

論文 打継がれた硬化セメントペーストの水分逸散挙動に関する検討

内海 秀幸*¹・紀伊国 洋*²・足立 一郎*³

要旨: 打継がれた材料系の組織構造の推定を目的とし、硬化セメントペーストで作製した小供試体によるモデル実験において、打継ぎを行わない材料系と打継ぎのある材料系の水分逸散挙動を打設直後からの乾燥による質量減少に基づき比較した。旧側材料打設から24時間以内の新側材料の打継ぎを対象とし、水セメント比と打継ぎ時間間隔をパラメータとして実験を行った。打継がれた材料系の組織構造特性を、見かけ上の水セメント比の変化として取り扱い、その変化量を推定した。

キーワード: 逸散水率, 結合水率, 蒸発可能水率, 硬化セメントペースト, 水セメント比

1. はじめに

コンクリートの打設では、工程や施工性の都合により、打設に時間差が生じる場合がある。このような打継ぎ施工では、水和反応の程度の異なる材料が接することから、新旧の材料間において複雑な水分の移動が生じることが予測され、打継ぎのある材料系特有の組織構造¹⁾が形成されるものと推測される。

施工後に打継ぎ部分のコアを採取し、直接的にその付着強度やその組織構造を評価することは可能であるが、打継がれた材料の品質を制御するといった観点からは、打継ぎ直後からの材料系内の水分状態の変遷と組織構造の形成過程を明らかにすることが重要な課題の一つとなる。

しかし、セメント系材料中の水分の移動は、配合や水和反応の進行程度に応じて高度な非線形性を有していることから²⁾、その過程における水分移動の方向や圧力勾配を単純に定めることは難しく、直接的に打継ぎのある材料系の水分の収支や組織構造を明確にすることは困難である。したがって、この種の問題においては、セメント系材料の水分状態と組織構造の特性を間接的に表現している物理挙動に着目すること、その物理挙動に対して打継ぎのない材料系と打継ぎのある材料系との相対的な差に着目することが重要となる。

そこで、本研究では打継ぎのある材料系と打継ぎのない材料系の打設直後からの水分逸散挙動に着

目した。水分の逸散挙動は一定の環境条件においては、材料の配合に基づいた緻密性と材料内に存在する蒸発可能水の比率に依存することから³⁾、打継ぎのある材料系の打設直後からのその挙動は、打継ぎにより形成された組織構造特性を反映した現象である。本研究の特色は打設直後からの水分逸散挙動に着目した研究でありながらも、その挙動に基づいて打継がれた材料系における組織構造の推定を目的としたところにある。

本研究では硬化セメントペーストで作製した小供試体によるモデル実験において、打設直後からの水分逸散挙動を検討する。水分逸散挙動は材料表面の乾燥による質量減少に基づいて評価した。供試体は水平打継ぎにより作製された一面開放円筒型のものを用いた。旧側打設より24時間以内の打継ぎに着目し、水セメント比、新側材料の打継ぎ時間間隔をパラメータとして実験を行った。実験結果より、打継ぎにより形成された組織構造を見かけ上の水セメント比として整理し、結合水率の時刻歴変化より打継ぎのある材料系の組織構造の空間分布について吟味した。

2. 水分逸散挙動を表現するための式

実験結果から得られる水分逸散挙動の特性を定量化することを目的として、本研究では時刻歴の逸散水率に対して以下のような双曲線式のカーブフィット式を採用する。

*1 : 千葉工業大学 助手 工学部土木工学科 工博 (正会員)
 *2 : 千葉工業大学大学院 工学研究科土木工学専攻 工修 (正会員)
 *3 : 千葉工業大学 教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

$$w_d = (W_d \cdot t) / \left(\frac{1}{\lambda W_d} + t \right) \quad (1)$$

式(1)において、 W_d は打設セメント量当たりの終局逸散水率(g/g)、 w_d は時間 t における打設セメント量当たりの逸散水率(g/g)であり、また、 λ は水分逸散挙動の容易さをあらわす定数である。式(1)は、終局値と一つの定数により時刻歴での水分逸散挙動を表現し得ることから、実験結果をカーブフィットするに際して有効な式である。予備実験の結果、水セメント比 40%～60%での時間-逸散水率関係は式(1)を用いることにより相関係数 0.97 以上でカーブフィット可能であることが確認された。カーブフィットの方法は、繰り返し計算で最適な値を得るために、それぞれの初期値には概略値を入力するが、定数である λ は初期値において 1.0 程度の値を与え、 W_d には本実験期間(240 時間)における最終値を与えることとした。

3. 実験の概要

3.1 供試体

円筒容器に硬化セメントペーストを打設することにより、一面開放の打継ぎのない供試体と打継ぎのある供試体を作製した(図-1 参照)。容器径は 4.3cm であり、打継ぎのある供試体は打継がれることにより、高さが打継ぎのない供試体と同じ高さ H となるように、新旧それぞれの高さは共に $H/2$ とした($H=2\text{cm}$)。表-1 に硬化セメントペーストの容器への目標打設重量を示す。目標打設重量はセメントの密度 3.15g/cm^3 、水の密度 1.0g/cm^3 として各水セメント比において所定の高さ($H=2\text{cm}$)となるよう計算されている。なお、実際の打設重量は目標打設重量に対して 1%以内の誤差で打設した。セメントは普通ポルトランドセメントを用いた。

3.2 実験条件

供試体は容器ごと、打設直後より恒温恒湿デシケータ内に設置した。デシケータ内の温度は 30°C ($\pm 0.5^\circ\text{C}$)、湿度は 60% ($\pm 3\%$) に設定した。デシケータ内の雰囲気攪拌用のファンは $0.7\text{m}^3/\text{min}$ 機能を有している。質量減少の計測には精度 0.01g を有するデジタル秤を用いた。なお、質量減少の計測は容器ごと行うこととしたため、供試体側面へのシーリングは行っていない。

本実験では、水セメント比 40%、50%、60%の三種類の配合に対して、新側の打設は旧側打設後 3, 6, 24 時間後に行うこととした。実験に際しては、先ず高さ $H/2$ の旧側となる供試体を作製し、新側を打継ぐ際に高さ H の打継ぎのない供試体を作成した(図-2 参照)。逸散水率は原則として 24 時間間隔で 240 時間計測することとしたが、予備実験の結果より逸散水率が顕著に変化する打設直後より 24 時間～72 時間においては集中的に計測を行った。

3.3 結合水率の計測

結合水率計測用に逸散水率計測と同条件での実験を別途行った。結合水率の算定は、容器に打設した硬化セメントペースト量、水分逸散量ならびに 105 度の乾燥炉で 72 時間乾燥を行うことにより得られる蒸発可能水量を計測することで次式より求めた。

$$w_n = \alpha - (w_{we} + w_d) \quad (2)$$

式(2)において、 α は水セメント比、 w_n は打設セメント量当たりの結合水率(g/g)、 w_{we} は打設セメント量当たりの蒸発可能水率(g/g)である。結合水率の計測は新側打設直後より 24, 48, 120, 168, 216, 240 間後の計 6 回行った。なお、打継ぎのある供試体に対してはその材料系全体の結合水率を測定している。

4. 実験結果

4.1 旧側供試体の水分逸散挙動

旧側となる供試体(高さ $H/2$)の打設直後から 24 時間までの時間-逸散水率関係(w_d :打設セメント量当たり)を図-3 に示す。

表-1 供試体の打設重量

α :W/C	目標打設重量(g)	
40%	H/2:40.60	H:81.20
50%	H/2:36.26	H:72.51
60%	H/2:33.16	H:66.31

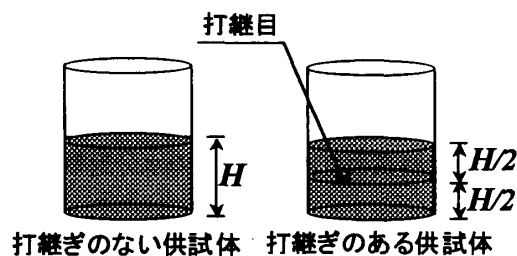


図-1 供試体の概要

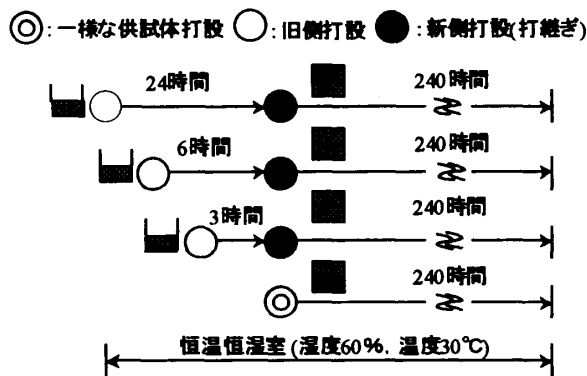
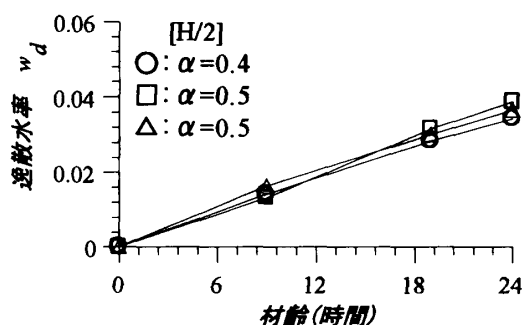


図-2 実験の概要

図より、打設直後から24時間以内の時間-逸散水率関係は水セメント比による相違はほぼ見られず、時間に対して線形的な増加傾向を示している。また、24時間後の結合水率 w_n も水セメント比40%と50%では0.086、水セメント比60%では0.092と水セメント比に関わらずほぼ同様な値であった。セメント量当たりの逸散水率 w_d と結合水率 w_n が水セメント比に関わらず同様な値を示す状態においては、系内に存在するセメントの絶対量が多い低水セメント比ほど、未水和セメントが多く存在することとなる。そのため、本実験では低水セメント比の材料ほど新側を打継いだ際に、新側材料の水分が旧側材料の未水和セメントとの水和に多く消費されることが予測される。また、表-2は旧側供試体の24時間後における水分状態を示している。表中、 $w_n + w_d$ は水和ならびに逸散によ

表-2 旧側供試体の24時間後における水分状態

α	$w_n + w_d$	$w_{we} = \alpha - (w_n + w_d)$
0.4	0.121	0.279
0.5	0.125	0.375
0.6	0.132	0.468

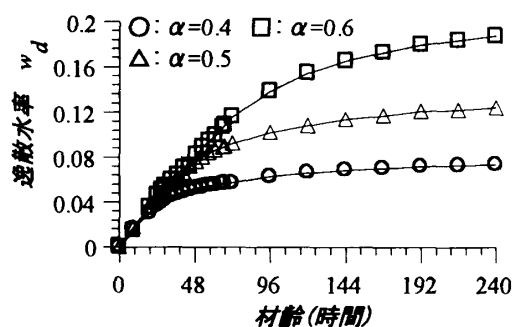
図-3 時間-逸散水率関係 ($H/2$, 24時間)

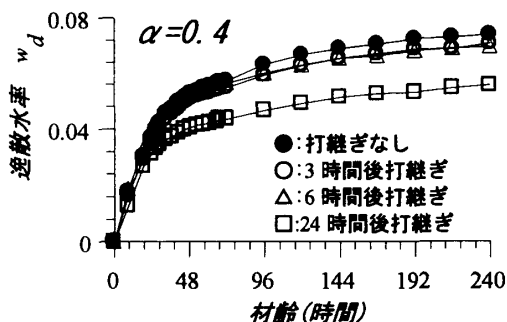
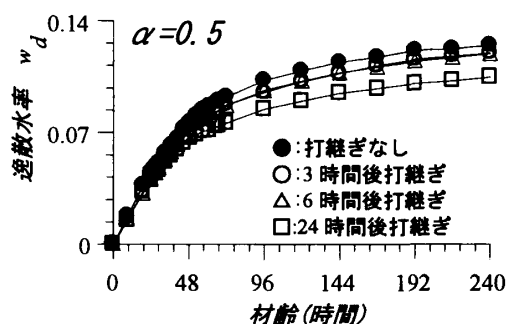
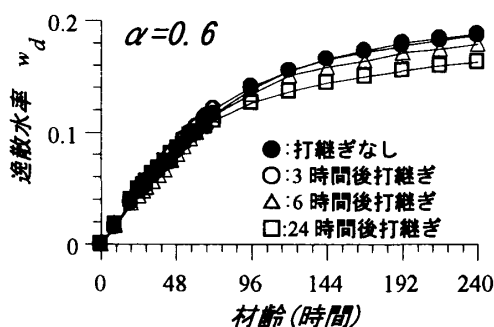
り消費された水分であり、蒸発可能水率 w_{we} の値は、見かけ上、旧側供試体の24時間後における含水状態としても理解できる。

4.2 打継ぎのある供試体と打継ぎのない供試体の水分逸散挙動

まず、打継ぎのない供試体(高さ H)の打設直後から240時間までの時間-逸散水率関係を図-4に示す。図より、逸散水率は水セメント比が低いほど低減する傾向を示しており、このような傾向は、セメント量に基づいた組織構造の緻密性が水分逸散挙動に影響することを示唆している。また、計測期間後半において各水セメント比の材料とも逸散水率の増加傾向は極めて緩やかであり、本実験の環境条件における平衡状態に近い水分状態にあると考えられる。

次に、打継ぎのない供試体と打継ぎのある供試体の時間-逸散水率関係を図-5から7に併せて示す。各図中、●は打継ぎのない供試体での結果(図-4に対応)、○は3時間後、△は6時間後、□は24時間後に打継がれた場合での結果である。時間軸は、新側を打継いだ時間を基準として描画している(新側と打継ぎのない供試体は同時に打設)。また、打継ぎのある供試体の逸散水率は系全体のセメント量を基準として描画している。図-5から7より、各水セメント比ともに打継ぎのある供試体の水分逸散挙動は打継ぎのない供試体に対してより低減した傾向を示している。このような水分逸散挙動の低減傾向は図-4の結果より評価すると、見かけ上水セメント比が低下したものとして解釈できる。また、打継ぎ時間間隔が長くなるにつれて、その低減される量は大きくなる傾向を示している。この打継ぎ時間間隔に伴った水分

図-4 時間-逸散水率関係 (H , 240時間)

図-5 時間-逸散水率関係の比較 $W/C=40\%$ 図-6 時間-逸散水率関係の比較 $W/C=50\%$ 図-7 時間-逸散水率関係の比較 $W/C=60\%$

逸散挙動の低減は、打継ぎ時間が長くなるにつれて旧側供試体の蒸発可能水率 w_{we} が乾燥による逸散と水和の進行により多く消費されるため、新側を打継ぐことにより形成された系に対して、計測開始時にすでに蒸発可能水率が低下していることに起因する。

つまり、打継ぎのない供試体に対する打継ぎのある供試体の水分逸散挙動の変化は、組織構造変化の観点からは、見かけ上の水セメント比の変化として考えられ、その低下の量は打設直前の旧側材料の蒸発可能水率に依存するものとして理解できる。

5. 考察

5.1 見かけ上の水セメント比に基づいた打継ぎのある材料系の組織構造変化の推定

打継ぎのない供試体に対する打継ぎのある供試体の組織構造の変化を見かけ上の水セメント比の変化に基づいて考察する。なお、考察は打継ぎのない供試体との水分逸散挙動がもっとも顕著な差を示した 24 時間後の打継ぎに着目して行う(図-5 から 7 における□の結果)。図-8 に打継ぎのない供試体の時間-逸散水率関係の実験結果(図中○)に対して、式(1)によるカーブフィット(図中実線)結果を示す。図より、水セメント比 60%の実験結果では、逸散水率が本実験期間内において十分収束していないため、双曲線式であるカーブフィット式とは若干差が見られるものの、各水セメント比におけるカーブフィットの相関係数はすべて 0.97 以上であり、式(1)は本実験での打設直後より反応の進行ならびに乾燥を受ける硬化セメントペーストの水分逸散挙動を表現し得るものと考えられる。図-8のカーブフィットの結果より水セメント比に対する λ と W_d の関係は図-9,10 のようである。 λ と W_d は水セメント比に対して、線形的な傾向を示しており、線形式によるフィッティングでは次式のようになる。

$$\begin{cases} W_d = 1.062\alpha - 0.3526 \\ \lambda = -1.885\alpha + 1.1264 \\ 0.4 \leq \alpha \leq 0.6 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)において、 λ に対するフィッティングの相関係数は 0.92、 W_d の相関係数は 0.97 であった。式(3)の関係を式(1)に導入することより、打継ぎのない供試体に対する任意の水セメント比での時間-逸散水率関係を表現することができる。

図-11 に打継ぎのある供試体(水セメント比 50%、60%)の実験結果と式(1)と式(3)に基づいて算定した水セメント比 55%、45%に相当する時間-逸散水率関係の推定結果(図中実線)を併せて示す。なお水セメント比 40%での打継ぎのある供試体に対応する計算結果はカーブフィット式の範囲外(40%以下)となるため検討しないこととした。図より、水セメント比 50%での打継ぎのある供試体の水分逸散挙動(実験結果)は、打継ぎのない供試体に換算すると水セメント比 45%での推定結果と良く一致している。また、

水セメント比 60%の打継ぎのある供試体では、水セメント比 55%とした推定結果より若干高い値を示しているものの、全体的な傾向はほぼ一致している。カーブフィットを繰り返すことによる誤差が含まれていることも否めないが、これらの結果より、本実験における水セメント比 50%と 60%の 24 時間後での打継ぎのある供試体の時刻歴逸散挙動は、見かけ上、打継ぎのない供試体での水セメント比より 5%程度の低下しているものと推定される。

また、旧側供試体の打継ぎ直前における蒸発可能水率 w_{we} に基づき、打継がれた直後の、見かけ上の水セメント比 α^* を以下のように考える。

$$\alpha^* = \frac{(w^{24}_{we} + \alpha)}{2} \quad (4)$$

ここで、 w^{24}_{we} は 4.1 節における表-2 中の w_{we} であり、 α は打継いだ新側材料の配合に基づいた水セメント比である。式(4)に基づいて算定した打継がれた直後の見かけ上の水セメント比 α^* を表-3 に示す。表より、打継がれた直後の見かけ上の水セメント比 α^* は基準となる水セメント比に対して 6%程度低下(表-3, $\alpha - \alpha^*$ 参照)している。この結果は、式(1)と式(3)により推定した見かけ上の水セメント比低下量(5%程度)とほぼ同様な値を示している。

このことより、本実験における見かけ上の水セメント比低下量は新側打設直前の旧側材料の蒸発可能水率を反映しているものと考えられる。

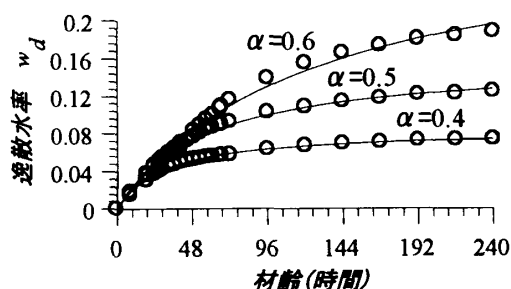


図-8 カーブフィットした時間-逸散水率関係

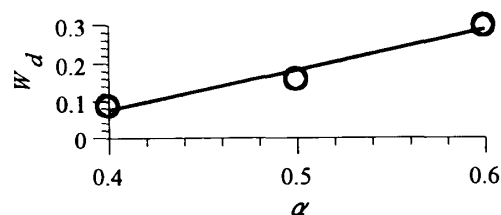


図-9 水セメント比と α^* の関係

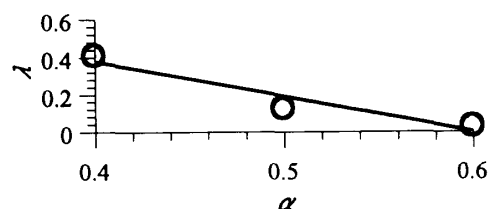


図-10 水セメント比と α^* の関係

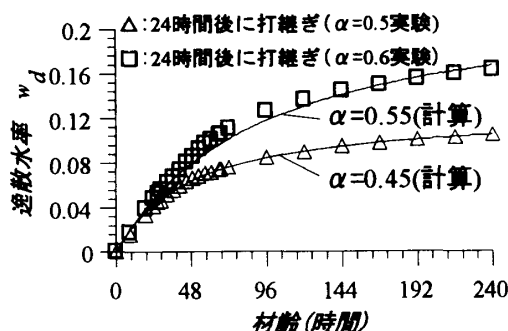


図-11 時間-逸散水率関係
(実験結果に対する推定)

表-3 見かけ上の水セメント比

α	w_{we}	$\alpha^* = (\alpha + w_{we})/2$	$\alpha - \alpha^*$
0.5	0.375	0.437	0.063
0.6	0.468	0.534	0.066

5.2 時間-結合水率関係と組織構造の空間分布

打継ぎのない供試体と打継ぎのある供試体の時間-結合水率関係(w_n)を図-12 から 14 に併せて示す。図中●は打継ぎのない供試体での結果、○は打継ぎのある供試体での結果である。時間軸は新側を打継いだ時間を基準として描画しており、打継ぎのある供試体はその材料系全体の結合水率を意味している。なお、図中、実線は打継ぎのある供試体の結果を式(1)と等価な双曲線式によりカーブフィットしたものである。図より、各水セメント比ともに 120 時間程度までは、打継ぎのある供試体の結合水率の値は打継ぎのない供試体の結合水率の値を上回っており、その差は低水セメント比ほど顕著に現れている。しかし、120 時間後以降における結合水率は各水セメント比ともにほぼ同様な値を示していることから、この領域におけるそれぞれの供試体は系全体としては水和の程度は同じであるといえる。このような時間-結合水率関係の傾向と水分逸散挙動の関係を吟味すると、水和程度が同様、すなわち材料系全体と

しての見かけ上の組織構造が同様な状態となる領域において、逸散水率は旧側材料の新側打設直前までの逸散水率(図-3 参照)を考慮しても、依然として打継ぎのない供試体と打継ぎのある供試体とで差が生じることとなる。このような現象の要因の一つに、それぞれの材料系における組織構造の空間分布の相違が考えられる。打継ぎ面近傍では旧側材料表面の未水和セメントと新側材料水分との水和により形成される組織構造が存在することが予測され、前節で考察した、打継ぎのある材料系での見かけ上の水セメント比の低下量は、この空間的な組織構造の分布特性を表しているものと推測される。

6. まとめ

本研究では硬化セメントペーストで作製した小供試体によるモデル実験において、打継ぎを行わない材料系と打継ぎのある材料系の水分逸散挙動を打設直後からの乾燥による質量減少に基づき比較した。

本実験結果より、打継ぎのない供試体に対する打継ぎのある供試体の水分逸散挙動は組織構造変化の観点からは、見かけ上の水セメント比の低下として考えられ、その低下量は新側打設直前における旧側材料の蒸発可能水率すなわち含水状態を反映しているものと推定された。また、材料系全体の見かけ上の組織構造が同様な状態となる時刻歴の領域においても、逸散水率においては、依然として打継ぎのない供試体と打継ぎのある供試体とで差が生じていることから、それぞれの材料系における組織構造の空間分布に相違があることが推測された。打継ぎのある材料系での見かけ上の水セメント比の低下量は、この組織構造の空間分布特性の差を表しているものと考えられる。

本研究より得られた打継ぎのある材料系の組織構造に対する知見は、直接的に材料強度や新旧材料間の付着強度等の力学特性を表したものではないが、材料系内の水分状態の変遷と組織構造の形成過程より、その構造特性を評価していることから、打継がれた材料品質を制御する上で重要な知見であると思われる。今後、本研究のようなモデル実験による間接的手法に基づいた組織構造の評価手法を援用した上で、施工指針としての打継ぎ時間間隔や良好な付着強度を得るための施工手法を確立してゆく

必要がある。

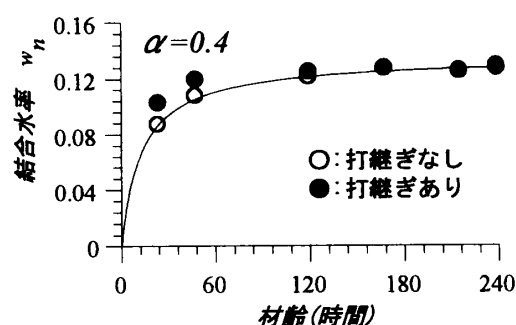


図-12 時間-結合水率関係 $W/C=40\%$

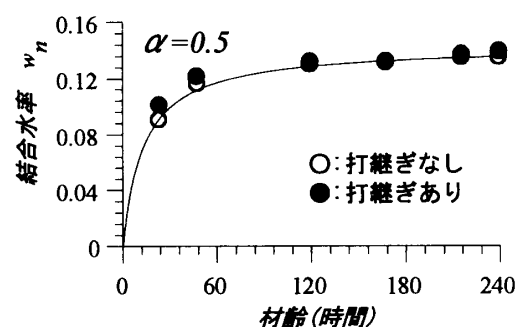


図-13 時間-結合水率関係 $W/C=50\%$

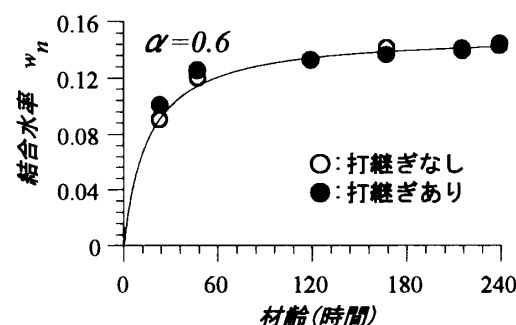


図-14 時間-結合水率関係 $W/C=60\%$

参考文献

- 1) 紀伊国洋ら：新旧コンクリート打継ぎ目の微細構造に関する基礎的研究。土木学会年次学術講演会講演集，V-21-171，2000。
- 2) 秋田宏ら：モルタルの乾燥，吸湿，吸水過程における水分移動，土木学会論文報告集，第420号/V-13，pp.61-69，1990。
- 3) K. Sakata：A Study on moisture diffusion in drying and dry shrinkage of concrete, CEMENT AND CONCRETE RESEARCH, Vol.23, pp216-224, 1983.