

# 初期乾燥における水和反応停止時期の推測に関する一考察

Study of Prediction of Stopping Cement Hydration in Different Curing Conditions

伊代田 岳 史\*・魚 本 健 人\*\*

Takeshi IYODA and Taketo UOMOTO

## 1. はじめに

作成したコンクリートが所定の強度・耐久性を十分に発揮するためには、水和進行過程における適切な養生が必要不可欠である。湿潤養生が十分に行われない場合には、コンクリート内部の水分が逸散することにより、内部水分が不足して水和反応を阻害すると考えられている。筆者らは前報<sup>1)</sup>においてその事実を確認している。しかし、どの程度の水分の不足により水和反応が阻害されるかについては考察されていない。このことより内部水分量と水和反応の進行度合いとの関係を明らかにする必要がある。

そこで、本研究では同一水セメント比における内部水分量を用いることで水和停止時期とその水和の進行度合いを推定することを試みた。この内部水分量を反応に寄与する水分量と寄与しない終局物理的拘束水量とに区別することで考察した。また、その物理的拘束水量を利用して連続して乾燥を行った様々な養生環境における供試体の水和停止時期の推定を行った。さらに、算出した物理的拘束水の妥当性について検討を加えた。

## 2. 実験概要

本研究<sup>2)</sup>では普通ポルトランドセメントで作成した水セメント比 0.35 のセメントペースト供試体を用い、若材齢時に乾燥を受ける場合のセメント硬化体の水和進行過程と内部水分量の測定を行った。打設直後から養生開始までの前養生の期間は温度 20°C、湿度 RH 90 ± 5% で養生し、所定の材齢（乾燥開始材齢）時に脱型し、恒温恒湿槽で実現したそれぞれの環境下で養生を開始した。供試体は 20 × 20 × 80 mm の直方体を用い、短期間で供試体内部まで均一に乾燥の影響を受けるようにした。実験は養生時の外部環境湿度と乾燥開始材齢が水和進行と内部水分量に与

える影響を調査した。本研究では温度の影響を考慮しないようすべての環境で温度 20°C 一定とした。

本研究の実験要因は前養生期間を 4 種類、養生環境を 6 種類とした。その一覧表を表 1 に示す。測定材齢は前養生終了時と養生を開始してからの材齢で 1, 3, 7, 14, 28, 56 日とした。測定項目は、強熱減量法による水和進行と重量変化を用いた内部水分量の測定である。内部水分量の測定方法として、供試体を各材齢で細かく砕き、それを試料として用いた。まず、その時の重量を測定し、その後 50°C で水分を蒸発させた。このときの質量減少量が内部の自由水である。その後、真空脱気により水を圧入して、満水時の質量とその時の体積を測定する。最後に 1000°C で乾燥させることで結合水量を蒸発させた。これらの一連の作業により内部に含まれていた水分を 1 cm<sup>3</sup> のセメントペースト内に存在していた水分として 3 つの水分（蒸発水、自由水、結合水）に分類することができ、その経時変化を示すことが可能となった。

表 1 実験要因

養生環境条件	乾燥開始材齢			
	6hrs	12hrs	24hrs	5days
真空 (Vacuum)	-	-	○	-
RH50%	○	○	○	○
RH85%	○	○	○	-
湿気 (Wet)	○	○	○	-
水中 (In water)	-	-	○	-
封緘 (Sealed)	-	-	○	-

## 3. 物理的拘束水

### 3.1 物理的拘束水の定義

筆者らはセメントペースト内部の水分を区分するとき供試体から蒸発した蒸発水、水和反応に伴う結合水、残留

\*東京大学生産技術研究所 物質・生命大部門

\*\*東京大学国際・産学共同研究センター

研究速報

する自由水の3種類に分類してきた。しかし、セメントの水和反応に伴い、水和生成物などに拘束される物理的拘束水が存在することが明らかとなってきた。そこで、物理的拘束水を考慮して内部水分の区分をする必要があると考えられる。物理的に拘束される水分の種類は次の3種類が考えられる。

- (1) 空隙の壁面に BET 理論により吸着している水
- (2) 小さな空隙 (2 nm 以下) に存在する層間水
- (3) 水和生成物に吸着している水

物理的に拘束された水は水和反応に寄与することができない。つまり水分の出入りのない環境において水和反応が停止した時点における残留している水分を物理的拘束水と定義することができる。この水量を求めることで水和に可能な水分量を算出できると考えた。このことを模式的に表した図を図1に示す。

3.2 物理的拘束水量の算出

図2に封緘環境で養生を行った供試体の水和進行と自由水量の経時変化を示す。図より水和進行に関して見てみると、材齢15日程度で水和反応が停滞しているといえる。つまりこの時点での残留している水分量が拘束水量と考えることができる。そこで自由水量の経時変化を見てみると、本研究においては水セメント比0.35における物理的拘束水量は  $0.17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  であるといえる。

4 自由水の経時変化

4.1 養生環境の違いによる自由水量の経時変化

図3(a)は養生環境の違いによる自由水量の経時変化を示したものである。図より乾燥環境である真空環境やRH50%などは自由水の減少量が激しいことが分かる。また、自由水量はある程度材齢が経過すると一定量残留するといえる。つまり蒸発水量は環境別に限界値が存在してい

るといえる。

4.2 前養生期間の違いによる自由水量の経時変化

図3(b)は図3(a)と同様にRH50%における前養生期間の違いによる自由水の経時変化を示している。図より

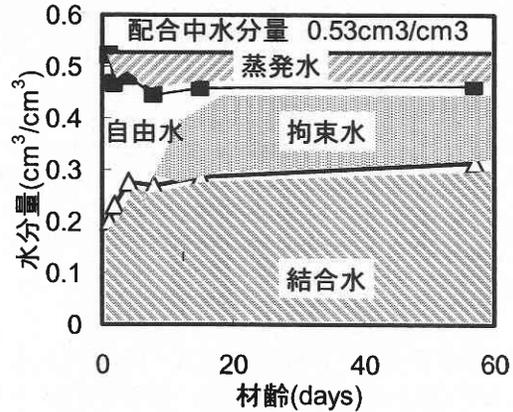


図1 物理的拘束水の定義 (模式図)

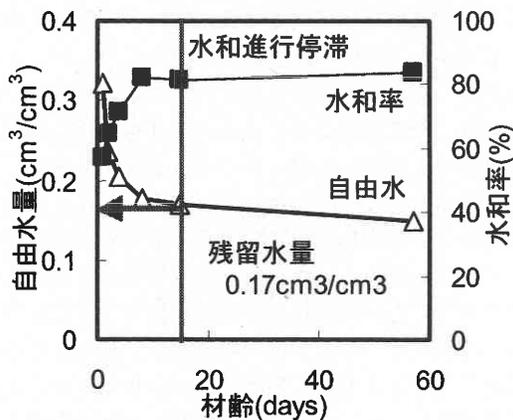
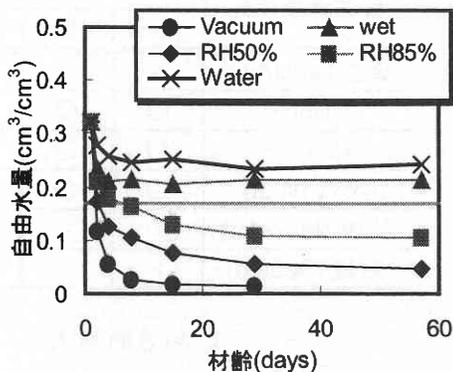
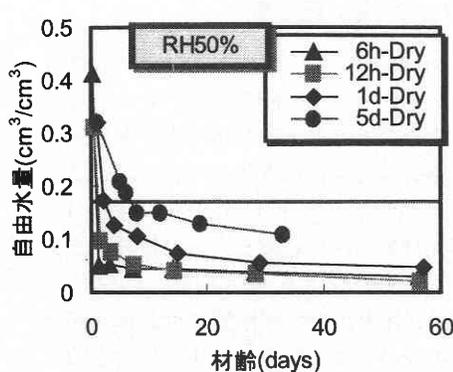


図2 物理的拘束水の算出



(a) 養生環境条件の違い



(b) 乾燥開始材齢の違い

図3 自由水の経時変化

前養生期間が短い6hsや12hsでは早期に自由水量が減少し、限界値に達していると言える。一方で5日間湿潤養生した供試体では、乾燥による自由水の逸散は大きく減少され、RH 85%程度の自由水量の経時変化とほぼ同量と言える。つまりコンクリート示方書で規定されている普通ポルトランドセメントの前養生5日後からRH 50%の環境で暴露した場合にはRH 85%程度の乾燥の影響程度に低減できると言える。

5. 水和反応停止時期の推定

以上の考えから水和反応が停止すると考えられる時期は水和可能水が消失したときと考えられる。つまり、自由水量が終局拘束水量を下回ったときに水和反応が停止すると考えることが可能となる。そこで、各環境下における水和率と自由水の経時変化ならびに拘束水量を示した図を図4に示す。乾燥環境下において自由水が終局拘束水量を下回ったときに水和の進行が停滞していることが言える。こ

のことから理論的に拘束しうる水量を下回った時点で、内部において水分不足が起こってしまい、結果として水和が停止してしまうと考えることができる。一方、湿気養生や水中養生などでは水の供給が継続的に行われるため、自由水が拘束水量を下回らないために水和反応は継続して起こると言える。つまり、残存している自由水から終局拘束水量を差し引くことで水和に起因できる水分量を割り出すことが可能である。

6. 拘束水率の算出

谷口ら<sup>3)</sup>は反応結合材量に対する拘束水量を拘束水率と定義している。従来、物理的に拘束される水量は反応結合材量の15%一定と仮定していた。しかし、低水セメント比においては水和の進行に伴う自己乾燥によって、空隙構造中の不飽和領域における壁面吸着水が少なくなると考えられる。本研究における拘束水率の経時変化を図5に示す。水和反応が停止したとする材齢15日の終局拘束水

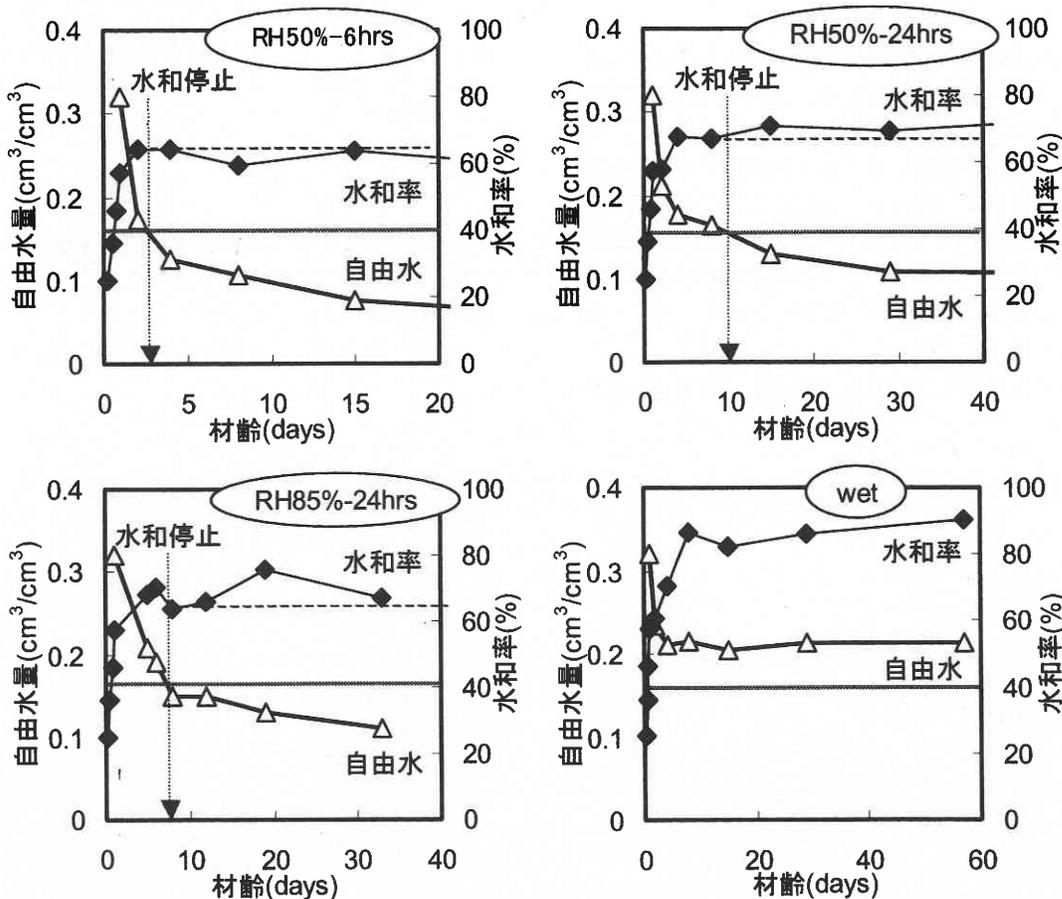


図4 各環境下における水和率と自由水の経時変化

## 研 究 速 報

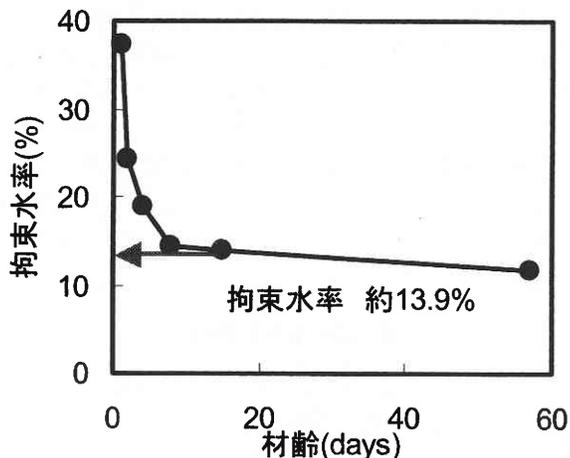


図5 拘束水率の算出

率を算出すると約 14%であった。このことから既往の研究とも一致するため妥当と考えられる。

## 7. ま と め

本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) 若材齢から連続的に乾燥を受けたセメント硬化体の水和反応は早期に停止する。一方、湿気養生や水中養生であれば水和反応は継続的に起こる。
- (2) 水の出入りのない環境において水和が停止しても水和反応に使用されない自由水が存在する。この自由水を物理的拘束水と考えると、その量は水セメント比が 0.35 のセメントペーストでは  $0.17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  程度であった。また、拘束水率は約 14%程度であり、既往の研究とほぼ一致した。
- (3) 配合に含まれる水分を逸散水、自由水、拘束水、結合

水に分類することができた。また、終局物理的拘束水を利用することにより乾燥環境下における水和反応停止時期を推定することができた。また、水和反応に必要な限界水量を特定することができた。

- (4) コンクリート標準示方書に規定されている普通ポルトランドセメントの湿潤養生は 5 日以上とされているが、その程度の養生では湿度 RH 85% の乾燥環境と水和進行、含水率、総細孔量などが同程度になることが分かった。

今後、水セメント比の変化による内部水分量の変化と物理的拘束水量の検討や混和材等の混入によりセメント量が増加した場合の水和進行と物理的拘束水量の変化について検討する必要がある。

## 参 考 文 献

- 1) 伊代田岳史, 魚本健人: 養生環境の違いによるセメント硬化体の水和反応と内部水分, 生産研究 10月号 (2000.10).
- 2) 伊代田岳史, 高羅信彦, 魚本健人: 初期養生時に乾燥を受けるセメント系硬化体の水和反応と水分逸散特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No.2, pp. 703-708 (2000.7).
- 3) コンクリート構造の時間依存性変形・ひび割れ評価—現状と今後の課題—, コンクリート技術シリーズ 38, 土木学会 (2000.9).

## 謝 辞

実験に関して千葉工業大学大学院高羅信彦氏, 芝浦工業大学長谷川博紀氏にお手伝い頂きました。ここに記し, 感謝を示します。

(2000年10月10日受理)