

論文 塗布タイプ収縮低減剤を用いたコンクリートの性能向上

郭度連*1・花田達雄*2・杉山彰徳*3

要旨: コンクリートの収縮低減策の一つである塗布タイプ収縮低減剤の性能を定量的に評価するため、水セメント比 38~57%のコンクリートを対象に基礎実験を行った。その結果、本実験の範囲内で塗布タイプ収縮低減剤によって期待される効果として、約 70 μ の乾燥収縮低減及び約 25%の水分保持性能の向上が認められた。また、本来の収縮低減効果以外に、初期材齢における優れた水分保持性能によって養生効果を発揮し、空隙構造は緻密になる。それに伴い、圧縮強度の増進、中性化進行の抑制、塩化物イオン浸透抑制等の耐久性能の向上が確認された。

キーワード: 塗布タイプ収縮低減剤, 収縮低減, 養生効果, 水分逸散, 圧縮強度, 中性化抑制

1. はじめに

コンクリート構造物の高性能化, 高耐久化, 長寿命化が求められる中, ひび割れ抑制に関する社会的要求は高まっており, 収縮低減策の一つとして収縮低減剤が挙げられる¹⁾。収縮低減剤については, 品質基準の規格化が検討されており²⁾, 活発に議論されている。収縮低減剤の一種に塗布タイプ収縮低減剤があり³⁾, そのメリットとして施工面では, コンクリート躯体に悪影響を及ぼさないこと, 作業の手軽さなどが, 経済面ではコストパフォーマンスに優れることが挙げられるが, その性能, 期待される効果については十分なデータの蓄積が必要である。一方, 性能面では, 収縮低減効果以外に養生効果も確認されており⁴⁾, 塗膜養生剤並みの効果が期待されることも報告されているが, その基礎データが十分とはいえない現状である。

そこで, 本研究では塗布タイプ収縮低減剤の性能を定量的に評価するための基礎データを提供することを目的とし, 水セメント比 38~57%のコンクリートを対象

に基礎実験を行った結果をまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び配合

表-1に使用材料を, 表-2にコンクリートの配合を示す。収縮低減剤には, 低級アルコールのアルキレンオキサライド付加物を主成分とし, コンクリート表面塗布の作業性及び含浸浸透性を改善した塗布型収縮低減剤を用いた。水セメント比は50%, 単位水量は168kgで最も一般的な生コンクリートを想定した配合になっており, スランプは14.5cm, 空気量は4.9%である。

2.2 実験方法

コンクリート打設 24 時間後脱型し, 塗布タイプ収縮低減剤を塗布したコンクリート(以下, CSコンクリート)は, 収縮低減剤 150g/m²を試験体の全面に塗布した。全ての実験は, 無塗布のプレーンコンクリート(以下, PLコンクリート)及びCSコンクリートについて行い, 養生方法は気中養生である。

表-1 使用材料

材料	記号	物性
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm ³)
粗骨材	G	桜川産砂岩碎石、密度2.65g/cm ³ 、吸水率0.67%、F.M.6.74
細骨材	S	掛川産山砂、密度2.56g/cm ³ 、吸水率2.2%、F.M.2.78
収縮低減剤	CS	塗布タイプ収縮低減剤(低級アルコールのアルキレンオキサライド付加物)
混和剤	Ad	リグニンスルホン酸系AE減水剤

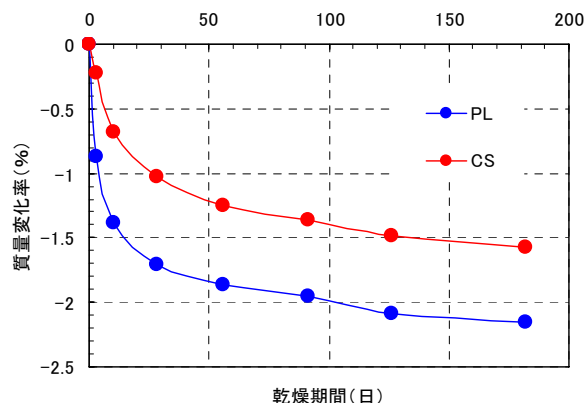
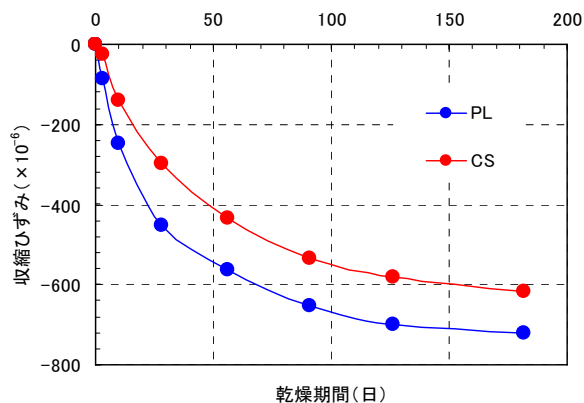
表-2 コンクリートの配合

記号	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				フレッシュ性状	
		W	C	S	G	スランプ(cm)	空気量(%)
PL	50	168	336	830	948	14.5	4.9

*1 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 博士(工学) (正会員)

*2 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 工修

*3 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 博士(工学) (正会員)



(1) 乾燥収縮

(2) 質量変化率

図-1 塗布タイプ収縮低減剤による効果

(1) 乾燥収縮

乾燥収縮ひずみは、JIS A 1129 のコンタクトゲージ法に準じて行った。各水準に対して 3 体の $10 \times 10 \times 40$ cm の角柱供試体を用いてコンクリート打設 24 時間後脱型し、基長を設定後、収縮低減剤 150 g/m^2 を全面に塗布した。供試体は、温度 20°C 、相対湿度 60% の恒温恒湿室内に曝露し、乾燥期間 6 ヶ月まで測定材齢における乾燥収縮ひずみ及び質量変化率を測定した。圧縮強度試験用の円柱供試体も同様に塗布を行い、脱型直後、材齢 7 日、28 日で試験を行った。

(2) 空隙構造の測定

脱型直後、材齢 7 日及び 28 日で測定範囲 $6 \text{ nm} \sim 500 \mu\text{m}$ の水銀圧入式ポロシメーターを使用し、空隙構造の測定を行った。試料は、コンクリート供試体を破碎し、 2.5 mm 以上 5 mm 以下のモルタル塊を採取し、水和を停止させるため、アセトンに 2 回浸漬した。1 回目は、10 分程度で廃棄し、2 回目は蓋をして 24 時間静置後、D-dry 乾燥させ、コンクリート中のモルタル分約 2.1 g を測定に供した。

(3) 水分逸散試験

直径 20 cm の平らな皿に塗布型収縮低減剤及び水 150 g をそれぞれ入れ、 20°C 及び 30°C の恒温室に静置し、経時による質量変化を測定した。質量変化から単位面積当たりの逸散量を求めた。

(4) 付着試験

$30 \times 30 \times 6 \text{ cm}$ の型枠を用い、打設 24 時間後脱型し、供試体の底面に塗布タイプ収縮低減剤を塗布した。以外の 5 面はアルミ箔でシールを行った。乾燥材齢 7 日で PL コンクリート及び CS コンクリートに、また乾燥材齢 28 日で CS コンクリートに、仕上げ材として汎用的に使われている硬質ウレタン樹脂を塗布した。試験は、材齢 48 日で建研式接着力試験機を用いて硬質ウレタン樹脂塗布面を引張ることで行った。試験は 5 回行い、その平均

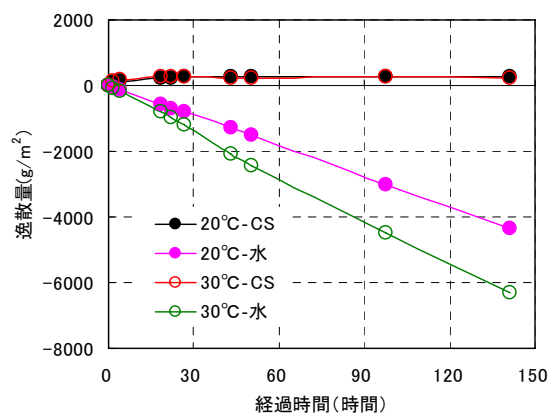


図-2 逸散試験

値を付着強度とした。

(5) 中性化促進試験

$10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の試験体を用い、打設 24 時間後脱型し、供試体の側面 2 面に塗布タイプ収縮低減剤を塗布し、以外の 4 面はアルミ箔でシールを行った。材齢 7 日まで温度 20°C 、相対湿度 60% の恒温恒湿室に静置後、中性化促進試験をスタートし、曝露環境は温度 20°C 、相対湿度 60%、二酸化炭素濃度 5% とした。促進期間 4 週、9 週、25 週に達した試験体は、端部に近い箇所を軸方向に直角に割裂し、割裂面に 1% フェノールフタレインアルコール溶液を噴霧し、中性化深さを測定した。

(6) 塩化物浸透試験

$10 \times 10 \times 40 \text{ cm}$ の試験体を用い、打設 24 時間後脱型し、供試体の側面 2 面に塗布タイプ収縮低減剤を塗布し、以外の 4 面はエポキシ樹脂塗料でシールを行った。材齢 52 日まで温度 20°C 、相対湿度 60% の恒温恒湿室に静置後、温度 20°C 、濃度 10% 塩化ナトリウム水溶液中に浸漬した。浸漬期間 22 週において EPMA による測定、及び割裂面に 1% フルオレセインナトリウム水溶液と 0.1N 硝酸銀溶液を噴霧し塩化物イオン浸透深さを測定した⁵⁾。

3. 実験結果及び考察

3.1 収縮低減効果及び水分逸散防止による空隙構造の緻密化

図-1に塗布タイプ収縮低減剤の塗布有無による乾燥収縮ひずみ及び質量変化率の26週までの実験結果を示す。PLコンクリートの収縮ひずみ約 720×10^{-6} に比べて塗布タイプ収縮低減剤を施したCSコンクリートの収縮ひずみは、約 620×10^{-6} になっており、収縮低減効果が認められる。一方、CSコンクリートの質量変化率は、PLコンクリートに比べて約26%少なくなっており、水分蒸発が最も多い初期材齢の水分逸散を大幅に防止し、水分保持能力に優れていることが確認できる。

図-2に塗布タイプ収縮低減剤及び水の逸散試験の結果を示す。20℃及び30℃ともに塗布タイプ収縮低減剤の質量変化は全く無いことから、塗布タイプ収縮低減剤は逸散せず、非揮発性であり、塗布した後の蒸発によるロスもなく塗布量の全量が効率よく含浸できると考えられる。

図-3には、塗布タイプ収縮低減剤を施した硬化体の模式図を示す。型枠を外した直後からコンクリートの細孔を通して自由水の蒸発は始まる。一方、塗布タイプ収縮低減剤を塗布することで自由水の表面張力は低く抑えられ、毛細管張力が緩和されて乾燥収縮は減少する⁶⁾

。自由水の表面張力を低減する収縮低減剤の作用機構から、自由水は逸散しやすくなる傾向にあるが、非揮発性の塗布タイプ収縮低減剤が表面近傍に高濃度で存在することでバリアーの効果を果たし、水分の逸散を大幅に抑制していると考えられる。

図-1からCSコンクリートの質量変化率は、PLコンクリートに比べて乾燥期間6ヶ月で約0.5%少なくなっている。この0.5%を単位水量として換算すると約13kgであり、単位水量の7.7%にもなる。PLコンクリートに比べてこの13kgの水量をコンクリート内に保つことによってセメントの水和に必要な水分を保持でき、セメントの水和は進行すると考えられる。

図-4及び図-5に塗布タイプ収縮低減剤の塗布による空隙構造の変化を示す。脱型直後に比べてPLコンクリート及びCSコンクリートともに材齢7日の細孔量は少なくなっているが、CSコンクリートはPLコンクリートよりさらに空隙構造は緻密になっている。この傾向は材齢28日ではさらに顕著になっており、図-5の空隙の分布に示すように、200nm以上の細孔は水和によって充填され、200nm以下の細孔になっていると推定される。以上のような空隙構造の緻密化は、塗布タイプ収縮低減剤の塗布による初期材齢の水分逸散の抑制、水分の保持能力に起因するものと考えられる。

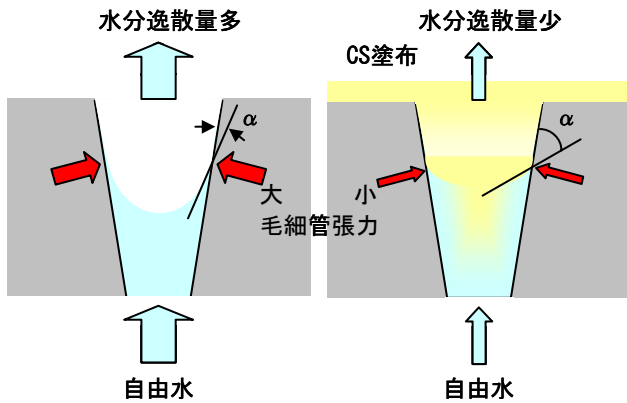


図-3 塗布タイプ収縮低減剤の模式図

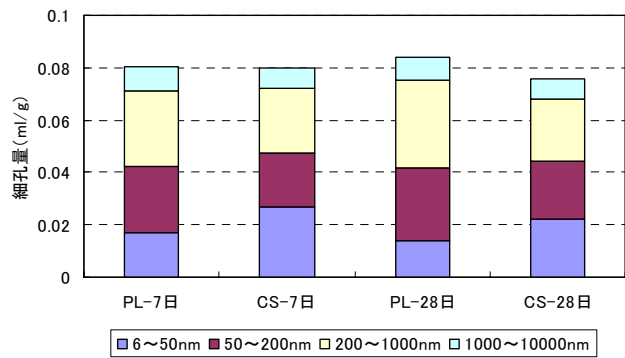


図-5 空隙構造の緻密化

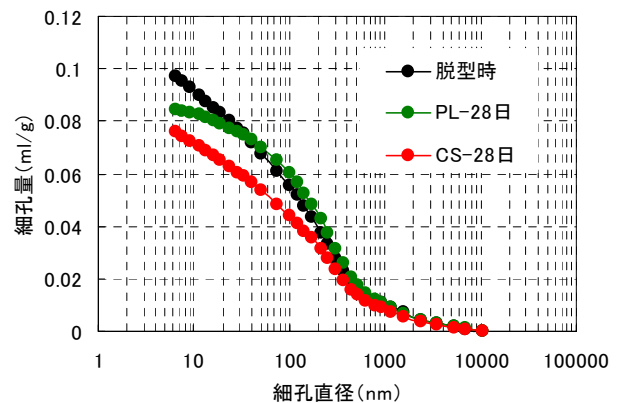
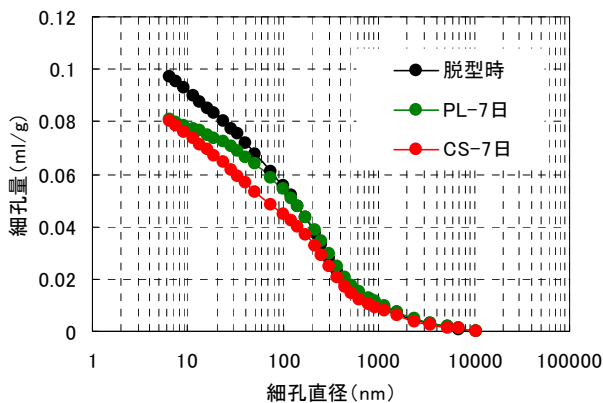


図-4 空隙構造の変化

表-3 性能確認試験の配合及びコンクリートの性状

セメント種類	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				フレッシュ性状		硬化体性状					
		W	C	S	G	スランプ (cm)	空気量 (%)	PL乾燥収縮26週 (×10 ⁻⁶)	CS乾燥収縮26週 (×10 ⁻⁶)	PL質量変化26週 (%)	CS質量変化26週 (%)	PL圧縮強度28日 (N/mm ²)	CS圧縮強度28日 (N/mm ²)
早強	38	160	421	725	1016	9.0	5.0	643	585	1.41	1.15	62.3	65.1
早強	38	165	434	715	1002	12.5	4.7	641	576	1.43	1.14	56.7	61.0
早強	40	165	413	722	1012	14.0	4.2	657	561	1.48	1.04	57.9	62.3
普通	50	168	336	838	948	14.5	5.7	752	657	2.71	1.93	33.2	38.1
	50	175	350	815	942	20.0	5.5	—	—	—	—	30.6	37.6
	50	175	350	815	942	17.0	5.8	—	—	—	—	29.4	35.5
	50	168	336	838	948	17.0	5.5	—	—	—	—	34.1	39.5
	50	168	336	830	948	14.5	4.9	722	617	2.15	1.58	32.4	37.9
普通+膨張材	57	175	307	830	948	16.0	5.0	554	513	—	—	28.2	33.6

空隙構造の緻密化に伴い、圧縮強度は増進しており、図-6に圧縮強度の試験結果を示す。CSコンクリートは、PLコンクリートに比べて材齢7日で約14%、材齢28日で約17%の圧縮強度の増進効果が認められる。供試体の養生条件に関わらず、水分逸散量と圧縮強度には負の相関関係があり⁷⁾、水分逸散量が少ないほど、セメントの水和は進行し、圧縮強度は大きくなる。

3.2 塗布タイプ収縮低減剤による性能向上

塗布タイプ収縮低減剤に期待されるパフォーマンスを定量的に示すために行った性能確認試験の配合及びコンクリートの性状を表-3に、その効果のまとめを図-7に示す。

水セメント比38%から57%まで9回実験を行っており、単位水量は160～175kg/m³範囲の結果のまとめである。乾燥収縮ひずみ及び質量変化率は、乾燥材齢6ヶ月の結果を、圧縮強度は材齢28日の結果を示している。収縮低減剤塗布コンクリートの乾燥収縮ひずみは、プレーンコンクリートに比べて40～100×10⁻⁶程度低減されており、平均値としては約70×10⁻⁶の低減効果が期待される。質量変化率については、収縮低減剤を塗布することで18～30%の水分逸散を防止し、平均値として約25%の水分保持性能の向上が期待できる。このような養生効果によって圧縮強度は、4.5～23%の増進を示す。

圧縮強度の増進効果は、水セメント比が高いほど、大きくなる傾向を示している。これは水セメント比が高いほど、コンクリートの空隙構造はポーラスで、逸散可能な自由水量が多く、収縮低減剤の塗布で水分蒸発の抑制効果も相対的に大きくなることに起因すると考えられる。このことは、表-3と図-7の(2)の水分蒸発の抑制効果からも確認できる。

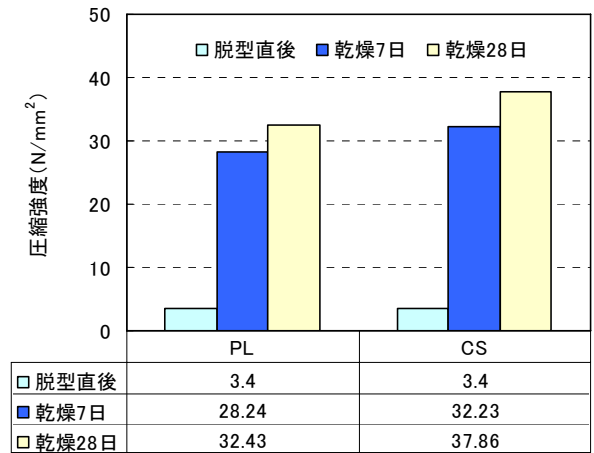
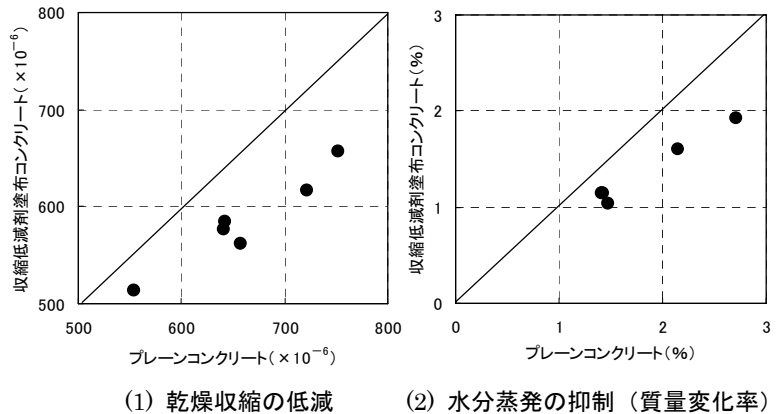
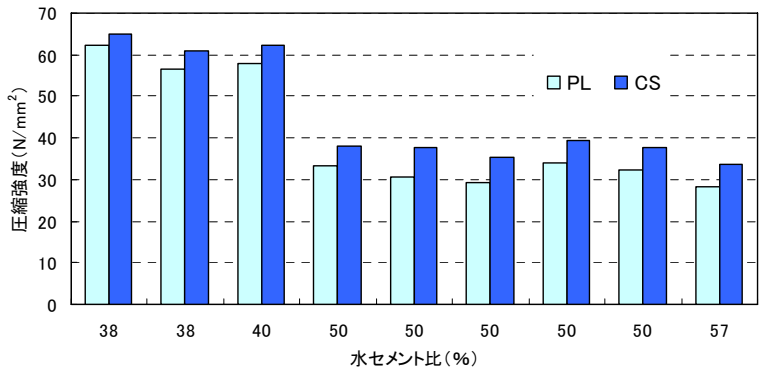


図-6 圧縮強度の増進効果



(1) 乾燥収縮の低減

(2) 水分蒸発の抑制 (質量変化率)



(3) 圧縮強度の増進

図-7 塗布タイプ収縮低減剤による性能向上

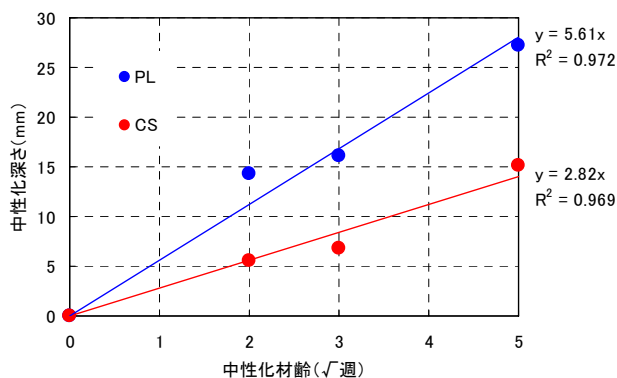
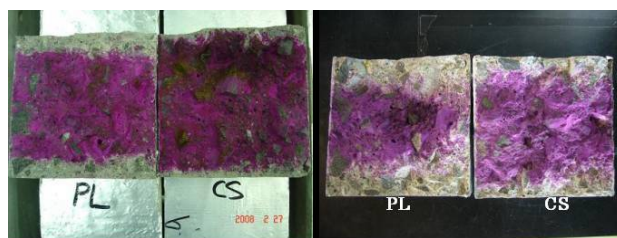
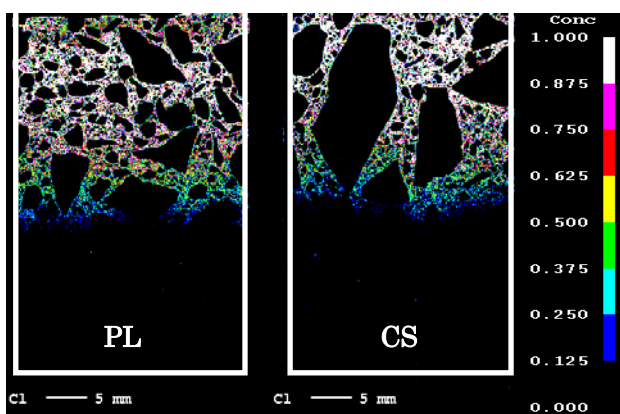


図-8 中中性化促進試験



(1) 促進材齢 4 週 (2) 促進材齢 25 週
写真-1 促進中中性化試験



(1) EPMA



(2) 硝酸銀噴霧

写真-2 塩化物イオン浸透深さ

3.3 耐久性能の向上

本研究では、塗布タイプ収縮低減剤による収縮低減以外に、水分逸散の抑制に伴う養生効果に注目しており、養生効果として圧縮強度の増進を挙げているが、初期材齢の水分を保持することは、圧縮強度で表せないコンクリートそのものの品質向上に繋がるものと考えられる。特に初期材齢の養生は、コンクリートの空隙構造の形成に最も重要な役割を果たしており、また空隙構造はコンクリートの長期的な耐久性能に大きく影響を及ぼす因子である。

塗布タイプ収縮低減剤による養生効果、それに伴う空隙構造の緻密化がコンクリートの耐久性能の向上に及ぼす効果を検証するために行った中中性化促進試験の結果を図-8に、試験状況を写真-1に示す。促進材齢 25 週までの結果から PL コンクリートの中中性化速度係数は 5.61 に比べて、CS コンクリートの中中性化速度係数は 2.82 になっており、塗布タイプ収縮低減剤による中中性化進行の抑制効果が認められる。

濃度 10%塩化ナトリウム水溶液中に 22 週間浸漬したコンクリートの塩化物イオン浸透深さの測定結果を EPMA によって求めたものを写真-1の(1)に、硝酸銀噴霧法によって求めたものを写真-2の(2)に示す。

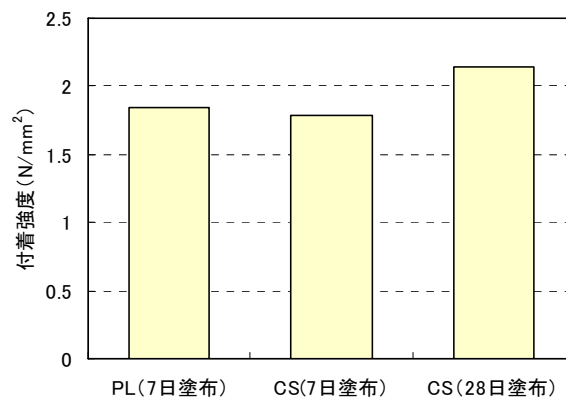


図-9 付着強度

EPMA 及び硝酸銀溶液の噴霧による塩化物イオン浸透深さは、PL コンクリートで 24mm、CS コンクリートで 21mm になっており、塗布タイプ収縮低減剤による塩化物イオン浸透の抑制効果が認められる。

実際の現場で塗布タイプ収縮低減剤が使用される場合、表面強化材、SL 材等の表面仕上げ材との併用も想定されており、先塗りした塗布タイプ収縮低減剤と表面仕上げ材との付着強さ実験の結果を図-9に示す。硬質ウレタン樹脂を用いた本実験結果から、CS コンクリートは PL コンクリートと同等以上の付着強さが得られること

が示されている。

以上のように、塗布タイプ収縮低減剤は、本来の収縮低減効果以外に、初期材齢の水分の逸散防止による養生効果、それに伴う空隙構造の緻密化、圧縮強度の増進効果、耐久性能の向上のような副次的な効果が期待できることが示された。また、施工面でのメリットとしては、硬化コンクリートに塗布することから、フレッシュ及び硬化コンクリートの性状に影響を及ぼさないことが挙げられる。さらに経済的な面からは、断面が大きい部材ではコストパフォーマンスに優れることも考えられる。

一方、収縮低減材料全てについて言えることではあるが、終局的にはひび割れについての低減効果を定量的に示すことが課題になると考えられる。したがって、今後は、初期材齢の養生効果及び長期材齢にかけての収縮低減効果によるコンクリートのひび割れ低減性能、すなわちひび割れ抵抗性を検討するとともに、水分逸散の抑制のメカニズムについては、推測の域を超えるさらなる考察が必要であると考えられる。

4. まとめ

コンクリートの収縮低減策の一つである塗布タイプ収縮低減剤を用いてその収縮低減効果及び養生効果を検討した。本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 塗布タイプ収縮低減剤によって、約 70 μ の乾燥収縮低減及び約 25% の水分保持性能の向上が期待される。
- (2) 初期材齢の優れた水分保持性能によって養生効果を発揮し、空隙構造は緻密になる。
- (3) 塗布タイプ収縮低減剤の養生効果により圧縮強度は増進し、中性化進行の抑制、塩化物イオン浸透の抑制等の耐久性能の向上が認められる。

参考文献

- 1) 例えば、日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説，pp.119 - 124，2006
- 2) 木之下光男，谷村充，名和豊春：コンクリート用収縮低減剤の品質規準に関する検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.279 - 283，2007
- 3) 富田六郎，下山善秀，井上潔：乾燥収縮低減剤を含浸させたコンクリートののせ以上について，セメント技術年報，No.40，pp.387 - 390，1986
- 4) 郭度連，佐竹紳也：膨張材及び収縮低減剤を用いたコンクリートの収縮低減効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.573 - 578，2007
- 5) 複合材料研究委員会「ポリマーセメントモルタル試験方法小委員会」：ポリマーセメントモルタル試験方法規準(案) / (その2)，コンクリート工学，Vol.25，No.8，pp.4 - 7，1987
- 6) 富田六郎：コンクリート用有機系収縮低減剤の作用機構及びその効果に関する実証的研究，東京工業大学博士論文，1994
- 7) 榎原泰造・近松竜一・十河茂幸：コンクリートの乾燥防止用各種養生剤の適用効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.1，pp.817 - 822，2005
- 8) 名和豊春：収縮低減材(剤)によるコンクリートのひび割れと制御～理論と実践～，コンクリートテクノ，Vol.24，No.11，pp.51 - 58，2005
- 9) 谷村充：ひび割れ低減対策－収縮低減剤の原理・効果と使用例，コンクリートテクノ，Vol.23，No.1，pp.38 - 47，2004