

論文 硬化コンクリートの表面改質効果に関する基礎的研究

志賀 正和^{*1}・金久保 雅之^{*1}・黒井 登起雄^{*2}・松村 仁夫^{*3}

要旨：本研究は、珪酸アルカリを主成分としたコンクリート用浸透性塗布剤（以下、塗布剤と称す）によって表面改質した硬化コンクリートの塩分浸透性、中性化、乾燥収縮および凍結融解に対する効果を基礎的に検討した。研究の結果、塗布剤を複数回（2, 3回）塗布したコンクリートは、塩分浸透性および中性化の抑制に効果的であり、凍結融解に対する抵抗性についても向上することが明らかとなった。また、塗布剤の有無による硬化コンクリートの強度特性および収縮特性の差異は認められなかった。

キーワード：浸透性塗布剤, 表面改質, 塩分浸透性, 中性化, 凍結融解抵抗性, 乾燥収縮

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の早期劣化が顕在化してきている。それに伴い、既存コンクリート構造物の補修・補強が必要不可欠の状況になってきている。^{1) 2)} 一方、新設コンクリート構造物に対する耐久性は、耐久性照査による設計法が導入されているが、更なる予防対策も必要である。新設コンクリート構造物の耐久性向上は、建設コストの削減、環境保護の観点からも重要である。コンクリートの表面改質による耐久性向上もその一手段と考えられる。そこで、本研究では、コンクリートの表面改質が期待できる塗布剤を取り上げ、研究を進めた。塗布剤は、珪酸アルカリを主成分とした液体で、コンクリート表面に塗布するものである。本研究は、新設のコンクリート構造物を対象に、塗布剤による硬化コンクリートの表面改質の効果を圧縮強度、乾燥収縮、凍結融解に対する抵抗性、中性化および塩分浸透性などの品質特性によって基礎的に検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントは、普通ポルトランドセメント（密度； 3.16 g/cm^3 ）および高炉セメント B 種（密度；

3.04 g/cm^3 ）を使用した。なお、高炉セメント B 種は中性化試験にのみ使用した。細骨材は、粒度の良い川砂（鬼怒川産、密度； $2.60 \sim 2.64 \text{ g/cm}^3$ 、吸水率； $2.07 \sim 2.28\%$ 、粗粒率； $2.67 \sim 2.88$ ）を用い、粗骨材は、良質の硬質砂岩の碎石（葛生町産、最大寸法； 20 mm 、密度； 2.64 g/cm^3 、吸水率； 0.52% ）を用いた。混和剤は、AE 減水剤を使用し、空気量の調整に AE 剤も用いた。主な AE コンクリートの配合を表-1 に示す。

2.2 実験要因および塗布剤の施工方法

(1) 実験要因

実験要因は、表-2 および表-3 に示したように、 W/C と塗布剤の施工方法（塗布回数）とした。実験は、それらを組み合わせたコンクリート（スランプ= $10 \pm 1 \text{ cm}$ 、空気量= $5 \pm 1\%$ ）について、圧縮強度試験（JIS A 1108）および表-3 に示した各種の試験を行った。

(2) 塗布剤の施工方法

コンクリートの供試体表面への塗布剤の第 1 回目の溶液噴霧は、水中養生後、供試体表面の水分をウエスなどで拭き取り、エアースプレーによって均一になるように行った。第 2, 3 回目の噴霧は、1 回目および 2 回目の噴霧からの間隔を 6~8 時間とし、1 回目と同様の方法で行った。その後、恒温室内にて 6 日間乾燥させた。

*1 足利工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 足利工業大学 工学部都市環境工学科教授（正会員）

*3 足利工業大学 工学部都市環境工学科（正会員）

表-1 コンクリートの主な配合

No.	W/C (%)	s/a (%)	単位量 kg/m ³				混和剤		スランプ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)
			W	C	S	G	AE減水剤	AE剤			
1	40	39.3	175	438	660	1024	C×0.50%	C×0.035%	9.3	5.5	30.0
2	50	41.8	175	350	733	1024	C×0.30%	C×0.025%	10.0	4.9	29.0
3	60	43.4	175	292	782	1024	C×0.25%	C×0.025%	10.5	4.8	29.0
4	65	44.0	175	269	801	1024	C×0.25%	C×0.025%	9.6	4.7	29.5

表-2 要因および水準

使用方法	塗布回数	水セメント比	供試体数
噴霧方法	2回	40、50、60、65%	各要因・水準 毎に3個
	3回	40、50、60、65%	
	0回*1	40、50、60、65%	

*1 塗布なし

表-3 各種試験の供試体と試験の要点

試験項目	前養生および表面処理期間	試験材齢
塩分浸透試験	28日間(水中養生) →表面処理14日	56,91,180,365日
中性化試験	28日間(水中養生) →表面処理7日→21日	1,2,3ヶ月
凍結融解試験	28日間(水中養生) →表面処理7日	——
長さ変化試験	28日間(水中養生) →表面処理7日	7,14,28,56,91,180,365日

2.3 実験方法

コンクリートの練混ぜは、強制式ミキサを用いて行い、供試体の成型（打込みおよび締固め）は、JIS A 1115 および JIS A 1132 に準じて行った。コンクリートの締固めは、内部振動機を用いて行った。また、養生は 20±3℃の水中とした。

(1) 塩分浸透性試験

供試体は、100×100×200mm の角柱とし、角柱断面の中心長手方向に鉄筋（φ9mm みがき丸棒鋼）を 2 本埋設した形状のものと、埋設していないものの 2 種類を作製した（写真-1 参照）。

塩分浸透性試験は、NaCl 濃度 10%に調整した塩水中に所定期間浸漬して行った。なお、塩分浸透深さの判定は、JSCE-G572 に従って行った。

(2) 中性化試験

供試体は、塩分浸透性試験用供試体と同様とした。なお、鉄筋を埋設した供試体は、高炉セメント B 種を使用した。

中性化試験は、促進中性化試験槽の環境条件を温度 20℃、湿度 60%RH、CO₂ 濃度 5%³⁾とし、JIS A 1153 に準じて行った。中性化深さは、JIS A 1152 に従って測定した。

(3) 凍結融解に対する抵抗性試験

供試体は、凍結融解に対する抵抗性試験用および気泡測定用ともに 100×100×400mm とした。なお、気泡測定用供試体は各要因・水準毎に 1 個作製した。凍結融解に対する抵抗性試験は、JIS



写真-1 供試体形状（鉄筋埋設形状）

A 1148（水中凍結融解）に従って行い、供試体の質量および一次共鳴振動数は、供試体の繰り返し回数 300 サイクルまで行い、試験開始前および繰り返し回数 30 サイクル毎にそれぞれ測定した。気泡間隔係数の測定は、角柱供試体を 100×100×20mm に切断および表面仕上げをした後、リアトラバース法によって行った。

(4) 長さ変化試験

供試体は、100×100×400mm の角柱とし、その断面の中心長手方向に鉄筋（φ19mm 異形棒鋼）を 1 本埋設した形状のものと、埋設していないものの 2 種類を作製した（写真-1 参照）。

乾燥収縮（長さ変化）試験は、JIS A 1129-2 および JIS A 1129-3 に従い、温度 20℃、湿度 60% RH の恒温室内で所定期間乾燥させて行った。なお、ダイヤルゲージ法については、鉄筋を埋設していないものについてのみ行った。

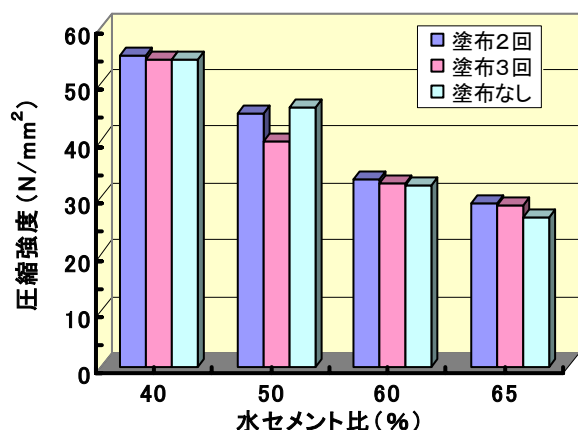


図-1 圧縮強度試験結果の一例

表-4 塩分浸透深さ (浸漬期間 91 日)

W/C (%)	塗布回数	浸透深さ (mm)		
		最大	最小	平均
40	2回	19.40	12.40	15.01
	3回	18.00	12.30	14.07
	0回*1	20.00	13.10	15.38
50	2回	20.70	15.20	17.49
	3回	21.00	13.10	16.58
	0回*1	22.70	15.10	18.44
60	2回	26.70	15.00	22.06
	3回	25.80	16.70	22.70
	0回*1	28.00	21.60	25.26
65	2回	32.00	22.70	27.65
	3回	21.60	18.00	23.07
	0回*1	31.60	23.80	29.00

*1 塗布なし

3. 実験結果

3.1 圧縮強度

図-1 は、供試体表面の塗布剤噴霧の有無によるコンクリートの圧縮強度試験結果の一例（塩分浸透性試験開始材齢時）を示す。塗布剤を 2 回および 3 回塗布したときのコンクリートの圧縮強度は、塗布剤が表面塗布であるため、塗布なしのときと同程度で、変化が認められない。また、塗布剤の塗布回数の違いによる圧縮強度の差も認められない。他の各種試験の際の圧縮強度も同様の傾向を示し、塗布剤の影響は認められない。

3.2 塩分浸透性

図-2 は、塩分浸透深さと W/C との関係（浸漬期間 56～91 日）を示す。2 回および 3 回塗布したときの塩分の浸透深さは、塗布なしのときより小さくなる傾向が認められる。塗布による塩分の浸透抑制効果は、W/C が大きいほど向上

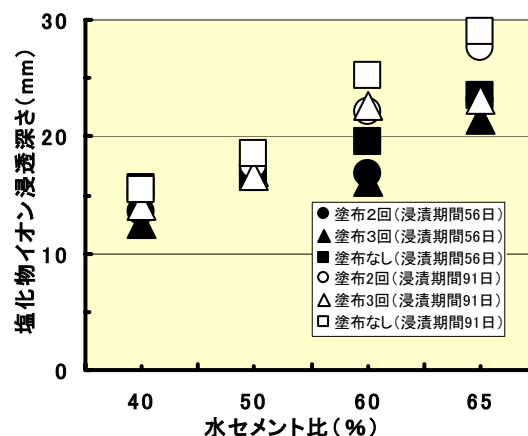


図-2 水セメント比と塩分浸透深さの関係

表-5 塩分浸透による鉄筋の腐食状況

W/C (%)	塗布回数	鉄筋腐食状況*2	
		浸漬56日	浸漬91日
40	2回	0本	1本
	3回	0本	0本
	0回*1	0本	1本
50	2回	0本	2本
	3回	0本	0本
	0回*1	0本	3本
60	2回	0本	0本
	3回	0本	0本
	0回*1	2本	4本
65	2回	0本	1本
	3回	0本	0本
	0回*1	3本	1本

*1 塗布なし

*2 鉄筋6本中の腐食本数

する傾向が認められる。表-4 に示す浸透期間 91 日における塩分浸透深さの結果によれば、塗布剤を塗布したコンクリートの浸透深さは、W/C にかかわらず、塗布なしのときより最大値が 2 ～10mm 程度小さくなり、浸透深さの変動も小さくなるようである。なお、2 回および 3 回塗布による浸透深さの差異は、殆ど認められない。これらの結果から、塗布剤による塩分の浸透抑制効果は、硬化コンクリートの組織が疎になっている場合に顕著に表れるものと考えられる。

塩水中に浸漬した供試体の埋設鉄筋の腐食状況（腐食した鉄筋の本数）は、表-5 に示す。2 回および 3 回塗布したときの埋設鉄筋の腐食は、塗布なしのときに比べ少なくなる傾向が認められる。また、塗布剤による鉄筋腐食の抑制効果は、塩分浸透深さの結果と同様、W/C が大きいほど向上する傾向が認められる。

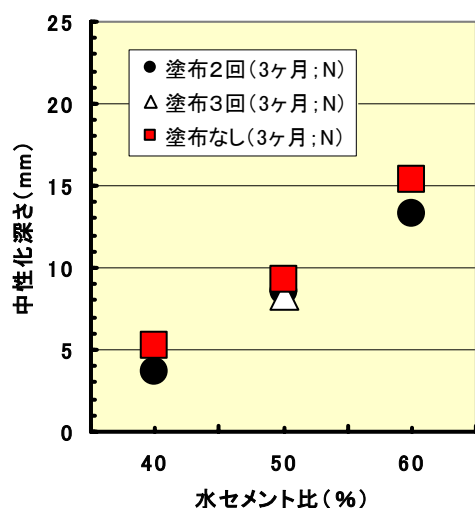


図-3 水セメント比と中性化深さの関係(普通セメント;3ヶ月)

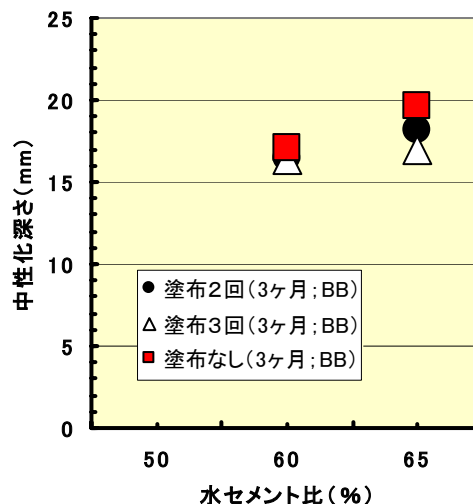


図-4 水セメント比と中性化深さの関係(高炉セメントB種;3ヶ月)

表-6 中性化深さ(普通セメント;3ヶ月)

W/C (%)	塗布回数	中性化深さ(mm)		
		最大	最小	平均
40	2回	6.70	1.35	3.64
	0回*1	8.85	2.95	5.23
50	2回	13.10	5.60	8.56
	3回	11.00	4.75	8.25
	0回*1	16.50	5.20	9.29
60	2回	20.50	9.25	13.35
	0回*1	22.00	9.90	15.41

*1 塗布なし

表-7 中性化深さ(高炉セメントB種;3ヶ月)

W/C (%)	塗布回数	中性化深さ(mm)		
		最大	最小	平均
50	2回	実 験 中		
	0回*1			
60	2回	21.36	11.20	16.42
	3回	21.70	12.70	16.29
	0回*1	22.40	13.30	17.11
65	2回	24.60	12.20	18.18
	3回	23.60	11.10	16.97
	0回*1	26.50	15.40	19.59

*1 塗布なし

3.3 中性化

図-3および図-4は、普通セメントおよび高炉セメントを使用した場合におけるW/Cと中性化深さの関係を示す。いずれも塗布剤を2回および3回塗布したときの中性化深さは、塗布なしのときより小さくなる傾向が認められる。しかし、W/Cの小さい40%および50%の場合は、W/C=60%以上の場合より、塗布の有無による差異が殆ど認められない。また、セメントの種類の違いによる中性化試験結果によれば、高炉セメントを用いたコンクリートの場合の塗布剤による中性化の抑制効果は、普通セメントの場合の塗布剤による中性化の抑制効果に比べ小さくなる傾向が認められる。以上の結果から塗布剤の効果はW/Cに起因するものと考えられる。

表-6および表-7は、普通セメントおよび高炉セメントを用いた場合の中性化深さを示す。普通セメントを用いた場合の中性化深さの結果に

よれば、塗布剤を塗布したときの中性化深さは、W/Cにかかわらず、塗布なしに比べ最大値が1~6mm程度小さくなる傾向が認められる。また、高炉セメントを用いた場合の中性化深さの結果によれば、塗布剤を塗布したときの中性化深さは、塗布なしのときよりも最大値が1~3mm程度小さくなる結果となり、普通セメントに用いた場合よりも中性化の抑制効果は認められない。

なお、中性化による埋設鉄筋の腐食は、いずれの場合においても認められない。

3.4 凍結融解に対する抵抗性

図-5および図-6は、サイクル数と相対動弾性係数の関係を示す(W/C=40~65%)。図-5より、W/C=40%および50%においては、塗布剤の塗布の有無に関係なく、相対動弾性係数が80%以上となり、凍結融解に対する抵抗性に差異は認められない。また、図-6より、W/C=60%および65%の場合、塗布なしのときに210サイ

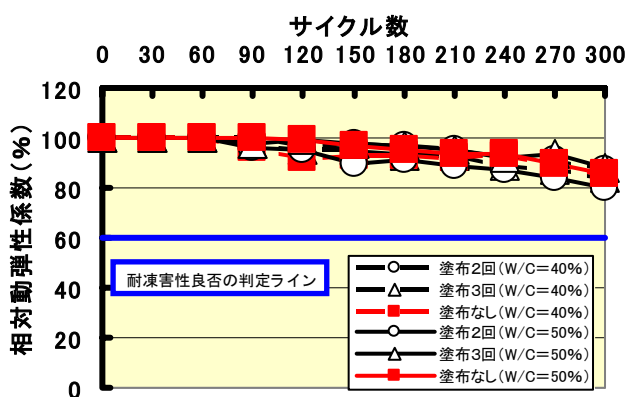


図-5 サイクル数と相対動弾性係数の関係 (W/C=40%, 50%)

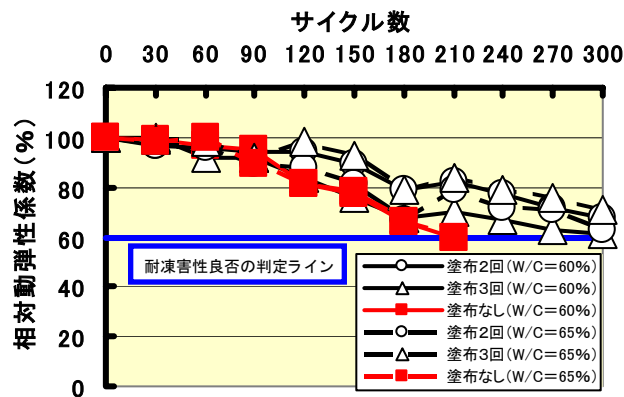


図-6 サイクル数と相対動弾性係数の関係 (W/C=60%, 65%)

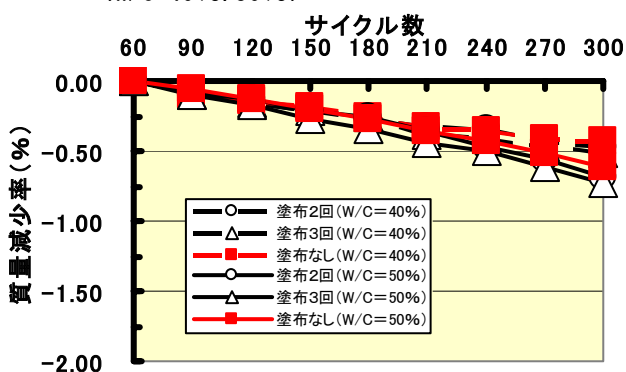


図-7 サイクル数と質量減少率の関係 (W/C=40%, 50%)

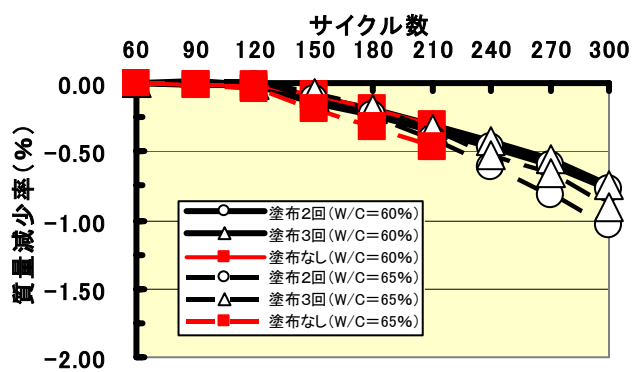


図-8 サイクル数と質量減少率の関係 (W/C=60%, 65%)

クル時で相対動弾性係数が 60%以下になる。これに対して、塗布剤を 2 回および 3 回塗布したときの相対動弾性係数は、300 サイクル時で相対動弾性係数 60%以上となり、塗布によって凍結融解に対する抵抗性が向上することが認められる。また、塗布剤の塗布回数の違いによる差異は殆ど認められない。

図-7 および図-8 は、サイクル数と質量減少率の関係 (W/C=40~65%) を示す。図より、W/C=40, 50 および 60% の場合、塗布剤を 2 回および 3 回塗布したときの質量減少率は、塗布なしのときとほぼ同程度の傾向が認められる。これに対して、W/C=65% の場合、塗布剤を 2 回および 3 回塗布したときの質量減少率は、塗布なしのときより、若干小さくなる傾向があり、スケーリング発生の抑制効果が期待できる。

図-9 は、塗布剤の塗布の有無による耐久性指数と気泡間隔係数の関係を示す。塗布剤を 2 回および 3 回塗布したときの気泡間隔係数は、100

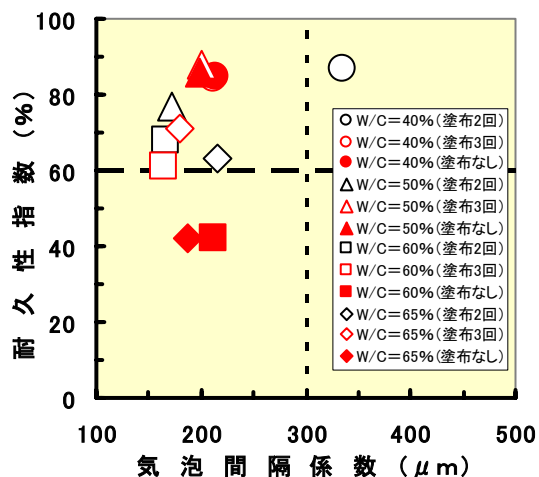


図-9 耐久性指数と気泡間隔係数の関係

~350 μm の範囲内にあり、塗布なしのときと同程度の値を示している。以上の結果から、2 回および 3 回塗布したコンクリートの凍結融解に対する抵抗性の向上は、気泡間隔係数の違いによる影響ではなく、塗布剤によってコンクリート表面が改質したためと推察される。

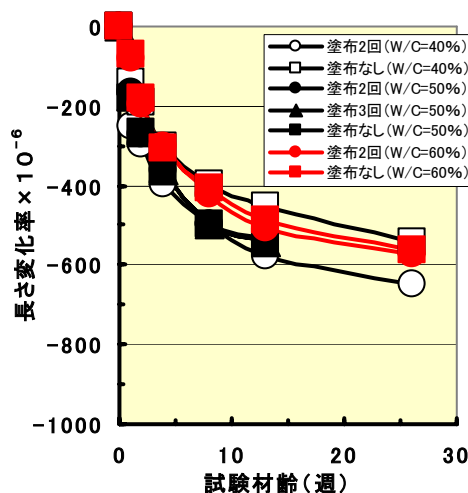


図-10 長さ変化率の経時変化
(ダイヤルゲージ; 鉄筋なし)

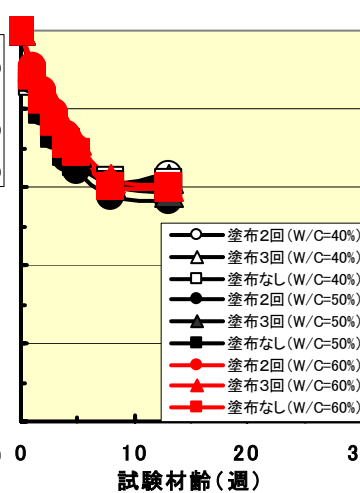


図-11 長さ変化率の経時変化
(コンタクトゲージ; 鉄筋なし)

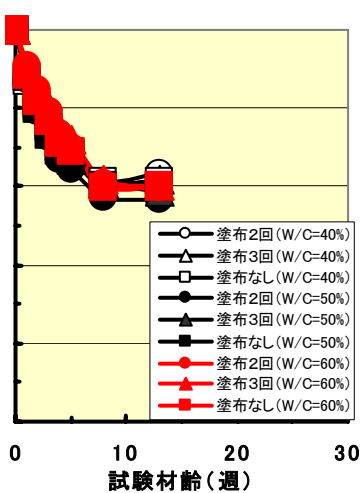


図-12 長さ変化率の経時変化
(コンタクトゲージ; 鉄筋あり)

3.5 乾燥収縮

図-10 はダイヤルゲージ法による長さ変化率の経時変化を示す。塗布剤を2回および3回塗布したときのコンクリート供試体の長さ変化率は、いずれの W/C においても塗布なしのときとほぼ同程度となることが認められる。また、塗布回数の違いによる長さ変化率の差異も殆ど認められない。

図-11 および図-12 は、コンタクトゲージ法による長さ変化率の経時変化を示す。図-11 は、鉄筋を埋設していない場合、また、図-12 は、鉄筋を埋設した場合の試験結果を示す。コンクリート供試体の長さ変化率（表面収縮）は、鉄筋の有無に拘わらず、ダイヤルゲージ法と同程度であり、塗布剤の有無による差異も殆ど認められない。

4. まとめ

硬化コンクリートの塩分浸透性、中性化、乾燥収縮および凍結融解に対する抵抗性に関する塗布剤による表面改質の効果を基礎的に検討し、以下の結果が得られた。

(1) 塗布剤の有無による圧縮強度の差異は、塗布剤が表面塗布であるため、殆ど認められない。また、乾燥収縮においても塗布の有無による差異は認められない。

(2) 塗布による塩分の浸透抑制効果は、塗布な

しるときよりも向上する傾向が認められる。また、 W/C が大きくなると、より効果が顕著になる傾向も認められる。

(3) 塗布による中性化抑制効果は、塗布なしのときより 10~30%程度向上する傾向が認められる。この傾向は、中性化期間が長くなるにつれて顕著となる。

(4) 塗布剤を塗布したときの中性化抑制効果は、高炉セメントを用いた場合よりも普通セメントの場合の方が優れている。

(5) 塗布剤を塗布した硬化コンクリートは、2回および3回の塗布を繰り返すことにより、塩水中などの腐食環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食の抑制にも効果が期待できる。

(6) 塗布剤を塗布したときの凍結融解に対する抵抗性は、 W/C が大きくなると塗布なしのときよりも向上する傾向が認められる。

なお、塗布剤によるコンクリート表面改質は、塗布により表面モルタル層が緻密になることに起因されると推察されるが、今後、そのメカニズムについての検討が必要である。

参考文献

- 1) 日経コンストラクション：これから始めるコンクリート補修講座，日経コンストラクション，2002
- 2) 小林一輔：コンクリートが危ない，岩波新書，1999