

論文 モルタル下地ひび割れ部の中性化に及ぼす建築仕上材のCO₂透過性能の検討

具罔諱*1・宮内博之*2・金圭庸*2・金武漢*2

要旨: 本研究ではモルタル下地ひび割れ部に適用した建築仕上材の中性化抑制性能を検討した。試験要因と水準について、モルタル下地のひび割れ幅はひび割れなし、0.3、0.5及び1.0mmとし、建築仕上材にはウレタンゴム系及びアクリルゴム系の2種類を使用し、中性化速度係数及び仕上材のCO₂透過係数を評価した。その結果、モルタル健全部だけでなくひび割れ部に対しても建築仕上材は中性化抑制性能があることを定量的に確認した。今後、コンクリートおよびモルタルの中性化を考慮した耐久性性能設計において、鉄筋コンクリート造のひび割れ部における仕上材のCO₂透過係数について検討する必要があると判断された。

キーワード: 耐久性能設計, モルタル下地ひび割れ部, 中性化, 建築仕上材, CO₂透過係数

1. はじめに

一般的にコンクリート及びモルタルの中性化に関する耐久性能設計では、かぶり厚さまでの中性化限界深さに対して、環境係数などを考慮して安全性を確保している。しかし、コンクリートの調合設計・施工段階でひび割れが制御されることを前提にしており、実際にひび割れが発生した際の耐久性への影響までは十分に検討されていない。

ここで図-1に示すコンクリートおよびモルタルのひび割れを考慮した耐久性能設計プロセスを検討し、その中で建築仕上材が耐久性を向上させる方法としてどの程度の効果があるかの検討を試みた。

そこで、本研究では建築仕上材のCO₂透過係数評価方法を提案し、モルタル下地ひび割れ部の中性化と仕上材のCO₂透過係数との関係を定量的に分析した。そして、モルタル下地ひび割れにおいて、中性化に対する耐久性確保をするための基礎的データを提示した。

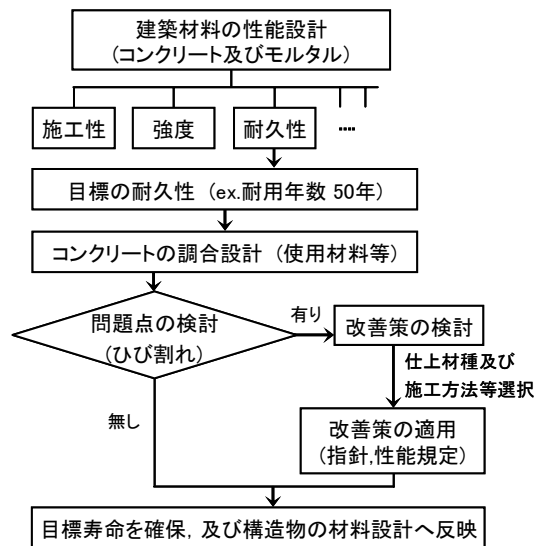


図-1 コンクリートとモルタルのひび割れを考慮した耐久性能設計のプロセス

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画

表-1に本研究の実験計画を示す。モルタル試験体寸法はφ100×100mmとした。モルタルの中性化の影響を検討するため、ひび割れの有無とひび割れ幅0.3、0.5及び1.0mmを設定した。また、中性化の抑制性能を評価するため、仕上材なし及び仕上材としてウレタン塗膜系防水材料及びアクリルエマルション系塗膜防水材料を用いた条件の3種類とした。

モルタル下地の中性化測定箇所は、ひび割れのない健全部とひび割れ部の中性化深さ及びひび割れ部における幅方向の中性化を測定した。また、仕上材が塗布され

表-1 実験計画

試験体の条件			測定項目
試験体寸法 (mm)	仕上材の種類	ひび割れ幅 (mm)	
φ100×100	1)仕上材なし 2)ウレタン系 3)アクリル系	1)なし 2)0.3以下 3)0.5以下 4)1.0以下	1)モルタルの中性化(mm) 2)仕上材のCO ₂ 透過度(mm ² /day)

表-2 モルタルの調合

W/C (%)	C : S	単 位 量 (kg/m ³)		
		W	C	S
61	1 : 3	293	481	1444

*1 大韓民国 忠南大学校 大学院 建築工学科 博士課程 (正会員)

*2 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 教授 工博 (正会員)

表-3 使用材料の種類と特性

種類	物理的性質
セメント	普通ポルトランドセメント 密度:3.15g/cm ³ ,粉末度:3,770cm ² /g
細骨材	海砂, 密度:2.54g/cm ³ F.M.: 3.05, 吸水率: 1.01%
仕上材	ウレタン系 引張強度: 4.3N/mm ² , 伸び: 550%
	アクリル系 引張強度: 2.5N/mm ² , 伸び: 330%

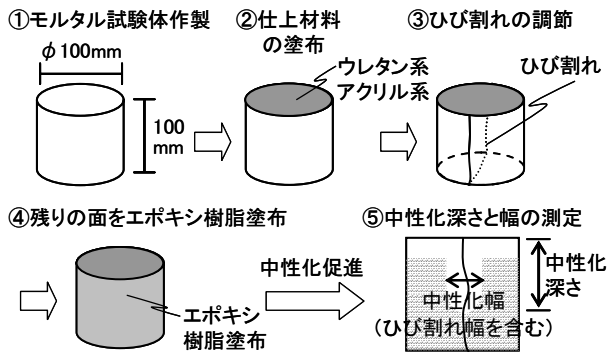


図-2 試験体の作製



図-3 モルタル試験体のひび割れ発生誘導状況

たモルタル下地にひび割れが発生した場合、仕上材は引張され膜厚さが薄くなり、CO₂透過係数が大きくなると予想される。そこで、モルタル下地ひび割れ部のウレタン及びアクリル系仕上材の厚さ変化によるCO₂透過係数を求め、モルタル下地の中性化速度係数と比較・分析した。

2.2 モルタルの調合および使用材料

表-2 と表-3 にモルタルの調合と使用材料の種類及び特性を示す。本研究で使用した建築仕上材は市販されているウレタン及びアクリル系防水材である。施工方法としてモルタル下地にプライマー処理後、膜厚さ 2mm を基準として防水材及びトップコートを塗布した。

2.3 試験体の作製および試験方法

試験体の作製方法を以下に示す。下地用モルタル試験体を材齢 4 週まで水中養生した後、材齢 8 週まで湿度 60 ± 5%、温度 20 ± 2°C の恒温恒湿室内で養生を行った。次に、図-2 に示すように養生が完了したモルタル下地に仕上材を塗布した。最後に、図-3 に示すように目標ひび割れ幅を誘導した後、仕上材が塗布されていない面をエポキシ樹脂で塗布し、アルミニウムテープで完全密封



図-4 CO₂透過装置



図-5 CO₂センサー

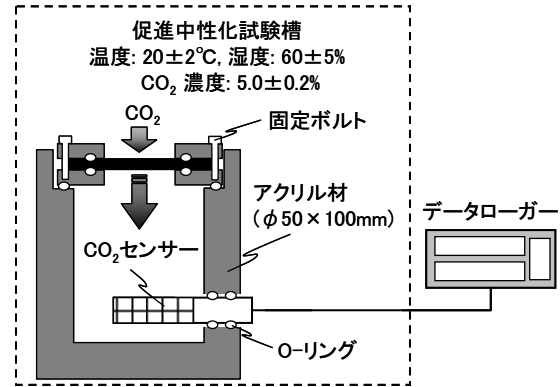


図-6 CO₂透過試験の模式図

した。

モルタルの中性化評価は KS F 2584 及び KS F 2596 に準じて行った。また、モルタル下地ひび割れ部の中性化による耐久性低下は、ひび割れ部を中心に深さ方向のみならず、幅方向でも生じると考えられる。そこで、本研究では一般建築構造物のかぶり厚さを考慮して、表面から深さ 30mm 地点におけるひび割れ幅方向の中性化幅も測定した。なお、モルタル健全部及びひび割れ部に対する中性化速度係数は次の式(1)に準じて算出した。

$$x = A\sqrt{t} \quad (1)$$

ここに、x : 中性化深さ及び中性化幅(mm)

A : 中性化速度係数(mm/day^{0.5})

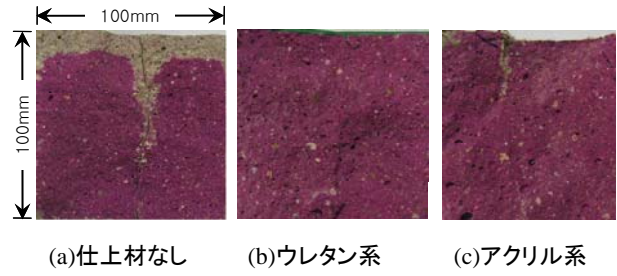
t : 材齢(日)

また、仕上材の中性化抑制効果に影響を及ぼす CO₂ 透過係数について検討した。本研究では仕上材を塗布したモルタル試験体の中性化を調べるため、図-4 及び図-5 に示す仕上材単体の CO₂ 透過度を測定するための装置を作製した。CO₂ 透過度の測定方法は、図-6 に示すように湿度 60 ± 5%、温度 20 ± 2°C、CO₂ 濃度 5.0 ± 0.2% の中性化試験槽内で CO₂ 透過装置を設置し、装置内部の CO₂ 濃度を CO₂ センサーを用いて測定した。

また、CO₂ 透過係数は試験体の大きさ、仕上材の面積、中性化試験槽内の CO₂ 濃度等により影響を受ける。そこで本研究では以下の式(2)の計算式を用いて、CO₂ 透過係数を算出した。

$$P = \frac{Q \times T_m \times V_s}{(Q_c - Q) \times A \times t} \quad (2)$$

ここに、 P ：CO₂透過係数(mm²/day)
 T_m ：CO₂濃度(%)
 V_s ：仕上材の厚さ(mm)
 Q_c ：中性化試験槽内のCO₂濃度(%)
 A ：仕上材の面積(mm²)
 t ：材齢(day)



(a)仕上材なし (b)ウレタン系 (c)アクリル系

図-7 モルタルひび割れ部の中性化の状況

(ひび割れ幅 0.3mm, 材齢 8 週)

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ及び仕上材塗布によるモルタルの中性化

図-7 にモルタル下地ひび割れ部の中性化状況の一例を示す。目視観察の結果、仕上材がない試験体の場合、ひび割れ部を中心にV字形状に中性化が進行し、同時に健全部でも中性化が確認された。一方、仕上材を塗布した試験体の場合、ひび割れの有無に関わらず良好な中性化抑制効果が観察された。

図-8 に下地にひび割れのない健全な試験体の中性化深さの結果を示す。仕上材を塗布しない場合、試験開始後直ちに中性化反応が始まり、材齢 13 週目では表面から 15.8mm まで中性化が進行した。一方、ウレタン及びアクリル系仕上材を塗布した試験体の場合、材齢 13 週

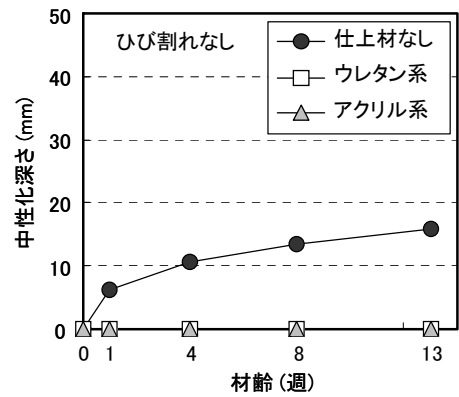


図-8 仕上材によるモルタル健全部の中性化深さ

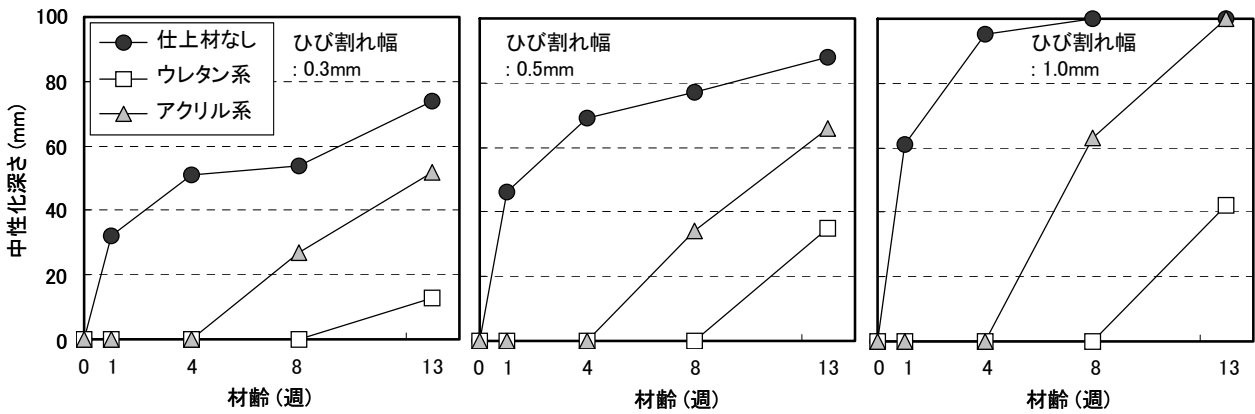


図-9 仕上材によるモルタルひび割れ部の中性化深さ

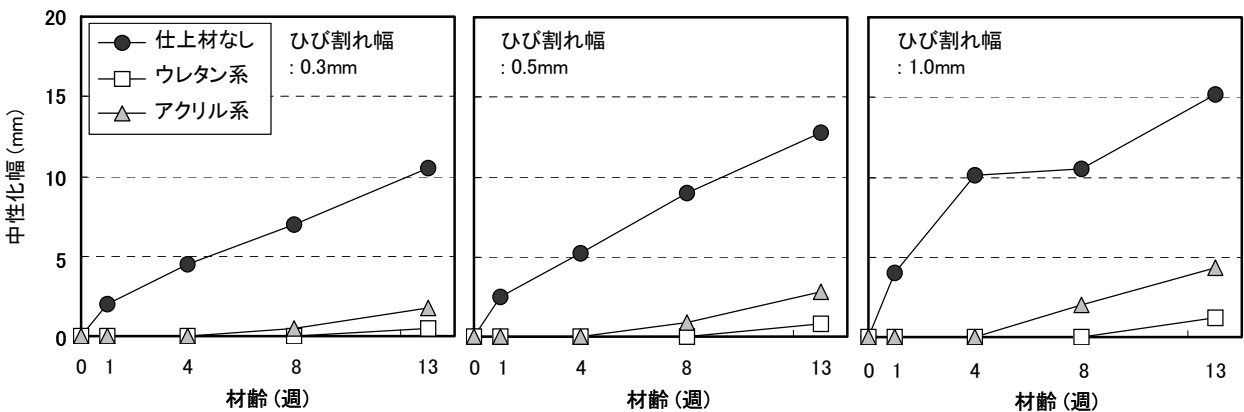


図-10 仕上材によるモルタルひび割れ部の中性化幅

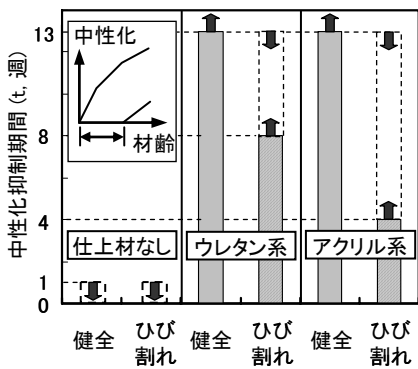


図-11 仕上材による中性化抑制期間

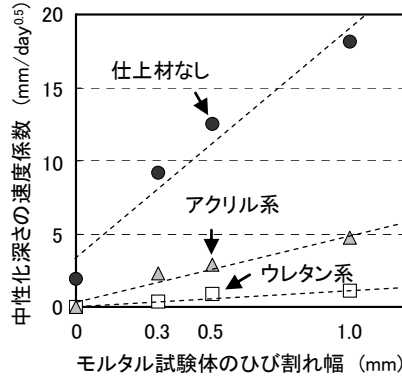


図-12 中性化深さの速度係数

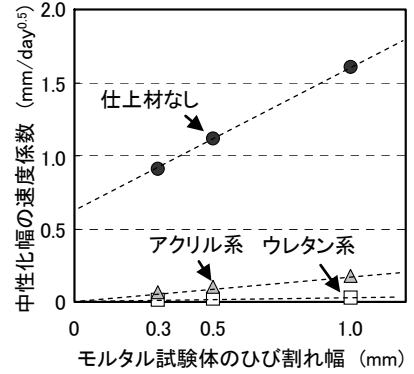


図-13 中性化幅の速度係数

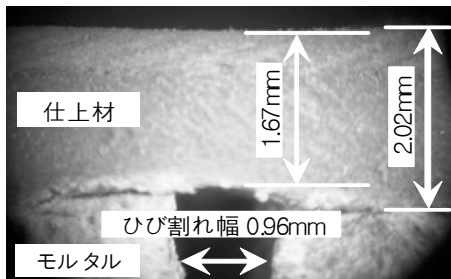


図-14 ひび割れ発生による仕上材厚さの変化

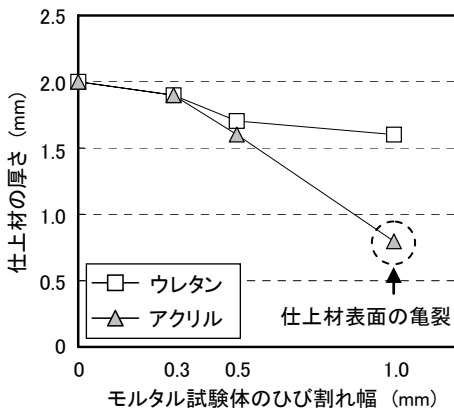


図-15 下地ひび割れ幅に対する仕上材厚さの変化

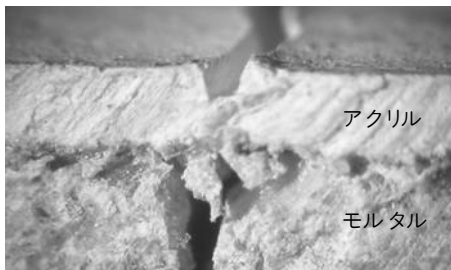


図-16 仕上材の表面亀裂状態

まで中性化が進行せず、優れた中性化抑制性能を確認できた。

図-9及び図-10に下地ひび割れ部における中性化深さと幅の測定結果を示す。仕上材を塗布しない場合、モルタル下地ひび割れ部における中性化深さが、ひび割れ

のない場合に比べて4~9倍大きく、ひび割れ幅が大きくなるほどその差は顕著な傾向を示した。

また、ひび割れ幅の測定結果から、ひび割れ内部で中性化が進行した場合であっても、仕上材を塗布した試験体でのひび割れ部の中性化幅は、仕上材なしの試験体に比べて10~25%まで低減した。これより、下地ひび割れ部の仕上材の中性化抑制性能について、中性化幅からも確認することができた。

図-11に各試験体における中性化抑制期間の結果を示す。仕上材なしの試験体の場合、中性化試験槽内で暴露された直後から中性化が進行し、モルタルの内部に急激に拡散する。一方、モルタル下地ひび割れ部に対する中性化抑制期間は、ウレタン系仕上材では8~13週間、アクリル系仕上材では4~8週間であった。

下地の中性化は、仕上材のCO₂透過度に大きく依存する。これは、仕上材がある試験体の場合、仕上材がない試験体に比べて、単位時間当たりのモルタル下地への透過度が低くなるからである。これより、CO₂とモルタルが十分に中性化反応をしてフェノールフタレインによる中性化を確認できるまでの時間が長くなることになるため、結果的に中性化を遅延化させる要因となる。

このCO₂透過度は、仕上材の条件、例えば仕上材の種類や厚さ等の基本的性質、或いは仕上材の劣化度合いに依存する。また、モルタル下地ひび割れの大きさによってもCO₂透過度は異なる。

図-12及び13に、モルタル下地のひび割れ幅及び仕上材の有無による中性化深さと幅の速度係数を導出した結果を示す。仕上材の有無に関わらず、すべての試験体の中性化深さと幅の速度係数は、モルタル下地ひび割れ幅の大きさに比例して大きくなった。また、中性化深さの速度係数は、仕上材なしの試験体に比べて仕上材を塗布することによって5~25%まで低下した。このように中性化抑制効果は中性化幅の速度係数でも確認することができた。

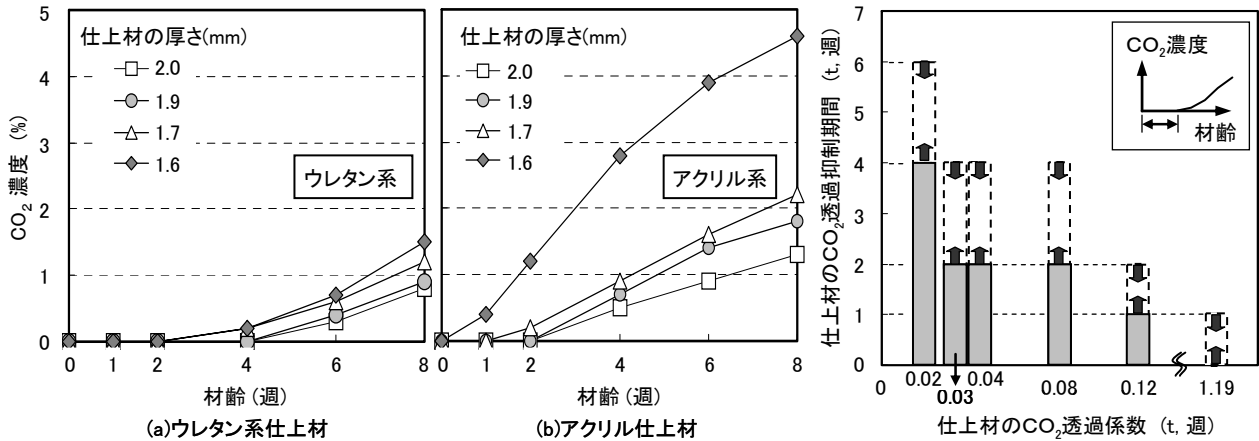


図-17 仕上材厚さによる透過試験装置内部のCO₂濃度

図-18 CO₂透過係数とCO₂透過抑制期間の関係

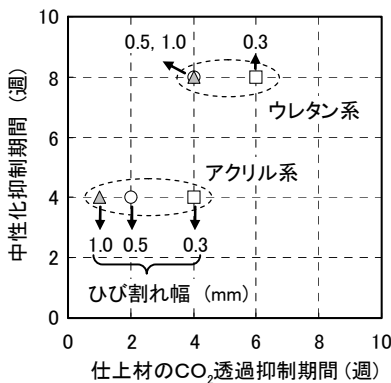


図-19 モルタルの中性化抑制期間と仕上材のCO₂透過抑制期間の比較

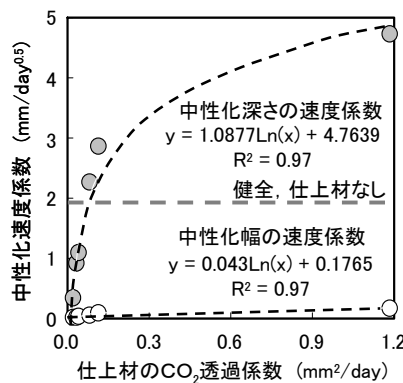


図-20 仕上材のCO₂透過係数と中性化速度係数の関係

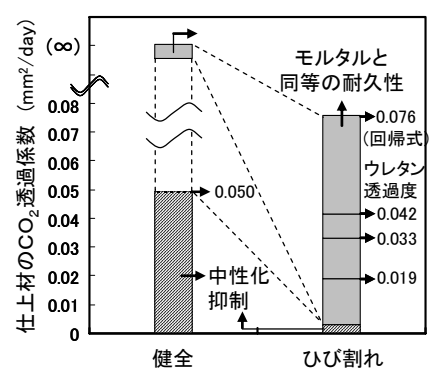


図-21 下地の性能確保に必要な仕上材のCO₂透過係数

表-4 仕上材の厚さによるCO₂透過係数

ひび割れ幅 (mm)	ウレタン系		アクリル系	
	厚さ (mm)	透過係数 (mm ² /day)	厚さ (mm)	透過係数 (mm ² /day)
なし	2.0	0.016	2.0	0.049
0.3	1.9	0.019	1.9	0.080
0.5	1.7	0.033	1.6	0.115
1.0	1.6	0.042	0.8	1.185

3.2 モルタル下地ひび割れ部の仕上材厚さを考慮したCO₂透過係数

仕上材が塗布された状態でモルタル下地にひび割れが発生した場合、図-14に示すようにひび割れ上部の仕上材は引張を受け断面厚さが薄くなる。これは結果的にCO₂透過性能を低下させることになる。そこで、本研究ではモルタルひび割れ部の中性化に影響を及ぼす仕上材の厚さ変化を考慮してCO₂透過係数を導出した。

図-15にウレタン及びアクリル系仕上材を塗布した試験体に対して、モルタルに所定のひび割れを発生させた時の断面厚さ変化の結果を示す。モルタル下地のひび

割れ幅が大きくなるに従い、仕上材の厚さは徐々に薄くなる傾向を示した。特にアクリル系仕上材について、下地ひび割れ幅を1.0mmとした場合、図-16に示すように仕上材表面に亀裂が発生した。

図-17にCO₂透過試験による試験装置内部のCO₂濃度の結果を示す。仕上材厚さが薄くなるほどCO₂濃度が増加し、アクリル系仕上材の方がウレタン系仕上材に比べて、同じ厚さの条件で1.5~3.0倍早く濃度が増加した。

表-4にCO₂濃度に対して換算したCO₂透過係数の結果を示す。仕上材の厚さが薄くなるに従いCO₂透過係数は増加した。また、仕上材厚さが等価の条件におけるウレタン系仕上材のCO₂透過係数は、アクリル系仕上材に対して23~32%の水準となった。

図-18にCO₂透過係数とCO₂透過抑制期間の関係を示す。本研究の範囲では、CO₂透過係数が0.02mm²/day以下の場合、本実験のCO₂濃度条件下でCO₂の透過を4週間以上抑制することが可能であると算定された。また、CO₂透過係数が0.12mm²/day以上の場合では、本実験のCO₂濃度条件下でCO₂透過抑制期間が1~2週間まで低下した。

3.3 仕上材の CO₂ 透過係数とモルタル下地ひび割れ部の中性化との関係

図-19 に中性化抑制期間と仕上材の CO₂ 透過抑制期間を比較した結果を示す。本研究の範囲で、下地ひび割れ幅が等しいモルタルに対して、ウレタン系仕上材はアクリル系仕上材より優れた CO₂ 透過抑制性能を示した。また、モルタルの中性化抑制期間は、ひび割れ内部の CO₂ 濃度の差と中性化反応時間の要因により、仕上材の CO₂ 透過抑制期間より長くなった。

図-20 に仕上材の CO₂ 透過係数とモルタル下地の中性化速度係数との関係を示す。仕上材の種類に関わらず、仕上材の CO₂ 透過係数が増加するに従い、モルタルの中性化速度係数も大きくなった。

以上の関係から下地ひび割れ幅 0.3~1.0mm の条件で、健全なモルタル下地と等しい透過性能を確保するために必要な仕上材の CO₂ 透過係数は、図-21 中に示す回帰式より求めた結果から、0.076mm²/day と算定された。

3.4 モルタルひび割れ部の耐久性向上に要求される仕上材の透過性能

中性化の評価をする際に、コンクリートまたはモルタルの耐久性設計は、ひび割れのない健全な下地の中性化速度係数を基準として耐用年数を算定することになっている。しかし、図-1 に示すように構造物にひび割れが発生する場合、本研究の結果のように耐久性が急激に低下するため、仕上材の性能を考慮することで耐久性を確保する方法がある。

ここで、設計段階で下地ひび割れの影響を考慮した場合、構造体の目標性能を確保するための方法の一つとして、仕上材の保護効果について考察してみると、本研究の範囲では下地ひび割れ幅 0.3~1.0mm に対して、CO₂ 透過係数が 0.076mm²/day 以下の性能を持つ仕上材を用いた場合、設計した耐久性を確保できると予想される。一方、健全なモルタル下地に対しては、0.050mm²/day 以下の CO₂ 透過係数を持つ仕上材は、非常に有効な中性化抑制性能を持つため、結果的に下地の耐久性を向上させることができると期待される。

4. まとめ

本研究ではモルタル下地のひび割れ部に対する仕上材の中性化抑制性能を定量的に示した。その結果を要約すると以下の通りである。

- (1) 仕上材の中性化抑制性能を評価する上で、下地健全部とひび割れ部の部位を問わず、モルタル下地の中性化幅及び中性化速度係数が有効な評価尺度となることを示した。
- (2) 仕上材の中性化抑制効果はひび割れ幅が大きくなるほど低下した。これはモルタル下地ひび割れ部の仕

上材の厚さが薄くなるほど、CO₂ 遮断性能が低下するためであると考えられる。

- (3) 仕上材の CO₂ 透過係数は、モルタル下地ひび割れ部の中性化速度係数と密接な関係がある。モルタルのひび割れ幅 0.3~1.0mm の範囲では、0.076mm²/day 以下の CO₂ 透過係数を持つ仕上材を用いることで、下地の目標耐久性能を確保できる可能性があるとして予想された。
- (4) 今後、モルタル及びコンクリートの耐久性設計をする上で、中性化に対する仕上材の CO₂ 透過性能も含めた総合的な設計の提案と、下地ひび割れ部における仕上材の保護効果の詳細な検討が必要であると考えられた。

謝辞

本論文は2009年度政府(教育科学技術部)の財源による韓国研究財団の支援を受けて遂行された研究(KRF-2009-0069919)であり、研究者の一部は2段階 BK21 事業の支援を受けました。

参考文献

- 1) Kobayashi, K. and Uno, Y., "Mechanism of Carbonation of Concrete, Concrete library of JSCE, No.16, pp.139~151, 1990
- 2) Glasser, F. P., Marchand, J., and Samson, E., Durability of Concrete-Degradation Phenomena Involving Detrimental Chemical Reactions, Cement and Concrete Research, 38(2), pp. 226~246, 2008
- 3) Castellote, M. and Andrade, C., Modelling the Carbonation of Cementitious Matrixes by Means of the Unreacted-core Model, UR-CORE, Cement and Concrete Research, 38(12), pp. 1374~1384, 2008
- 4) 塚越雅幸, 田中享二, 塗膜防水層下のコンクリートひび割れ部分の中性化, 日本建築学会構造系論文集 [606], pp.43~50, 2006
- 5) 水上 翔太, 西村 次男, 加藤 佳孝, 勝木 太, ひび割れが中性化進行に及ぼす影響に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, 32(1), 2010
- 6) 福島敏夫: コンクリートの中性化進行の理論的予測法と数値解析 その 1 鉄筋コンクリート構造物外壁の耐久性予測法に関する研究; 日本建築学会構造系論文報告集、第 428 号、pp1~15,1991.8
- 7) 長井宏憲、兼松学、野口貴文、友澤史紀: 遺伝的アルゴリズムによる RC 構造物の補修・改修最適化問題に関する研究 pp.457-462, コンクリート工学年次論文集 Vol.22.No.1.2000