

論文 モルタル及びコンクリートの中性化に影響を及ぼす透気係数に関する実験的研究

金武漢^{*1}・権寧璣^{*2}・朴宣圭^{*3}・姜錫杓^{*3}

要旨：コンクリート構造物の耐久性などを考える場合、コンクリートの中性化は鉄筋に対する防錆力を失なわせる極めて重要な現象の一つである。コンクリートの中性化には水セメント比、使用材料、単位セメント量、ポロシチー、施工精密度、仕上げ材の有無及び種類、環境条件などが影響を及ぼす。また、同様要因が影響を及ぼすモルタル及びコンクリートの透気係数はコンクリート構造物の中性化速度に密接な関係がある。本研究はモルタル及びコンクリートの透気係数と中性化速度との関係を実験的に分析・検討したものである。

キーワード：透気係数、中性化速度、総細孔量、水セメント比、仕上げ材

1. はじめに

コンクリートの中性化は経年的に現われる代表的な性能低下機構として知られており、材料的な側面だけでなく施工精密度及び環境要因によって大きく支配を受ける。特に、大気中の炭酸ガスの浸透によってコンクリートの中性化は鉄筋の発錆を誘発させ鉄筋コンクリート構造物の耐久性能を低下させることになり、コンクリートの中性化速度に関する研究は構造物の残余寿命予測及び適切な補修時期の算定のための耐久性設計の基礎として位置付けられている。^{1),2)}

コンクリートの中性化速度に及ぼす要因としては主に使用材料、水セメント比、単位セメント量、ポロシチー、施工精密度、仕上げ材の有無及び種類、環境条件等が挙げられる。なお、コンクリートの透気性は大気中の炭酸ガスの侵入速度とも高い相関があり、また、鉄筋に到達する酸素の量によって鉄筋腐食速

度が左右されるため中性化による劣化進行と密接な関係がある。また、耐久性向上のためにコンクリートの表面に使用する仕上げ材の透気性を明確に究明することは鉄筋コンクリート構造物の耐久性向上に重要である。

従って、本研究はシリーズ I ではモルタル及びコンクリートの中性化深さ、透気係数、総細孔量、圧縮強度に及ぼす水セメント比の影響を検討し、シリーズ II では水セメント比、仕上げ材有無及び種類によるコンクリートの中性化深さ、透気係数を比較・検討して、モルタル及びコンクリートの透気係数と中性化速度との関係を実験的に分析・検討したものである。

2. 実験計画及び方法

2.1 実験計画

本研究は表-1に示すように2つのシリーズで構成さ

表-1 実験計画

シリーズ	試験体	W/C (%)	仕上げ材種類	測定項目
I	・モルタル ・コンクリート	47	無処理	・中性化深さ (中性化促進 1, 2, 4, 8週) ・透気係数 (中性化促進 前, 1, 4, 8週) ・細孔容積 (中性化促進 前) ・圧縮強度 (中性化促進 前)
		55		
		60		
II	・コンクリート	47	・無処理	・中性化深さ (中性化促進 1, 2, 4, 8週) ・透気係数 (中性化促進 前, 1, 4, 8週)
		55	・ペイント1級	
		60	・ペイント2級	
			・モルタル*	

* 中性化深さの測定用の厚さ：9mm, 透気係数の測定用の厚さ：3mm

- * 1 大韓民国 忠南大学校 工科大学 建築工学科, 教授・工博 (正会員)
- * 2 大韓民国 双龍Engineering 安全技術部, 工博 (正会員)
- * 3 大韓民国 忠南大学校大学院 建築工学科, 博士課程

表-2 モルタルの調合

W/C (%)	重量 (g)*		
	水	セメント	細骨材
47	401	853	2560
55	451	820	2459
60	488	813	2438

*セメント：細骨材（重量比）= 1：3

れている。シリーズⅠの場合、水セメント比のモルタル及びコンクリートの透気係数と中性化速度への影響を把握するために水セメント比 47, 55, 60%のモルタル及びコンクリート試験体を製作して中性化促進試験を行なって、中性化深さ、透気係数、細孔容積及び圧縮強度を測定した。また、シリーズⅡの場合、仕上げ材の有無及び種類によるコンクリートの透気係数と中性化速度との関係を把握するために水セメント比 47, 55, 60%の3水準、仕上げ材の種類を無処理、ペイント1級、ペイント2級、モルタルの4水準で設定してコンクリート試験体を製作した後、中性化促進試験を行なって中性化深さと透気係数の測定を行なった。本実験のモルタル及びコンクリートの調合を各々表-2及び表-3に示す。

2.2 使用材料及び試験体の製作

本実験に使用した使用材料を表-4に示す。

モルタルの場合、中性化深さ及び圧縮強度の測定用の試験体は5×5×5cmの角柱供試体を利用して製作し、透気係数の測定用の試験体は厚さ3cmに切断した直径10cmのプラスチックの管を利用して製作した。

コンクリートの場合、中性化深さの測定用の試験体は7.5×10×40cmの角柱供試体を利用して製作し、養生終了後測定面を選定した後仕上げ処理を行い、残りの面はエポキシコーティングでシールして炭酸ガスの浸透を抑制した。コンクリート透気係数の測定用試験体は養生終了後図-1に示すように圧縮強度測定用のφ10×20cmの円柱型試験体の中央の一定部位を選定して、厚さ3cmに切断した後、仕上げ処理を行なった。

仕上げ材としては韓国のアパート外壁に主に使用されているペイントの2種類とモルタル仕上げを選定して使用した。ペイントの場合、表-5に示すように韓国の

表-3 コンクリートの調合及び練混ぜ性状

W/C (%)	H標スランブ (cm)	s/a (%)	単位重量 (kg/m ³)				スランブ (cm)	空気量 (%)
			水	セメント	細骨材	粗骨材		
47	18±2	46.4	193	412	792	919	18.5	2.5
55		48.1	193	349	846	916	19.5	2.6
60		49.0	193	323	873	912	17.0	2.4

表-4 使用材料の物理的性質

細骨材	・種類：川砂 ・比重：2.60
粗骨材	・種類：碎石 ・比重：2.62 ・最大寸法：20mm
セメント	・種類：普通ポルトランドセメント ・比重：3.15, 粉末度：3,200(cm ² /g)

表-5 ペイントの物理的性質

	比重	粘度	pH	揮発分	成分
ペイント1級	1.38	88	8.8~9.5	41%	アクリルエマルジョンタイプ
ペイント2級	1.40	87	8.8~9.5	46%	

KS M 5310に準じた水性ペイント1級と水性ペイント2級を選定して韓国の住宅建設仕様書に準じて塗布した。また、モルタル仕上げの場合、中性化深さの測定用は韓国の住宅建設仕様書に準じてモルタルの厚さを9mmにし、透気係数の測定用はモルタルの厚さを3mmにした。

2.3 測定項目及び測定方法

(1) 中性化深さ測定

試験体の製作1日後に脱型して材齢の4週間の標準養生を行ない、中性化促進試験の前養生として1週間の気乾養生を行なった。中性化試験は温度20℃、湿度50%、CO₂濃度5%の条件で促進試験を行い。

モルタルの中性化深さ測定の場合、炭酸ガスに全面暴露した試験体を割裂し、中央の破断面に1%のフェノールフタレイン溶液を噴霧した後、赤色に着色しない部分の表面からの深さを中性化深さとして測定した。

なお、コンクリートの中性化深さ測定の場合、圧縮強度試験機を利用して試験体を所定の厚さに割裂した後1%のフェノールフタレイン溶液を噴霧して赤色に着色しない部分の表面からの深さを中性化深さとして

測定した。特に、モルタル仕上げの場合中性化深さはモルタル仕上げの厚さを除いたコンクリートだけの中性化深さとして中性化深さを測定した後、測定面は炭酸ガスの浸透を抑制するためにエポキシコーティングでシールした。

(2) 透気係数測定

4週間の標準養生を行ない、透気係数用試験体を製作した後、含水率による透気係数の影響を考慮して質量がほぼ一定になるまで中性化促進試験の前養生として、温度20℃、相対湿度50%の恒温恒湿室内で1週間の気乾養生を行なった。

透気係数測定用の試験体は炭酸ガスの露出面(コンクリート試験体の場合仕上げ面)だけを中性化させるために残りの面は図-2に示すように炭酸ガスの浸透を抑制した。透気試験体は中性化深さ測定用の試験体と同じ方法で促進中性化を行い、所定の材齢に伴う透気係数の変化を測定した。

透気係数を求めるために図-3に示すような内部直径7cmのシリンダーに試験体を固定してシリコンでシールした後2kgf/cm²の圧縮空気を注入してメスシリンダーを利用した水中置換法により透気量を測定した。透気係数は測定した透気量の測定の結果から式(1)に準じて透気係数を求めた。^{3),4),5)}

$$K = \frac{2 P_2 h \gamma}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \quad (1)$$

ここに K : 透気係数 (cm/sec)

P₁ : 載荷圧力 (kgf/cm²)

P₂ : 大気圧 (1.0332kgf/cm²)

h : 試験体の厚さ (cm)

Q : 透気量 (cm³/sec)

A : 透気面積 (38.465cm²)

γ : 気体の単位容積重量
(空気 : 1.205 × 10⁻⁶kgf/cm³)

(3) 細孔容積測定

モルタル及びコンクリートの細孔容積の測定は中性化促進前に試験体の表面から試料(コンクリートの場合粗骨材を除去した試料)を採取して、100℃の乾燥機で24時間乾燥させた後水銀圧入法によりポロシメーターを利用して細孔容積を測定した。

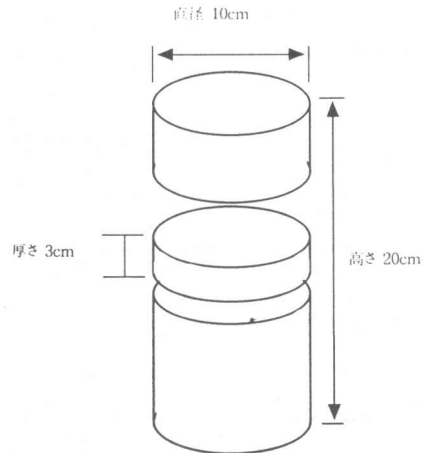


図-1 コンクリート透気係数の試験体の形状

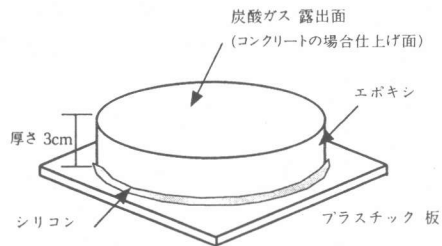


図-2 促進中性化試験時の透気係数試験体

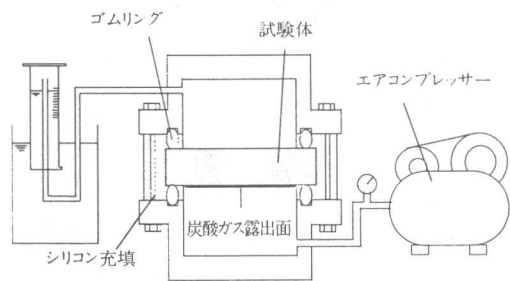


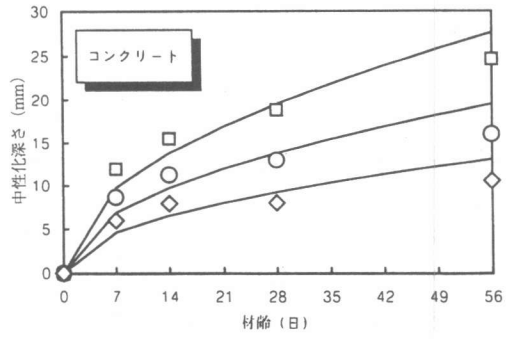
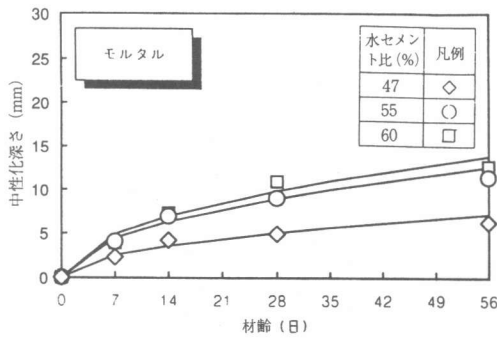
図-3 透気係数の測定装置

3. 実験結果の分析及び検討

3.1 水セメント比のモルタル及びコンクリートの中性化速度への影響分析及び検討

図-4は水セメント比によるモルタル及びコンクリートの材齢と中性化深さを示したもので、モルタルよりコンクリートの中性化深さが大きいことが分かり、水セメント比によって多少の差異はあるが、同じ水セメント比であればコンクリートがモルタルに比べて約1.5~2.0倍程度中性化が速く進行している。

図-5はモルタル及びコンクリートの水セメント比と圧



<モルタル>

<コンクリート>

図-4 水セメント比によるモルタル及びコンクリートの材齢と中性化深さ

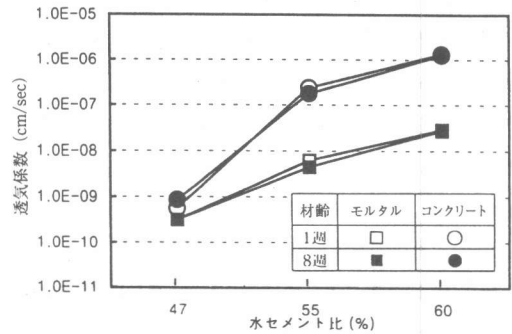
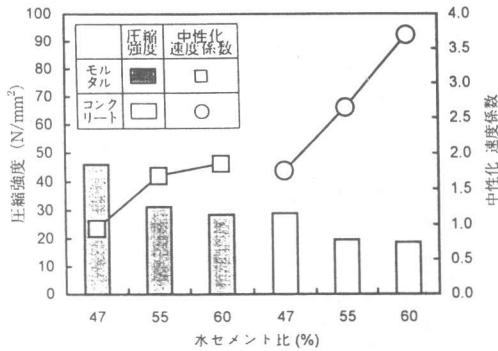


図-5 モルタル及びコンクリートの水セメント比と圧縮強度及び中性化速度係数

図-6 水セメント比によるモルタル及びコンクリートの透気係数

縮強度及び中性化速度係数を示したもので、同じ水セメント比の場合、コンクリートの圧縮強度はモルタルと比較して相対的に小さくなり、コンクリートの中性化速度係数はモルタルより大きく現われている。これはコンクリートの単位容積あたりセメント量がモルタルに比べ減少し、骨材とペーストの内部境界面積が増加するためであると考えられる。⁶⁾ なお、モルタルとコンクリート共に圧縮強度が増加するほど中性化速度係数は減少していることを示している。

係数はモルタルの透気係数より相対的に高くなって、その差は水セメント比が高くなるほど大きくなる傾向を示している。水セメント比47%の場合、モルタルとコンクリートの透気係数は材齢8週において各々 3.16×10^{-10} cm/secと 3.63×10^{-10} cm/secで類似な値を示しているが、水セメント比55%及び60%ではモルタルとコンクリートの透気係数は大きな差異を示している。

3.2 水セメント比のモルタル及びコンクリートの透気係数への影響分析及び検討

一方、材齢による透気係数はモルタルとコンクリート共に中性化促進1週及び8週で類似な値を示しており材齢の増加による透気係数の変化は小さいと考えられる。

図-6は中性化促進材齢1週及び8週でのモルタル及びコンクリートの透気係数を示したもので、モルタルとコンクリート共に水セメント比が小さくなるほど透気係数は減少する傾向を見せている。これは水セメント比が小さくなるほどモルタル及びコンクリートの組織が緻密になるためと考えられる。

3.3 モルタル及びコンクリートの水セメント比と細孔量及び透気係数の分析及び検討

なお、同一水セメント比の場合、コンクリートの透気

図-7は中性化促進前のモルタル及びコンクリートの水セメント比と細孔直径75~7500nmの細孔量及び透気係数の関係を示したもので、細孔直径3~35000nmの総細孔量なかで中性化速度と密接な関聯があるものと報告^{7),8)}されている細孔直径75~7500nmの細孔量はモルタル及びコンクリート共に水セメント比が低くな

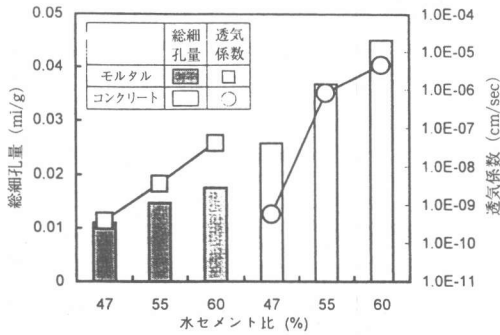


図-7 モルタル及びコンクリートの水セメント比と細孔量及び透気係数（細孔直径75～7500nm）

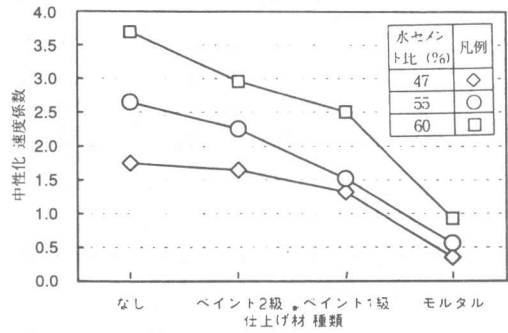


図-8 水セメント及び仕上げ材種類によるコンクリートの中性化速度

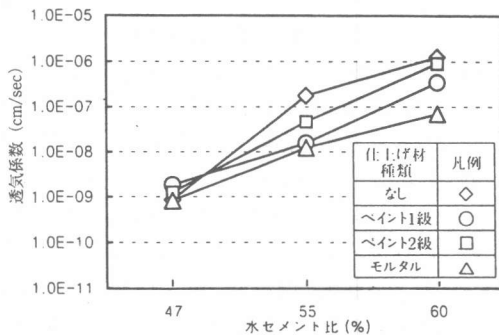


図-9 水セメント及び仕上げ材種類によるコンクリートの透気係数

るほど減少している。

このように水セメント比による細孔直径75～7500nmの細孔量の変化は水セメント比による透気係数の変化と類似した傾向を示しており、モルタル及びコンクリートの透気係数は空隙率だけでなく空隙の直径に密接な関係があるとの既存の報告⁴⁾と一致している。

3.4 水セメント比及び仕上げ材種類によるコンクリートの中性化速度係数の分析及び検討

図-8は水セメント比及び仕上げ材種類によるコンクリートの中性化速度係数を示したもので、ペイント仕上げの場合、仕上げ材無処理と比べてペイント1級の場合25～42%、ペイント2級の場合6～20%で中性化速度係数が小さくなっており、ペイント1級はペイント2級に比べて約2倍程度中性化抑制効果が大きく現われている。モルタル仕上げの場合、仕上げ材無処理と比べて75～80%で中性化速度係数が小さくなり、水セメント比による差は相対的に小さく現われた。

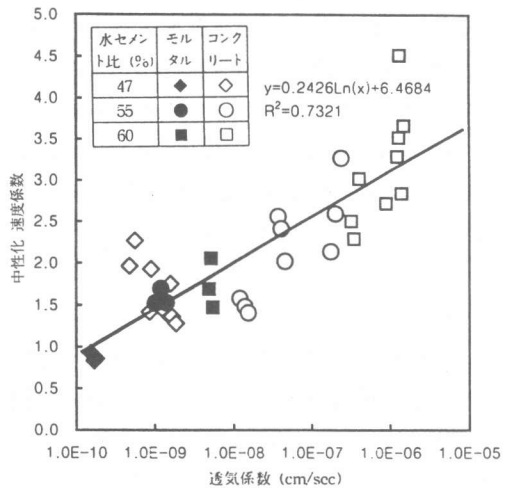


図-10 水セメント比によるモルタル及びコンクリートの透気係数と中性化速度との相関関係

なお、同一仕上げ材を用いた場合中性化速度係数は水セメント比が低いほど小さくなっており、水セメント比47%に比べて水セメント比55%及び60%の場合、仕上げ材使用によって中性化速度係数低下の幅が大きく現われている。これよりコンクリート耐久性確保の観点から仕上げ材使用は高い水セメント比において相対的に効果が大きいと考えられる。

3.5 水セメント比及び仕上げ材種類のコンクリートの透気係数への影響分析及び検討

図-9は水セメント比及び仕上げ材種類による中性化促進材齢8週のコンクリート透気係数を示したもので、水セメント比及び仕上げ材種類によるコンクリートの中性化速度係数の結果と同様に水セメント比が低いほどコンクリートの透気係数は小さくなる傾向を示している。

さらに、仕上げ材使用による透気係数の低下効果は水セメント比が高いほど大きく現われている。これは水セメント比47%の場合、コンクリートの透気性能は水セメント比55%、60%と比べて、相対的に仕上げ材の影響よりコンクリート自身の水密性が支配要因であるためと考えられる。

3.6 透気係数と中性化速度係数との相関関係の分析及び検討

図-10はモルタル及びコンクリートの透気係数と中性化速度係数との相関関係を示したもので、透気係数が増加するほど中性化速度係数が増加する傾向が現われ、透気係数と中性化速度係数は比較的に有効な相関関係を持っていることを現われている。したがって、モルタル及びコンクリートの水セメント比、仕上げ材の有無及び種類等の中性化に及ぼす諸要因によって影響される、透気係数を要因とした中性化速度の推定が可能であると考えられる。

4. まとめ

モルタル及びコンクリートの透気係数と中性化速度との関係を実験的に分析・検討した本研究の範囲で結果をまとめると以下のようである。

- 1) 同じ水セメント比の場合、単位容積あたりセメント量の減少および骨材とペーストの内部境界面積の増加によりコンクリートの圧縮強度はモルタルに比べて小さくなり、中性化速度係数および透気係数は大きくなると考えられる。
- 2) ペイント仕上げの場合ペイント1級はペイント2級と比べて約2倍程度中性化抑制効果が大きくなり、モルタル仕上げの場合仕上げ材無処理と比べて75~80%で中性化抑制効果が大きくなり、同一仕上げ材を用いた場合、高い水セメント比において仕上げ材使用により中性化抑制効果および透気係数の低下効果が大きくなった。
- 3) 透気係数と中性化速度との関係はモルタルおよびコンクリートの水セメント比、仕上げ材の種類、圧縮強度にかかわらず良好な相関関係を示しており、透気係数を要因にして中性化速度を推定する可能性があると考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造建築物の耐久性調査・診断および補修指針(案)・同解説, 1997. pp.15~28
- 2) コンクリート構造物の寿命予測と耐久性設計に関するシンポジウム, 日本コンクリート工学協会, 昭和63年. pp.63~70
- 3) 笠井芳夫他, セメントモルタル板の透気性試験, セメント技術年報36, 昭和57年. pp.440~443
- 4) 千葉一雄他, モルタルコンクリートの透気性と透気性が中性化に及ぼす影響, セメント技術年報41, 昭和62年. pp.347~350
- 5) モルタルの透気性に関する試験, セメント・コンクリート No.436, 1983. pp.8~15
- 6) 鄭載東他, 中性化速度に及ぼすコンクリートの調合及び細孔構造の影響に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, 1990. 1. pp.61~73
- 7) 塚山隆一, 中性化したコンクリートのポロシチー, セメント・コンクリート, No.274, 1969. pp.28~33
- 8) 河野俊一他, セメント硬化体の細孔経の透気性による評価に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第20巻, 第2号, 1998. pp.745~750.
- 9) 岸谷孝一他, コンクリート構造物の耐久性シリーズ 一中性化一, 技報堂出版, 1988. pp.21~40
- 10) Kim Moo-Han et al., An experimental study on the alkali-recovery performance of impregnating alkalization agent for deteriorated concrete by carbonation, Proceeding of AIK, Vol.19, No.2, 1999. 5. pp.473~476
- 11) Kim Moo-Han et al., Development of application technique of lifetime Prediction for concrete structure considering of carbonation and steel corrosion, Proceeding of KCI, Vol.8, No.2, 1996. 11. pp.218~224
- 12) Kim M, H et al, An experimental study on the carbonation effected by the water cement ratio and kinds of finishing materials, Proceeding of KCI, Vol.11, No.2, 1999. 11 pp.667~670.