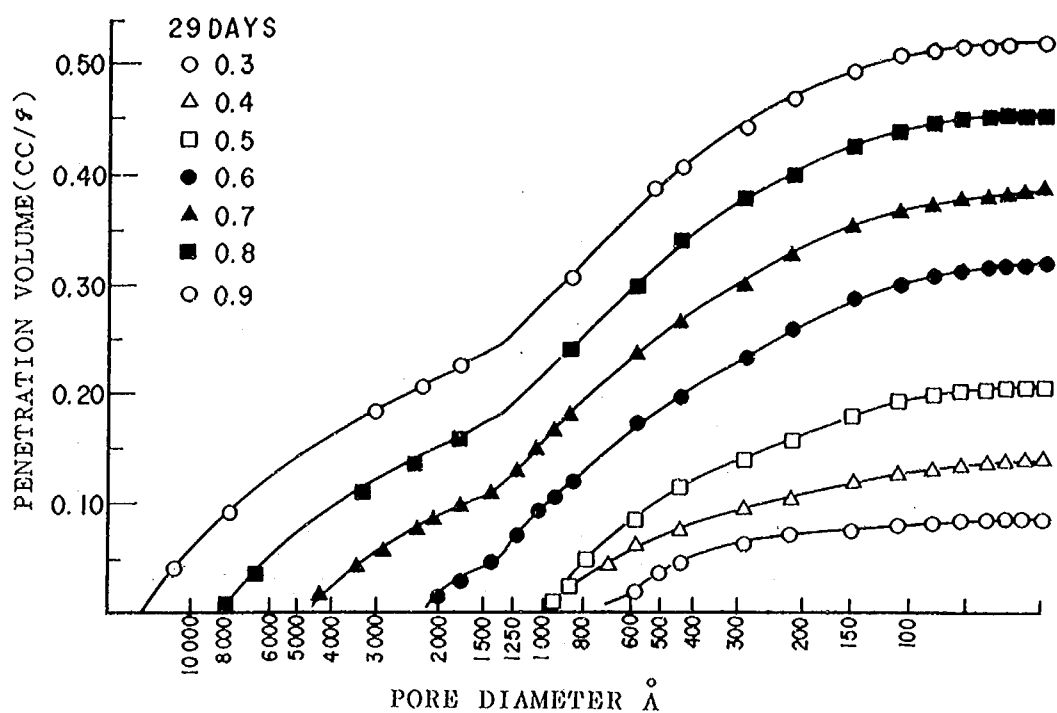


図8 細孔径分布に及ぼす水セメント比の影響, 28日

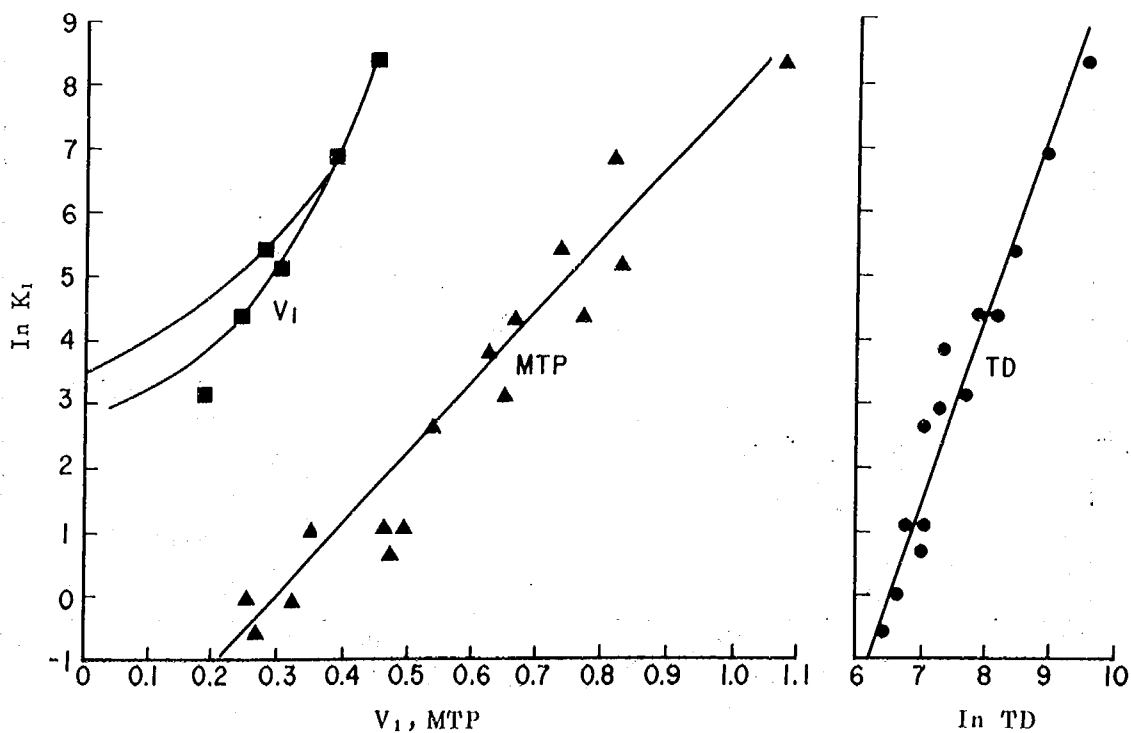


図9 V_1, MTP, TD と透過性との関係

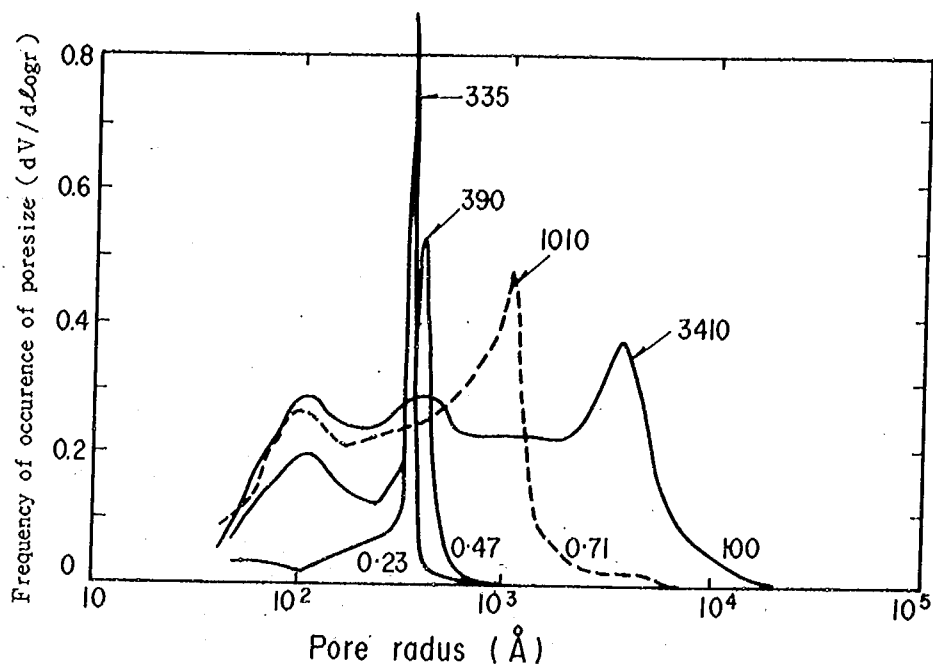


図 10 28 日水和セメントペーストの細孔径分布に及ぶ水セメント比の影響
(図中の数字は r_{∞})

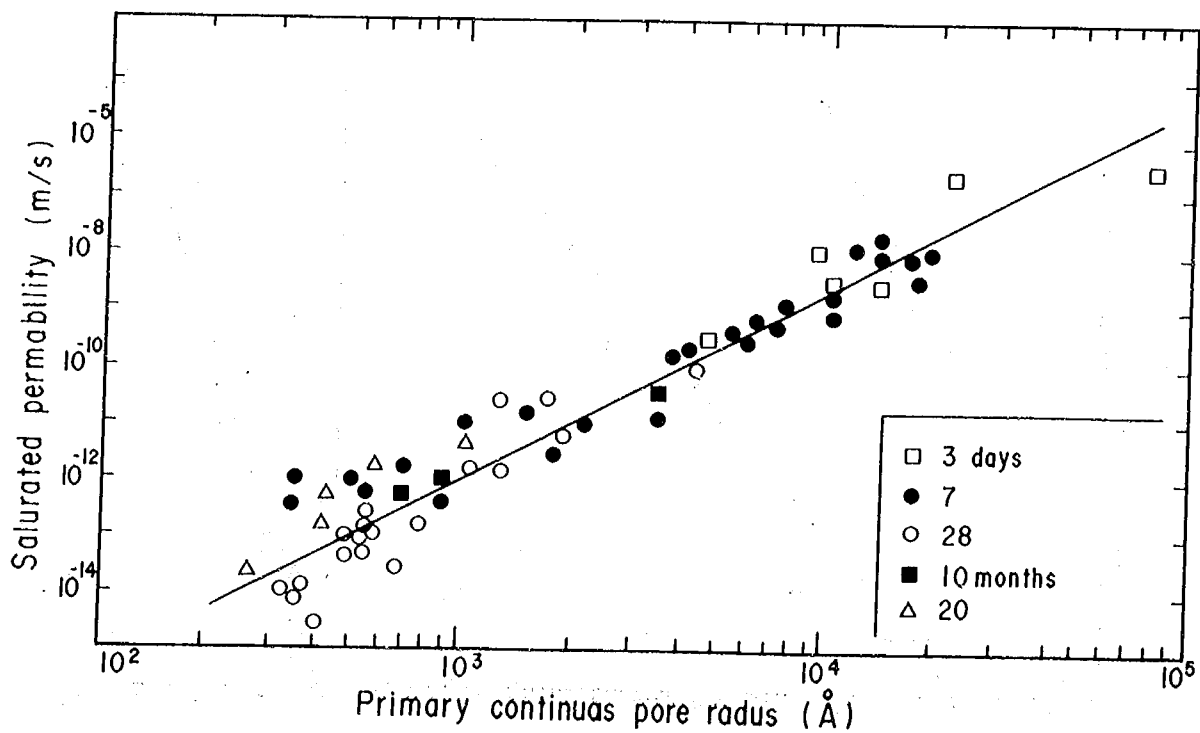


図 11 r_{∞} と硬化セメントペーストの透過性との関係

4-2 透 気 性

セメントペーストを透過する空気も、透水と同様にセメントペースト内部の毛細管空隙を透過するので、セメントペーストの透過性に及ぼす空隙組織の影響は基本的には透水性の場合と同様である。したがって、透気性も水セメント比によって大きく左右される。

図12¹⁴⁾は水セメント比とコンクリートの透気係数の関係を示したものであるが、透水性の場合と同様に透気係数は、水セメント比が増加するにつれて大きくなっている。さらに、水セメント比40%以下で透気係数にあまり差がみられないことも、透水性の場合と同様に、毛細管空隙の連続性に関係していると考えられる。

また図12においては、水セメント比が同じで十分水中養生(28日間)が行われたコンクリートであっても、その後の乾燥日数が長くなれば透気係数は大きくなっている。このことから、コンクリート(セメントペースト)の透気性に影響を及ぼすのは全ての毛細管空隙ではなく、乾燥により水分の逸散した毛細管空隙であると考えられている。

さらに、長滝ら¹⁵⁾はコンクリートの透気係数は、図13に示すように水分の逸散した毛細管空隙率 ϵ と毛細管空隙の平均半径 d (水銀圧入法により求めた細孔径分布の細孔径加積曲線の50%に相当する半径)の2乗との積に比例すると報告している。

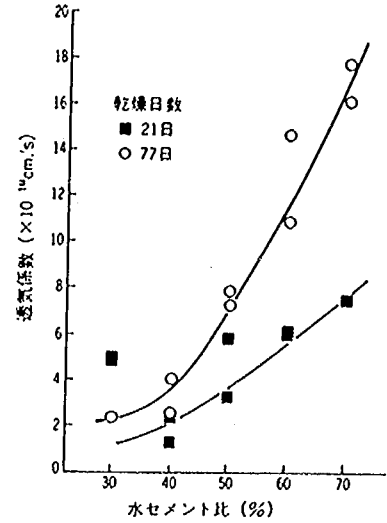


図12 水セメント比と透気係数との関係

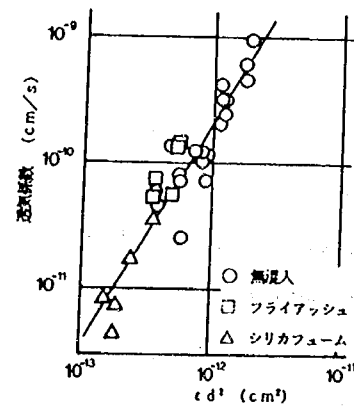


図13 ϵd^2 と透気係数の関係

4-3 イオンの拡散

イオンの拡散は濃度勾配によって生じるが、セメントペースト中に入り込んだイオンは、ペーストとの反応や、細孔中の溶液濃度を高めることに使われ、残りがより低濃度側へ拡散していく。

イオンも液体で満たされた細孔中を拡散するので、見掛けの拡散係数は細孔量と細孔構造に影響される。したがって、図14¹⁶⁾に示すように見掛けの拡散係数も水セメント比によって大き

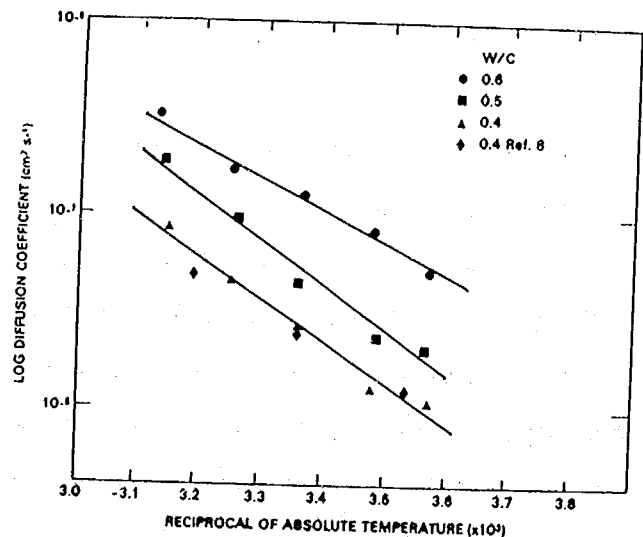


図14 塩素イオンの拡散に対する水セメント比の影響

く左右される。しかし、後藤ら¹⁷⁾ はイオンの拡散係数も全細孔量だけでは説明できないことを示している。(図15) さらに、イオンの拡散係数は図16に示すように、半径 $20 \text{ \AA}$ 以下の細孔量の増加に伴い指数関数的に減少すると報告している。これは、半径 $20 \text{ \AA}$ 以下といった非常に小さな細孔はイオンの侵入を妨げるので、このような細孔が少ないときはより大きな半径を持つ細孔が連続しているため、イオンは小さな細孔を迂回して拡散する(すなわち大きな細孔中を拡散する)が、小さな細孔量が増加すると大きな細孔の連続性が小さくなるからであると説明されている。

また、図16ではアニオン (Cl^-) はゆるやかな勾配を持ち、カチオン (Li^+ , Na^+ , K^+) は急な勾配を持つが、これは比較的大きな細孔中では両者は自由に拡散することができるので見掛けの拡散係数に差はないが、カチオンは反発力により半径 $20 \text{ \AA}$ 以下といった非常に小さな細孔に侵入することは難しいのに対し、アニオンは電気的親和力により小さな細孔でも侵入することができるためであると説明されている。

4-4 気体の拡散

セメント系材料の気体の拡散、透過に関する研究は、そのほとんどが透気性に関するもので拡散に関する研究は非常に数が少なく、明らかにされていない面も多くある。

小林ら⁵⁾ はコンクリート中の酸素の拡散に対して系統的な実験を行い、気体の拡散に対する多くの知見を得ている。これによると、コンクリート中の酸素の拡散は、図17に示すように含水率を一定とした場合、あまり水セメント比の影響は受けないようである。しかし、同一乾燥日数で比較すると、水セメント比の違いが含水率に差を与え

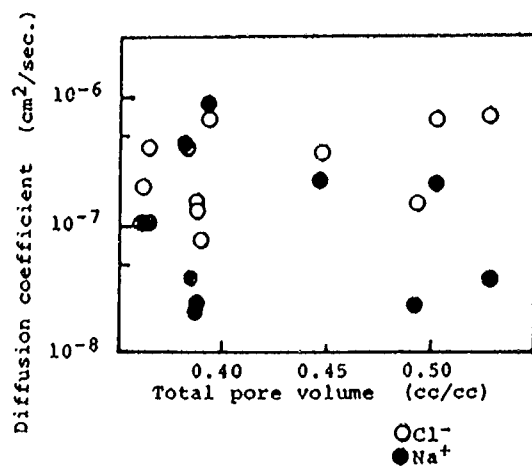


図15 全細孔量と見掛けの拡散係数

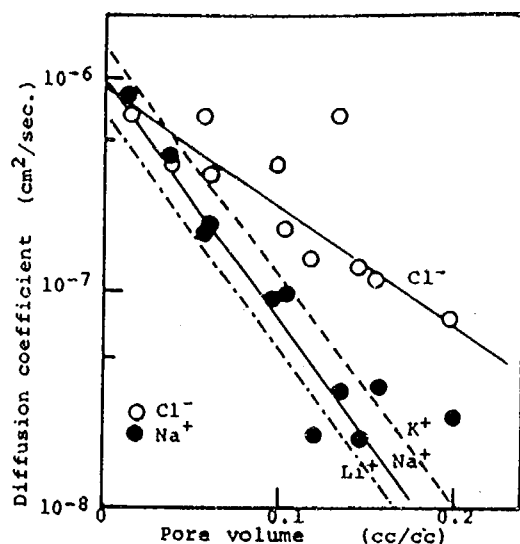


図16 半径 $20 \text{ \AA}$ 以下の細孔量と見掛けの拡散係数

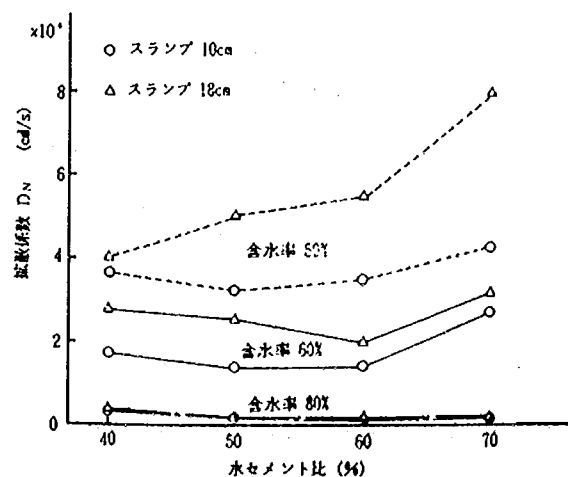


図17 水セメント比と拡散係数の関係

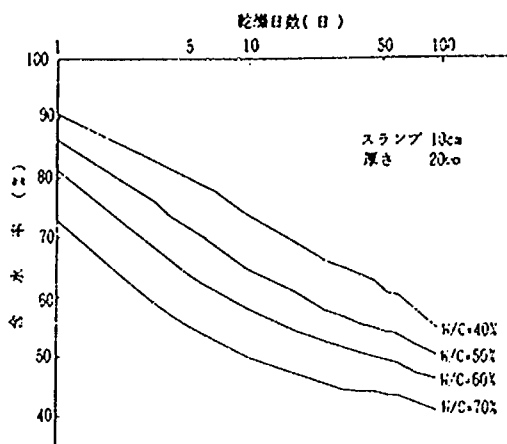


図18 水セメント比の違うコンクリートの含水率の経時変化

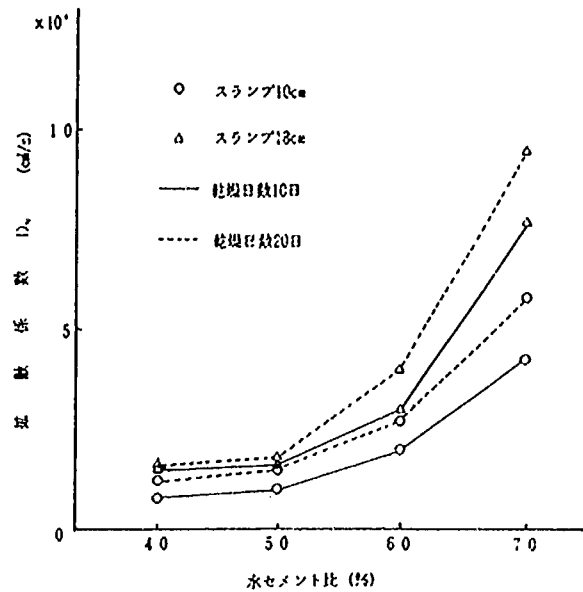


図19 同一乾燥日数で比較した時の水セメント比と拡散係数の関係

るため(図18), 図19に示すように水セメント比が大きくなると拡散係数も大きくなるようである。このことは、透気性の場合と同様、水で閉塞されていない細孔中を酸素が拡散することを示している。

さらに、酸素の拡散係数も図20に示すように、全細孔量(水で閉塞されていない全細孔量)だけで評価するのは難しいという結果が得られている。したがって、酸素の拡散の場合も細孔径分布が重要な要因であり、この場合、図21に示すように半径 $1\mu\text{m}$ 以上の比較的大きな細孔と密接な関係があることが明らかにされている。また、図21で気中養生したコンクリートの拡散係数が細孔容積および半径がほぼ等くても若干他の場合と異なっているのは、乾燥などによって生じた微細なひびわれにより細孔が短絡され、細孔の折れ曲がり程度(屈曲度)が小さくなり、拡散経路が短くなったためであると説明されている。

一方、中性化にみられる炭酸ガスの拡散のように、セメント硬化体に対して活性な気体の拡散の場合、拡散とともに細孔分布も変化するので(例えば図22¹⁸⁾), 酸素のような不活性な気体の場合のように単純に細孔量との関数で表わすことはできない。

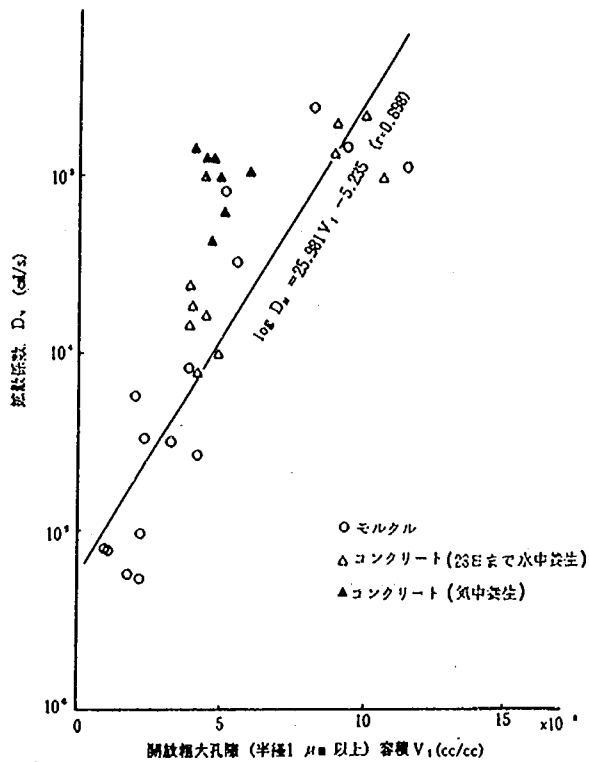


図20 開放孔隙量と拡散係数の関係

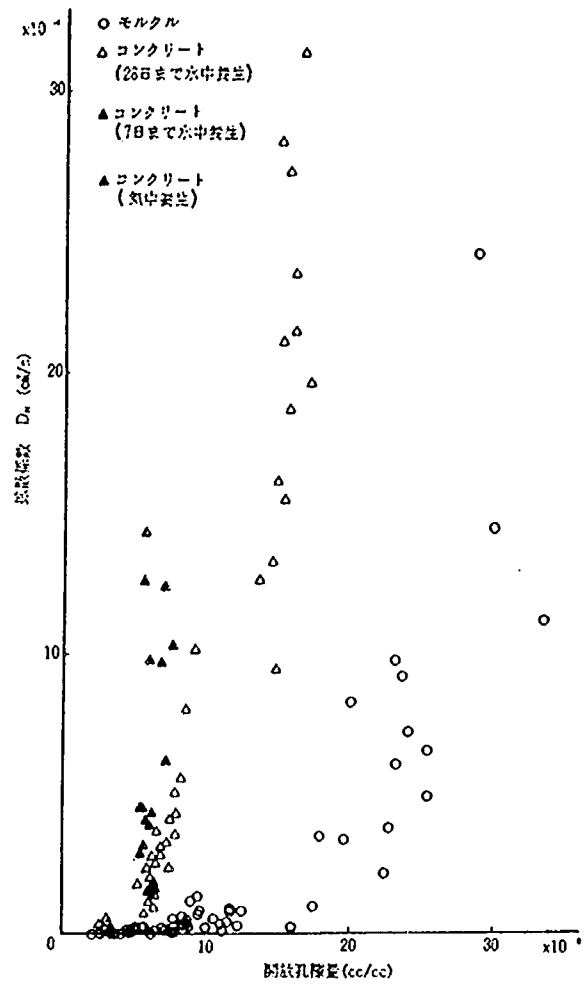


図21 開放粗大孔隙 (半径1 μ m 以上) と拡散係数の関係

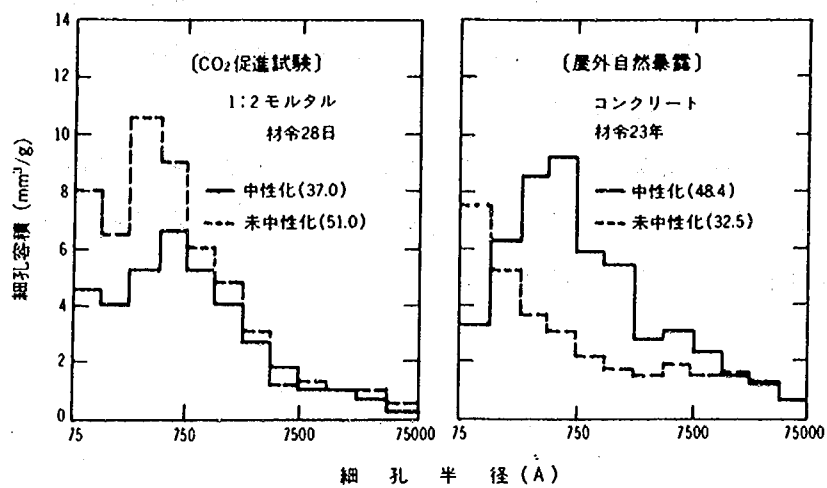


図22 中性化による細孔径分布の変化の例
〔 () 内は全細孔量 〕

5. AEコンクリートとプレーンコンクリートの透過性の比較

5-1 既応の研究による検討

コンクリートの透過性はその空隙組織に大きく左右されるが、空隙組織の影響に関する既往の研究においては、そのほとんどが毛細管空隙に関するもので、空気泡に関する研究は比較的少ない。

村田⁶⁾はコンクリートの水密性に関して広範囲な実験を行い、図23に示すようにAEコンクリートの水密性はAE剤を用いないものに比べ、水セメント比が小さい場合は小であるが水セメント比が約62%以上の場合は大となる結果を得ている。また、図24に示すように、水セメント比およびコンシステンシーを一定としたプラスチックなコンクリートに相当な水圧を加えた場合には、空気量の増加にともなって圧縮強度と同様に水密性も低下すると報告している。このように、空気量が増すほどかえって水密性が低下するのは、比較的大きい水圧（5～20 kg/cm²）が加えられる場合には、微細気泡中にも水が浸透して水途を短縮するからであると考察している。さらに結論としては、適当な空気量を有するAEコンクリートは、単位セメント量が同等であれば、AE剤を用いないコンクリートと同等以上の水密性を有するものであり、またAEコンクリートはワーカビリチーがよくて均等質なコンクリートが得られやすいから、水密的なコンクリートを容易かつ安全に造るためには適当な空気量を有するAEコンクリートを用いるのが有利であるとしている。

近藤ら¹⁹⁾は3種類のポルトランドセメントを用いて、単位セメント量およびコンシステンシーを一定としてプレーンコンクリートとAEコンクリートの透水性を比較し、表1に示すような結果を得ている。すなわち、AE剤を用いた場合は使用水量が減じ、材料分離が少なくなるため透水性は非常に少なくなり、特に上層部においてその効果が大きいとしている。しかしながら、例えばセメントAまたはCの水セメント比70%の下

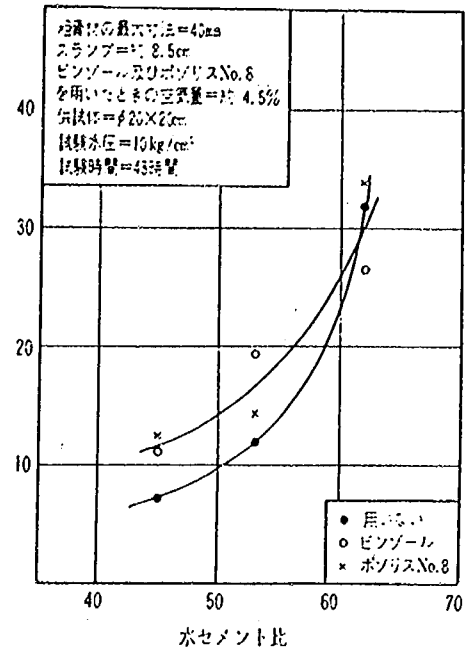


図23 AE剤およびセメント分散剤がコンクリートの水密性におよぼす影響

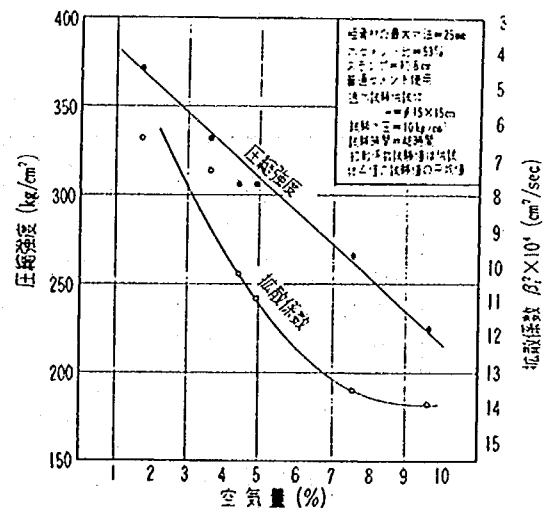


図24 空気量がコンクリートの水密性および圧縮強度におよぼす影響

層部のように、同一水セメント比でくらべるとブレンコンクリートの方が透水性は少なくなっている場合もあり、A Eコンクリートの方が良好な透水性を示したのは、単位セメント量およびコンシステンシーを一定としたため、水セメント比が小さくなったことの影響が大きいと考えられる。

吉井ら²⁰⁾はA Eコンクリートの透気性に関する知識を得るために、ワーカビリチー、フィニッシャビリチーともに良好なコンクリートを選び同一単位セメント量およびコンシステンシーを有し、空気量を異にする4種類のコンクリートについて透気試験を行い、表2および図25に示す結果を得ている。すなわち、A Eコ

表1 コンクリートの透水試験結果

使 用 セメント	水セ メント 比 W/C %	セメン ト 量 kg/m ³	透 水 係 数 $K 10^{-9}$ cm/sec		
			円 柱 供 試 体		截頭円錐 供 試 体
			上 層	下 層	
セメント A Non A E	50	294	1,300	0	0
	60	251	2,000	0	0
	70	229	2,900	0	9.1
	80	209	4,500	1,000	120
セメント A A E	44	294	0	0	0
	51	261	0	0	0
	63	222	370	0	0.23
	70	209	2,600	10	2.0
セメント B Non A E	50	294	1,600	0.37	3.7
	60	251	20,000	1.5	0.51
	70	229	55,000	300	170
	80	209	73,000	1,200	390
セメント B A E	44	294	0	0	0
	51	261	0.20	0.46	81
	60	229	1,100	2.50	0.64
	67	209	1,500	82	10
セメント C Non A E	50	294	0.57	0	0
	60	261	0.10	0	0
	70	229	1,100	0.096	0.17
	80	209	2,000	2.50	0.34
セメント C A E	50	294	0	0	0
	55	261	0.19	1.3	0
	64	229	0.0022	0.017	0.0024
	70	209	2.0	2.5	0.14

表2 A Eコンクリートの透気量

コンクリ ートの 種 類	スラ ブ (cm)	W/C (%)	単位セメ ント量 (kg/m ³)	A E 剤 添加量 C % (%)	実 測 空気量 (%)	重量配合比	透 気 量 (CC/sec)
NON・A E	7.5	53.0	263	—	1.3	1 : 2.64 : 4.75	1.02×10^{-2}
A E・1	7.0	54.5	"	0.0030	3.0	1 : 2.61 : 4.70	4.79×10^{-2}
A E・2	7.5	53.0	"	0.0065	4.8	1 : 2.57 : 4.63	4.26×10^{-2}
A E・3	8.0	51.5	"	0.0100	7.2	1 : 2.50 : 4.49	6.01×10^{-3}

- 備考 1) セメント：秩父セメント K. K. 製 ポルトランドセメント
 2) A E 剤：Vinsol Resin
 3) 骨材修正係数 0.36
 4) 透気量：供試体3個の平均値

ンクリートはブレンコンクリートに比べて透気量を減少させるとしており、その原因としてはワーカビリチーの改善による供試体成型時の充填性の良化、またまだ固まらないコンクリートのブリージングによって生じる硬化後の透気経路の減少などの影響によると考察している。ブリージング量に関しては、その結果が示されていないので明かではないが、この研究においても単位セメント量およびコンシステンシーを一定としているので、空気量の増加にしたがい水セメント比が小さくなっており、この影響が大きいのではないかと考えられる。

長滝ら¹⁾は水セメント比を一定(50%)として空気量を5水準にとり、28日間および77日間乾燥条件下(温度20℃、湿度60% R. H.)で養生したコンクリートについて透気試験および重量変化の測定を行っており、図26に示す結果を得ている。すなわち、透気係数は空気量が多くなるにつれて大きくなっており、その傾向は乾燥日数77日において顕著である。また、このような傾向を示したのは、各乾燥日数において空気量が増加しても重量変化率はあまり差がない(図27)ことより、乾燥により水分の逸散した細孔が空気泡を連続させるため、空気泡が新しい空気の通路になるためであると考察している。

笠井ら²⁾はコンクリートの中性化と透気性に関して水セメント比を一定にしてプレーンコンクリートとAEコンクリートを比較しており、図28および図29に示す結果を得ている。すなわち、水セメント比を同じにして比較した場合、AEコンクリートの中性化速度および透気速度はプレーンコンクリートと同じか若干大きくなる傾向を示している。

和泉ら²²⁾も水セメント比を一定にして5種類のセメントにおいてプレーンコンクリートとAEコンクリートの中性化率を調べており、図30に示すように、普通セメントの場合を除きプレーンコンクリートの中性化

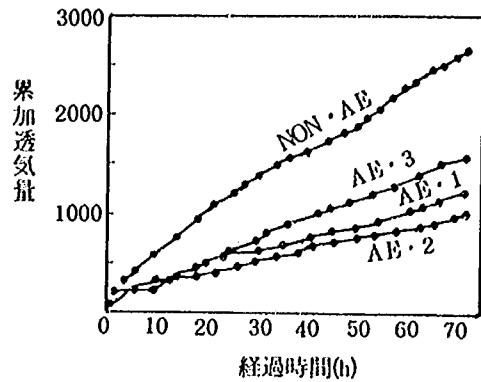


図25 AEコンクリートの透気経過

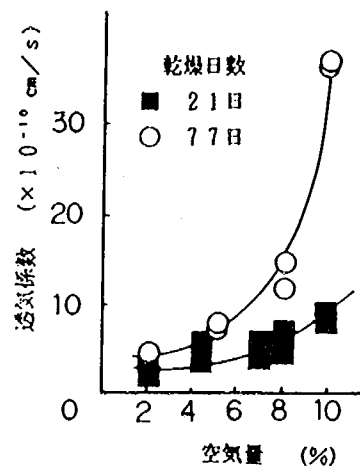


図26 空気量と透気係数との関係

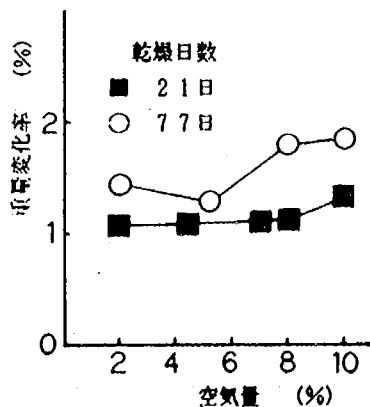


図27 空気量と重量変化の関係

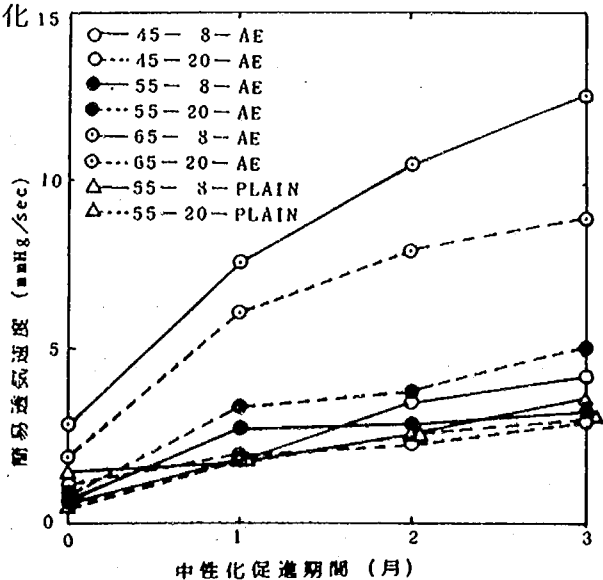


図28 AE剤を用いた場合の中性化深さ

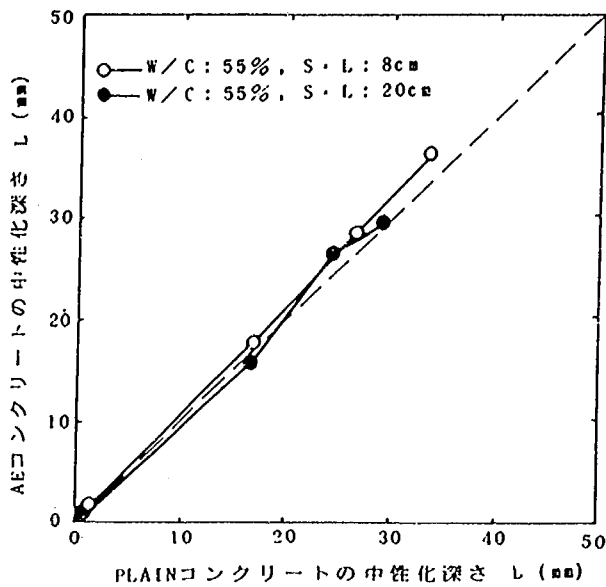


図29 中性化促進期間と簡易透気速度との関係

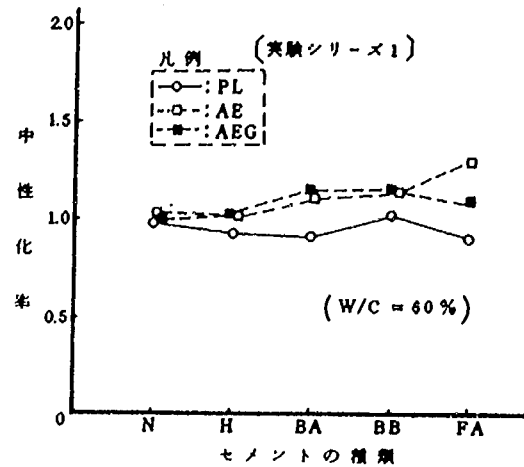


図30 混和剤の種類およびセメントの種類の影響

率はAEコンクリートよりも若干小さい傾向にあると報告している。

さらに、最近の屋外暴露の中性化試験結果^{23) 24) 25)}では、混和剤の有無あるいは種類によらず、中性化速度が水セメント比で一義的に決まっている場合もある。

このように、AEコンクリートとブレンコンクリートの透過性の優劣は、比較するときの条件によって結果が異なるようである。すなわち、単位セメント量およびコンシステンシーを同じにして比べると、AEコンクリートはブレンコンクリートに比べて水セメント比が小さくなり、毛細管空隙の減少による影響が空気泡の増加による影響よりも卓越するので透過性は小さくなる。一方、水セメント比を同じにして比較した場合、AEコンクリートはブレンコンクリートに比べて必ずしも有利ではなく、逆に透過経路が増加するためブレンコンクリートよりも劣る場合があるということである。

5-2 実験による検討

5-1節で述べたように、ブレンコンクリートと比較したAEコンクリートの透過性の優劣は、その水セメント比によってほぼ一義的に決定される。すなわち、設計基準強度から水セメント比が定められる場合、AEコンクリートはブレンコンクリートよりも水セメント比が小さくなるので、ブレンコンクリートよりも優れた透過性を有する。一方、耐久性や水密性から水セメント比が定められる場合など、AEコンクリートの水セメント比がブレンコンクリートと同じになる場合、その透過性はブレンコンクリートよりも若干劣るようである。しかしこの場合でも、その程度が実用上問題にならない範囲であれば、AEコンクリートとすることにより材料分離が少なくなり、欠陥部分の少ない均等質のコンクリートを容易に得ることができるので、全ての場合においてAEコンクリートはブレンコンクリートよりも透過性に優れていると考えることができる。

そこで本実験では、水セメント比が同じ場合のAEコンクリートとブレンコンクリートの透過性を、拡散に関係する中性化深さおよび塩分の浸透深さにより比較し、両者の差の程度について検討した。また、AEコンクリートとブレンコンクリートの性質を総合的に比較するために、凍結融解試験も合わせて行った。

さらに、最近、コンクリートの耐久性はコンクリート表層部の性状と深い関係があるとし、その性状を支配すると考えられるコンクリート表層部の細孔構造に着目した研究が行われている。²⁶⁾しかしながら、これらの研究は水銀圧入法で測定される細孔構造に限られ、空気泡についての研究は皆無に近い。そこで、本実験においては、中性化や塩分が浸透した場合のコンクリート表層部の空気泡の性状についての検討も行った。

5-2-1 実験概要

実験に供したセメントは普通ポルトランドセメントで、その性質を表3に示す。骨材は、細骨材には富士川産の川砂（比重2.62，吸水率1.61%，FM2.61）を、粗骨材には茨城県笠間産の碎石（Gmax. 20mm，比重2.66，吸水率0.4%，FM6.64）を用いた。また、AE剤としては山宗化学社製ウィルソンを用いた。

表3 セメントの試験成績表

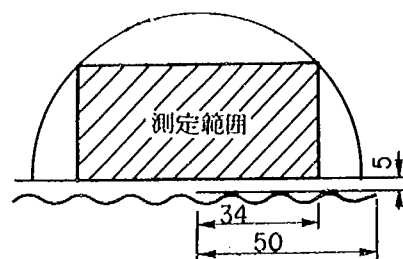
比重	比表面積 (cm^2/g)	凍 結			安定性	フ ロー (mm)	曲げ強さ (kgf/cm^2)			圧縮強さ (kgf/cm^2)		
		水 量 (%)	始 発 (h-m)	終 結 (h-m)			3 日	7 日	28日	3 日	7 日	28日
3.15	3190	29.0	2-13	3-56	良	261	34	50	69	156	256	412
化 学 成 分 (%)												
強 熱	不 宿	二酸化	酸化アル	酸 化	酸化カル	酸化マグ	三酸化	合 計				
減 量	残 分	けい素	ミニウム	第二鉄	シウム	ネシウム	いおう					
0.6	0.3	21.9	5.2	2.7	64.0	1.9	2.0	98.6				

コンクリートの配合は、水セメント比を55%一定とし、スランプの目標値は5～8cmとした。また、目標空気量はブレン、4%および8%とした。なお、空気量の測定におけるコンクリートの締め固めおよび供試体の作製には内部振動機を用いた。

実施した試験の項目および方法は次の通りである。

- (1) 凍結融解試験：ASTM C 666 急速凍結融解に対するコンクリートの抵抗試験方法演A方；水中における急速凍結融解により行った。
- (2) 中性化；コンクリート打設翌日に供試体（ $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ ）を脱形し、5日間湿空養生を行った後、温度20℃，炭酸ガス濃度15%の中性化促進槽中に静置した。促進材令1，2および3ヶ月において供試体を割裂し、割裂面に1%フェノールフタレイン溶液（JIS K 8006）を噴霧し、3日間静置した後²⁷⁾写真撮影を行った。

- (3) 塩分浸透深さ；コンクリート打設翌日に供試体（ $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ ）を脱形し，5日間湿空養生を行った後，温度 20°C で NaCl 飽和溶液（26.4 % 溶液）中に浸せきした。浸せき材令 1，2 および 3 ケ月において供試体を割裂し，割裂面にフルオレセインナトリウム（ $\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{Na}_2\text{O}_5$ ，0.2 %）および硝酸銀（ AgNO_3 ，N/10）を噴霧²⁸⁾した後，写真撮影を行った。なお，材令 3 ケ月のものについては，噴霧直後の発色が不鮮明であったので 3 日後に写真撮影を行った。
- (4) 供試体表面の空気泡の観察；中性化および塩分浸透深さの写真撮影を終えた供試体の上面（仕上げ面）を研磨し，図31に示す範囲での気泡システムのパラメータと空気量の測定を行った。なお，研磨および測定は ASTM C 457 顕微鏡による硬化コンクリートの気泡システムのパラメータと空気量の測定方法により行い，気泡システムの評価は修正ポイントカウント法により行った。



5-2-2 実験結果および考察

試し練りにより決定したコンクリートの配合および標準水中養生供試体による圧縮強度を表4および表5に示す。

図31 気泡システムのパラメータと空気量の測定範囲

表4 コンクリートの配合

配合 No	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m^3)				混和剤 A E 剤 (C×%)	フレッシュコンクリートの性状			
			セメント	水	細骨材	粗骨材		スランブ (cm)	空気量 (%)	単位容 積質量 (kg/l)	コンクリート温度 ($^\circ \text{C}$)
1		45.0	351	193	810	1003	—	7.5	1.4	2.38	21.7
2	55	43.5	316	174	781	1032	0.035	5.8	4.3	2.32	21.6
3		41.5	298	164	741	1061	0.070	6.5	7.8	2.22	21.4

表5 強度試験結果

材令 配合No	7日	28日	91日
1	285 (100)	393 (100)	460 (100)
2	246 (86)	337 (86)	393 (85)
3	178 (62)	247 (63)	290 (63)

()内はブレンに対する相対強度

水セメント比を一定とした場合、同一スランプを得るための単位水量は、空気量1%の増加につき約3%減少し、土木学会RC示方書に示されている補正表と一致した。さらに、圧縮強度は材令に関係なく空気量1%の増加につき約6%低下する傾向が認められ、従来の報告と同様の結果を示した。

凍結融解試験の結果は図32に示す通りで、これも従来の報告と同様に、空気を連行することにより凍結融解に対する抵抗性は著しく改善されている。

中性化試験の結果は写真1～3に示す通りである。これらによると、材令1ヶ月ではいずれの供試体においてもほとんど中性化していないため、連行空気の影響は認められないが、材令とともに中性化が進行すると、空気量8%のものは中性化深さが大きくなる傾向を示している。しかし、空気量4%

のものは材令3ヶ月においてもブレンとほぼ等しく、空気を連行したことの影響は認められない。

塩分の浸透深さ試験の結果は、写真4～6に示す通りである。ここで、白色を呈している部分が塩分の浸透した領域である。これらも中性化の場合と同様に、空気量4%ではブレンとほとんど差はないが、空気量8%では若干浸透深さが大きくなる傾向を示している。なお、中性化深さよりも塩分浸透深さの方が先行しているが、これは塩分浸透深さの場合は供試体の浸せきとともに吸水し、ある程度の深さまでClイオンが急速に拡散するのに対し、中性化の場合は図33¹⁸⁾に示すように、供試体中に含まれている水分の蒸発とともに炭酸ガスが拡散してゆくためであると考えられる。

供試体表面の気泡の観察結果は表6に示す通りである。これによると、いずれの場合においても、供試体表面の空気量は練りませ直後の空気量よりも減少している。これは、Backstromらの報告²⁹⁾にもあるように、締め固め時に打ち上がり表面近傍では気泡の上昇による発散消滅が生じたためであると考えられる。また、当然のことであるが、空気量の増加とともに気泡の比表面積は増加し、気泡の間隔係数は小さくなっている。しかしながら、材令が長

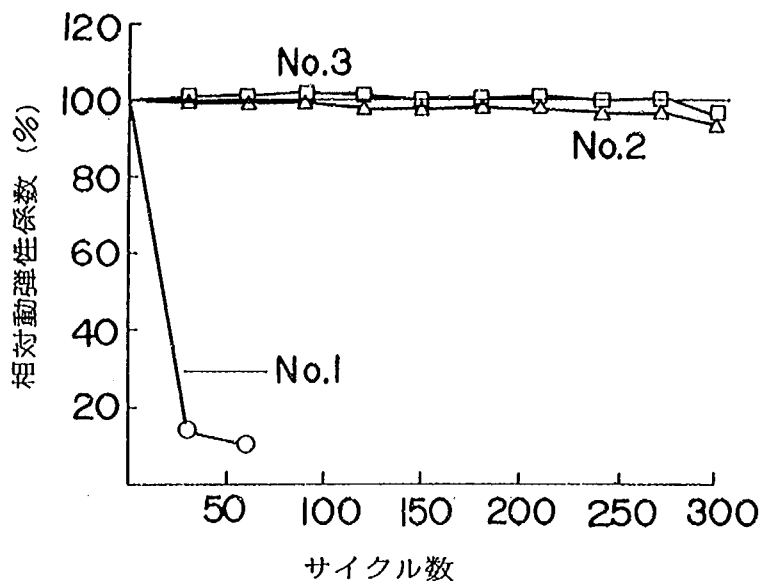


図32 凍結融解試験結果

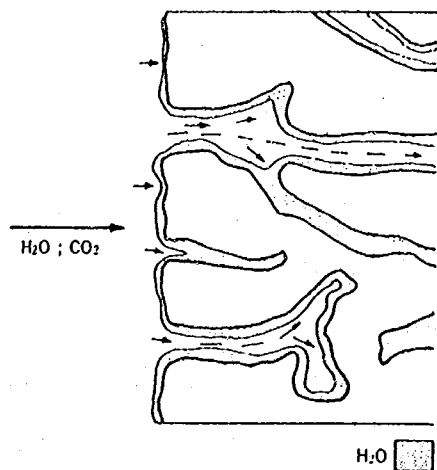


図33 セメント硬化体の細孔と炭酸ガスおよび水の拡散の模式図

表6 供試体表面の空気泡の観察結果

配合 No	フレッシュコン クリートの空気量	試験項目	材令	空 気 量 (%)	気 泡 の 比表面積 (mm ² /mm ³)	気 泡 の 間隔係数 (μ m)
1	1.4	中 性 化	1 M	0.5	16.3	851
			2 M	0.7	19.1	618
			3 M	1.1	14.5	688
		塩分浸透 深 さ	1 M	1.1	9.0	1104
			2 M	1.4	9.2	962
			3 M	0.8	12.2	907
2	4.3	中 性 化	1 M	3.0	40.3	152
			2 M	2.7	39.6	160
			3 M	2.9	32.0	194
		塩分浸透 深 さ	1 M	3.3	28.5	204
			2 M	3.9	30.3	178
			3 M	3.5	27.9	205
3	7.8	中 性 化	1 M	6.8	39.5	96
			2 M	5.5	45.6	99
			3 M	6.4	38.9	103
		塩分浸透 深 さ	1 M	5.7	37.8	117
			2 M	6.6	35.4	112
			3 M	6.8	35.3	108

くなっても中性化や塩分の浸透による空気量，気泡の比表面積および気泡の間隔係数の変化はほとんど認められない。このことは，毛細管空隙は中性化により減少し，また塩分の浸透などによるリーチング（ペースト内部からのセメント成分や水和生成物の溶出）により増加するのに対し，空気泡はこのような場合においても安定していることを示していると考えられる。

5-2-3 結 論

空気を連行することにより，中性化および塩分の浸透深さは若干大きくなる傾向であるが，土木学会RC示方書や建築学会JASS 5あるいはJIS A 5308などに規定されている範囲内の空気量であれば，ブレンコンクリートとほとんど差がないことが明らかになった。さらに，中性化や塩分が浸透した場合の硬化コンクリート中の空気泡は，表層部においてさえもほとんど変化せず，大気圧下においてはこのような場合でも気体や液体の新しい通路にはなりにくいことが確認できた。

また，AEコンクリートは凍結融解に対する抵抗性も優れており，AEコンクリートにすることにより容易に耐久的なコンクリートを得ることができると考えられる。

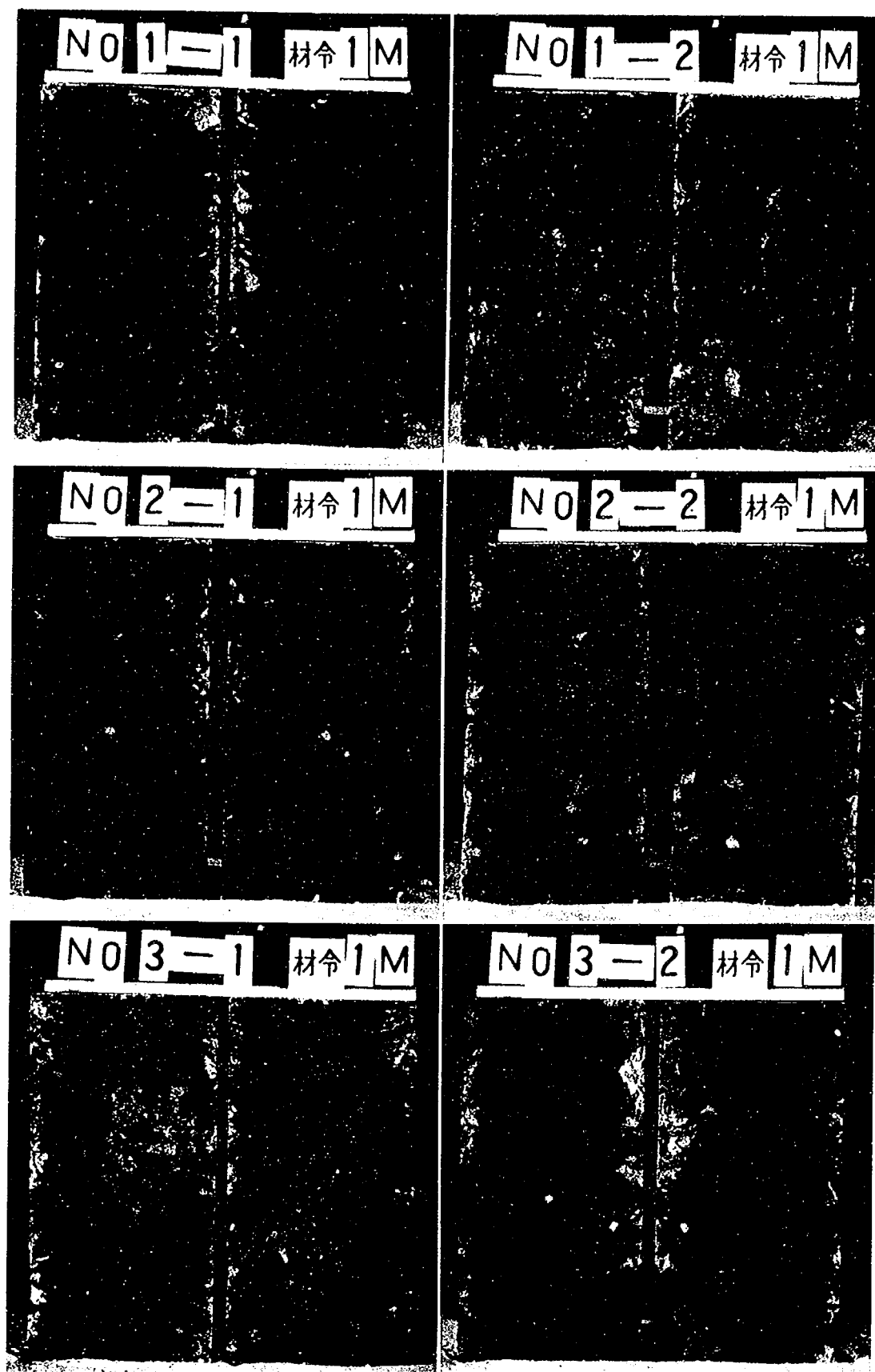


写真-1 中性化深さ (促進材令1ヵ月)

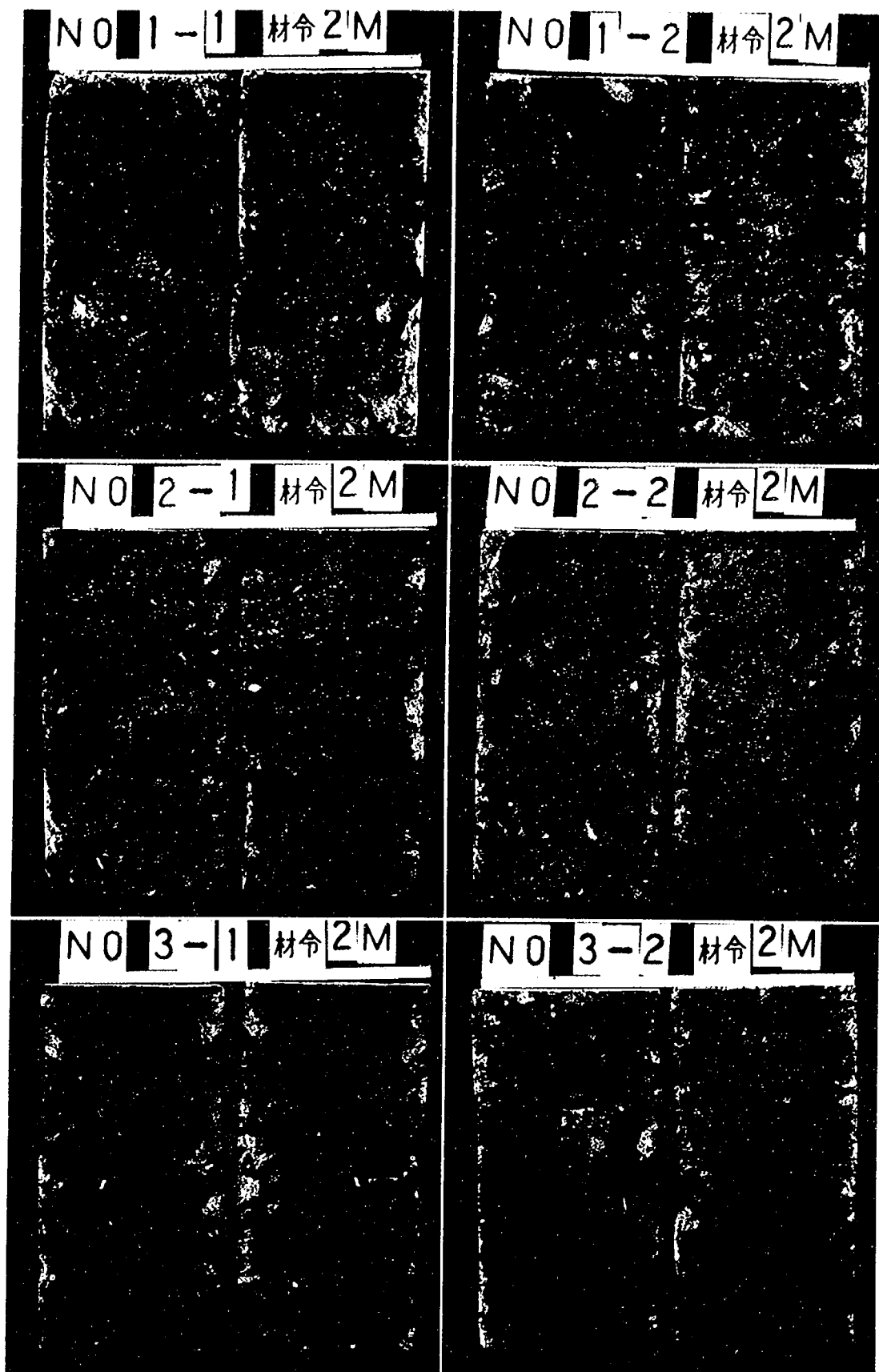


写真-2 中性化深さ（促進材令2ヵ月）

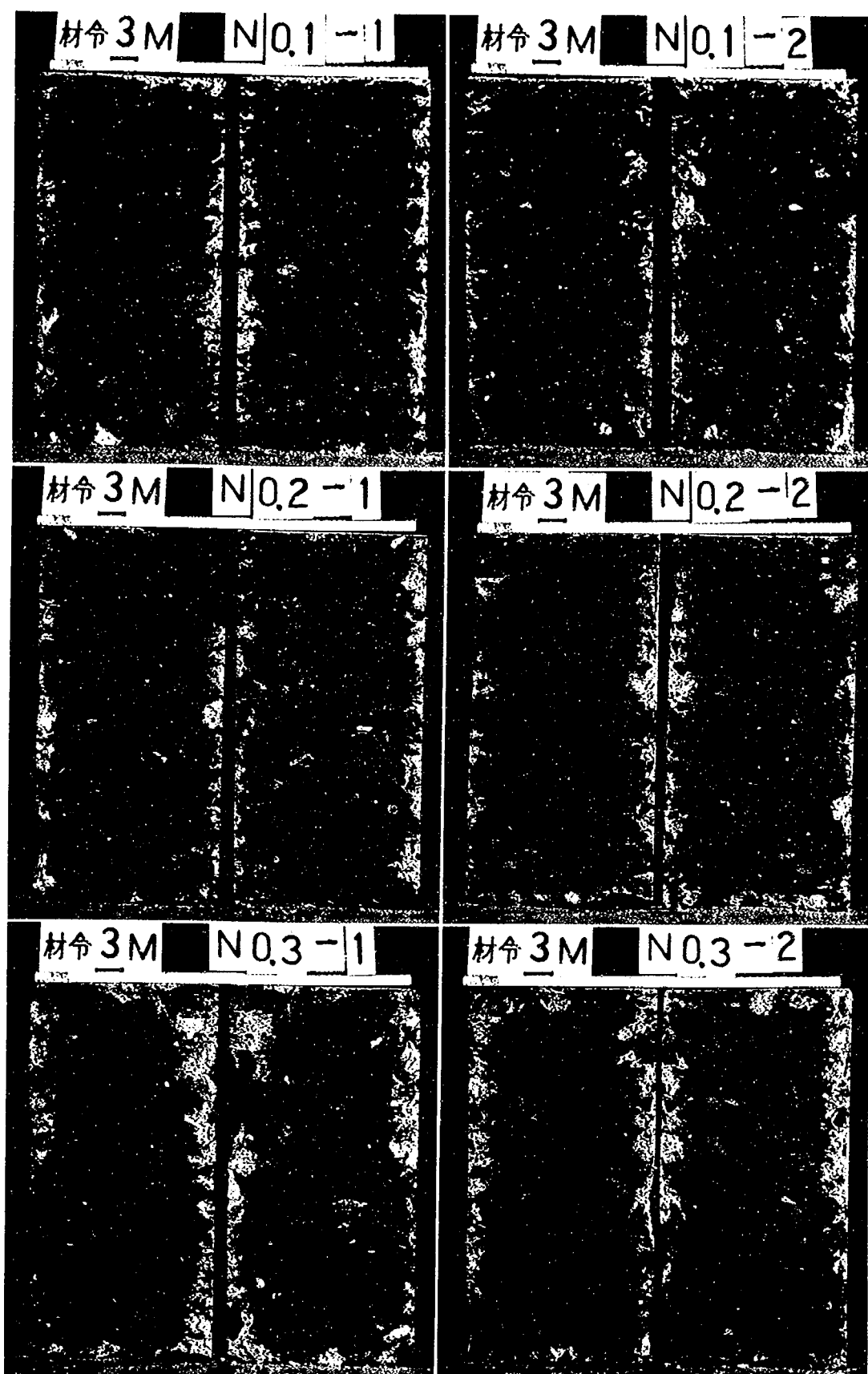


写真-3 中性化深さ（促進材令3ヵ月）



写真-4 塩分浸透深さ（促進材令1ヵ月）



写真-5 塩分浸透深さ（促進材令2ヵ月）

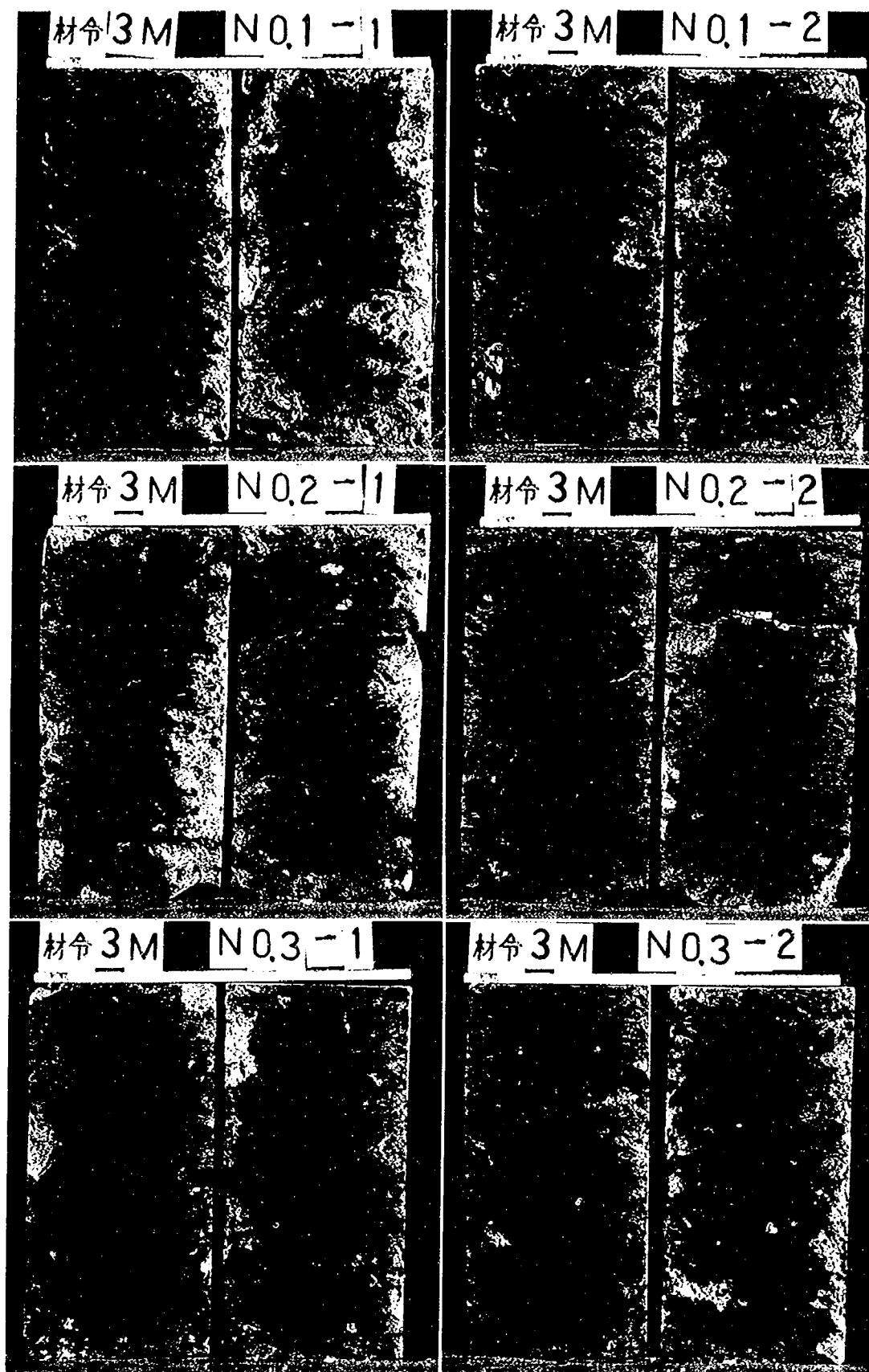


写真-6 塩分浸透深さ（促進材令3ヵ月）

6. お わ り に

コンクリートの耐久性に及ぼす連行空気の影響を知るために、耐久性と深い係わりのある透過性を対象として、空隙組織と透過性の関係について調査してきた。

その結果、コンクリートの透過性に最も大きく影響するのは、セメントペースト中で連続した組織を有する毛細管空隙であることが明らかになった。したがって、一般にAEコンクリートはブレンコンクリートに比べて水セメント比を小さくすることができ毛細管空隙が減少するので、連行空気泡により全体としての空隙量は多くなるにもかかわらず、ブレンコンクリート以上に透過性に優れた性質を有する。また、水セメント比が同じ場合においても、各学・協会の規定する範囲内の空気量であれば、ブレンコンクリートに比べて劣ることはないようである。さらに、コンクリート中の空気泡は、中性化や塩分が浸透した場合においても安定しており、毛細管空隙のような組織の変化はなく、加圧されるようなことがなければ流体の新しい通路にはならないようである。

以上、AEコンクリートは凍結融解に対する抵抗性ととともに、透過性においても優れた性質を有していることが明らかになった。さらに、最近注目されているアルカリ骨材反応に対しても、連行空気泡は膨張を緩和する働きがあるという報告^{30) 31)}もあり、AEコンクリートとすることにより耐久性に優れたコンクリートを容易に得ることができると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 長滝重義, 氏家勲, 柳瀬進, コンクリートの透気性に関する基礎的研究, セメント技術年報 38
- 2) 山田, 有泉, わかりやすいセメントとコンクリートの知識, 鹿島出版社
- 3) 神山行男, 岡田克也, 中島徹, コンクリートおよびコンクリート部材の気密性に関する基礎的研究, 第1回コンクリート工学年次講演会論文集
- 4) 近藤連一, 佐竹実, 牛山宏隆, セメント硬化体中のイオン拡散, セメント技術年報 28
- 5) 小林一輔, 山頭圭三, 各種セメント系材料の酸素の拡散性状に関する研究, コンクリート工学 Vol. 24, №12, Dec. 1986
- 6) 村田二郎, コンクリートの水密性の研究, 土木学会論文集 第77号
- 7) Дещинский, М. Ю. : Испытание Бетона, pp. 290 ~ 294, СТРОЙИЗДАТ, 1980.
- 8) T. C. Powers, Structure and physical properties of hardened Portland cement paste, J. Amer. Ceramic. Soc. 41 (Jan. 1958)
- 9) T. C. Powers, L. E. Copelando and H. M. Mann, Capillary continuity or discontinuity in cemento pastes, J. Portl. Cem. Assoc. Research and Development Laboratories, 1, № 2, (May 1959)
- 10) T. C. Powers, L. E. Copeland, J. C. Hayes and H. M. Mann, Permeability of Portland cemento paste, J. Amer. Concr. Inst., 51 (Nov. 1954)
- 11) Seishi Goto and Della M. Roy, The effect of W/C ratio and curing temperature on the permeability of hardend cemento paste, Cement and Concrete Research Vol. 11, 1981
- 12) P. K. Mehta and D. Manmohan, Pore size distribution and permeability of hardened cement pastes, Proc. 7th. Int'l Cong. Chem. Cement, Vol. 3 V11-3 (1980)
- 13) B. K. Nyame, J. M. Illston, Capillary pore structure and permeability of hardened cement paste, Proc. 7th. Int'l Cong. Chem. Cement Vol. 3 V1-181 (1980)
- 14) 長滝重義, 氏家勲, コンクリートの透気性, セメントコンクリート № 455 Jan. 1985
- 15) 長滝重義, 氏家勲, 荒木淳, コンクリートの透気性に影響を及ぼす諸要因, セメント技術年報 39
- 16) C. L. Page, N. R. Short and A. EL Tarras, Diffusion of chloride ions in hardend cement pastes, Cement and Concrete Research Vol. 11, 1981
- 17) 後藤誠史, 茂啓二郎, 高木達雄, 大門正機, セメント硬化体の細孔径分布とイオンの拡散,

- 18) 永嶋正久, 飛内圭之, 二酸化炭素の作用と硬化コンクリートの変化, セメントコンクリート № 465, Nov. 1985
- 19) 近藤実, 中条金兵衛, 各種セメントの透水性および凍結融解の試験, セメント技術年報 9
- 20) 吉井豊藤丸, 森仁明, 神田衛, コンクリートの透気性に関する研究, セメント技術年報 12
- 21) 笠井芳夫, 松井勇, 永野基司, コンクリートの中性化と透気性, 第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集
- 22) 和泉意登志, 嵩英雄, 押田文雄, 西原邦明, コンクリートの中性化に及ぼすセメントの種類, 調査および養生条件の影響について, 第 7 回コンクリート工学年次講演会論文集
- 23) 通産省住宅産業課編, 昭和 59 年度新住宅開発プロジェクト研究成果報告書 11, (1) 第 1 分冊, コンクリートの耐久性向上に関する研究
- 24) 富田六郎, 城所卓明, 人工軽量コンクリートの中性化, セメントコンクリート № 458 (1985)
- 25) 土木学会, フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究 (第 2 次), コンクリートライブラリー 53 号 (1984)
- 26) 例えば, 地濃茂雄, 平野隆, 仕入豊和, 養生条件とコンクリート表層部の細孔構造, セメント技術年報 38
- 27) 喜多達雄, 新名順一, 前田照信, コンクリートの中性化に関する 2・3 の考察, 間組研究年報, 1983
- 28) M. Collepardi, A. Marciali, Turriziani ; 11 Cement № 3 (1972)
- 29) J. E. Backstrom, R. W. Burrows, R. C. Mielenz and V. E. Wolkodoff, Origin, Evolution, and Effects of the Air Void System in Concrete Part 3 - Influence of Water Cement Ratio and Compaction, J. Amer. Con. Inst. 30-3 (Sep. 1958)
- 30) 能町, 吉崎, 岡沢, 小川, アルカリシリカ反応に関する基礎的研究 (その 1) - モルタルバーの膨張性に及ぼす各種要因の影響について, 日曹マスタービルダース研究所報告, № 7 1986
- 31) A. D. Jensen et al., Studies of Alkali-Silica Reaction Part 11. Effect of Air-Entrainment on Expansion, Cem. Concr. Res. Vol. 14, № 3, 1984

要旨 コンクリートを作る場合、耐凍害性を向上させるためにAE剤を使用することが一般的となっているが、連行される空気により、水や空気の透過性が大きくなり耐久性が低下するとの疑問が生じている。本報告では、空気量を2%から8%まで変化させたAEコンクリートについて、中性化促進試験、塩分浸透試験を行い、透過性の面から考察を加え、通常の連行空気量の範囲では、耐凍害性には効果があり、透過性には影響ないことを明らかにしている。

キーワード: AE剤 空気量 透過性 中性化 塩分浸透耐久性



郵便はがき

305-□□

下を40
さは円
い。切
て手

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

コンクリート研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第2552号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

⑩