仕上材の二酸化炭素透過性と透湿性がコンクリートの中性化へ与える影響

INFLUENCE OF CARBON DIOXIDE AND MOISTURE PERMEABILITY OF COATING MATERIALS ON CARBONATION OF CONCRETE

川村康晴 — * 1 本橋健司 — * 2

Yasuharu KAWAMURA — * 1 Kenji MOTOHASHI — * 2

キーワード：
塗料, 仕上塗材, 二酸化炭素透過性, 透湿性, 促進中性化試験

Keywords:
Paints, Coating materials, Carbon dioxide permeability, Moisture permeability, Accelerated carbonation test

Influence of carbon dioxide permeability and moisture permeability of coating materials on carbonation depth of substrate concrete was discussed by 2 series of accelerated carbonation tests. Moisture permeability shows higher correlation than carbon dioxide permeability. Accordingly, moisture change in concrete was monitored in accelerated carbonation test in this study. It was found that water generated by carbonation reaction of concrete raise moisture content of the substrate concrete. Consequently, this increase of moisture content strongly affects the carbonation depths of concrete.

In conclusion, moisture permeability has high correlation between carbonation depth, and which is due to generation of water by carbonation reaction in the accelerated carbonation test.

1. はじめに

塗料及び建築用仕上塗材(以下、仕上材)の製品は多種・多様あり、それぞれの材料規格・分類における中性化抑制効果の評価が不十分な現状では、製品ごとの中性化抑制効果の評価が必要である。

これまでも仕上材の中性化抑制効果を効率的に評価する方法は種々検討されている。コンクリートの促進中性化試験に準じた方法^{1)~3)}や仕上材の透湿性を評価することで中性化抑制効果を予測する方法^{4),5)}などが報告されている。

筆者らは、仕上材の中性化抑制効果を予測するため、コンクリートの中性化に直接影響を与えるであろう、仕上材の二酸化炭素(以下CO₂)透過性の評価方法を検討してきた。短期間でかつ多様な形状の材料を評価できる方法としてボックス法の提案を行っている⁶⁾。

既往の報告では、中性化抑制効果は仕上材の透気性、透湿性^{4),7)}との相関が指摘されているが、CO₂透過性との相関を確認した報告例は少ない。

本報では、2シリーズ行った促進中性化試験の検討結果を報告する。シリーズ1として、仕上材のCO₂透過性及び透湿性がコンクリートの促進中性化試験における仕上材の中性化抑制効果へ与える影響を確認した。検討の結果、中性化の抑制効果は仕上材の透湿性の影響を受けることが確認された。そこで、シリーズ2として、再度、促進試験中のコンクリートの含水率変化に着目し実験を行った。仕上材の透湿性とコンクリートの含水率との関係を明確にし、仕上材の透湿性及び二酸化炭素透過性がコンクリートの中性化に与える影響について報告する。

2. 試験概要

2.1 試験体

促進中性化試験は、水セメント比 65%のコンクリートを下地として用いた。試験体は JIS A 1153 に規定される方法で打設、脱型を行い、材齢 4 週まで水中養生を行った。次いで、相対湿度 60±5%、温度 20±2℃で材齢 8 週まで気中養生した。調査及び性状と使用材料を表 1、表 2 に示す。

その後、コンクリートの側型枠面に、JIS A 6916 に規定される下地調整塗材 C-1 で穴埋め処理を行い 1 週間の養生後、仕上材を施工した。評価を行った仕上材材料は、JIS K 5660 に規定される塗料と、JIS A 6909 の建築用仕上塗材に規定される薄付け仕上塗材と複層仕上塗材の中から表 3 に示す仕上材を選択した。

表 1 コンクリートの調査及び性状

実験 シリーズ	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)				空気量 (%)	スラフ (cm ²)
			C	W	G	S		
1	65	46.4	274	178	968	829	4.6	20
2							4.6	19

表 2 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	C	太平洋セメント社製普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm ³)
水	W	上水道水
粗骨材	G	茨城県桜川市産硬質砂岩砕石 (表乾密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:0.68%, 粗粒率(F.M.):6.80)
細骨材	S	静岡県掛川市産陸砂 (表乾密度:2.58 g/cm ³ , 吸水率:1.81%, 粗粒率(F.M.):2.97)

¹⁾ 菊水化学工業(株)汎用塗料事業本部
(〒504-0925 岐阜県各務原市松本町二丁目457番地)
²⁾ 芝浦工業大学 教授・博士(工学)

¹⁾ General Purpose Coating Dept., Kikusui Chemical Industries Co., Ltd.

²⁾ Prof., Graduate School of Engineering, Shibaura Institute of Technology, Dr. Eng.

表3 仕上材の種類一覧

試験体略称	仕上材の種類	表面形状
薄塗E-1	外装薄塗材E	砂壁状(リシン)
薄塗E-2	外装薄塗材E	石材調(着色骨材系)
薄塗E-3	外装薄塗材E	平たん状(ローラーリシン)
可とう薄E	可とう形外装薄塗材E	砂壁状
防薄E	防水形外装薄塗材E	平たん状
複層E	複層塗材E	平たん状
可とう複CE	可とう形複層塗材CE	平たん状
防複E	防水形複層塗材E	平たん状
塗料	つや有リアクリルエマルションペイント	平滑

図1 中性化深さの測定位置

仕上材は、JASS18 及び JASS23 に準拠して施工した。仕上材の施工後2週間養生した後、無塗装面にアルミテープを貼り付け試験に供した。

2.2 促進中性化試験

JIS A 1153 に準じて促進中性化試験を行い、材齢1週、2週、4週、8週、13週、26週での中性化深さを測定した。中性化深さはJIS A 1152 に準拠して測定し、図3に示す2面10カ所の平均値を求めた。また、中性化深さと同じ測定位置で仕上材の塗膜厚みも測定を行った。

本検討の中で促進試験のシリーズ2においては、コンクリートの含水率変化についても測定を行った。

含水率の測定方法は、中性化深さ測定後の割裂した試験体を100℃の恒温槽で乾燥させた。試験体の重量変化を測定し恒量となるまで乾燥させた。その前後の試験体重量の減量分をコンクリートの含水率とした。

3. 試験結果と考察

3.1 CO₂透過性及び透湿性と中性化抑制効果の関係

(1) 中性化抑制効果の確認

CO₂透過性及び透湿性と中性化抑制効果の関係を確認するため、まずは、シリーズ1として仕上材を施工したコンクリートの促進中性化試験を行った。

促進中性化試験における各材齢での中性化深さの測定結果と仕上材の厚みを表4に示す。また、中性化深さの経時変化を図2に示す。一部の仕上材で測定値にばらつきがみられるが、中性化深さと促進期間の間にいわゆる $\sqrt{t}$ 則の関係性が確認出来た。そこで最小2乗法により各試験体の中性化速度係数を求め、ブランクとの速度係数の比から中性化率を求めた。結果を表5に示す。また、JASS5に記載されている種類別中性化率の値⁸⁾及び前報⁶⁾における各仕上材料のCO₂透過度と透湿度も併せて示す。

今回、実施した促進中性化試験の中性化率は文献値よりもかなり

低い。但し、外装薄塗材Eが高く、次いで可とう形薄塗材E、防水形薄塗材Eと中性化率が低くなるなど全体的には類似した傾向が確認出来る。一方で、JIS上の分類では同じ外装薄塗材Eの中でも、中性化率が異なることが確認出来た。薄塗E-1のいわゆるリシンと、薄塗E-3のローラーリシンでは中性化率が倍も違うことが分かる。

(2) CO₂透過性及び透湿性と中性化率との関係

前報⁶⁾で求めているCO₂透過度と中性化率との関係を図3に、透湿度と中性化率との関係を図4示す。それぞれ決定係数は、CO₂透過度の0.4に対し透湿度は0.84と強い正の相関を示す。コンクリートの中性化に直接的に働く、CO₂の透過性より透湿性の方が中性化率との相関性を見せる。

表4 促進中性化試験の測定結果(シリーズ1)

試験体略称	平均膜厚 (mm)	中性化深さ(mm)						速度係数 (mm/週 ^{1/2})
		1週	2週	4週	8週	13週	26週	
薄塗E-1	0.7	1.9	2.8	3.9	4.6	9.7	13.0	2.38
薄塗E-2	1.3	1.6	1.7	2.6	2.6	4.8	7.7	1.35
薄塗E-3	0.5	1.1	1.4	2.6	2.6	4.0	6.1	1.13
可とう薄E	0.8	1.2	1.2	1.7	1.6	3.0	4.7	0.84
防薄E	0.5	1.2	1.4	1.3	1.0	1.8	2.2	0.49
複層E	0.7	1.4	1.8	2.2	1.9	4.3	7.6	1.26
可とう複CE	0.8	1.1	0.9	1.2	1.5	2.0	2.9	0.57
防複E	0.6	0.8	0.9	1.4	1.5	1.9	2.3	0.52
塗料	0.1	1.2	1.3	1.7	1.9	2.7	3.6	0.74
ブランク	-	7.1	8.4	11.5	14.0	17.9	22.9	4.87

図2 中性化深さの経時変化(シリーズ1)

表5 各試験体の中性化率及びCO₂透過度と透湿度の一覧

試験体略称	中性化率	JASS5における 種類別中性化率 [*]	CO ₂ 透過度 ^{**} (mol/m ² ・24h)	透湿度 ^{**} (g/m ² ・24h)
薄塗E-1	0.49	1.02	2.28	173.6
薄塗E-2	0.28		2.53	119.3
薄塗E-3	0.23		0.31	133.4
可とう薄E	0.17	0.86	1.69	79.5
防薄E	0.10	0.68	1.15	26.7
複層E	0.26	0.22	0.47	96.6
可とう複CE	0.12	0	0	69.2
防複E	0.11	0.4	0.08	49.1
塗料	0.15	0.64	0.32	82.3

^{*}JASS5に記載⁸⁾、^{**}前報⁶⁾において報告した値

図3 CO₂透過度と中性化率との関係

図4 透湿度と中性化率との関係

これまでもコンクリートの中性化への影響として、湿度条件⁹⁾やコンクリートの含水率および乾燥状態^{10~12)}によって中性化抑制効果に影響が出ることが報告されている。長谷川ら⁴⁾は、仕上材の透湿性の影響として含水率の保持があるとし、コンクリートの乾燥を遅延することでコンクリートの中性化が抑制される期間が持続するとしている。

3.2 コンクリートの含水率の推移

仕上材のCO₂透過性と透湿性の中性化抑制効果への影響を明確にすべく、シリーズ2としてコンクリートの促進中性化試験を再び行い、試験中のコンクリートの含水率の変化を確認した。

コンクリートの中性化深さの測定結果を表6に示す。シリーズ1とシリーズ2と同様の促進中性化試験を行ったため、図5にてデータの比較を行った。全体的にシリーズ2は中性化率がやや低めとなる傾向を示した。ただし、データのばらつきは少なく、決定係数で0.91と誤差が小さく精度の高い実験であるといえる。

シリーズ2の下地コンクリートを20℃での各湿度条件での平衡含水率を表7に示す。この際、下地コンクリートは100mm幅で割裂し、側面以外をアルミテープでシールし恒温恒湿槽で養生した。含水率の平衡の判定は重量変化の測定を行い、変化が収束してから3日後に含水率を求め平衡含水率とした。各湿度条件とともに含水率が増加することが確認できる。促進中性化試験と同じ相対湿度60%では、含水率が2.64であった。

表6 促進中性化試験の測定結果（シリーズ2）

試験体略称	平均膜厚 (mm)	中性化深さ(mm)						速度係数 (mm/週 ^{1/2})	中性化率
		1週	2週	4週	8週	13週	26週		
薄塗E-1	0.7	2.4	1.8	2.9	4.2	8.0	13.8	2.25	0.47
薄塗E-3	0.5	1.2	0.9	1.2	1.5	2.7	5.6	0.87	0.18
可とう薄E	0.8	1.3	1.4	1.6	1.6	1.8	4.0	0.70	0.15
防薄E	0.5	1.2	1.2	1.5	1.3	1.3	2.9	0.54	0.11
複層E	0.7	1.4	1.4	1.8	1.7	2.2	4.5	0.78	0.16
防複E	0.5	1.2	1.2	1.2	1.3	1.7	3.4	0.59	0.13
塗料	0.2	0.9	1.2	1.2	1.4	1.7	4.8	0.73	0.15
ブランク	-	5.9	7.7	10.2	13.8	17.5	23.0	4.75	1.00

図5 シリーズ1とシリーズ2の促進中性化試験における再現性確認

表7 各湿度条件におけるコンクリートの平衡含水率

湿度条件(%RH)	60	70	80	90	98
含水率(%)	2.64	2.78	3.02	3.10	3.14

表8 促進中性化試験における含水率の測定結果

試験体略称	含水率(%)					
	1週	2週	4週	8週	13週	26週
薄塗E-1	3.74	4.30	4.02	3.86	2.97	2.95
薄塗E-3	3.71	4.36	4.18	4.09	3.28	3.20
可とう薄E	3.70	4.22	4.12	4.11	3.22	3.15
防薄E	3.67	4.18	4.18	4.12	3.38	3.25
複層E	3.80	4.23	4.23	4.03	3.16	3.03
防複E	3.85	4.27	4.18	4.06	3.28	3.22
塗料	3.60	4.02	3.90	3.86	3.15	3.11
ブランク	3.50	3.80	3.88	3.72	2.75	2.64

図6 促進中性化試験における含水率の推移

図7 コンクリートの含水率増加のメカニズム

促進中性化試験におけるコンクリートの含水率の測定結果を表8に示す。またその推移を図6に示す。

仕上材を施したコンクリートの促進中性化試験の含水率は、試験開始から急激に上昇していき、2週目をピークに徐々に低下していく。また、仕上材を施した試験体では全ての試験期間において含水率が相対湿度60%の際のコンクリートの平衡含水率よりも高い状態にあることが分かった。ブランクの試験体についても一度含水率が上昇し時間とともに平衡含水率に達することが確認出来た。

既往の報告では、コンクリートの表面に透湿性の低い材料を施工した場合、コンクリートの深部の水の影響を受け、コンクリートの表面含水率が上昇し中性化の進行が遅くなるとされているが、本検討ではコンクリート全体の含水率が增加することが確認出来た。

通常、水蒸気などの気体は濃度勾配により拡散・浸透する方向が決定され濃度の高い方から低い方へ移動する。湿度60%の平衡含水率よりも高い含水状態のコンクリートからは乾燥方向への水蒸気の移動が起こるはずで、外部から内部への水分の移動は考えにくい。水の発生経路としてCO₂とコンクリートのアルカリ成分との中和反応により生成する水分によってコンクリートの含水率が上がっていると考えられる。促進中性化試験における含水率増加のメカニズムを図7に示す。

3.3 透湿性が及ぼすコンクリートの含水率と中性化への影響

図6をみると、中性化の進行が早く水和反応が多く進行しているはずのブランクより、仕上材を施工してあるコンクリートのほうが含水率は高い。また、材齢1週目から2週目の含水率の上昇幅も仕上材を施工しているほうが大きいことがわかる。中和反応によって生成された水は仕上材の透湿性によって蒸発が抑制された状態となっていると考えられる。

仕上材の透湿度と材齢26週での含水率との関係を図8に示す。決定係数が0.56と一定の相関を確認できる。含水率と中性化率との関係についても同様に0.64と相関性が確認される。図9に示す。その際、含水率が低くなるにつれ、中性化率の値にばらつきが大きくなる傾向がみられる。含水率が低い薄塗Eと複層Eは、CO₂透過度がそれぞれ2.28と0.47である。含水率が低い場合、仕上材のCO₂透過度の影響を受けやすくなると考えられる。

CO₂透過量と水分発生量の関係性の定量的な解析も試みたが、仕上材を通してCO₂が透過し、コンクリート中へ浸透する過程。コンクリート中でのCO₂とアルカリ成分の中和による水分の発生量と速度。コンクリートから仕上材を通して水分が放散される過程が複雑に絡み合っており解明には至らなかった。

図8 透湿度と含水率の関係（材齢26週で比較）

図9 含水率と中性化率との関係

いずれにせよコンクリートの含水状態と中性化傾向および仕上材の透湿性には密接な関係が見られる。ただし、透湿性は中性化抑制効果と相関が直接あるのではなく、含水率の増減に関与し間接的に中性化速度に影響を与えると考えられる。含水率の増加は、コンクリートの中和反応により発生する水の影響だと考えられる。

大気中のCO₂濃度は凡そ400～700ppm程度であり、促進試験での5%というCO₂濃度の1万分の1程度の濃度である。当然、CO₂濃度が低い場合はコンクリート中で発生する水分は少なくなり、コンクリートの含水率も標準状態に近い値に保たれるはずである。促進中性化試験においては、透湿性が中性化試験との相関性を示すが、屋外暴露試験においては、仕上材のCO₂透過度の影響を受けやすくなる可能性が高く今後の課題としたい。現在、我々は屋外暴露条件下での中性化試験も検討中であり、仕上材のCO₂透過性および透湿性が中性化抑制効果に与える影響をさらに解明していく予定である。

4. まとめ

仕上材の中性化抑制効果について、特にCO₂透過性および透湿性が与える影響について確認するため促進中性化試験を実施した。その検討結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) コンクリートの促進試験において、JIS上は同じ種類に分類されるものでも、中性化率が1/2になるものもある。現状、仕上材の

中性化抑制効果のデータも少なく、製品ごとに中性化抑制効果を評価する必要がある。

(2) CO₂透過性及び透湿性のいずれが中性化深さと相関するかについて促進中性化試験で検討した。その結果、仕上材のCO₂透過性より透湿性のほうが、コンクリートの中性化深さに影響を与える結果となった。このメカニズムとして、中性化に伴い発生する水の影響で特に中性化が進んでいる領域でのコンクリートの含水率が増加することが確認できた。

(3) 促進中性化試験において、仕上材を施したコンクリートの含水率は仕上材なしのブランクの含水率よりも高く、また、同湿度における同じ下地コンクリートの平衡含水率よりも高いことが確認された。このような高含水率の領域では、コンクリートの中性化反応は抑制される。このような理由で、仕上材のCO₂透過性より透湿性のほうが、コンクリートの中性化深さとの相関性が高いと考える。

今後の課題として、屋外暴露試験や実際の使用条件下では促進中性化試験と比較して二酸化炭素濃度は著しく低いため、中性化反応により生成する水はコンクリート含水率の変動に大きな影響は及ぼさないと考えられる。したがって、屋外暴露試験や実際の使用条件下においてはコンクリート中性化深さとCO₂透過性の間に相関性が認められる可能性があり、この点についての検討を予定している。

参考文献

- 1) 向井毅, 菊池雅史, 福田泰久, 宮本俊次: 外装仕上材の躯体保護に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 353-354, 1986
- 2) 向井毅, 菊池雅史, 福田泰久: 外装仕上材の躯体保護性能および塗膜の透湿性に関する実験的検討, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp. 265-268, 1987
- 3) 千歩修, 馬場明生, 小俣一夫, 松島泰幸: コンクリートの外装仕上げ材料の躯体保護効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 609-610, 1989
- 4) 長谷川拓哉, 千歩修, 大久保孝昭, 古賀純子: 建築用仕上塗材の中性化に関する研究, 日本建築学会構造系論文集第 609 号, pp. 23-30, 2006. 11
- 5) 石崎貴之, 小山明男, 菊池雅史, 佐藤隆軌: 仕上塗材の経年劣化を考慮した RC 造建築物の中性化抑制効果に関する実験的研究 その 2 仕上塗材の中性化抑制効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 317-318, 2010
- 6) 川村康晴, 本橋健司: 迅速な建築用仕上塗材及び塗料の二酸化炭素透過性の評価方法, 日本建築技術報告集第 43 号, pp. 825-830, 2013. 10
- 7) 千歩修, 馬場明生, 松島泰幸, 小俣一夫: 仕上げ塗材の躯体保護効果に関する研究, 日本建築仕上学会大会論文集, pp. 49-52, 1990. 10
- 8) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, pp. 194-203, 2009
- 9) 阿部道彦, 榊田佳寛, 田中斉, 柳啓, 和泉意登志, 友沢史紀: コンクリートの促進中性化試験の評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集第 409 号, 1990 年 3 月
- 10) 大岸佐吉, 楊静: 促進法によるコンクリートの長期中性化推定の試み, セメント・コンクリート, No. 533, pp. 41-48, 1991
- 11) 依田彰彦, 横室隆: コンクリートのケミカルレジスタンスに関する研究 (その 2, 草津温泉水による浸漬したコンクリートについて), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 191-192, 1983
- 12) 申雪寒, 長谷川寿夫: コンクリートの乾燥度を考慮した外断熱建物躯体

体の中性化速度予測式の提案, コンクリート工学年次論文集 vol. 27, No. 1, pp625-630, 2005

[2015 年 10 月 6 日原稿受理 2015 年 11 月 9 日採用決定]