

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

Cement Hydration and Porosity of Cement Paste with Re-supplied Water after Drying

伊代田 岳 史*・魚 本 健 人**

Takeshi IYODA and Taketo UOMOTO

1. はじめに

作成され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。現場における工期短縮や型枠転用による早期脱型のような原因により湿潤養生が十分に行われない場合、露出面からの水分逸散により水和に必要な水分が不足してしまうことが考えられる。このような原因による水和阻害に関しては普通ポルトランドセメント並びに高炉セメントにより筆者らは確認している¹⁾。しかし、実際の現場においては、構造物の供用前における水分の供給や雨水等の影響で水和に必要な水分が供給されることが考えられる。

そこで、本研究では乾燥によって水和阻害が起こったセメントペーストに水分を供給することによる水和の進行を定量的に把握するとともに形成される細孔径分布を測定し、水中養生を行った試験体と比較することで乾燥による水和停止後の水分再供給が与える影響を定量的に評価することを目的とした。また、その強度特性も検討した。

2. 実験概要

実験には材料として普通ポルトランドセメント (OPC: 密度 3.18 g/cm³) と高炉セメント C 種 (BSC) を用いた。高炉セメント C 種は高炉スラグ (密度 2.91 g/cm³) でセメントを体積で 70% 置換した。作成したセメントペーストの配合は W/B = 0.35 であり、供試体は均一に環境の影響を受けるために 20 × 20 × 80 mm の直方体とした。実験の行程は、打設したセメントペーストは前養生として直後からシートをかぶせて封緘状態とし、水分の出入りがないように静置した。打設から 6 時間後に脱型しその後恒温恒湿槽で実現した RH 50% の乾燥環境で材齢 28 日まで養生

を行った。材齢 28 日からは水分の再供給を与えるために環境条件を変化させた。環境条件は水中、湿気、表面湿潤状態の 3 種類とした。また、比較のために連続乾燥、連続水中養生の水和進行も測定した。これらの実験要因の一覧は表 1 にまとめた。なお、本研究では温度の影響を考慮しないためにすべての環境で温度 20℃ 一定とした。

実験における測定項目は強熱減量法による水和進行、供試体の重量変化率、水銀圧入式ポロシメータを用いた細孔径分布、φ10 × 20 cm のシリンダーを用いた圧縮強度である。また、湿度履歴を与えた等温吸脱着試験も行い、内部情報の一部として利用した。測定材齢は水和の進行に関しては前養生が終了してから材齢で 1, 7, 14, 28 日と、環境を移行して水和の回復を確認するため材齢 35 日までとその後材齢 60 日, 120 日で水和率を測定した。なお、水和率は強熱減量により得られた結合水量を Powers の提案する理論結合水量である 0.227 g/g で除して求めている。同時に供試体の重量を測定することで、水分の供給、逸散量を把握した。圧縮強度は材齢 7, 28, 56 日で行った。一方、空隙情報や内部情報の取得のためのポロシメータは材齢 60 日の試験体、等温吸脱着試験は 120 日の試験体を用いて行った。なお、水和率・ポロシメータの試験体はハンマーにより砕いた一部を用い、等温吸脱着の試料はオイルカッターで 5 mm 角に切断したものを用いた。

表 1 実験要因と記号

養生方法		記号	区分	
Time				
前養生	水中	W	連続養生	
		D		
	乾燥 (RH50%)	水中	DW	再供給
		湿気	Dwet	
表面湿潤	DS			

*東京大学生産技術研究所 物質・生命大部門

**東京大学 都市基盤安全工学国際研究センター

3. 実験結果

3.1 水和進行

図1は OPC を、図2は BSC の水和の進行を示したものである。それぞれ比較のために連続乾燥養生、水中養生を行った試験体の水和進行も掲載した。これより、セメントの種類によらず水分供給を受けた材齢28日から急激に水和は進行し、7日後の材齢35日における水和率は、連続水中養生していた試験体の水和率の OPC では88%程度、BSCでも84%程度まで進行した。連続乾燥養生の試験体の水和率が両者のセメントとも60%前後であることを考えると、水和の進行は著しく起こったといえる。一般的に BSC ではスラグの潜在水硬性の特徴より反応が遅延することが懸念されており、今回のような水分再供給においても若干ではあるが OPC に比べ遅延したといえる。

また、材齢が経過するに従い、水中養生した試験体の水

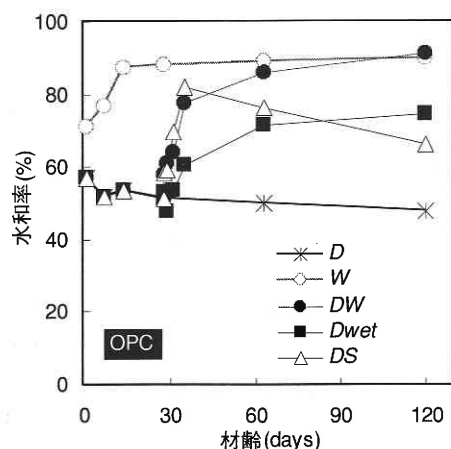


図1 OPCにおける水和進行

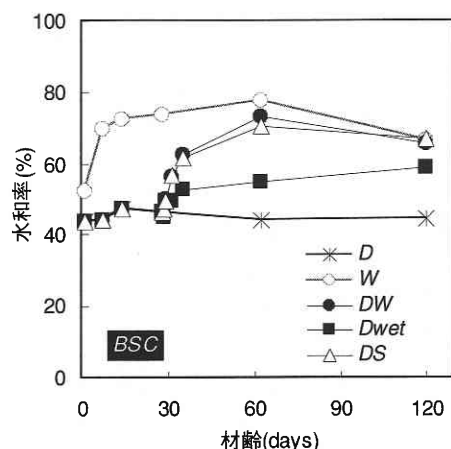


図2 BSCにおける水和進行

和率と乾燥の履歴を受けた試験体の水和率の差はなくなり、最終測定である120日においては水中養生した試験体とほぼ同等の水和率まで向上した。このことより、液体で水を圧入する事で水和反応は復活し、時間は多少かかるが水中養生した試験体と同等まで水和が復活することが証明できた。このことは表面を湿潤状態にした試験体でも同様なことがいえた。

一方、湿気状態で水分を供給した場合にはより小さな空隙径まで気体が進入し、壁面に吸着した水蒸気が凝縮され水となって反応に使用されると考えられる。しかし、すべての未反応セメントが水和するために必要な水分量まで供給できないので水和率はあまり進行しなかった。

3.2 質量変化測定による水分供給量

図3に代表として OPC における各試験体の質量変化率の経時変化を示す。連続乾燥養生した試験体は乾燥開始初期から急激な質量減少が起こる。しかし、水分の再供給により水を与えると急激に吸水していることがわかる。このことから供給開始直後から未水和セメントは反応が開始し始めたと考えられる。一方で水分再供給を湿気で行った試験体ではその直後からは吸水せず、ゆっくりと吸水していくことがわかった。BSC においても同様な傾向がみられた。

3.3 細孔径分布

図4, 5は OPC, BSC それぞれにおける水銀圧入式ポロシメータを用いて測定した細孔径分布である。連続乾燥養生したものは既報²⁾の通り、大きな径の空隙が大量に残存している。それに対して水中養生を行ったものでは小さな径でピークを有し、その量も少量である。本研究のように乾燥履歴を受けた後に水分供給を行ったものは、連続乾燥養生の細孔径分布から水和が進行し緻密化していることがわかる。特に DW においては水中養生の分布と同形と

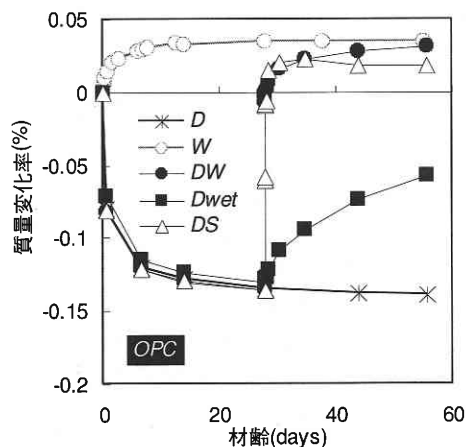


図3 OPCにおける質量変化率の経時変化

研 究 速 報

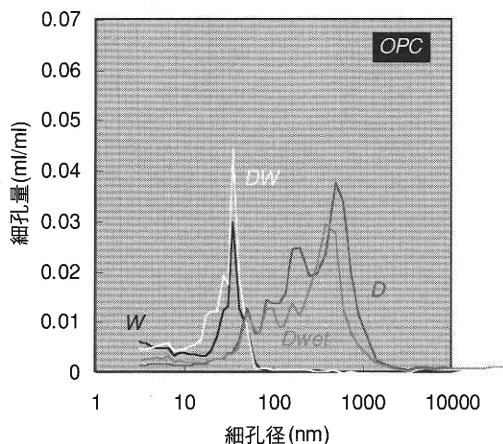


図4 OPCにおける細孔径分布測定結果

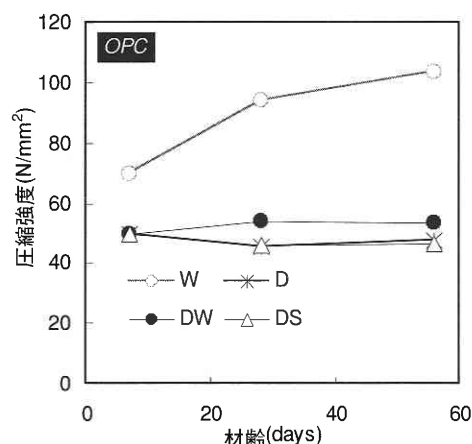


図6 OPCにおける圧縮強度発現

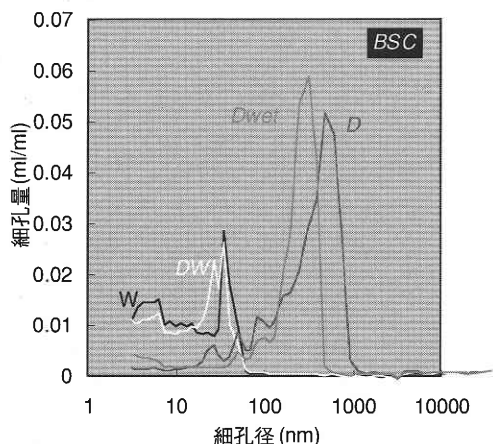


図5 BSCにおける細孔径分布測定結果

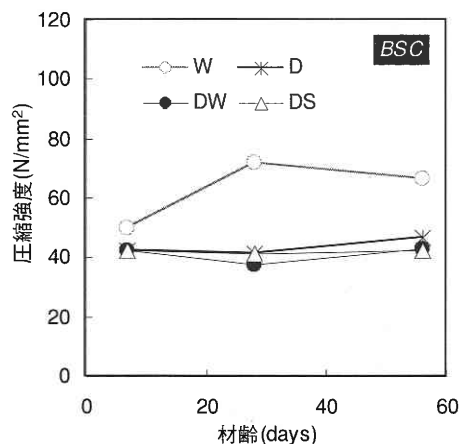


図7 BSCにおける圧縮強度発現

なり、ピーク径も同じになった。しかし、そのピークで持ちうる細孔量は一致していないことから、乾燥履歴を受けた後の水分再供給における細孔径分布は形状を同じくし、そのピーク量に変化することで若干の水和率の差を表す関係となっていると考えられる。

3.4 圧縮強度

図6, 7はOPC,BSCそれぞれの環境の材齢ごとにおける圧縮強度の試験結果である。水中養生した試験体に比べ乾燥を受けた試験体は強度の発現性が認められない。また、水分を再供給した試験体の圧縮強度もほとんど発現していない。3.1で示したように水和の進行は水分の供給とともに起こっていることを考えると水和の進行と圧縮強度の発現は非線形であり、圧縮強度の発現性は乾燥の履歴を受けた場合、一概に水和の反応度では推測できないといえる。

4. 考 察

4.1 総細孔量と水和率の関係

図8にポロシメータで測定した総細孔量と水和率との関係を示す。既報²⁾で行った実験における連続養生環境下では実線で表すような総細孔量と水和率には相関関係が得られた。そこで、本研究で行った水分再供給を行った試験結果をプロットしたところ、非常によい相関を得た。つまり、ポロシメータで測定できる総細孔量と水和率の間には強い相関が存在し、乾燥の履歴を受けた場合でも連続養生と何ら代わりのない反応が起きていると考えられる。

4.2 水和率と圧縮強度の関係

図9は水和率と圧縮強度の関係を示したものである。連続養生を施した環境では圧縮強度は水和率と非常によい相関を持っている。しかし、乾燥履歴後に水分再供給した試験体は連続養生した関係と一致しない。このことから強度に影響する要因は水和率並びに総細孔量で表現できないと

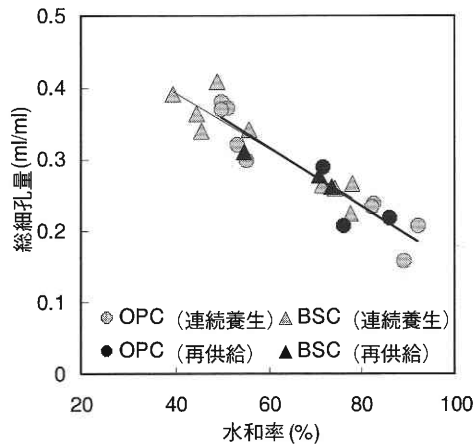


図8 水和水率と総細孔量の関係

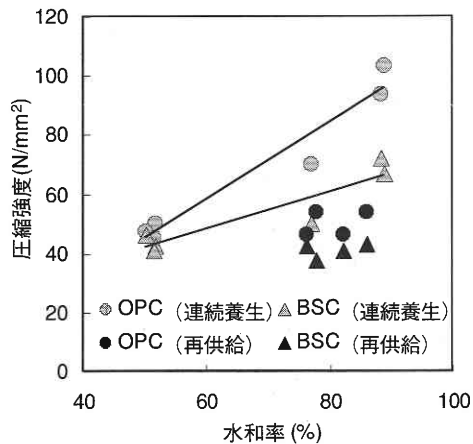


図9 水和水率と圧縮強度の関係

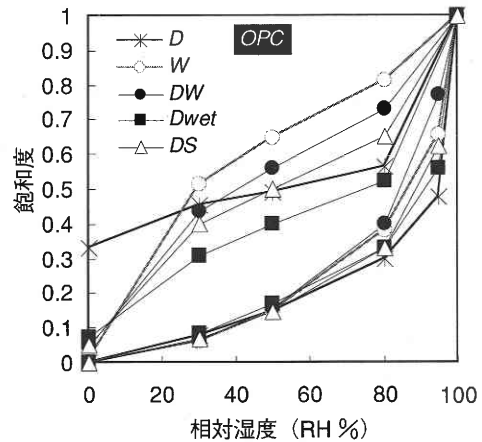


図10 等温吸脱着の試験結果

た、その進行は供給された水分量に比例し、湿気等の微量の水分供給を連続的に行うことで水和水はゆっくりと進行する。

- (2) 水分再供給した試験体の細孔径分布は水中養生した試験体の分布と同形となるまで緻密化しピーク径は一致するが、その量が異なる。
- (3) 総細孔量と水和水率には一定の関係が存在し、乾燥の履歴を受けてもその関係は普遍である。しかし、圧縮強度と水和水率との関係には乾燥履歴による影響が存在し、強度を水和水率または総細孔量で表現できないと考えられる。
- (4) 等温吸脱着試験により得られた内部情報により乾燥履歴を受けた試験体は水中養生したものと比較して若干ではあるが異なった内部構造を持っていると考えられる。

参考文献

- 1) 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水反応と水分逸散特性, コンクリート工学年次論文集, NO.22, Vol.2, pp.703-708, 2000.
- 2) 伊代田岳史, 魚本健人: 初期乾燥を受けたセメントペーストの水和水・細孔組織に与える高炉スラグの影響, 生産研究 3月号掲載予定

謝辞

実験に関して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。なお本研究費の一部は平成12年度科学研究費補助金基盤研究(A)(2)課題番号12305029(代表:魚本健人)によったものであることを付記する。

(2001年3月7日受理)

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 水和水反応は水分の再供給により再び進行し、時間経過とともに水中養生の水和水度まで進行するといえる。ま

考えられる。

5. 等温吸脱着試験による検討

図10はOPCの等温吸脱着試験の結果である。これより、水中養生と乾燥履歴を受けた試験体の挙動が異なっていることがわかる。特に乾燥過程におけるRH100%からRH80%での飽和度の減少量が異なっていることからインクボトル効果を含んだ水分移動に対する抵抗性は、水中養生したものの方が高い。この細孔構造の違いが圧縮強度にどの程度影響があるかは不明であるが、水銀圧入式ポロシメータで測定できないここに現れた差が圧縮強度に影響していると考えられる。