

論文 エポキシ樹脂系仕上げ材を施工したコンクリートの含水率、 細孔構造及び仕上げ材の接着性

湯浅昇^{*1}・笠井芳夫^{*2}・松井勇^{*3}・逸見義男^{*4}

要旨：本研究は、仕上げ材の下地コンクリートの含水率、細孔構造について、仕上げ材（エポキシ樹脂系塗床材）施工前及び施工後の品質を明らかにし、仕上げ材の施工材齢とコンクリートの品質との関係を検討した。更に、このエポキシ樹脂系塗床の剥離接着性と施工前のコンクリートの含水状態及び細孔構造との関係を検討し、表層0.5cmの質量含水率が4%、表面からの水分蒸発量が $3.0 \times 10^{-7}(\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$ 以下の場合、接着力が確保されることを示した。

キーワード：コンクリート、含水率、細孔構造、仕上げ材、塗床材、接着性

1. はじめに

構造体コンクリートは、施工後、乾燥によりコンクリート表層部の含水率が内部に比べて著しく低下する。これが表層部のセメントの水和の進行を阻害し、表層部の細孔構造を粗くする[1]。一般に打設直後から乾燥を受ける床部材は、他の部材に比べ、この現象が顕著に起きると予想される。また、このコンクリートに仕上げ材を施工すると、表面からの乾燥が緩慢となるか、または停止する。これに伴い、コンクリート内に水（水蒸気）の拡散（再配分）が起こり、再び水和が進行することも考えられる。

一方、仕上げ材と下地コンクリートの界面で、剥離（剥落）、ふくれ等の故障がみられることある。この現象に関連する下地コンクリートの品質には、接着のメカニズムの観点からコンクリートの含水状態（仕上げ材や接着剤の未硬化、劣化に関係する）、細孔構造（強度・投錨効果に関係する）があげられる。しかし、これらコンクリートの品質は、コンクリートの調合、混練、打設、乾燥、仕上げ材の施工によって経時的に変化するため、仕上げ材の故障防止の観点からコンクリートの品質を適切に管理し、評価することが難しい。

本研究は、コンクリートの品質を打設初期から観察し、乾燥過程における品質の変化、仕上げ材として用いた不透湿なエポキシ樹脂系塗床材を施工した後の乾燥停止に伴う品質変化を明らかにし、更に、その接着性について、施工前の含水状態及び細孔構造との関係を検討し、仕上げ材の適切な施工時期の評価を試みたものである。

2. 実験の概要

2.1 試験体の作製

(1) コンクリート

表1に示す調合により床部材を想定した試験体A（ $15 \times 15 \times 50\text{cm}$ ）と、試験体B（ $\phi 10 \times 15\text{cm}$ ）を作製した（図1参照）。この試験体の打設面は、打設直後より 20°C 、 $\text{R.H.}=60\%$ の空气中に開放した。なお、この打設面は、乾燥途中適切な時期にて仕上げを施した。

*1 日本大学助手 生産工学部建築工学科、工修（正会員）

*2 日本大学教授 生産工学部建築工学科、工博（正会員）

*3 日本大学教授 生産工学部建築工学科、工博（正会員）

*4 日本大学非常勤講師 生産工学部建築工学科

(2) 仕上げ材

仕上げ材として不透湿なA社製エポキシ樹脂系塗床材を用い、材齢1、3、7、14、28、56日に塗布量を2.0kg/m²として施工した。プライマー等による下地処理は行っていない。

2. 2 試験方法

(1) コンクリートの含水率測定方法 コンクリートの含水率測定は、セラミックセンサ（φ10×5mm:写真-1参照）を用いる方法[2]により行い、試験体Aの塗床施工面から0.5、1.5、2.5、5.0、7.5、10.0、13.5cmの深さにセンサを埋め込み、含水率を測定した。

(2) コンクリートの水分蒸発速度の測定方法 塗床施工時に、市販の試験紙（T社製乾燥度試験紙）を下地コンクリート面に貼り付け、試験紙の10分後の変色程度により、水分蒸発速度の測定を行った（図-2参照）[3]。

(3) コンクリートの細孔構造の測定 細孔構造測定用試料は、塗床施工時（材齢1、3、7、14、28日）及び、塗床施工後、コンクリート材齢56日に試験体Bの乾燥面から深さ0～1cm部分を切り出し、2.5～5.0mmの粒度に調整した後、アセトンによる水和の停止及びD-dry処理を行って作製した。細孔構造の測定は、水銀圧入法により行い、塩酸による試料中の骨材量の推定試験の併用により、骨材を除いたセメントペースト部分の細孔量（有効細孔量）として整理した。

(4) コンクリートの結合水量の測定方法 細孔構造用試料の強熱減量を全て結合水量とし、単位セメントペースト量に対する結合水量の割合を求め、これを結合水率とした。

(5) 塗床材の接着性試験 試験体Aを用い、塗床施工後14日に皮剥ぎ式剥離接着強さ試験により、塗床の剥離接着強さの測定を行った（図-3参照）[4]。本実験では試験片の幅は3cmとし、試験は同一条件で12回行い、その平均を剥離接着強さとした。

3. 仕上げ材（エポキシ樹脂系塗床）施工に伴うコンクリートの品質変化

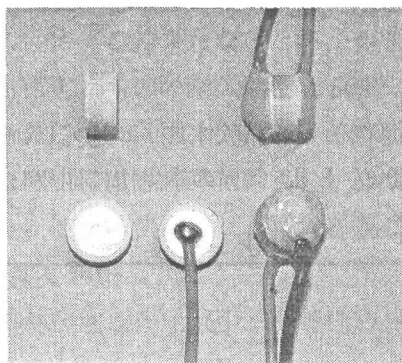


写真-1 セラミックセンサ

表-1 調合表

w/c (%)	単位水量 (kg/m ³)	絶対重量 (kg/m ³)			混和剤 (cc/m ³)	
		セメント	細骨材	粗骨材	No.70	No.303A
60	185	308	838	957	770	38

No.70：N社製AE減水剤

No.303A：N社製空気調整剤

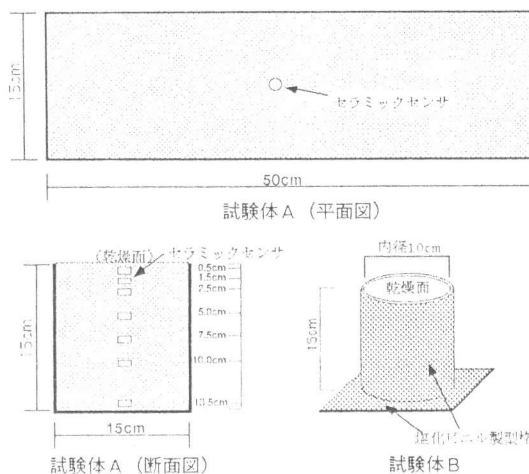


図-1 試験体

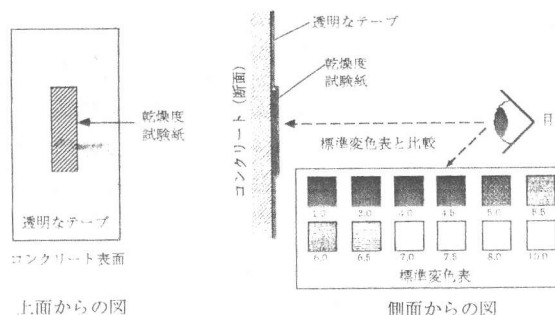


図-2 水分蒸発速度の測定

3. 1 含水率分布の変化

図-4は、乾燥及び乾燥の停止に伴う含水率分布の変化を示している。図-5は、深さ5mm部分の含水率の経時変化を、図-6は、材齢56日における含水率分布を、塗床施工材齢別に示したものである。乾燥過程では、図中の無施工（塗床を施工しない）のものが示すようにコンクリート表面から含水率が低下し、乾燥面からの深さが2.5cmまでは含水率が急激に低下し、深さ約5cmまで低下が見られる。しかし、図-5、図-6に示すように、コンクリート表面に塗床を施工すると、コンクリート表面からの乾燥が停止し、施工前に低下した含水率が回復、上昇する傾向が見られる。このように塗床を施工することによってコンクリート内部の含水率は、均一化する傾向にある。ただし、施工材齢が14日、28日の場合、内部含水率の均一化にはかなりの時間を要すると思われる。

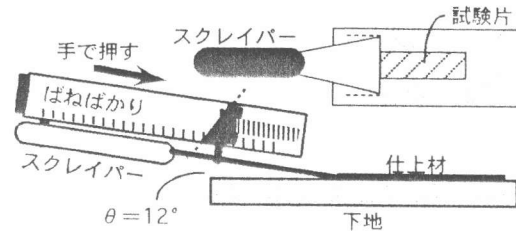


図-3. 皮剥ぎ式剥離接着強さ試験機

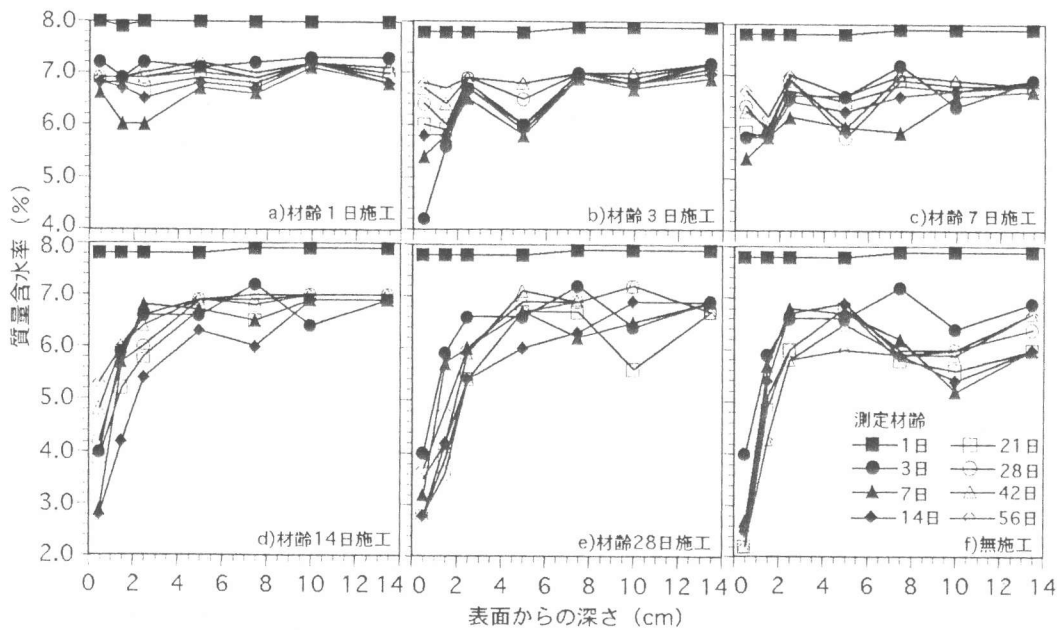


図-4 塗床施工前と施工後の含水率分布の変化

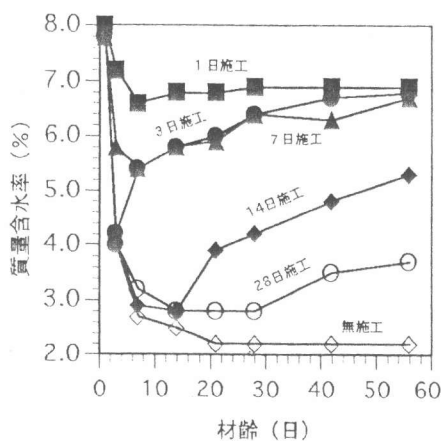


図-5 深さ5mm部分の含水率の経時変化

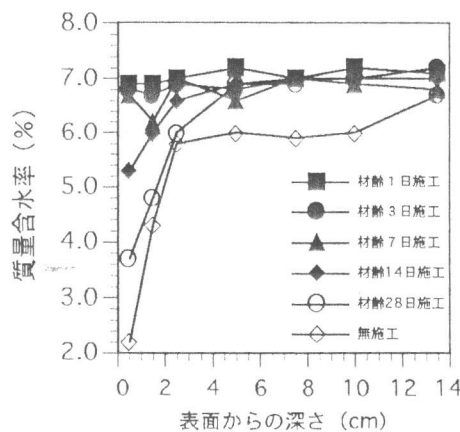


図-6 材齢56日の含水率分布

これらの傾向は、実塗床施工現場で得られた結果と相違している[5]。これには、実験室実験では温度、湿度をほぼ一定に管理したのに対し、施工現場実験では温度、湿度が変化していること等、環境条件の違いが複合化されており、現在のところ両者の明確な対応はできない。

3. 2 結合水率の変化

図-7は、深さ1cmまでの表層部コンクリートについて、水和の程度を示す結合水率を、塗床施工時（網掛け）及び塗床施工後、コンクリート材齢56日（白抜き）に測定した結果を示す。網掛けの棒グラフの経時変化は、乾燥を受け続けた場合の結合水率の経時変化を示す。また、それぞれの施工材齢ごとに示された施工時結合水率と施工後材齢56日（白抜き）の差は、施工後の水和による結合水の増加率を示す。この結合水率の増加量は、施工材齢が早いほど大きい。また、塗床を施工すると乾燥が抑制されるため、材齢56日で測定した結合水率（網掛け）は、施工材齢が早い程小さい。

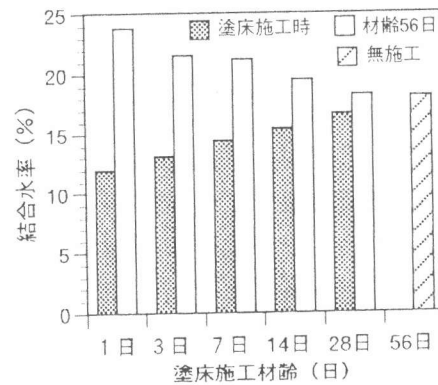


図-7 結合水率の変化

3. 3 細孔構造の変化

図-8は、水和による総有効細孔量を図-7と同じ試料、同じ手法で示したものである。塗床施工後材齢56日の総有効細孔量は、塗床施工時に比べて小さくなっている。この傾向は施工材齢が早いほど顕著である。これは前項の結合水率でも示したように、塗床施工後に水和が進むためである。

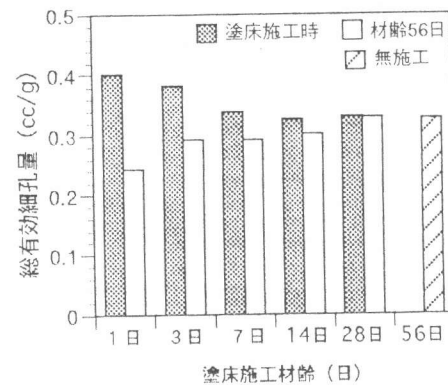


図-8 総有効細孔量の変化

図-9は、これらを細孔径分布で示したものである。実線で示したものを図(a)から(f)まで見ていくと、乾燥を受け続けるコンクリートの経時変化を見ることができる。これによると材齢3日以降、細孔径分布の経時変化が小さいことがわかる。

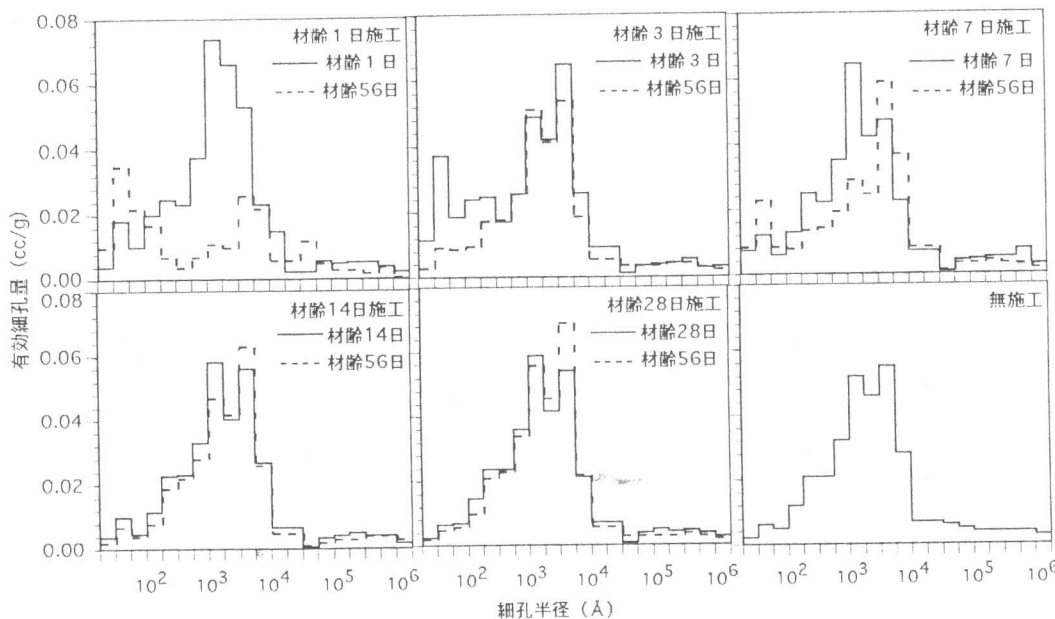


図-9 塗床施工時と材齢56日の細孔径分布の比較

すなわち、乾燥により水和の進行が抑制され、細孔構造が緻密化しにくいことを示している。一方、塗床の施工を行うと、材齢1日で施工した場合を除き、施工時と施工後材齢56日の差は小さく、材齢3日以降塗床を施工しても、若材齢時や養生の不足時に見られるような大きな細孔が残存することがわかる。

4. 下地コンクリートの品質とエポキシ樹脂系塗床材の接着性

4.1 塗床施工材齢と塗床材の接着性

図-10は、下地コンクリートに対するエポキシ樹脂系塗床材の剥離接着強さ（プライマー無塗布）を筆者らが試案した皮剥ぎ式剥離接着強さ試験によって測定し、塗床施工材齢との関係で示したものである。この結果、本実験条件の場合、塗床は、材齢7日以降に施工することにより高い接着強さが得られ、材齢10日以降では接着強さは一定となっている。しかし、実施工現場では往々にして、極端にコンクリートの乾燥状態が悪かったり、良かったりするの施工材齢と接着性の関係は慎重に扱うべきものとする。

4.2 下地コンクリートの含水率と塗床の接着性

打設初期から下地コンクリートに埋め込んだセラミックセンサを用いて深さ5mmにおける含水率を測定し、塗り床材施工時の含水率と剥離接着強さとの関係を示したものが図-11である。剥離接着強さは、下地コンクリートの含水率がおおよそ4%以下で塗床を施工したものは、高い剥離接着強さを示しほぼ安定している。

また、実現場で仕上げ材の施工時期を簡易に評価する方法を探るため、筆者らが研究中の乾燥度試験紙を用いた方法を本実験に適用すると、図-12のように、試験紙の変色の評価値が小さくなる（コンクリートの水分蒸発速度が小さくなる）と剥離接着強さが大きくなることからわかる[3]。剥離接着強さが安定するときの試験紙の評価値は5以下となっている。この時のコンクリート水分蒸発量は、先に報告した結果によると、おおよそ $3.0 \times 10^{-2} (g/cm^2 \cdot sec)$ 程度である。先に提案した「乾燥度試験紙を用いた構造体コンクリートの水分蒸発速度測定方法」[3]によって仕上げ材の施工時期の判定が可能と考える。

4.3 細孔構造と塗床材の接着性

接着剤の投錨効果は、コンクリート表面の孔の形態、孔の径、孔の容量、孔の強度、表面ぬれ性状によって相違すると考えられる。図-13は、これらの孔の状態を表すものの中から、ここでは塗床施工時の表層1cm部分の総有効細孔量と剥離接着強さとの関係を示したものである。一般にコ

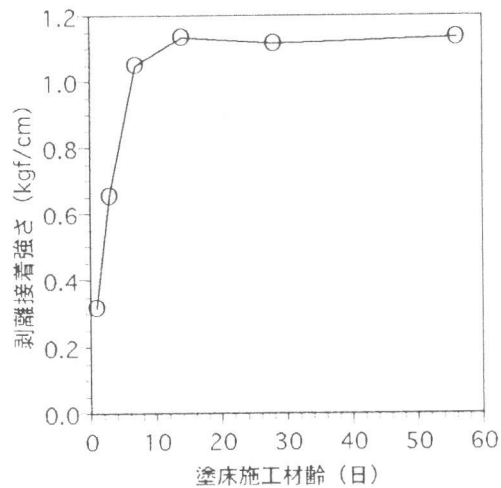


図-10 塗床施工材齢と剥離接着強さ

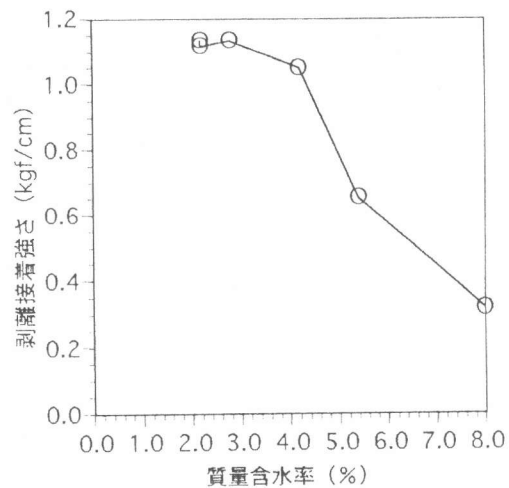


図-11 セラミックセンサによる深さ5mmの含水率と剥離接着強さ

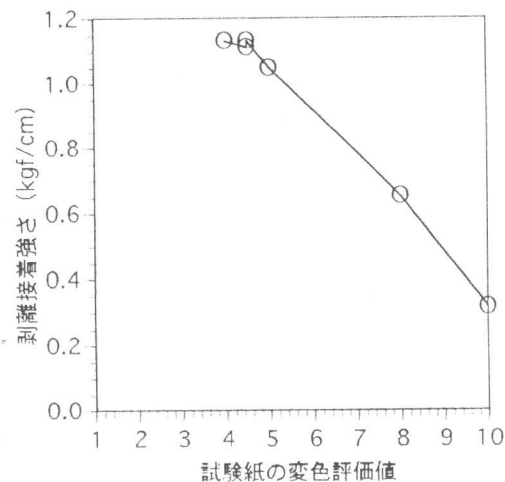


図-12 乾燥度試験紙による評価と剥離接着強さ

ンクリートの細孔は、水和の進行とともに、小径化、小容量化し、また強度増加等が同時に起こるので、総細孔量をこれらの現象の程度を総合的に表す指標と見るならば、水和の進行に伴い、剥離接着強さが増加することを示唆している。しかし、複合的な指標である故に、投錨のメカニズムを考慮してこの結果を解釈することが難しい。

これまで検討してきた塗床の接着性と含水率や細孔構造の関係は、含水率と細孔構造が同時に変化する同一実験から得られたもので、塗床とコンクリートの接着性に対するそれぞれの影響割合については、現時点では明らかでない。また、投錨効果にかかわる孔の品質について明解に評価できなかった。これらは、今後の課題である。

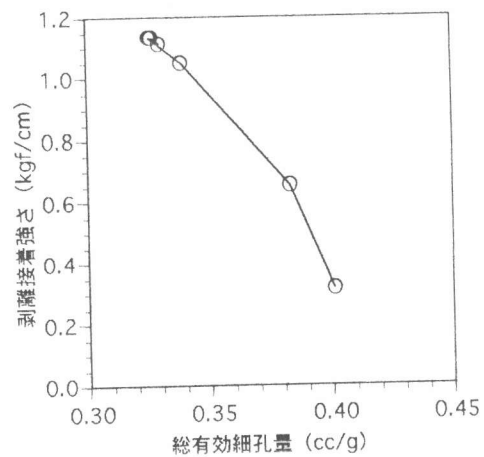


図-13 塗床施工時の総有効細孔量と剥離接着強さ

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

(1) 乾燥を受けたコンクリートは、表面に近いほど含水率が低い、仕上げ材として用いたエポキシ樹脂系塗床の施工後は、含水率が回復する傾向がみられる。

(2) 表層部の乾燥によって残った未水和セメントは、塗床の施工により再び水和が進み、組織の緻密化が若干進む。これらの変化は、塗床施工材齢の遅れとともに小さくなる。

(3) 打設直後より乾燥を受ける場合、コンクリートの表層部は水和が進まず、細孔径分布は材齢3日以降変化が小さい。

(4) 施工された塗床材の剥離接着強さが高く、しかも安定する下地コンクリートの表層部（深さ5mm）の質量含水率は、施工時で4%以下であった。

(5) 乾燥度試験紙を用いた水分蒸発速度測定と剥離接着強さの関係を検討した結果、剥離接着強さが高く安定する場合の施工時の試験紙の変色の評価値は5以下を示し、このときのコンクリート表面からの水分蒸発速度はおおよそ $3.0 \times 10^{-7} (\text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec})$ 以下であった。仕上げ材の施工時期を乾燥度試験紙によって評価できるものと思われる。

謝辞

なお、本研究の一部は、平成6年度文部省科学研究費（一般研究（C）：代表笠井芳夫）の交付を受けて行ったものである。記して謝意を表す。

参考文献

- 湯浅昇・笠井芳夫・松井勇：表層コンクリートの品質の評価（乾燥を受ける表層コンクリートの細孔構造の経時変化）、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp.199-200、1994
- 笠井芳夫・松井勇・湯浅昇：埋め込みセラミックセンサによるコンクリートの含水率測定方法、第20回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集、pp.7-12、1993.11
- 笠井芳夫・松井勇・逸見義男・湯浅昇・佐藤弘和：乾燥度試験紙を用いた構造体コンクリートの水分蒸発速度測定方法の提案（その1、その2）、日本建築学会大会学術講演梗概集A、pp.1291-1294、1994
- 佐藤弘和・笠井芳夫・松井勇・逸見義男・湯浅昇：皮剥式仕上材接着強さ試験方法の提案、日本大学生産工学部第27回学術講演会、pp.13-16、1994
- 湯浅昇・田中享二・浅見勉・橋田浩：塗り床を対象とした下地コンクリートの含水率分布及び細孔構造、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.675-680、1994