

若材齢時における乾燥後の水分再供給による 水和進行と細孔径分布の関係

The Relationship Between Cement Hydration and Porosity by the Re-supplied Water after Drying at Early Age

伊代田 岳 史*・魚 本 健 人*
Takeshi IYODA and Taketo UOMOTO

1. は じ め に

コンクリート構造物は打設されてから脱型し、供用を開始するまでの間に様々な環境の影響を受けることが考えられる。特に若材齢における環境の作用は、コンクリート内部の組織構造が未だ形成されていないため、後の強度や耐久性に大きく影響すると考えられる。作成されたコンクリートが所定の強度や耐久性を発揮するためには、若材齢時の水和進行過程における適切な養生が必要不可欠となる。しかし、実際の工事現場におけるコンクリートの養生は、工期短縮や型枠転用などといった理由から早期脱型してしまうことが多く、十分とはいえない。このような場合、コンクリートの露出面から内部水分が逸散してしまい、水和に必要な水分が十分に確保できないことが考えられる。これにより、水和阻害がおこり内部空隙構造が変化したり強度低下の原因になったりすることは筆者ら¹⁾が確認している。また、一方で実際の構造物は、供用以前に雨水や再養生、湿度の増加などといった理由から水和に必要な水分が再び供給されることも考えられる。筆者らはこのような状態における再水和現象²⁾も確認している。

本研究においてはこのように若材齢時に一度乾燥の影響を受けた水セメント比の異なるセメントペーストに再び水分を供給することでおこる再水和反応と内部組織構造の違いを明らかにすることを目的とした。また、継続的な水和反応と一度乾燥を受けた断続的な再水和反応の違いについて検討をおこなった。

2. 実 験 概 要

本研究においては普通ポルトランドセメント（密度 3.18 g/cm³）を用いて作成したセメントペーストを利用して実験を行った。作成したセメントペーストの配合は W/C = 0.25, 0.35, 0.50 の三種類であり、供試体は均一に

*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

環境の影響を受けるために 20 × 20 × 80 mm の直方体とした。実験は、打設したセメントペーストを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、それぞれの環境条件で引き続き養生を行った。養生環境条件は表 1 に示す。環境条件の作成方法は以下の通りである。乾燥環境は恒温恒湿槽で実現した RH 50%、RH 80% で、真空養生は真空ポンプにより強制排気したものである。封緘環境はアルミテープにより試験体をコーティングし、水分の出入りを防いだ。RH 100% の環境はできるだけ高湿度にするため、水を張ったコンテナの中に試験体が水に触れないようにコントロールして行った。これは気体として水分供給された際の挙動を確かめるために行ったものである。一方、乾燥後水分供給する環境条件は、表 2 に示すように材齢 28 日で試験体を水中、RH 100%、水分を吸水した布

表 1 連続環境条件

W/C	0.25, 0.35, 0.50
連続環境条件	真空、RH50%、RH80% 水中、封緘、RH100%

表 2 環境変化試験における環境条件

養生方法		記号	区分	
Time →				
前養生	水中	W	連続養生	
		50D		
	乾燥(RH50%)	水中	50W	再供給
		RH100%	50wet	
		表面湿潤	50A	
	乾燥(RH80%)		80D	連続
水中		80W		
RH100%		80wet	再供給	
表面湿潤		80A		

で試験体を覆う表面湿潤養生に移行した。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°C 一定とした。

測定項目は経過時間ごとの強熱減量法による水和進行、供試体の重量変化率、材齢 28 日と材齢 120 日における水銀圧入式ポロシメータを用いた細孔径分布である。なお、水和進行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 で除して水和率として表している。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。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 120 日の試験体を用いて 3.2 nm ~ 300 μm の範囲で測定した。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た。

3. 実験結果

3.1 水和進行

図 1 は各水セメント比ごとに整理した水分を再供給した試験体の水和進行を示したものである。代表して乾燥条件が RH 50% のものを示した。比較のため、連続乾燥条件、連続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、どの水セメント比においても水分を液体で供給した場合、水分供給時に水和は急速に進行していることがわかる。水分供給後 5 日間程度で、連続水中養生した試験体の水和率に接近し、高水セメント比では供給後 28 日程度でほぼ追いつくことがわかる。これは後から水分供給した場合においても水和反応は再び起こり、水中環境下と同等の水和率まで回復することを示している。高水セメント比の水和速度が速い理由として、高水セメント比ほど乾燥による水和阻害の影響が大きく、水分再供給前に粗大空隙が多く存在しているため、供給直後の水分の浸透は早くなると考えられる。これらのことから乾燥によって停止したと見られた水和反応は一時的なものであり水分不足による現象で、水分再供給で再び水和が開始することがわかった。一方、RH 100% の状態である気体で供給した 50 wet の場合には急速に水和していない。しかし、材齢が経過するに従って徐々に水和反応が起こり低速ではあるが水和していることがわかる。

以上のことは RH 80% 環境下から水分を再供給した試験体でもほぼ同様の結果が得られた。しかし一点だけ注目すべき点は、乾燥環境が過酷なほど、ここでは RH 50% と RH 80% を比較すると、RH 50% から水分供給した場合の方が、再水和反応が早いと見られた。この理由は過酷乾燥下では試験体に多くの粗大空隙が残存してしまうことにより、水分供給時に試験体内部まで早期に水分が供給されるためと考えられる。一方で乾燥が過酷でない場合は空隙構

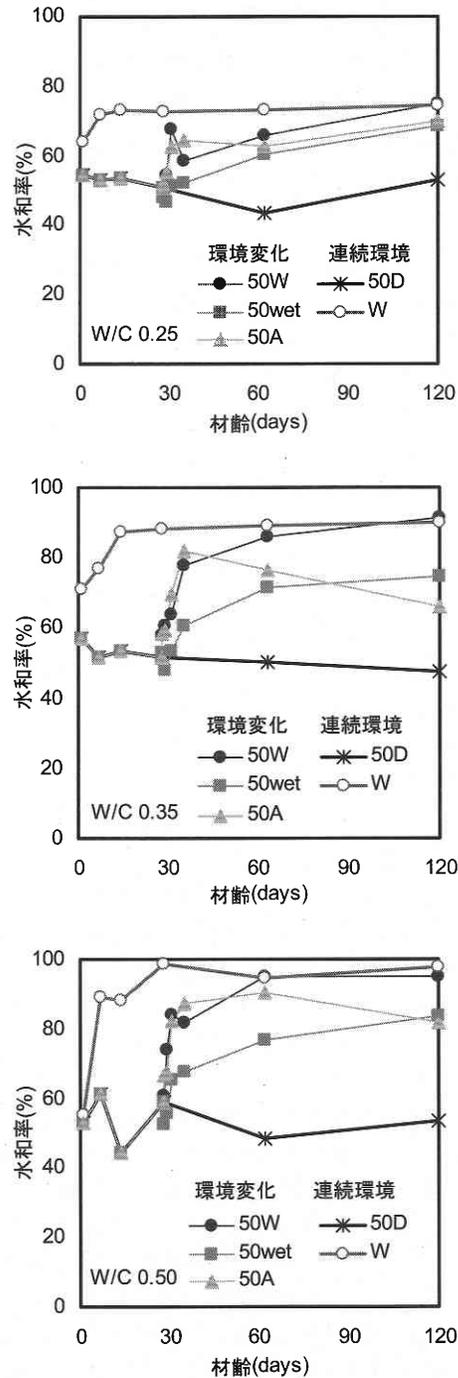


図 1 各環境における水和進行 (水セメント比変化)

造が緻密に形成されるため水分が浸透しにくいといえる。

3.2 細孔径分布

図 2 は各水セメント比における総細孔量を細孔径別に区分けして示したものである。表 3 はその区分を示してい

表3 細孔径区分

□ 3nm-6nm	■ 6nm-10nm
▨ 10nm-50nm	▩ 50nm-100nm
▧ 100nm-1000nm	▦ 1000nm-10000nm
■ 10mm-	

る。掲載したのは RH 50 % の乾燥環境から水分再供給した結果と比較のために連続乾燥環境と連続水中養生した結果を示している。連続乾燥養生と比較すると水分を再供給したものは総細孔量が減少していることがわかる。つまり内部組織は緻密化している。しかし、一方で水中養生と比較すると再供給した試験体の総細孔量は若干ではあるが大きい。また、気体で水分を供給した wet の総細孔量が多い。

次に細孔径別に見た場合、wet に関しては多量の粗大な空隙が残存しているが、その他の 50 W と 50 A では粗大空隙は減少し、微細空隙に変化していることがわかる。50 W と 50 A を比較すると若干ではあるが 50 W の方が小さい径の空隙量が多く、大きな径の空隙は減少しているといえる。このことは水セメント比が高くなるほど顕著に表れる。つまり存在する空間に水和生成物が析出して空隙をより小さなものにしていくことになり、一般的な水和反応と何ら代わりのない現象がおきていることとなる。しかし、測定した水和率においては水中養生と乾燥後水中養生した試験体は非常に近傍な値であったにも関わらず、50 nm ~ 100 nm の空隙の量は乾燥後水中養生した試験体の方が多く存在し、空隙の組織構造が異なっていると考えられる。このことは水和した生成物の相違が影響しているのではないかと考えられる。

図3は連続乾燥環境と連続水中養生における材齢の違いによる空隙分布を示したものである。水中養生した試験体は材齢の経過とともに微細な空隙構造はほぼ変化せず、粗大空隙が若干減少する結果を示した。これは材齢 28 日において水和反応もほぼ収束し、細孔構造が形成されたことを示している。しかし、連続乾燥環境下にある試験体は、総細孔量は減少しているにもかかわらず、若干粗大な空隙は増大し、微細空隙が著しく減少していることがわかる。これは別途測定していた質量変化の結果が材齢 28 日程度から徐々に増加の傾向を示していることから、中性化による内部組織の緻密化であると推測できる。乾燥条件の湿度が RH 50 % と RH 80 % を比較すると RH 50 % の方が微細空隙の減少が顕著であることから、乾燥湿度が低い RH 50 % の方が微細空隙内の水分までも逸散し、中性化しやすいと考えられる。

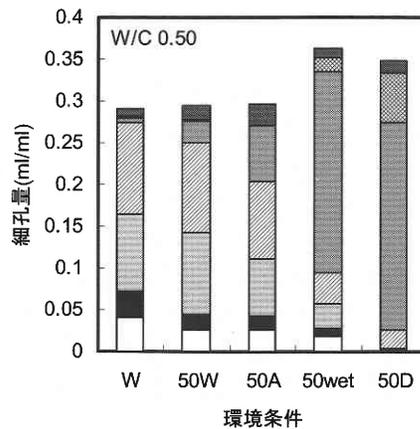
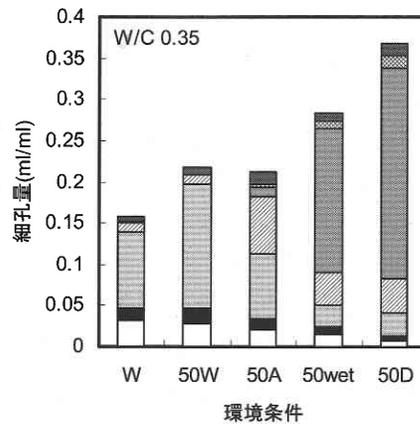
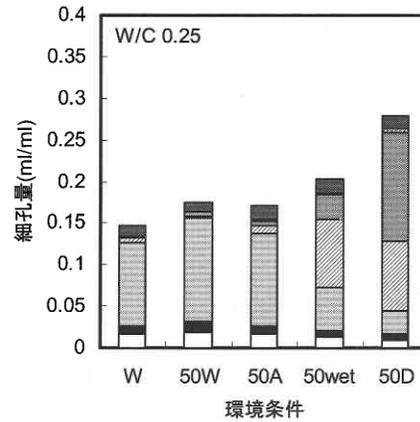


図2 各環境条件での細孔径分布結果 (RH50 %)

4. 総細孔量と水和率の関係

図4は総細孔量と水和率の関係を示したものである。水和率と総細孔量の関係は水セメント比ごとに一定の関係性を持っているように見える。総細孔量に関して言えば、初期において受けた乾燥の影響はさほど大きくなく、水分の

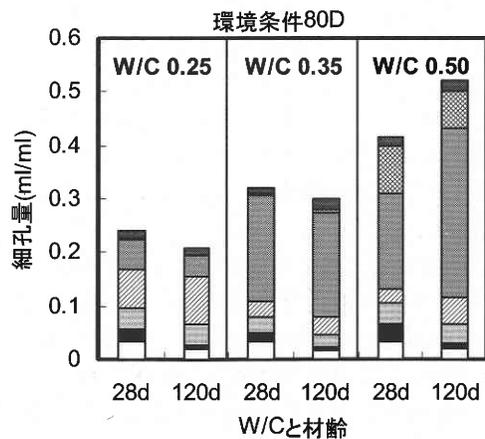
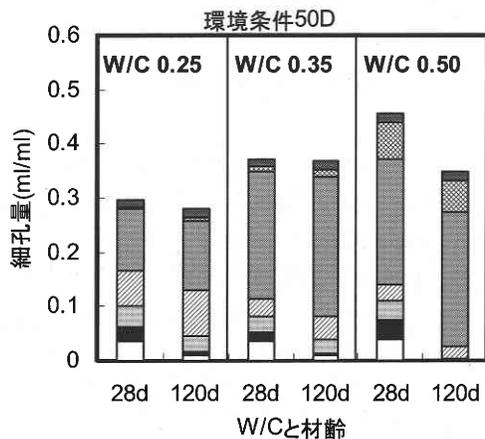
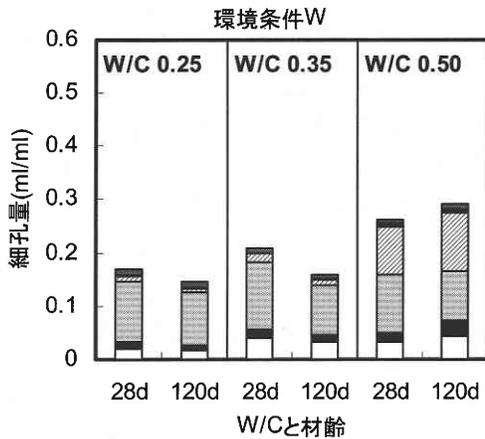


図3 連続環境条件による細孔径分布の変化

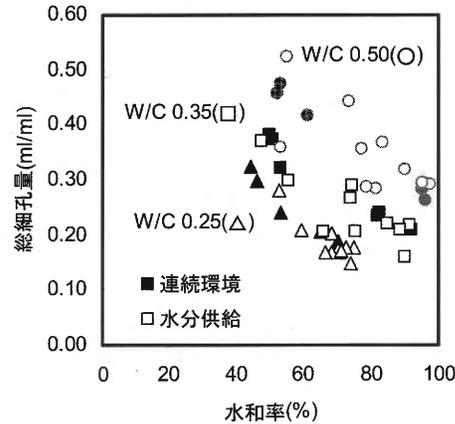


図4 水和率と総細孔量の関係

このことは物質の移動性能を考える上で非常に重要な機能を果たすと考えられ、今後、水和生成物との関係も含め、内部組織構造がどのように変化しているのかを顕微鏡などを利用して調査する必要があると考えられる。

5. ま と め

本研究で得られた結果を以下に列挙する。

- (1) 水セメント比を変化させたセメントペーストを用いて養生環境を変化させた水和挙動を調査したところ、初期に乾燥を受けた試験体に再び水分を供給すると水分の形態により差があるものの再水和反応が確認できた。このことから乾燥による水和停止は一時的なものであると確認できた。
- (2) 環境条件を変化させて養生した試験体の内部組織構造を調査したところ、再水和反応を起こした試験体では総細孔量は減少し、水中養生したものとはほぼ同等まで回復した。しかし、その分布には若干の相違が見られ、今後より深い検討が必要である。
- (3) 連続的に乾燥養生した試験体は中性化の影響を受けたと考えられ、材齢経過とともに 10 nm 以下の極微細な空隙径の空隙が減少し、総細孔量が減少する緻密化現象が確認できた。

(2002年10月30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, Vol. 54, 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号5号, pp.46-49, 2001

再供給により水和とともにほぼ回復し、連続養生と同程度になるといえる。しかし、前述したように水分を再供給した試験体は、微細径の空隙が減少する反面、50 nm ~ 100 nm 程度の空隙が多く存在するよう見受けられる。