

論文

[1143] コンクリートの塩分浸透における乾燥及び微細構造の影響

正会員○村上 祐治 (間組技術研究所)
 正会員 山下 英俊 (間組技術研究所)
 正会員 鈴木 篤 (間組技術研究所)
 正会員 大津 正康 (熊本大学土木環境工学科)

1. まえがき

コンクリート構造物の劣化が近年、多発していることが各機関より報告されている。その劣化現象は我が国が海に接していることから塩害が頻発していることが伝えられ、社会資本の損失の面から社会問題となっている。塩害を受けるコンクリート構造物の劣化は、主にコンクリート中に塩分が浸透し、鉄筋部分の塩分量が限界腐食塩分量となって鉄筋が腐食して膨張することであり、塩害の発生箇所は海水中よりもスラッシュゾーン、陸上部が被害にあっているという報告もある [1] [2]。これは、コンクリート中の塩分浸透のメカニズムが水中と気中での相違、酸素量の違いのためと考えられている。コンクリート中の塩分浸透は、塩化物の濃度、温度、相対湿度、飽水度、乾燥時間、塩水浸せき時間、乾燥-塩水浸せき繰り返し回数などの構造物の受ける環境(外的要因)、並びに圧縮強度、空気量、細孔径分布などのコンクリートの材料特性(内的要因)に大きく影響される。

本研究では、コンクリートの微細構造を表す細孔径分布と物理化学的な相変化に着目して、コンクリートの空隙中の水分の蒸発量を表す乾燥水量を算出し、塩水浸せき実験結果と対応することによってコンクリートの塩分浸透のメカニズム及びコンクリートの微細構造の関係について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

実験に使用したセメントはO社製普通ポルトランドセメント及び高炉B種セメント、混和剤はY製ガイヤールを使用した。コンクリートの配合は表-1に示す。なお、配合の名称は第1字目がセメントの種類(N:普通, B:高炉)を、第2字目はAE剤混入の有無(A:混入, N:無混入)を、打3字目以降の数値は水セメント比を表す。

2.2 塩分浸透実験

コンクリートの乾燥が塩分浸透に及ぼす影響を明らかにすることを目的にして、①塩水中浸せき実験、②乾燥-塩水浸せき繰り返し実験、③乾燥実験の3項目の塩分浸透実験を行った。

(1) 塩水中浸せき実験: 表-1に示す配合の10×10×40cmの供試体を作成した。養生は、28日間標準水中養生し、5面にエポキシ樹脂を塗布し、20°C一定の塩分水(3%NaCl水溶液)に浸せきさせた。

表-1 コンクリートの配合及びフレッシュコンクリートの特性

セメントの種類	配合名称	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤量 C× (%)	フレッシュコンクリートの特性		
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		スラッシュ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
普通ポルトランドセメント	NA50	50	46	178	356	804	958	0.02	5.0	4.5	22.0
	NA65	65	46	178	274	835	981	0.02	6.5	5.0	22.0
	NA80	80	46	178	223	855	1004	0.02	8.0	4.5	22.0
	NA100	100	46	178	178	872	1024	0.02	8.2	4.0	22.0
	NN65	65	46	194	298	842	990	—	7.0	1.2	22.0
高炉セメント	BA65	65	46	178	274	831	976	0.02	7.5	4.0	21.5
	BN65	65	46	194	298	839	985	—	7.8	1.3	21.5

コンクリートの細孔径分布及び全塩分量を測定した。細孔径分布はモルタル部より試料を採取して水銀圧入法で行い、全塩分量の測定はJCI基準案(硬化コンクリートの全塩分の測定方法)に準じて行った。なお、塩素イオンの定量は銀電極を用いた電量滴定法によった。

(2) 乾燥-塩水浸せき繰り返し実験：埋設型ひずみ計を供試体の中央部に埋設し、10×10×40 cmの供試体を作成した。養生は28日間標準水中養生し、①実験と同様な処理を行った。乾燥-塩水浸せきの繰り返しは、図-1に示すように乾燥状態が温度30℃、湿度80%の空气中に16時間、塩水浸せき状態が30℃の塩水(3%NaCl水溶液)に8時間浸せきの実験、並びに乾燥状態が温度30℃、湿度80%の空气中に72時間、塩水浸せき状態が30℃の塩水に8時間浸せきの2ケースの実験を行い、同時にひずみ計測を実施した。

(3) 乾燥実験：①の実験と同様に埋設型ひずみ計を埋設し、10×10×40cmの供試体を作成した。養生は28日間標準水中養生し、①実験と同様な処理を行った。供試体は温度30℃、湿度30%の恒温恒湿槽に設置し、ひずみ計測を行った。

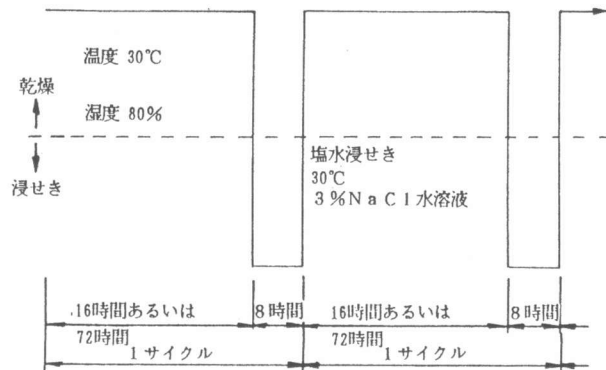


図-1 乾燥-塩水浸せき繰り返し実験のサイクル

3. 実験結果

3.1 全塩分量分布

図-2は、乾燥-塩水浸せき繰り返し実験の全塩分量分布である。全塩分量は表面で多く、内部に行くに従って小さくなる傾向が認められる。また、水セメント比が高くなるに従って塩分は内部に浸透している。NA65とNN65を比較すると、混和剤により空気を混入したNA65の方が塩分は浸透している。AEコンクリートの空気泡は一般に数μm～数mmの範囲にイントラポर्टI7とイントレイトI7が存在し、前者の空気泡は比較的大きい部分にあり、後者は50μm～100μmにピンクがあると言われている。このように、AEコンクリートとnon-AEコンクリートでは空気泡の構成に相違があり、AEコンクリートはイントレイトI7分だけ空隙量が多いために塩分が浸透したと思われる。

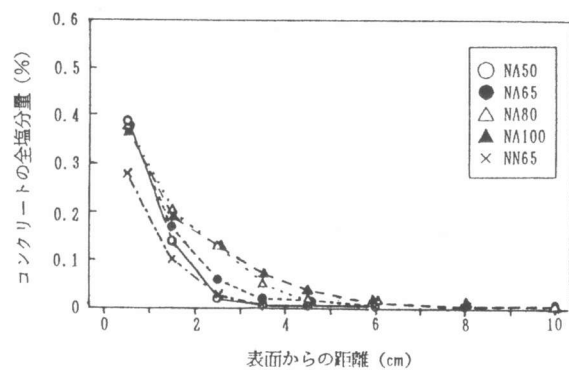


図-2 乾燥-塩水浸せき繰り返し実験の100サイクルの全塩分量分布

3.2 拡散係数

図-3は、水セメント比と各塩水浸せき実験の拡散係数の関係である。なお、拡散係数はFickの法則を用いて塩水の浸せき時間を拡散時間として各サイクル毎に算出し、平均値とした。水セメント比及び乾燥時間が增加するに従って拡散係数が上昇していることが分かる。特に、乾燥の有無によ

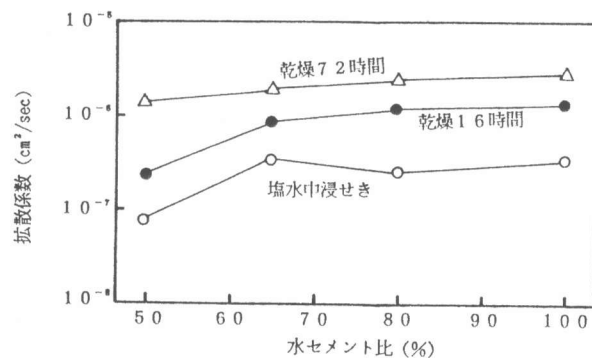


図-3 水セメント比と拡散係数の関係

る拡散係数は顕著な差があり、コンクリートの乾燥が塩分浸透に影響していることが分かる。

図-4は、NA65の乾燥-浸せきサイクルと拡散係数の関係(乾燥16時間、浸せき8時間)である。乾燥-浸せきサイクルが増加するに従って拡散係数は低下傾向にある。

3.3 乾燥-塩水浸せき繰り返しひずみ

図-5は、高炉セメントを用いた水セメント比65%のAEコンクリートのひずみ経時変化を示す。乾燥-塩水浸せき1サイクルのひずみの挙動は乾燥時には収縮が生じ、塩水浸せき時には膨張に転じている。その膨張量は乾燥開始時のひずみまでは達していない。これは、乾燥過程ではコンクリート表面から水分が蒸発して収縮し、塩水浸せき過程では表面から塩水が浸透して膨張したためであり、乾燥開始時と塩水浸せき後のひずみの差はコンクリートの不可逆過程のためと考えられる。乾燥-塩分浸せきサイクルが増加するに従って乾燥収縮ひずみ量が増加している。

これは、繰り返し開始当初は表面付近から水分が蒸発であったが、サイクルが増加するに従って乾燥が表面から奥行き方向に徐々に深くなったため、収縮ひずみが増加したものである。このように、乾燥-塩水浸せき回数が増加するに従って、表面から奥行き方向に乾燥が進んでいることを示唆するものである。

4. 塩分浸透のメカニズムと乾燥水量の算定方法

4.1 塩分浸透のメカニズム

セメント-砂の内部には大小様々な空隙が存在し、空気孔、毛細管孔、ゲル孔に分けられる [3]。空気孔は独立した気泡であると言われており、比較的大きい細孔である。毛細管空隙は細孔半径 10^4 \AA 付近 $\sim 30 \text{ \AA}$ の空隙であり、この空隙には練り混ぜ水などが存在し、水隙部分となっている。塩分の浸透は今回の塩分量分布及びひずみの挙動から、空隙部分が水分で満たされている場合には、水液中の塩分の拡散(Diffusion)となり、また、コンクリートの空隙が空洞になっている場合には、塩分水が流れを持った浸透(Penetration)となることが推測される。後者の方が塩分の拡散係数は今回の実験から明らかのように大きくなる。乾燥-塩分浸せきを繰り返す場合のコンクリートの塩分の浸透は今回の実験の範囲で次のようなメカニズムであることが推測される。

- ① 毛細管空隙の水分が温度、相対湿度によって粗大径側から徐々に乾燥し、その空隙部分が粗大径側から空洞の状態となる。
- ② コンクリートの表面に塩水が接触して空洞化した毛細管空隙中に流れを持って塩水が移流拡散する。

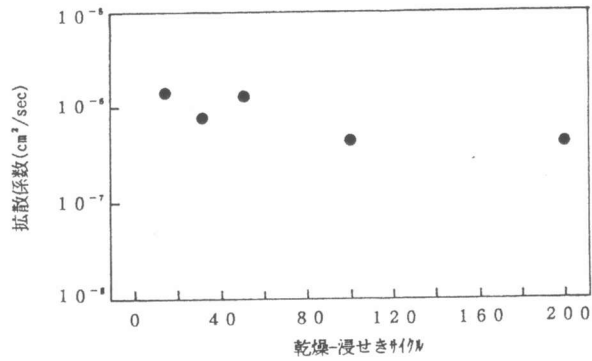


図-4 NA65の乾燥-浸せき繰り返し回数と拡散係数の関係 (乾燥16時間, 浸せき8時間)

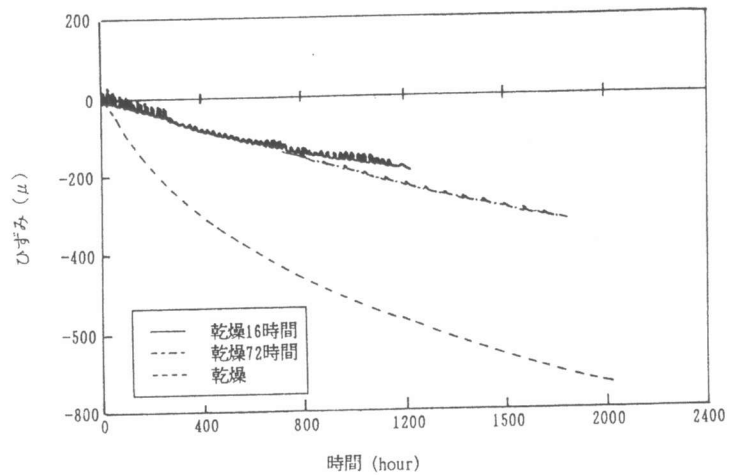


図-5 BA65のひずみ経時変化

その移流拡散は粗大径側から微細な径に移動していく。

③乾燥—塩分浸せきを繰り返すと、乾燥して空洞化した空隙が表面から奥行き方向に徐々に進行していき、塩水も奥行き方向に浸透していく。

4.2 乾燥水量の算定方法 [4]

[5]

コンクリート中の毛細管空隙は乾燥収縮、塩分浸透に及ぼす影響が大きいことが分かっており、通例、細孔径分布として表される。一定温度の場合相対湿度の降下に伴い、あるいは、一定相対湿度の場合温度の上昇に伴い、粗大径側の毛細管中の水から順次乾燥していく。これは、細孔中の水はメンスによる乾燥しにくくなっており、細孔径の大小によって温度及び相対湿度が決定されているためで、

物理化学的な乾燥現象としてよく知られている。このためセメント中の空隙は乾燥部と未乾燥部が混在し、温度かつ相対湿度を一義的に決めることはできず、コンクリートの塩分浸透を直接的に表す乾燥水量を温度及び相対湿度ごとに算出することが必要となる。

細孔半径を r 、細孔径分布の密度関数を $F(r)$ 、全細孔量を V_0 とすれば、任意の r における細孔量は、

$$V_0 F(r) \quad (\text{ただし } \int F(r) dr = 1) \quad (1)$$

で表される(図-6(a))。そして、乾燥に対する環境条件は物理化学的に相対湿度 P/P_0 かつ温度 T で表され、これを $E = E(P/P_0, T)$ で表されると仮定する。なお、これを以下環境指数と呼ぶ。ある細孔半径の増分 dr における乾燥水量は $V_0 F(r) dr$ で表すことができるので、粗大径側から順次乾燥していく過程を考えると、ある環境指数 E までの乾燥し得る細孔半径を r_e とすると、

$$V_e = - \int_{\infty}^{r_e} V_0 F(r) dr = \sum_{i=1}^n V_0 F(r_i) \Delta r_i \quad (2)$$

で表される細孔量が乾燥すると考えることができる。式(2)の右辺は、細孔径分布が離散的に与えられた場合を示す。このときの環境指数 E と乾燥する細孔半径 r_e との関係は通例、 $r_e = g(E)$ のような特性曲線(相変化曲線)として表される(図-6(b))。この特性曲線 $r = g(E)$ を用いると、式(2)は、

$$V_e = V_0 \int_E^0 F(g(E)) g'(E) dE \quad (3)$$

となり、環境指数 E とセメント中の乾燥水量 V_e との関係が得られる(図-6(c))。実際のコンクリートでは、

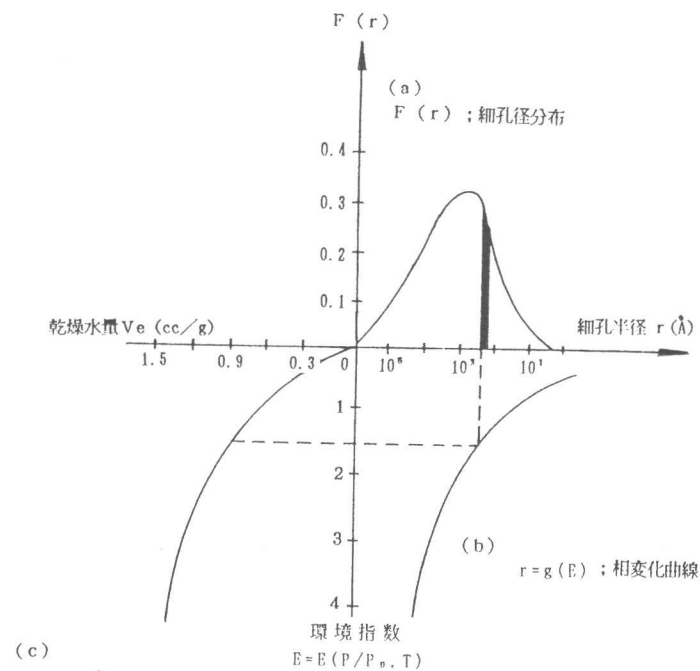


図-6 細孔径分布と相変化曲線と乾燥水量の関係

独立した気泡が存在しており飽水度は必ずしも100%ではない。よって(3)式は飽水度を示す関数 θ を乗ずることにより、下式を得ることができる。

$$V_e = V_0 \int_E^0 \theta(g(E)F(g(E))g'(E))dE = \sum_{i=1}^N \theta(r_i)V_0F(r_i)\Delta r_i \quad (4)$$

ここで、実際の計算では密度関数 $F(r)$ が連続量として与えられないこと、及び演算の簡便性を勘案して、式(4)の右辺を導いた。

5. 配合別の乾燥水量の算定

異なる3つの配合の測定結果を用い、本算定方法によりその乾燥水量の推定を試みた。相変化曲線に関して乾燥し得る細孔半径 r_e と環境指数 E の関係は、次のKelvin式を用いた。

$$r_e = \frac{2M \cdot \gamma}{R \cdot \rho \cdot T \cdot \ln P / P_0} \quad (5)$$

ここで、 M :モル質量、 γ :表面張力、 R :気体常数、 ρ :液体の質量である。

図-7は配合別の細孔径分布を示し、図-8は温度30°C一定での乾燥水量 V_e との関係について試算した結果である。いずれも相対湿度100%以下になると乾燥が始まり、相対湿度の低下に伴って乾燥水量が増加していることを示しているが、配合別の違いが明瞭に表われている。例えば、粗大径に細孔を多く含むNA100は相対湿度100%以下になった直後から乾燥水量が急激に増加するのに対して、微小径に細孔を多く含むBA65は相対湿度が低下に伴い、徐々に増加しており、両者に顕著な差があることが確認できる。

図-9は、乾燥水量と拡散係数の関係である。この乾燥水量は、前述のように温度30°C、相対湿度80%の環境下で毛細管空隙中の水分が逸散したときの水量である。乾燥水量が増加するに従って、拡散係数が増大し、かなり強い相関関係があることが分かる。また、乾燥時間の相違により拡散係数が違い、乾燥時間が

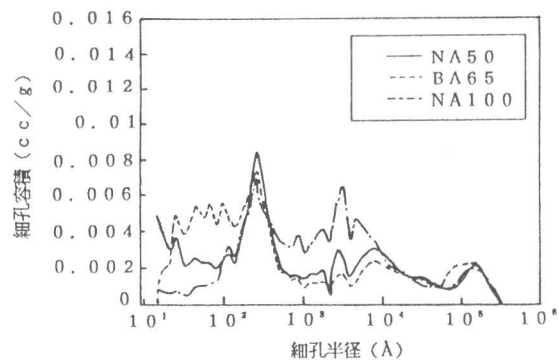


図-7 コンクリートの配合別の細孔径分布

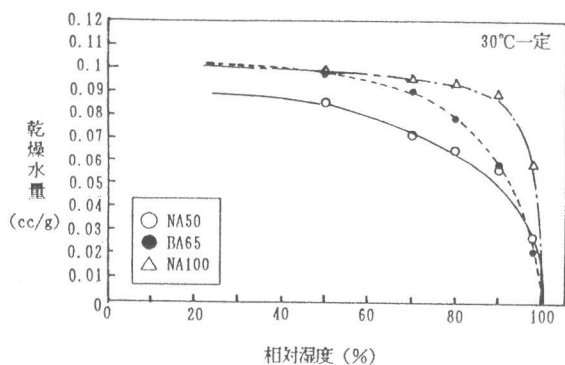


図-8 相対湿度と乾燥水量の関係

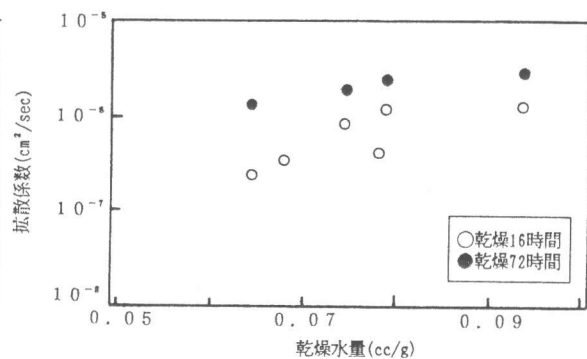


図-9 乾燥水量と拡散係数の関係

長い方が拡散係数は大きく、塩分が浸透しやすくなっていることが分かる。

6. まとめ

今回の実験の範囲で次の結論を得た。

- (1)塩分の浸透は外的要因として、乾燥時間、乾燥-塩水浸せき繰り返し回数、内的要因として、水セメント比、空気量、細孔径分布などに影響される。
- (2)ひずみの挙動から、乾燥-浸せきサイクルが進及び乾燥時間の増加に連れて、表面から奥行き方向に乾燥範囲が広がる。
- (3)コンクリートの空隙中が水分で満たされている場合には水液中の塩分の拡散(Diffusion)、乾燥して空洞になっている場合には塩水の流れを持った移流拡散(Penetration)となっており、後者の方が塩分の拡散係数は高くなる。
- (4)熱力学的な相変化とコンクリートの細孔径分布を組み合わせることにより、塩分の浸透に関する乾燥水量が算出でき、乾燥水量と塩分浸透は密接な関係となった。

コンクリートの耐塩害性は複雑な要因に支配されており、外的要因及び内的要因を評価した上でコンクリートの耐塩害性を総合的に表す指標値が望まれている。今回求めた乾燥水量、乾燥時間及びコンクリートの品質は塩分の浸透を直接的に表す要因と考えることができ、これらからコンクリートの耐塩害性を表す指標値を構築していきたい。

【参 考 文 献】

- [1] 川上英男：塩害における問題，建築の技術施工，No.1.1985，pp98～107
- [2] Florinda B. Coggins and Catherine W. French: Chloride distribution in Twenty-Year-Old Prestressed Bridge Girders, ACI Materials Journal, September-October, 1990
- [3] 村上祐治，山下英俊，坂本守，大津正康：コンクリートの微細構造に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，1991
- [4] 山下英俊，村上祐治，吉川弘道，田中典明：凍害を受けるコンクリートの凍結水量の算定方法と耐凍害指標値の提案，コンクリート工学年次論文報告集，1991
- [5] 坂本守，村上祐治，山下英俊，喜多達夫：凍害融解を受けるコンクリートの変形挙動に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，1991
- [6] 宮本幸始，熊谷浩二：塩分環境下におけるRC構造物の耐用年数評価についての一考察，土木学会第42回年次学術講演会，1987，pp150～151