

配合と養生環境の違いが質量変化と水和反応、 内部組織構造に与える影響

Effect of Mixture and Curing System on Weight change, Hydration and Porosity of Cement Paste

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が打設されてから供用を開始されるまでの間には様々な外部環境の影響を受け、長期強度や耐久性に影響を与えることがわかっている。特にまだ固まらない若材齢コンクリートにおいては水和反応の関係などからその影響は顕著であると考えられる。そのためコンクリート標準示方書では、若材齢時コンクリートの保護のために養生の規定が示されている。しかし、近年の施工現場においては、工期短縮や型枠転用といった理由から早期脱型されることが考えられる。早期脱型された若材齢コンクリートはその直後から周囲の環境の影響を受ける。特に周囲の湿度が低い場合には水和反応に必要な水分がコンクリートの内部から逸散してしまい、水和反応が停止してしまうことは筆者らが明らかにしている¹⁾。一方で、外部環境に曝されたコンクリートは雨水などによる湿度上昇や水分供給、再養生などの観点から再び水分が供給されることも考えられる。この場合には実験室の試験体レベルにおいては、再水和反応が起こり水和回復することを筆者らは確かめている²⁾。

また、一方で近年は様々なセメント種が利用されており、多種多様なコンクリートが作られている。しかし、そういった異なったセメントにおける物理的特性は未だ明らかにされていない部分が多い。

そこで、本研究においてはセメント種の違いが再水和反応に与える特徴を普通ポルトランドセメント(OPC)と高炉C種セメント(BSC)を用いた試験体を利用して把握するとともに、早期脱型された試験体の受ける暴露環境が異なった場合の再水和反応の特徴を把握することを目的とした。具体的には湿度を変化させた環境下で若材齢から養生した試験体を材齢28日において異なった4種の方法で水分供給を行い、質量増加量、水和進行、内部組織構造を測

定することで、環境の異なった養生、水分再供給養生における特性を把握することを目的としている。

2. 実験概要

普通ポルトランドセメントと高炉C種セメントを用いてW/Pが0.25, 0.35, 0.50の三種類とした計6種類の配合の異なった試験体を用いて試験を行った。試験体の大きさは試験体内部まで均一に周囲の環境の影響が及ぼされるように20×20×80mmの試験体を用いた。打設から6時間後に脱型し、真空[V](RH0%), RH50%[50], RH80%[80]の三種類の乾燥環境に移動して乾燥養生を行った。材齢28日を迎えた時点で水分を供給するために水中(W), RH100%(wet), 湿潤(A), 水中後封緘(B)の4種類で水分を再供給した。ここでRH100%とは容器内に水を張り、試験体が水と触れないように静置して容器を密封したものであり、湿潤とは試験体を塗れた布で被覆して水分を供給した。また、水中後封緘は30分間水中で水分供給した後、アルミテープを用いて封緘状態を作り、供給された水分の逸散を防いだものである。比較のために連続的な水中養生と各乾燥環境下で連続的に養生した試験体も作製した。

作製した試験体は、質量変化率を経時的に材齢56日まで測定した。また、合わせて水和進行も材齢1, 3, 7, 14, 28, 56, 120日と水分再供給直後の1日間を継続的に測定を行った。また、内部組織構造に関しては乾燥環境をRH50%とRH80%に限定し、RH80%においてはBシリーズ以外の硬化体を対象として材齢120日にて測定した。水和進行に関しては試験体を破碎し、その一部を粉碎した後に、アセトンを用いて水和停止し40°Cでアセトンと水分を逸散させたのちに600°Cで結合水を逸散させた。表示はすべて結合水量で示している。また、内部組織構造は水銀圧入式ポロシメータを用いて3.2nm~320μmまで測定している。

*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

3. 実験結果

3.1 質量変化率

図1, 2はそれぞれ W/P = 0.35 の OPC と BSC における各種条件下における質量変化率を示している。連続乾燥環境下では、乾燥度が厳しい、つまり湿度の低いものほど質量減少率が大きいことがわかる。しかし、その割合は均等ではなく RH 80 % では質量減少率は少ないが RH 50 % と RH 0 % との間には大きな相違は存在しない。このことは、RH 50 % 程度以下の低湿度下においては、水分逸散量はそれほど変わらず、いずれも厳しい乾燥環境下であることを示している。また、OPC と BSC で比較すると、BSC の方が初期材齢において急激に質量減少している。この理由として、OPC では粒子がすべて反応可能なセメントであるのに対して、BSC では水だけでは反応できない高炉スラグが多量に存在するため、従来言われているように乾燥の影響を大きく受けてしまうと考えられる。次に乾燥環境下から水分再供給を行った質量変化率に注目すると、乾燥後水中養生を施した W シリーズではどの乾燥状態から水分供給しても、接水直後から水分を吸水し、ほぼ 30 分程度で基の質量まで回復する。その後、徐々に水和反応の影響と内部の微細構造まで水分が浸透して質量は増加する。連続的に水中養生した試験体と比較すると、ほぼ同等の質量変化率まで回復していることから、水和反応による重量増加と水分吸収による膨潤したことになる。このことは BSC においても同様の傾向であることは図からわかる。しかし、水セメント比で比較すると、低水セメント比である 0.25 では同様の傾向であるが 0.50 では若干差が生じており、乾燥度の強い低湿度下の方が、質量増加率が高くなった。これは水分吸水量か水和の影響かははっきりしていないが、空隙が多い分、多くの水分が供給され水和が起りやすい状態になるのではないかと考えられる。次に RH 100 % の気体で水分を供給した wet シリーズの場合には質量増加は起こるものの水分供給量が不足しているため質量は基に戻らない。乾燥度の厳しい環境ほど接水直後からの質量増加率が高く、乾燥度の低い RH 80 % では質量増加率は非常に少ない。また、OPC の方が、質量増加率が高いことも伺える。これは先ほどの連続乾燥の結果と同様、空隙に進入した気体の水分が未反応セメントと敏感に反応するために起こるものと考えられる。一方、BSC では高炉スラグはアルカリ分が必要となるため反応が遅くなり、質量増加率も鈍くなるものと考えられる。次に水分供給方法 A シリーズでは接水直後に質量は水中養生と同等まで供給されるが、その後、布からは供給できない微細部分が存在するためか、ほとんど変化しない。また、水分供給方法 B シ

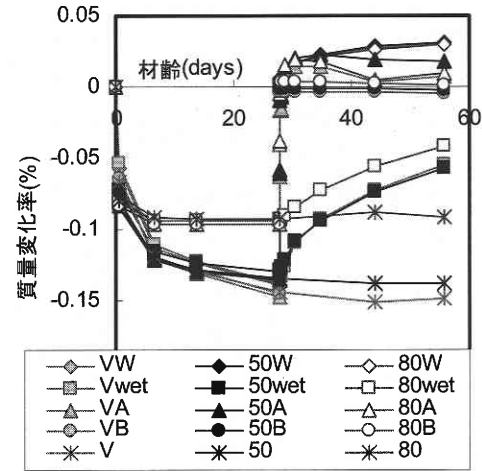


図1 OPCにおける質量変化率

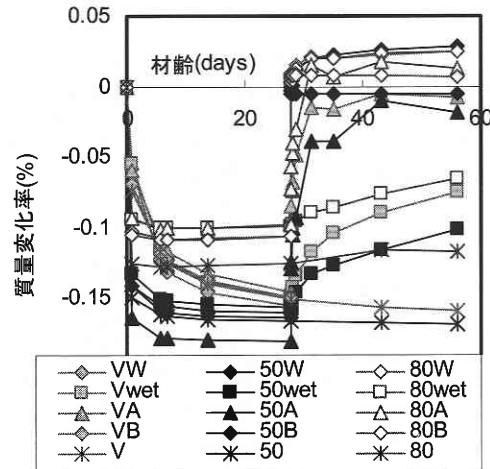


図2 BSCにおける質量変化率

リーズでも封緘することで質量変化しないものの、水中養生した試験体よりは質量変化率は大きくないことがわかる。低水セメント比では質量変化率は基の質量まで回復する B シリーズも高水セメント比である 0.50 では基の質量まで回復することができないことも確認できた。

3.2 水和進行

図3, 4はそれぞれ W/P = 0.35 の OPC と BSC における各環境から水分供給した場合の水和進行を示した。参考に連続的に水中養生、乾燥養生した結果も付記している。筆者らが確認している¹⁾ように連続的乾燥養生を行った場合には水和停止をおこす。これは硬化体内部から水分が逸散することによる水分不足が原因である。この傾向は BSC を用いた試験体でも明らかであり、セメント種類に寄らず、乾燥環境下では水和停止することがわかる。一方、水中養

研 究 速 報

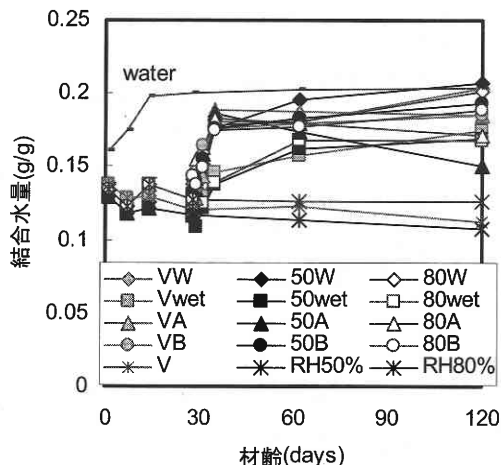


図3 OPCにおける結合水量

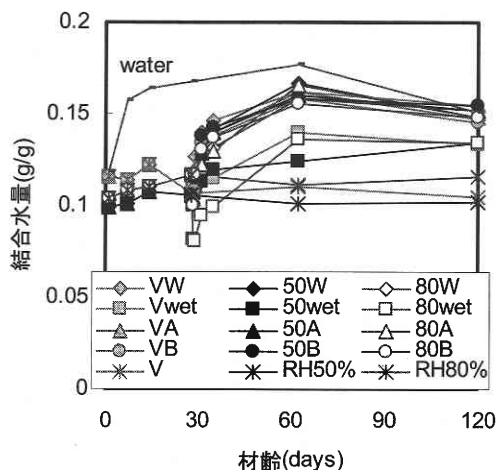


図4 BSCにおける結合水量

生を行った場合では、材齢とともに水和進行し、材齢28日程度で安定する。BSCを用いた場合は高炉スラグの水和反応が遅れるため、材齢56日程度まで水和反応が行われる。BSCの水中養生における材齢120日での結合水量測定結果が減少する結果になった原因としては、測定誤差と試験体による格差と考えられる。本研究での水和進行の測定には数本の試験体を各材齢で利用したため、試験体ごとの偏りと試験体内部と外部における偏りがあったものであり、その影響は単独では反応できない高炉スラグの入ったBSCの方が多大であると考えられる。次に水分再供給した試験体の水和挙動に着目すると、どの水分の与え方においても接水直後から水和反応が再び起こり、結合水量が増加している。Wシリーズはその速度が速く材齢120日ではほぼ連続水中養生した試験体の結合水量と同等まで回復した²⁾。一方、wetシリーズの場合には、結合水量の増加は

材齢120日においても連続水中養生した試験体には追いつかない。しかし、乾燥環境下の違いの差異は材齢120日にはほとんど認められなかった。水分供給方法Aシリーズでは接水時は水中養生したものと同等の結合水量を持ち、その後はほとんどのびないか、減少に転じた。この原因は、前にも書いたとおり、試験体間誤差に寄るものと考えられる。このことから、Aシリーズのような方法では均一に水分を供給することは難しいとわかる。供給方法Bシリーズでも、Aシリーズと同様、接水直後に結合水量が増しその後、封緘することで水和進行はあまり進まない状態に陥る。材齢120日においてはWシリーズに比べて若干小さな値となっており水和に必要な水分が完全に供給されたわけではないといえる。このシリーズでも乾燥環境の影響はあまり見られなかった。BSCを用いた場合には水和反応が鈍くなっており接水から28日程度して水和が落ち着く結果となった。これは従来言われているとおり、高炉スラグの反応遅延が原因であると考えられる。また、材齢120日の結果は連続水中養生の結合水量とは完全に一致することではなく、水和進行の遅れと限界が存在するようである。これは高炉スラグの反応に必要なアルカリ分が水和遅延により不足し、供給が遅れるためと考えられる。また、再水和現象によって供給されるアルカリ分に関しては高炉スラグが反応するのに十分なものは不明である。水セメント比間による相違点はOPCの場合、低水セメント比では連続乾燥環境下と水中養生の間にもさほど大きな差が見られないため、水分を再供給して反応が再開してもすぐに水和限界が訪れてしまう。一方、高水セメント比では水分の供給が多くても水和反応が追いつかないため、少し水和反応に遅れが出てくる。しかし、Wシリーズではおおかた水中養生試験体と同等まで結合水量が回復しており、水和進行が行われたことが明らかであった。BSCでも同様の傾向が伺われ、高炉スラグの混入しているだけ水和遅延した。

3.3 内部組織構造

図5、6は同様にOPCとBSCを用いたW/P=0.35における各環境から水分供給した場合の内部組織構造を示している。連続乾燥したRH50%並びにRH80%では前述したとおり水和反応が停止していることから粗大な空隙が大量に残存していることがわかる。一方、水中養生Wでは乾燥養生で多く見られた径の空隙はほとんど存在せず、微細空隙が多く存在しているといえる。総細孔量を比較しても明らかに異なり、水和反応による内部組織構造の緻密化が伺える。同様のことがBSCを用いた硬化体でも伺えるが総細孔量の差はあまり大きくないのが特徴的である。これは、もともと反応の鈍い高炉スラグの存在が内部組織構

表1 細孔径区分

□ 3nm-6nm	▣ 6nm-10nm
▤ 10nm-50nm	▥ 50nm-100nm
▦ 100nm-1000nm	▧ 1000nm-10000nm
■ 10mm-	

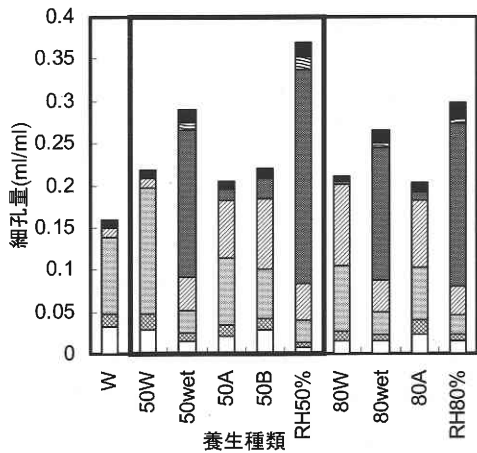


図5 OPCにおける内部組織構造比較

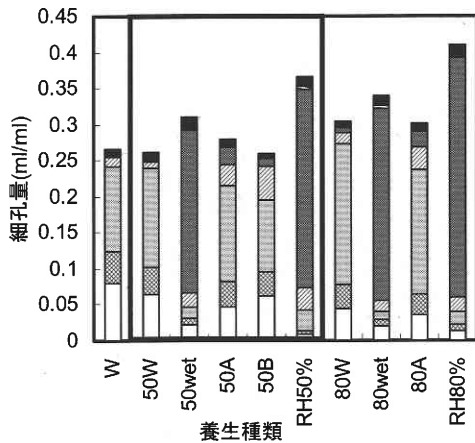


図6 BSCにおける内部組織構造比較

造を粗大化しているものと考えられる。次に水分供給したWシリーズでは明らかに水和による緻密化が起きていることが確認できる。連続乾燥環境では100nm以上の空隙が多量に存在するのに対し、Wシリーズでは減少し、10nm～100nm程度の空隙が増大している。特に50Wでは10nm～50nmの空隙が多いのに対し、80Wでは10nm～50nmと50nm～100nmが多く残存している。ここに乾燥過程における差が生じているものと考えられる。ここで、連続水中養生と比較すると50W, 80Wともに総細孔量は大きく、また10nm～100nmの空隙量に差があり、完全

に同等の内部組織構造を持ったとはいえない。一方、BSCにおいては、総細孔量はほぼ同等まで回復しているが、OPCと同様、微細空隙が少なく、10nm～50nmの空隙が多い。このようにWシリーズは水和反動的にはほぼ同等まで回復したにもかかわらず、内部組織構造は若干の相異が存在する。次にwetシリーズについて検証すると、どちらの環境から水分供給した場合でも粗大径である100nm以上の空隙が多量に残存していることがわかる。しかし、連続乾燥養生と比較するとその量は減少しており、水和が進行して緻密化しているといえる。BSCにおいても同様に、wetの環境で再供給すれば乾燥過程による差異はあまり存在しない。Aシリーズ、Bシリーズともに100nm以上の空隙は大きく減少している。しかし、10nm～100nm程度の空隙の量は多く存在し水和反応が十分に行われなかったためであると考えられる。BSCにおいても水中養生よりは若干大きい空隙が存在している。このように再水和反応により内部組織構造も緻密化するがその水和進行のように完全には同一の組織構造にならないといえる。

4. ま と め

本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) OPCとBSCのセメントの違いによる質量変化ではOPCが敏感に質量変化するといえる。これは水和反応のしやすさが起因している。また、乾燥環境の違いによる敏感さはOPCでは差が見られないもののBSCでは若干の差が見られる。
- (2) 水和反応においては乾燥環境に暴露後に水分を供給することでいずれの形においても再水和反応を起こす。しかし、十分な水分供給が必要となる。
- (3) 内部組織構造は再水和反応の具合により変化するが、水饱和度が同程度になったものでも空隙構造に差が見られる。このことから若干の強度・耐久性への影響も懸念される。OPCとBSCにおける違いは水和反応と同じように評価できる。

ほぼ同一の結合水量でありながら、内部組織構造に差が見られる点については、現在顕微鏡を用いた観察を勧めている。

(2002年10月30日受理)

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 52 巻 10 号 pp. 47-50 (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)