

論文 表面仕上げを施したコンクリートの乾燥収縮性状に関する研究

今本 啓一^{*1}

要旨：乾燥収縮ひび割れに関する研究は古くより行われているが、その多くはコンクリート自体の収縮に関するものである。本研究は、表面仕上げ材がコンクリートの乾燥収縮挙動に及ぼす影響を実験的に検討したものであり、①仕上げ材の種類によってはコンクリートの乾燥収縮に著しく影響すること、②収縮ひずみと質量変化率の間には概ね一義的な対応関係が認められることを示す。さらにこの点を踏まえて、仕上げ材による乾燥収縮抑制効果は、仕上げ材による水分逸散抑制効果であると仮定して、③既往の乾燥収縮予測式における部材表面積の項を修正する「仕上げ係数」を提案した。

キーワード：表面仕上げ、乾燥収縮、質量変化率、部材表面積

1. はじめに

乾燥収縮ひび割れに関する研究は古くより行われているが、その多くはコンクリート自体の収縮に関するものである。建築物は一般に躯体表面に仕上げが施される場合が多く、したがってこの種の構造物の収縮ひび割れ制御を図るためには、仕上げが施された状態での収縮挙動を把握することも重要であると考え¹⁾。そこで本研究では、主として外装仕上げ材がコンクリートの乾燥収縮性状に及ぼす影響について、実験的な検討を行った。本論はその結果を述べるものである。

2. 既往の研究と仕上げ時期の事前調査

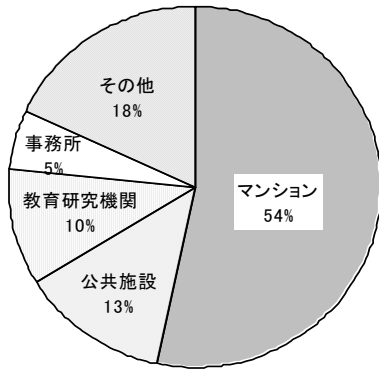
仕上げ材がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響を検討した研究は国内外を通して非常に少ない。関連する研究は、嵩、坂本ら²⁾によってなされたものが見られるのみであり、その中では、仕上げ材の塗布によりコンクリートの乾燥収縮が大幅に抑制された報告がなされている。但し、現象の報告にとどまるものであり、総合的な仕上げ材の性能評価の段階には至っていない。仕上げ材がコンクリートの中性化を抑制する効果

を、仕上げ材の透湿性の観点から検討したものとして、千歩、馬場ら³⁾の研究があり、仕上げ材に水分移動抑制効果のあることが報告されている。このことから、仕上げ材がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は、その水分移動抑制効果と関連のあることが推察される。

一方、仕上げ材がコンクリートの乾燥収縮性状に影響を及ぼすならば、その仕上げ時期も重要な影響因子となる。建築物の施工工程における、躯体完成から仕上げまでのおおよその期間を把握するために、15 階建て以下の建物を中心とする 125 件の鉄筋コンクリート造建物の現場工程表を用いて事前の調査を行った。**図-1**は、調査対象の構造物を用途別に分類したものであるが、本調査では半分以上をマンションが占めている。一階躯体完成から外壁仕上げの開始時迄の期間を**図-2**に、最上階躯体完成から外壁仕上げの終了時迄の期間を**図-3**に示す。躯体に仕上げを施すまでの期間は、概ねこの範囲内にあると仮定している。

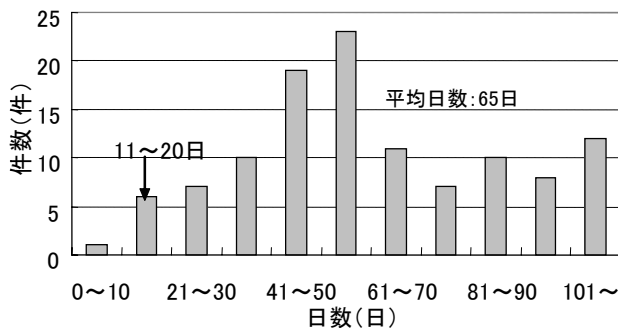
図-2, 3によると、躯体完成から外壁仕上げの開始時迄の期間は広い範囲で分布しているが、11~20 日で塗布するケース (**図-2**) も見

^{*1} 足利工業大学 工学部 建築学科 講師 博士 (工学) (正会員)

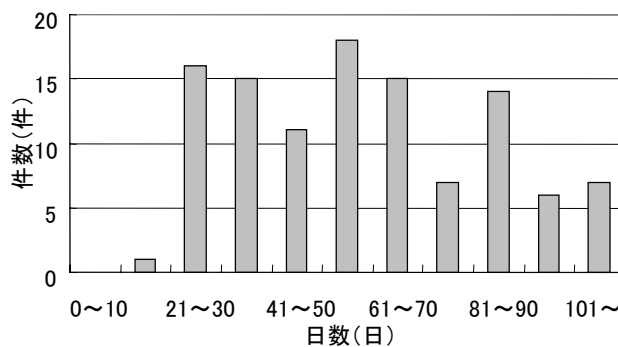


図－１ 調査建物の分類

受けられ、おおよそ 90 日に至るまでその時期はまんべんなく分布していることが分かる。一般環境下におけるコンクリート部材の収縮ひずみの進行が数ヶ月から場合によっては数年にわたって進行することからも、仕上げ材が収縮ひずみ挙動に何らかの形で影響を及ぼす可能性は十分高いものと推察される。以上の調査結果を踏まえ、後述の仕上げ材の影響を検討する実験では、この調査結果を概ねカバーするものとして、仕上げ材の施工時期を乾燥後材齢 28 および 91 日とした。



図－２ 一階躯体完成から外壁仕上げ開始迄の期間



図－３ 最上階完成から外壁仕上げ終了迄の期間

3. 仕上げ材の影響確認実験の概要

3.1 使用材料と調合

使用材料と調合を、表－１，２に示す。

表－１ 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント密度 3.16g/cm ³
細骨材①	陸砂(混合比 70%wt)：表乾密度 2.60g/cm ³ ，吸水率 1.96%
細骨材②	砕砂(混合比 30%wt)：表乾密度 2.60g/cm ³ ，吸水率 1.38%
粗骨材	碎石：表乾密度 2.68g/cm ³ ，吸水率 1.02%，実積率 59.0%
混和剤	AE 減水剤
水	地下水

表－２ 計画調合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
		水	セメント	細骨材	粗骨材
57.5	49.9	180	314	880	909

3.2 試験体形状

本研究で使用する試験体は、30×30×18cm 板に端面をアルミ箔テープでシールしたものである（図－４，写真－１参照）。使用する仕上げ材とその組み合わせを表－３，４に示す。なお、塗材の厚さは超音波膜厚計により測定（片面 5 箇所を平均）したものである。

表－３ 仕上げ材使用材料

塗材(主材)	アクリル系外装薄塗材	
	ウレタン系外装薄塗材	
	エポキシ系外装薄塗材	
シーラー	水性シーラー	
壁紙	市販壁紙	
タイル	磁器質無釉モザイクタイル	
タイル下地	モルタル	セメント：珪砂＝1：0.3（セルロース系保水剤添加）
	ボンド	変成シリコーン系樹脂

表－４ 仕上げ材の種類と組み合わせ

No.	仕上げ面 A	仕上げ面 B	厚さ(mm)	施工時期
1	無		—	乾燥後 28 日
2	壁紙		—	
3	エポキシ		0.54	
4*	エポキシ	壁紙	0.40 (A 面)	
5	エポキシ	アルミ箔	0.48 (A 面)	
6	ウレタン		0.34	91 日
7**	ウレタン		0.73	
8	アクリル		0.55	28 日
9**	アクリル		0.83	91 日
10	タイル(モルタル下地)		—	28 日
11	タイル(ボンド下地)		—	
12	タイル(ボンド下地)		—	91 日
13	アルミ箔		—	28 日

*設置ゲージ 3 本，**乾燥後 91 日で二度目塗り

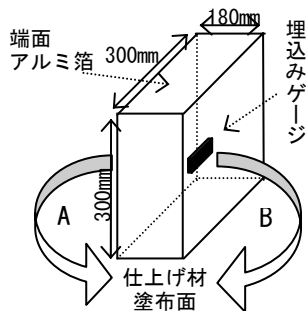


図-4 試験体形状



写真-1 試験体外観

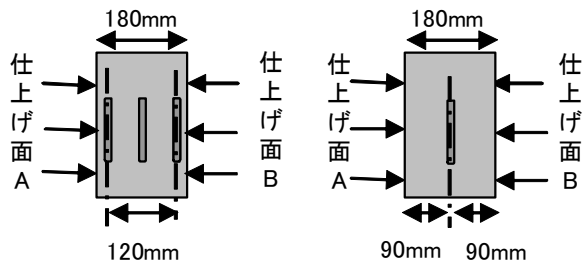


図-5 ゲージ位置 (図-4 上より: 左 No. 3, 右その他)

3.3 測定方法

コンクリートは打設後 2 日で脱型し、20℃水中にて 12 日間養生した。その後、20±3℃、60±5%R. H. の恒温恒湿室において、試験体下部にコロ（丸鋼）を設置した状態で、埋込み型ひずみゲージ（図-5 参照）によりひずみを計測した。なお質量の計測も同時に行い、収縮ひずみとの関係についても検討した。

4. 実験結果と考察

4.1 仕上げ材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響

図-6 は、乾燥後材齢 28 日において仕上げ材を施したコンクリートの乾燥収縮の変化を示したものである。図より、全面にアルミ箔を施したコンクリートは、乾燥収縮ひずみがほとんど進展しておらず、本研究ではコンクリートの自己収縮の影響はないと判断される。タイル仕上げの場合について、材齢 180 日の時点で変成シリコン系樹脂下地としたものが、無塗布と比較して約 330×10^{-6} 、モルタル下地としたものが約 190×10^{-6} 、それぞれ収縮ひずみが小さくなっている。また、エポキシ系、アクリル系、ウレタン系の塗材を比較してみると、エポキシ系、ウレタン

系の間に大きな差はみられず、最も高い抑制効果は、アクリル系塗材において認められた。本塗布材を施したコンクリートの乾燥収縮ひずみは無塗布のものと比較して、材齢約 180 日の時点で約 150×10^{-6} 小さくなっているのがわかる。壁紙については、本研究の範囲内では、乾燥収縮が 180 日の時点で約 70×10^{-6} 程度小さくなるのみで、その抑制効果はほとんど認められない。

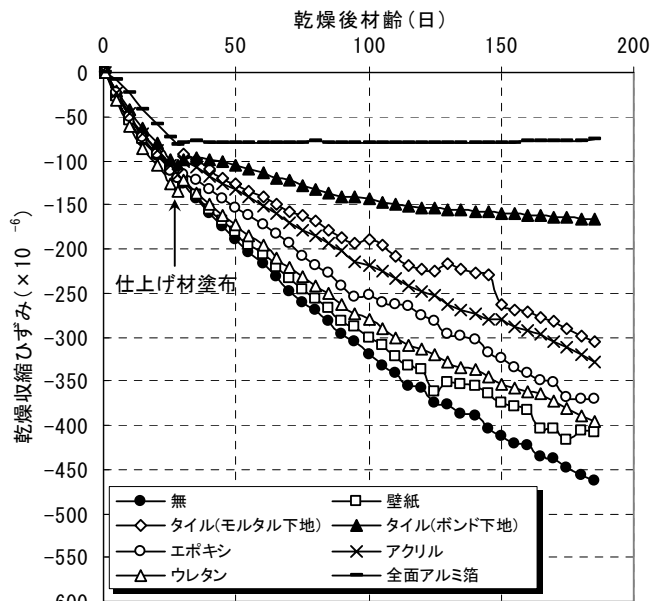


図-6 乾燥収縮ひずみの変化

4.2 仕上げ材の塗布時期の影響

図-7 は、タイル仕上げ（変成シリコン樹脂下地）時期がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響を示したものである。

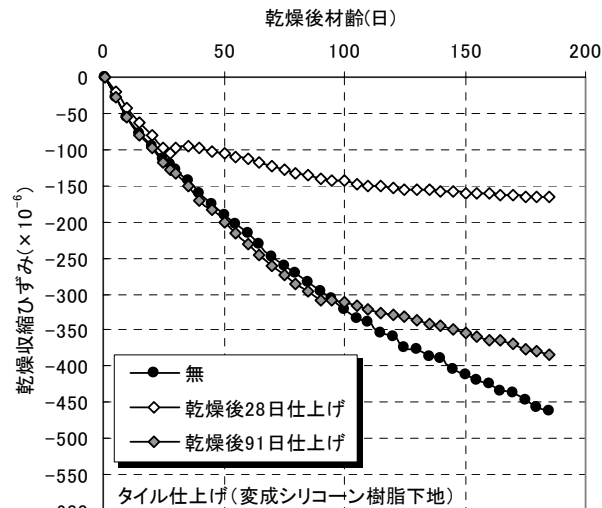


図-7 仕上げ材塗布時期の影響

乾燥後材齢 28 日および 91 日で仕上げを施したコンクリートの乾燥収縮ひずみを比較してみると、両者の間には材齢 190 日の時点で約 200×10^{-6} の差があり、仕上げを施す時期がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響は大きいと考えられる。また仕上げ後の傾向として、コンクリートの乾燥収縮曲線は、ほぼ平行に推移する形となっていることが分かる。

4.3 仕上げ材が異なる場合の反り変形

図-8 は、片面にエポキシ系塗材、もう一方に壁クロス材を施し、それぞれの面に種類の異なる仕上げを有するコンクリートの乾燥収縮ひずみ挙動を示したものである。図より、材齢 28 日の仕上げ材塗布直後、壁紙側のひずみは膨張側に進展し、一方、エポキシ側のひずみは急激に収縮側に変化している。これは壁紙が湿潤状態で施工されたため、直後に膨張し、その後の水分蒸発の抑制効果がエポキシ塗材よりも相対的に低いことから同面からの乾燥収縮が卓越したものと考えられる。以上のことから、部材に異なる

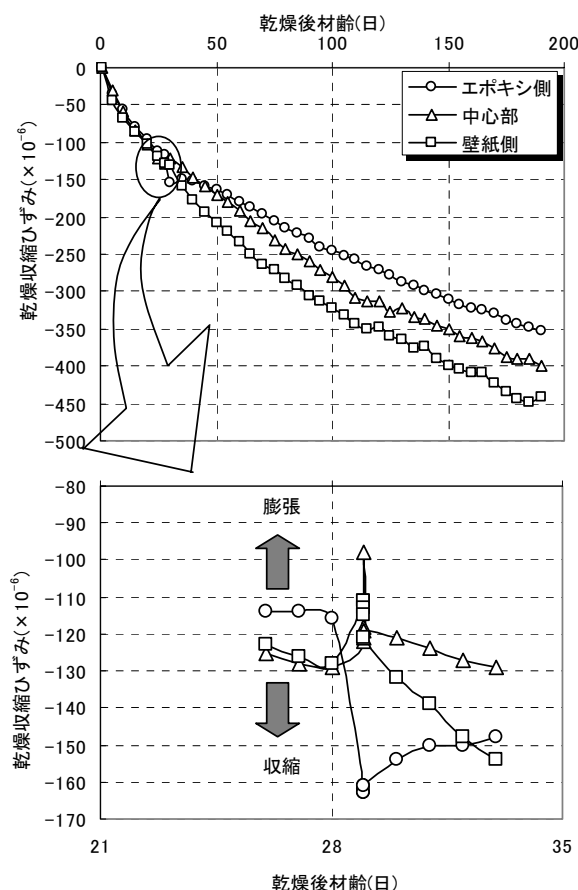


図-8 仕上げ材が異なる場合の反り変形

仕上げを施した場合は、反り変形が生じる可能性があり、ひび割れの検討では、この点も考慮する必要があるものと思われる。

4.4 塗り厚の影響

図-9 は、2 種類の塗り仕上げについて、塗厚がコンクリートの乾燥収縮ひずみに及ぼす影響について示したものである。

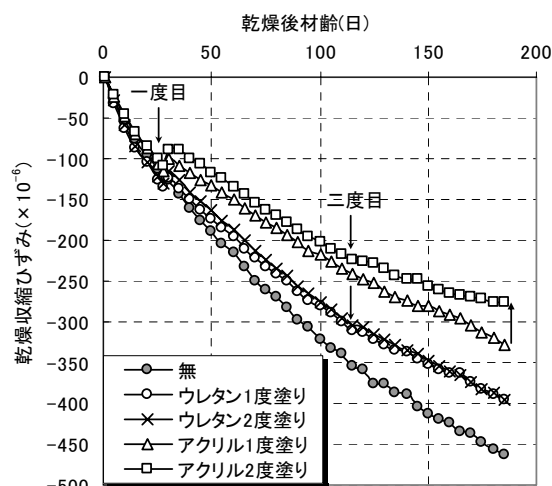


図-9 再塗布の影響

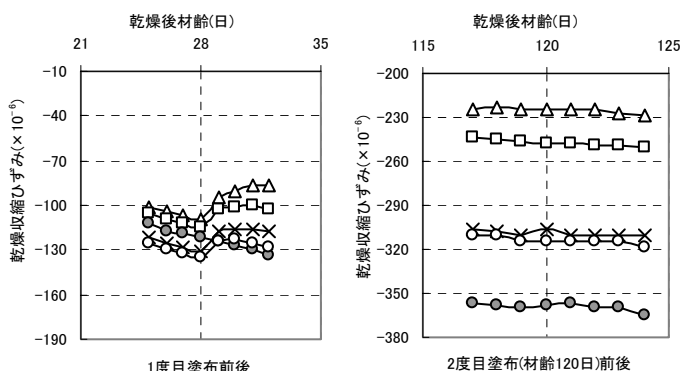


図-10 塗布前後のひずみの変化

1 度塗りのものは乾燥後材齢 28 日に、また 2 度塗りのものは、その後、材齢 120 日で再度塗布した。図より、ウレタン系塗材を施したものは材齢 180 日の時点での乾燥収縮ひずみは、ほぼ同じであることから、塗厚の増大による乾燥収縮の抑制効果は低いと考えられる。アクリル系塗材を施したものは、塗材の増大による乾燥収縮の抑制効果がウレタン系と比較して大きい (図中↑)。なお、図-10 に示されるように、1 度目の塗布時にはコンクリートに一時的に膨張挙動が認められるが、2 度目の塗布時には、大きな変化が見られないことも観測された。

4.5 質量減少率と乾燥収縮性状の関係

図-11は、仕上げ材を施したコンクリートの水分蒸発による質量変化率を示したものである。なお、質量変化率は表面仕上げ材自体の質量変化を差し引いたものである。図より、全面をアルミ箔でシールしたコンクリートは、ほぼ完全に水分蒸発が抑制されており、この点に関して収縮ひずみがほとんど進展していないことと関連づけることができる。仕上げ材を施したコンクリートは、仕上げ材の種類によって差はあるものの、全般に無塗布のものと比較してコンクリートからの水分の蒸発抑制がされていることがわかる。本実験の範囲内で最も抑制効果が高いのは、仕上げ後材齢約140日の時点ではタイル仕上げ(変性シリコーン樹脂下地)である。

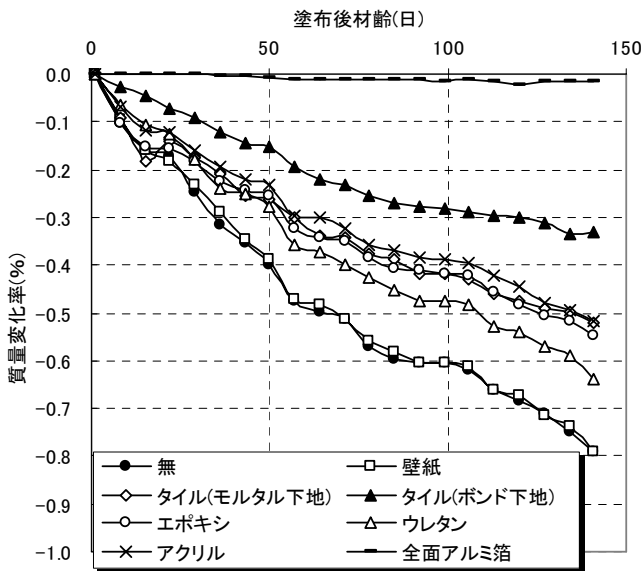


図-11 仕上げ後の質量変化

質量変化と乾燥収縮ひずみの相関を図-12に示す。本実験の範囲内において、仕上げ材の種類にかかわらず、質量減少と乾燥収縮ひずみは概ね一義的な関係にあることが認められる。このことから、仕上げ材によるコンクリートの乾燥収縮の抑制は、タイル仕上げによるコンクリートの収縮の力学的な拘束よりも、むしろ、コンクリートからの水分蒸発の抑制によるものが支配的であると判断される。

4.6 各種乾燥収縮予測式に基づく仕上げ係数の提案

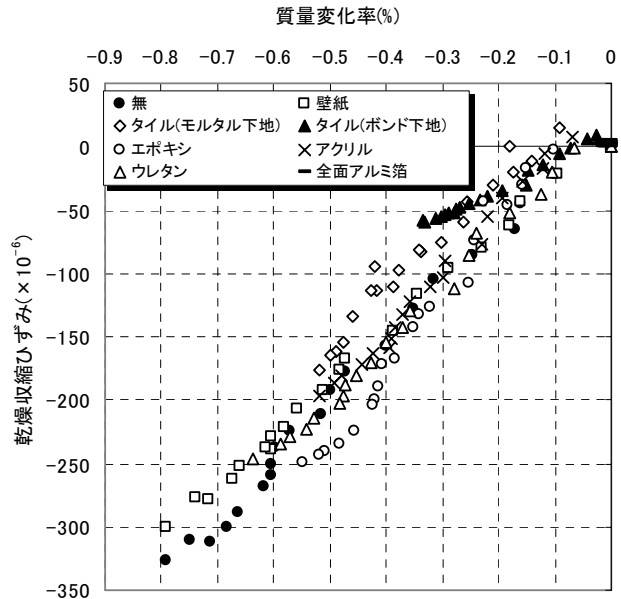


図-12 塗布後質量変化率と乾燥収縮ひずみ

前述の検討における仕上げ材によるコンクリートからの水分蒸発抑制効果は、仕上げ材によるコンクリートの見かけ上の体積表面積比の変化と解釈することもできる。この考え方に基づき、既存の乾燥収縮予測式に仕上げ材の効果を簡易に取り入れるための検討を行う。仕上げ材を施したコンクリートの最終的な乾燥収縮性状が確認できていないため、ここでは、既存の予測式として体積表面積比が最終値には関与しないがその進行に関与するガードナー(N.J.Gardner)式⁴⁾を対象とし、仕上げ材の効果を体積表面積比に乗じる仕上げ係数 a として評価することを試みた。

《ガードナー式》

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = \varepsilon_{sh\infty} \beta(h) \beta(t) \quad (1)$$

$$\beta(h) = 1 - 1.18 h^4 \quad (2)$$

$$\beta(t) = \left[\frac{7.27 + \ln(t - t_0)}{17.18} \right] \left[\frac{t - t_0}{t - t_0 + 0.015 (v/s)^2} \right] \quad (3)$$

ここで、

$\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥収縮ひずみ

$\varepsilon_{sh\infty}$: 最終収縮ひずみ

h : 相対湿度(%)

t : 材齢

t_0 : 乾燥開始材齢(日)

v/s : 体積表面積比(mm)

$v/s \Rightarrow v/(a \times s)$ a : 仕上げ係数

本式において、無塗布の試験体の乾燥収縮曲線にフィッティングする $\varepsilon_{sh\infty}$ (最終収縮ひずみ：本論では -1210×10^{-6}) を第一に同定する。同定された $\varepsilon_{sh\infty}$ を基に、各仕上げ材を施した部材の乾燥収縮曲線に適合する仕上げ係数 a を求めた。フィッティングされた収縮曲線を図-13に、各仕上げ係数を図-14に示す。

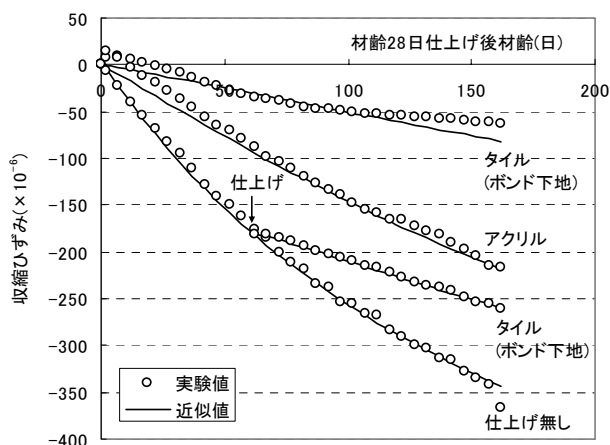


図-13 フィッティング曲線

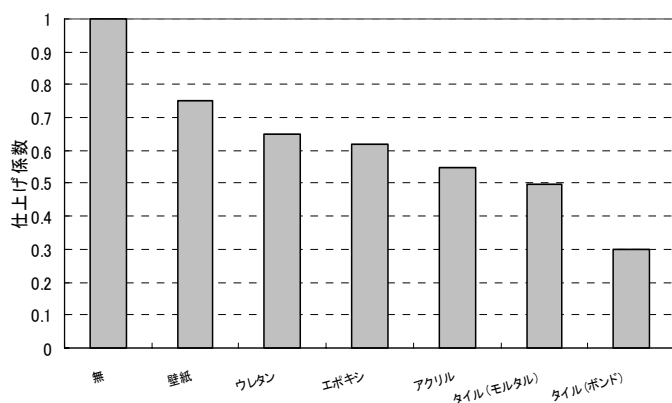


図-14 各種仕上げ材の仕上げ係数

図から無塗布のコンクリートに対して乾燥収縮低減効果の最も高いタイル（ボンド：変成シリコーン系樹脂下地）を用いたものは、コンクリートの見かけ上の乾燥面積が約 30%になることがわかる。また、塗材を比較してみると、図-6の結果を反映してアクリル系の効果が最も高く、仕上げ係数は無塗布に対して約 55%の値になる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 仕上げ材を施すことにより、コンクリートの乾燥収縮ひずみは小さくなる。本研究で用いた仕上げ材の中ではタイル仕上げ（変成シリコーン系樹脂下地）の乾燥収縮抑制効果が最も高かった。また塗材の中ではアクリル系に最も大きな抑制効果が認められた。メカニズムについては今後検討したい。
- 2) 仕上げ時期が異なる場合の仕上げ後の乾燥収縮曲線は、本研究で検討した材齢の範囲内では、ほぼ同じ勾配となる。
- 3) 同一部材において仕上げ種類が異なる際、部材に反り変形が若干認められる。
- 4) 質量減少率と乾燥収縮ひずみの関係は、仕上げ材の種類に関らず、概ね一義的に評価できる。
- 5) 前述の知見に基づき、仕上げ材を施すことによりコンクリート部材の見掛け上の乾燥面積が減少すると仮定し、既往の乾燥収縮予測式の構成因子である部材表面積に乗じる形の仕上げ係数を提案した。

参考文献

- 1) 今本啓一，平石裕子：外装仕上げ材がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響に関する研究，日本建築仕上学会大会学術講演会研究発表論文集，pp.219-222，2003.10
- 2) 坂本昭夫他：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす塗布材の影響に関する実験研究，日本建築学会大会学術講演梗概集 A，pp.55-56，1984.9
- 3) 千歩修他：仕上材がコンクリートの水分移動性状と中性化速度に及ぼす影響，日本建築仕上学会論文報告集，Vol.2，No.1，pp.17-22，1994.8
- 4) N.J.Gardner：Design Provisions for Shrinkage and Creep of Concrete，ACI SP-194，pp.101-133，2000.8