

初期乾燥を受けたセメントペーストの 水和・細孔組織に与える高炉スラグの影響

Effect of Slag Cement on Hydration and Porosity of Cement Paste 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¹⁾において同一水セメント比の普通ポルトランドセメントにおいてその事実を確認している。しかし、近年におけるコンクリートの多様化によって様々な水セメント比や混和材を混入したセメントが使用されるようになってきた。そこで、水セメント比や混和材の混入が養生不良から起こる初期乾燥による水和阻害と生成される組織構造に与える影響を確認する必要があると考えられる。

そこで、本研究では水セメント比を3種類、混和材に高炉スラグを用いたセメントを用いて乾燥による水和阻害と内部水分量、内部組織構造を普通ポルトランドセメントを用いた時と比較することで実験的に求めることとした。

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) と高炉セメント C 種 (BSC) の二種類を用いたセメントペースト供試体を作成した。高炉スラグは体積割合でセメントの70%を置換した。測定は若材齢時から連続的に乾燥を受けたセメント硬化体の水和進行過程と内部水分量、並びに材齢28日における内部組織構造の測定を行った。実験行程は、打設してから脱型するまでの前養生期間を封緘養生し、脱型は打設から6時間後に行なった。脱型後、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。本研

究では温度の影響を考慮しないためすべての環境で温度20℃一定としている。

本研究の実験要因は図1に示した通りであり、養生環境は3種類とした。測定材齢は前養生終了時と養生を開始してから材齢で1, 3, 7, 14, 28日とした。測定項目は、供試体の重量変化と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。また、材齢28日における細孔量の測定のために水銀圧入式ポロシメータと等温吸脱着試験を用いた。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40℃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600℃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 cm³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。

試験は水セメント比を0.25, 0.35, 0.50の三種類としてセメント種を二種類とした合計6 casesで行った。ここでは紙面の関係上、W/P=0.35における結果を掲載し、特異であった水セメント比に関しては付記するものとする。また図中において特に明記しない限り、黒塗りをOPC白抜きをBSCとする。

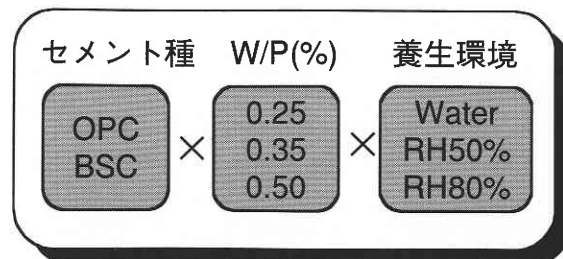


図1 実験要因

*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

3. 実験結果

3.1 質量変化

図2は供試体の質量を経時的に測定した結果である。水中養生における水分の吸水に関しては水セメント比、混和材の影響はほとんど見られなかった。一方、乾燥環境における水分の逸散に関しては、どの水セメント比においても混和材を混入したものの方が大きくなっている。また、水セメント比が小さいものほどその傾向は大きくなっていた。これより、水分の逸散を考えた場合には水セメント比が小さいものほど水和の阻害に大きな影響を与えたと考えられる。

3.2 水和の進行

図3にそれぞれの環境で養生された供試体の水和の進行を示す。水中養生を施された供試体は時間の経過とともに水和が進行している。また、混和材を混入したセメントは、初期の水和の程度は非常に低いが材齢の経過とともに水和が進行している。それに対して、乾燥養生されたものは水和の進行が材齢1日から3日程度で停止してしまってい

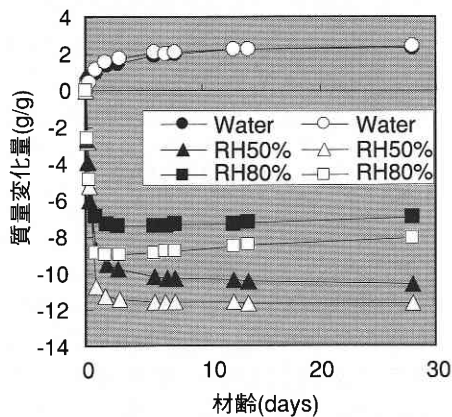


図2 質量変化

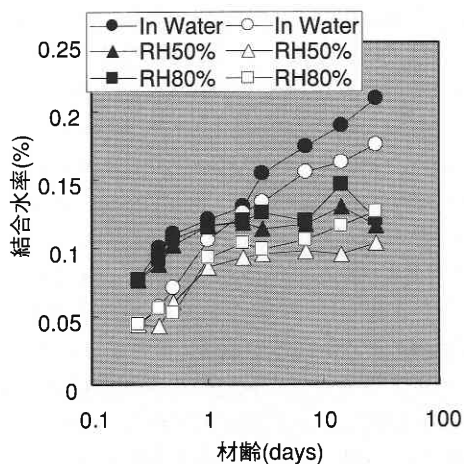


図3 結合水量の経時変化

る。この傾向は水セメント比や混和材の有無に関わらず同様の傾向を示した。水セメント比が大きくなるにつれて乾燥養生と水中養生との差が大きくなることも確認できた。

3.3 内部水分（自由水）の経時変化

図4は内部自由水量の経時変化を示したものである。どの環境においても水セメント比の違いによらず、ほぼ同量の水分が自由水として残存していることが確認できた。また、水セメント比が低い0.25以外は混和材の影響をあまり受けず、同等の水分量を保持していた。つまり、ある湿度下において残留する水分量は一定であるといえる。また、残留した自由水は水和停止していることから水和には使用されない水分であるといえる。このことからそれらの水分の存在箇所として考えられるのは、水和反応のできない箇所である、ほぼ反応が終了した水和生成物の周囲と非常に小さな細孔内と推定できる。

3.4 総細孔量と細孔径分布

材齢28日における水銀圧入式ポロシメータで測定した総細孔量を比較するとBSCの総細孔量の方が、養生方法によらずOPCに比べて多くなっている。また、乾燥養生した場合、水中養生と比較してかなり多量の細孔が存在しており、非常に粗な構造となっていると言える。図5はOPCとBSCの水銀圧入式ポロシメータによる細孔径分布の結果である。水中養生を施したBSCではゲル空隙領域である5nm以下の空隙が多くなっていることが分かる。この領域の空隙が多くなる原因は不明であるが、全体的にみて総細孔量は多くとも普通セメント単体よりも緻密であると考えられる。また、乾燥養生を施したセメントに関しては水中養生と比較して大きな空隙がピーク径として残存していることがわかる。これは水和不良によるものであり、このような径の粗大化が耐久性に大きな影響を与えたと考えられる。また、水セメント比が大きくなるに従ってピー

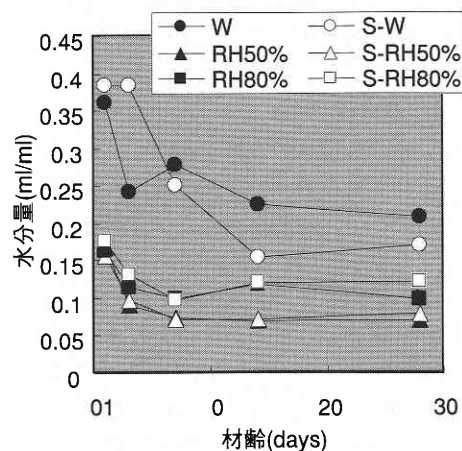


図4 内部水分量の測定結果

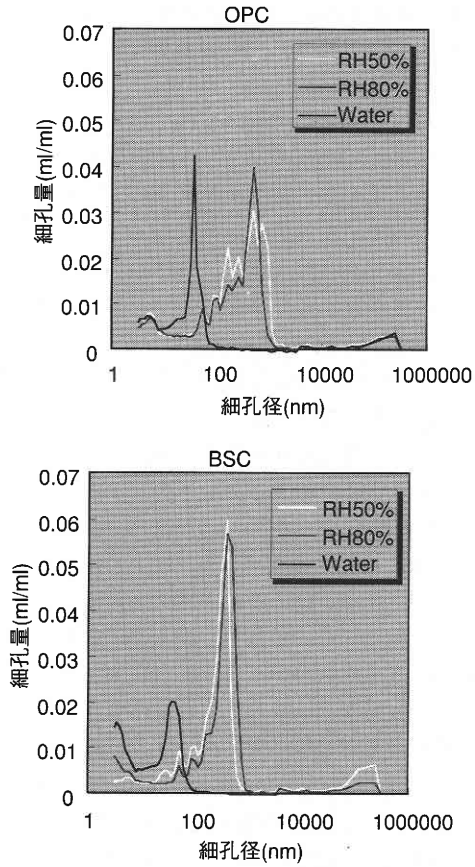


図5 水銀圧入式ポロシメータの試験結果

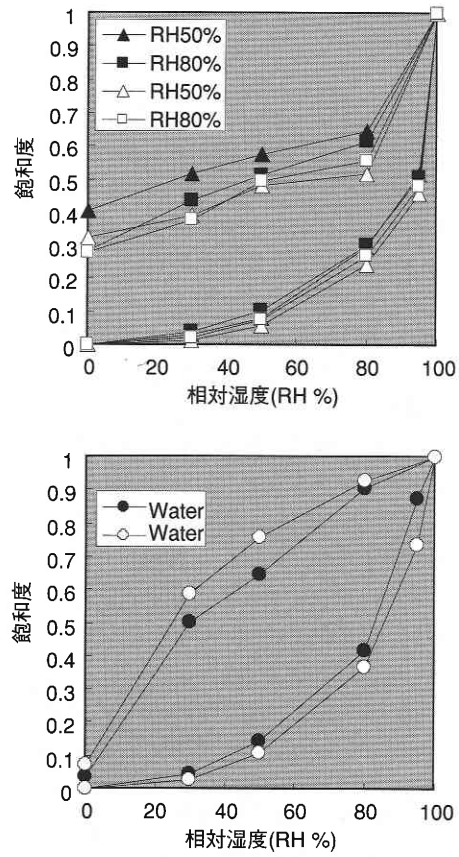


図6 等温吸脱着試験の結果

孔径が大きくなっていくことも確認できた。混和材の混入が細孔径分布に与える影響としては、ピーク径には影響していない。W/P = 0.25 の場合は練り混ぜの際に混入した高性能 AE 減水剤の作用により空隙径が変化しているものと考えられる。一方、そのピーク径の量に大きな差が発見できる。つまり、混和材を混入したセメントでは水和不足の影響により耐久性に影響を与える大きな径の量が多く残留してしまうと言える。

3.5 等温吸脱着試験

図6はそれぞれの環境の試料を細かく砕いたものを用いて等温下において湿度履歴を与えた等温吸脱着試験の結果を示したものである。横軸は与えた湿度履歴であり、縦軸は総細孔量に対する水分の飽和度を示したものである。この試験によってRH 0%からRH 100%への湿潤過程では小さな空隙から満水になっていくことによって空隙分布をある程度推定することが可能である。一方でRH 100%からRH 0%への乾燥過程においてはインクボトルの作用があるために空隙分布による水分の逸散が起こらず、空隙の水分保持能力、つまり水の移動のしやすさを表現すること

が可能となる。この試験を利用してそれぞれの環境下における水分の移動のしやすさを表現した。ここで、セメントの種類異なる場合においても乾燥を受けているRH 50%、RH 80%で養生したものに関してはループが閉塞していないことがわかる。この理由としては、図7の模式図のようにRH 100%近傍で水を圧入したため水和反応が進行してしまい、連結していた空隙を閉塞してしまったのではないかと考えられる。そのため乾燥過程においては閉塞された部分より奥の空隙に存在する水分が脱水できない状態になってしまったのではないかと考えられる。ここで、湿度履歴や水分の再供給によって少なくとも水和反応が再び始まることが確認できた。

また、RH 100%からRH 80%に移動したときの乾燥過程で極端に水分が逸散していることから、粗大な空隙が残留しており移動に対する抵抗性が極端に低下しているといえる。

一方で水中養生を行った試料の等温吸脱着試験においてはセメントの種類によって差がみられた。OPCに比べBSCは湿潤過程では下側、つまり大きな空隙の量が多少多くなっているといえる。一方、乾燥過程ではBSCの方が上側、

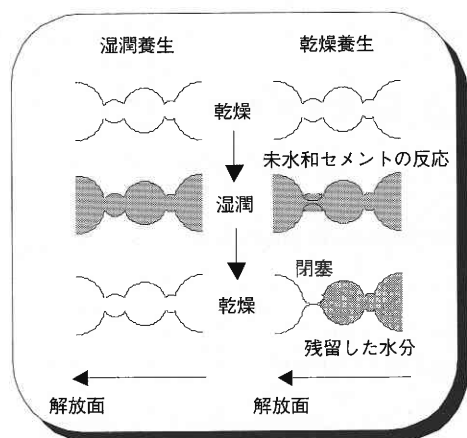


図7 乾燥過程と湿潤過程における模式図

つまり水分の逸散である移動が、しにくい傾向にあるといえる。つまり、BSCの方が比較的大きな空隙を持ち合わせていながら、水分（水蒸気）の移動に対する抵抗性が高いといえる。

4. 考 察

3章における結果よりBSCとOPCの相違点を以下に列挙する。

- 1) 供試体全体系の質量変化は吸水においては同程度であるが逸散においてはBSCの方が大きい。
- 2) 乾燥による水和阻害においては、あまり大きな差はみられない。しかし、内部の保持できる水分量はOPCでもBSCでも変わらないことから全体的に失う水分量は多量であるといえる。また、粒子単体の保持できる水分量はセメントもスラグも同程度と考えられる。
- 3) 細孔径分布としては、両者とも同程度のピーク径であるがその量の違いからBSCの方が粗大な空隙を多量に残留してしまうといえる。

- 4) 水和反応がある程度終了した供試体では、BSCの方が水分の移動に関する抵抗性が高いといえる。一方で乾燥を受けた供試体では粗大な連結空隙が多く存在することから移送に対する抵抗性が低くなっているといえる。

これらのことより、BSCは乾燥により反応できるセメント粒子が少ないことから多量の水分が逸散しやすくなってしまい、ピーク径の量が多量に発生しやすい構造となってしまう。また、十分に養生されたBSCに比べ乾燥を受けることで極端に移動の抵抗性が低下することから極めて注意して使用する必要があると考えられる。

5. ま と め

本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) 質量変化における水分の吸水過程においては混和材の影響を受けず同程度の吸水量であった。一方で、乾燥においてはどの水セメント比においてもBSCの方がOPCに比べて多量の逸散量であった。このことより混和材を混入した場合の方が乾燥の影響を受けやすいと考えられる。
- (2) 混和材の有無に関わらず、乾燥養生では水和が阻害され、ある程度までしか水和できないことがわかった。また、混和材の有無による水和反応阻害の影響に大きな差はみられなかった。
- (3) 水銀圧入式ポロシメータによる総細孔量と細孔径分布に関してはBSCの方がOPCに比べて多くの細孔量である。細孔径分布においては水中養生においてはピーク径では同程度であったがその量に差がみられた。乾燥養生ではOPC、BSCに関わらず、またその養生湿度に関わらず、ピーク径は同程度であった。分布の形状をみみるとBSCでは幅の狭い分布を示すのに対し、OPCでは幅の広い広範囲の分布を示していることがわかった。このことがどの程度、耐久性に影響を及ぼすかを検討する必要がある。
- (4) 等温吸脱着試験においては乾燥養生においては履歴のループが閉塞しないことがわかった。これは高湿度において水和が再び起こることにより連結していた空隙が閉塞してしまい、その奥に存在していた空隙内の水分が逸散できなくなってしまったと考えられる。また、水中養生においては、履歴のループの違いからOPCに比べBSCの方が水分の移動に対する抵抗性を持っていると考察できる。

今後、気体、液体で圧入された水分がどの程度まで水和反応に影響を及ぼすかを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).

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。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1月10日受理)