

# 若材齢時の乾燥履歴を受けたセメント 硬化体の内部組織構造のモデル化

The Modeling of Microstructure on Hardened Cement paste after Drying at Early Age

伊代田 岳 史\*・魚 本 健 人\*

Takeshi IYODA and Taketo UOMOTO

## 1. はじめに

コンクリートが所定の強度・耐久性などの性能を十分に発揮するためには、施工段階における養生が重要となる。水和過程において極初期段階で周囲環境に曝すことは乾燥の影響を受けることとなり、硬化体表面から水分が逸散することとなり、水分不足に陥り水和反応が阻害される<sup>1)</sup>。現在の現場施工においては工期短縮や型枠転用などから早期脱型してしまうことが多々あり、強度や耐久性不足に陥ったケースが報告されている。しかし一方で、降雨や湿度変化、再養生などにより水分を再供給する環境も考えられ、乾燥した硬化体内に水分が供給されることで、再水和反応が起こることも確認されている<sup>2)</sup>。

そこで、本研究においてはこのように水和初期において、刻一刻と変化する周囲環境に付随して起こる水和反応と内部組織構造の関係を調査し、内部組織構造と密接に関わる圧縮強度、曲げ強度などに代表される長期物理特性を評価することを目的とした。また、若材齢時に受けた乾燥が硬化体の内部組織構造形成に与える影響をモデル化し評価した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体の作成と環境条件

普通ポルトランドセメント（密度  $3.16 \text{ g/cm}^3$ ）を用いて  $W/C = 0.35$  のセメントペーストを作成して試験を行った。試験体寸法は乾燥の影響が均一になるように小さな寸法の試験体を用いた。試験体寸法は圧縮強度、曲げ強度の測定は  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$  の試験体を利用し、内部組織構造の測定にはその試験体から切り出した小片を利用した。作成した試験体は前養生として脱型までの期間は室温  $20^\circ\text{C}$ 、打設面からの水分逸散を防止するため相対湿度を  $\text{RH } 80\%$

\*東京大学生産技術研究所 都市基盤安全工学国際研究センター

以上に設定した。脱型後は  $20^\circ\text{C}$  に保った環境で、水中環境 (W)、乾燥環境として  $\text{RH } 35\%$  (35 D)、 $\text{RH } 60\%$  (60 D) の二種類とし、材齢 28 日で乾燥環境から湿潤環境に移動する  $\text{RH } 35\%$  から水中 (35 DW) と  $\text{RH } 60\%$  から水中 (60 DW) の二種類を用意した。

### 2.2 測定項目

測定は長期物理特性として質量変化、長さ変化と曲げ強度、圧縮強度並びに微視的観点として内部組織構造測定と観察も併せて行った。質量変化ならびに長さ変化の結果は前報にて掲示している。曲げ・圧縮試験は土木学会のセメントの強さ試験を利用し、材齢 7, 28, 56, 113, 181 日で測定した。内部組織構造測定には水銀圧入式ポロシメータを用い、観察には電子走査顕微鏡 (SEM) を用いた。試験体は 2 ないし 3 個の平均値で示しており、試験体内は均一と仮定している。

## 3. 実験結果

### 3.1 圧縮強度、曲げ強度（長期物理特性）

図 1 に圧縮強度試験の経時変化を示した。W では既往の研究どおり材齢が経過するに従い水和反応とともに強度発現していることがわかる。一方、乾燥環境である 35 D、

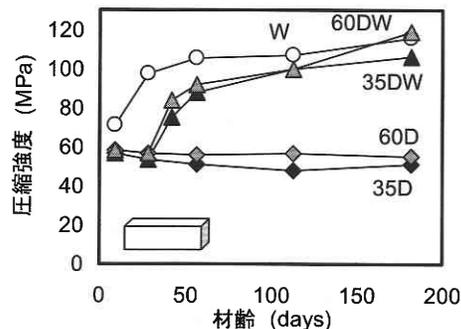


図 1 圧縮強度発現性 (角柱試験体)

研 究 速 報

60 D では乾燥開始直後から強度発現が見られないことから水和停止が原因であることが伺える。水分を再供給した 35 DW, 60 DW は供給直後から急激に強度発現が起これ、長期材齢では W と同等の強度を保持できることがわかる。このことは水和反応による強度回復を物語っている。

図 2 は  $\phi 50 \times 100$  mm の円柱試験体を用いた圧縮強度発現を示したものである。この試験体では材齢 21 日において水分供給を行っている。W ならびに D は角柱試験体と同等の結果が得られたが DW ではほとんど強度発現していない。材齢 56 日における試験体内部の結合水率を測定したところ、W と DW ではほとんど差が見られなかったことから、水和反応は進行しているが圧縮強度発現が見られないという現象が得られた。両者を比較すると載荷面の面積はほとんど差異がないことから試験体高さの違いであると想像できる。

図 3 は曲げ強度試験を測定した結果を示している。ここでは図の簡素化のため RH 60 % 環境は省略した。この図より W においては曲げ強度も発現しているのに対し 35 D では発現していない。また、35 DW でも 35 D のように強度発現していないことから曲げ強度においては水分再供給しても回復できない円柱試験体と同等の結果が得られた。曲げ強度と圧縮強度の関係が乾燥環境 (D)、水中環境

(W) では維持されていることを考えると水分再供給しても強度回復できない欠陥が存在すると思われる。つまり、水分再供給した環境下においては曲げのような引張力を受ける部分が軟弱になると考えられる。また、試験体高さの異なる試験体では、高さの高い試験体においては破壊前に試験体ははらみをおこしその部分に引張力が作用し、引張側で破壊することから初期材齢の乾燥は引張縁では危険であるといえる。

3.2 内部組織構造

(1) 内部組織構造の測定

図 4 は材齢 180 日経過した試験体の内部組織構造を示している。図より連続的に乾燥した 35 D ならびに 60 D は非常に大きな空隙を残存していることがわかる。強度や耐久性に影響を与えるとされる空隙は 50 ~ 100 nm 以上とされることから 35 D, 60 D は強度が低く耐久性のない構造を形成していると想像できる。一方、W は水和反応が進行したためピークを示す径が小さくなっており、緻密化していると推測できる。また、同様に 35 DW ならびに 60 DW ではそれぞれ D より緻密化しており、ピーク径も W と同等まで緻密化している。しかし、ピーク径を示す細孔量が異なることから長期間水中で水分供給しても完全に同様の内部組織構造とはならず、初期材齢に受けた乾燥の影響が

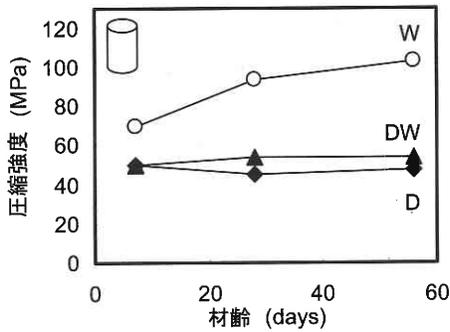


図 2 圧縮強度発現性 (円柱試験体)

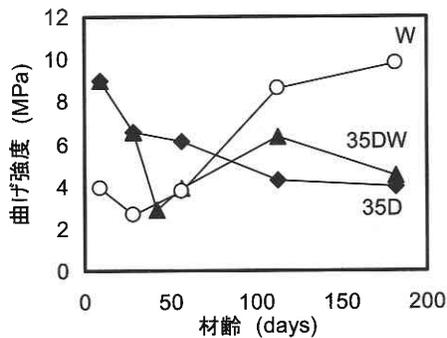


図 3 曲げ強度発現性

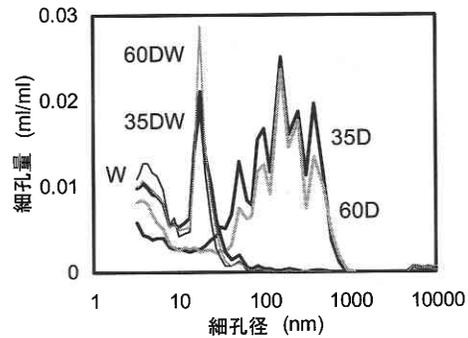


図 4 各環境下の硬化体の内部組織構造

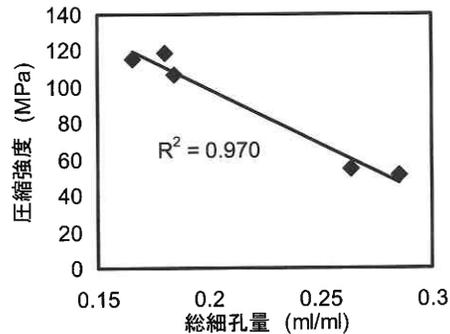


図 5 総細孔量と圧縮強度の関係

存在していると考えられる。しかし、前節で示したとおり、この内部組織構造の差は圧縮強度にはほとんど影響していない。

そこで、図5に総細孔量と圧縮強度の関係を示した。図から明らかなように総細孔量と圧縮強度の相関は著しくよいことからピーク径となる20 nm程度の内部組織構造が若干異なっても圧縮強度にはそれほど影響がなく、総細孔量によりその関係を示すことができる。

## (2) 内部組織構造の観察

DWにおいて曲げ強度が発現しにくい、つまり引張力が軟弱となる理由を考察するために試験体内部の観察を試みた。試験体の外観調査でひび割れ観察を行ったところW, 35Dならびに60Dでは目立ったひび割れが観察できなかったのに対し、35DW, 60DWでは試験体表面に小さなひび割れを観察できた。そこで、以下の方法により電子走査顕微鏡(SEM)を用いた試験体内部の観察<sup>3)</sup>を行った。

- (1) 試験体を5 mm程度の厚さに切断し、3日間程度エチルアルコールに浸漬し試験体内部の水分を置換した。その後、真空ポンプを用いてエチルアルコールを逸散させ試験体を乾燥させた。
- (2) 乾燥した試験体にエポキシ樹脂を含浸させ試験体をコーティングした。作成した試料に研磨機を用いて何回か鏡面研磨後、炭素蒸着してSEMを利用して反射電子像ならびに二次電子像を取得した。

写真1は試験体をSEMの反射電子像で撮影したものである。反射電子像で得られる像の内、白色部分は未水和鉱物、灰色部分は水和生成物、黒色部分は空隙である。35Dでは白色部分が非常に多く未水和鉱物が多量に残存しており、黒色部分が多くを占めていることから粗な空隙構造であることがわかる。一方、Wでは白色部分はかなり少なく、全体的に灰色部分が多い。35DWでは白色部分は点在しているが35Dに比較したら減少しており、水和反応が進行したことが伺える。また、全体的に灰色部分が多いが、ところどころ独立気泡のような黒色部分があることがわかる。このことからDWでは水和反応が進行しているが若干空隙が残存していることがわかり、Wとは同じ内部組織構造にはならないといえる。

写真2は二次電子像における内部組織構造を観察したものである。35Dには目立ったひび割れは存在せず、連続した空隙が存在していることがわかる。一方、Wにはひび割れが存在していたがひび割れ内をエポキシ樹脂が完全に含浸していた。また、そのひび割れは直線的に入っていることがわかる。一方、35DWでもひび割れが観測できたがその形状は曲線的でひび割れ内に白色物質が含浸している。ここで、WとDWで観察されたひび割れは形状の

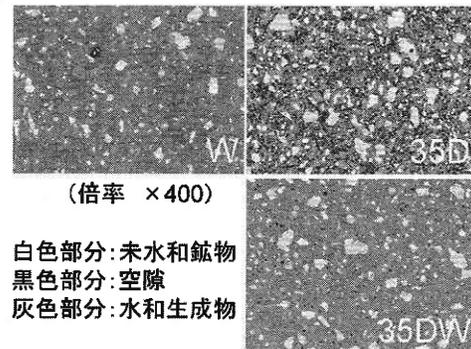


写真1 硬化体の内部組織構造観察結果(反射電子像)

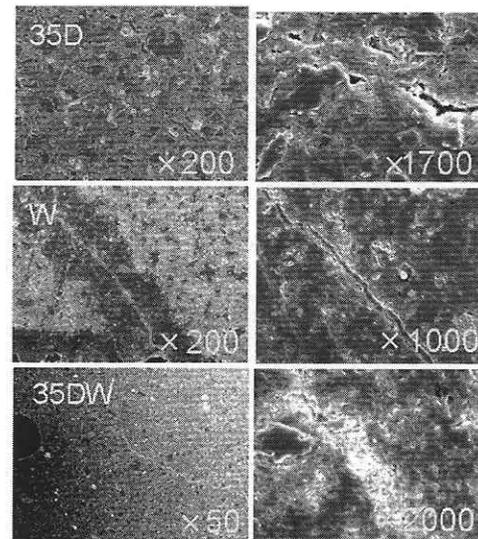


写真2 硬化体の内部組織構造観察結果(二次電子像)

違いから導入方法が異なることが推測できる。

Wでは試料作成時の真空脱気乾燥によるひび割れと推測でき、DWでは試料作成前に存在したひび割れで試料作成前に水和生成物もしくは炭酸カルシウムが析出したものであると考えられる。つまり若材齢時の乾燥環境ではひび割れが導入されなかったにもかかわらず、水分再供給することでひび割れが導入され、ひび割れ内は析出した物質で含浸されたと考えられる。

## 4. 若材齢時に乾燥を受ける硬化体のモデル化

前章までの結果で若材齢時に乾燥を受けることにより水和停止し内部組織構造が粗になること、そして水分再供給により再水和反応が起こり、内部組織構造が緻密化することが明らかとなった。また、水分再供給により質量変化・圧縮強度は水中養生と同等まで回復するにも関わらず、長さ変化・曲げ強度が回復できないことも明らかとなった。

研 究 速 報

それに加えて SEM 観察の結果から水分再供給した場合には特異なひび割れを発見することができた。これらのことをまとめると若材齢時において乾燥した試験体に水分供給をすることで試験体表層面では急激な吸水による膨潤ならびに水和反応が急速に起こることにより膨張するにも関わらず、試験体内部は乾燥により導入された収縮が保持されているため、表層面近傍と内部において応力分布に大きな差が生まれ、内部応力が発生する。発生した内部応力は乾燥環境時に試験体内部に生成された弱点部である連続空隙内の微細空隙部分を押し広げ、解放されることからひび割れに発展すると考えられる。しかし、未水和鉱物が多量に残存している DW においては発生したひび割れ内にも反応生成物または炭酸カルシウムを生成することでひび割れを埋めることができる。これにより物質の透過性、圧縮強度などには有効に働き、全体的には影響しない程度であ

るが、曲げ強度のような引張力などが作用する場合には存在するひび割れが欠陥部となり強度増進しない結果になったと考えられる。このことを図化したものが図6である。以上より、D,W,DW の内部組織構造を図化したものを図7に示す。Dは粗なマトリックスを形成しているのに対し、WとDWでは緻密な構造を形成している。この際、DWとWは同様なマトリックスが形成されているが、DWにはひび割れが存在し、それが大きな原因となり曲げ強度や円柱形状の圧縮試験体の強度増進を抑制したと考える。

5. ま と め

本研究によって得られた結果を示す。

- (1) 極若材齢において乾燥履歴を受けたセメント硬化体に水分を再供給することで際す岩反応により、圧縮強度は角柱試験体を利用すれば長期材齢では水中養生した硬化体の強度まで回復した。しかし曲げ強度を比較すると水分再供給しても強度増進が見られず、硬化体内部に生成されたひび割れによる強度低下が認められた。
- (2) 内部観察の結果、水分再供給した硬化体にはひび割れが観察でき、水分の急激な供給によりひび割れを誘発することがわかった。しかし、未水和鉱物と再供給された水分の再水和反応によりひび割れは見た目上閉塞するが、引張を請け負う部材では強度低下することがわかった。

(2003年4月1日受理)

参 考 文 献

- 1) 伊代田岳史, 魚本健人: 若材齢時に連続乾燥を受けるセメント硬化体の水和進行と内部水分量, セメント・コンクリート論文集 54 巻, pp. 167-173, 2000
- 2) 伊代田岳史, 魚本健人: 乾燥による水和停止後の水分再供給による水和進行と細孔径分布の形成, 生産研究 53 巻 5 号, pp. 46-49, 2001
- 3) Karen L. Scrivener: The use of backscattered electron microscopy and image analysis to study the porosity of cement paste, Material Research Society Symposium Proceeding, Vol. 137, pp. 129-140, 1989

謝 辞

本研究は1年間留学させていただいたスイスのEPFL (L'école Polytechnique Fédérale de Lausanne) で行ったものであり、Prof. Karen Scrivener ならびに研究室のみなさまにご助力頂きました。また、研究をまとめるに際して東京大学生産技術研究所の岸利治助教授、加藤佳孝講師ならびに魚本研究室のみなさまのご助言をいただきました。ここに記し、感謝いたします。

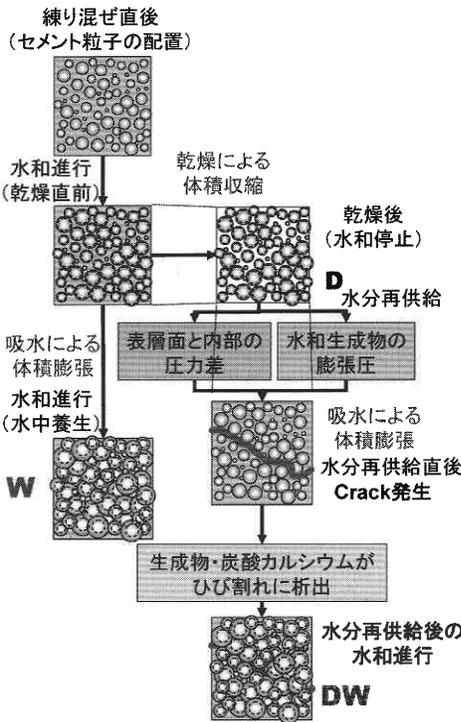


図6 各環境下における内部組織構造の形成

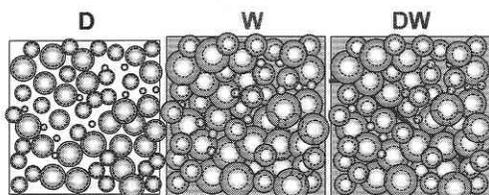


図7 各環境下での内部組織構造のモデル化