

乾燥したセメント硬化体に対する水分浸透の検討

埼玉大学 学生会員○神田 真希
埼玉大学 正会員 浅本 晋吾

1. 研究背景および目的

塩害、凍結融解、アルカリ骨材反応などのコンクリート構造物の劣化は、すべて水分浸透が関連する。2017年制定コンクリート標準示方書においても水分浸透速度係数の測定方法が規定され、水分浸透の重要性が着目されている。しかし、水分浸透の根本的なメカニズムは解明されておらず、Krusらの研究¹⁾によれば、配合によって浸透速度や深さが変わることが分かっている。また、コンクリートへの水分浸透は時間の平方根に比例しないことが確認されており、Lucas-Washburn式に従う上記の示方書の係数では、精緻に予測できないといえる。また、事前の乾燥条件によって、水分が浸透するコンクリートの空隙径やそれに伴う水分浸透の速度は異なる。さらには、骨材周辺の遷移帯を持つコンクリートについては、より現象が複雑になるといえる。

したがって、本研究では、セメント硬化体への水分浸透メカニズムの検討を主眼に、事前の乾燥条件やセメント硬化体の配合を変えることで、各空隙への水分浸透について考察することとした。

2. 実験方法

セメントは早強ポルトランドセメントを用い、水セメント比は0.6として、薄い板状のセメントペーストを作製した。供試体寸法は、5×100×50mmである。養生期間を3日、7日とし、20℃、湿度60%の恒温恒湿室内にて封緘養生を行った。養生後、105℃炉乾燥、40℃で湿度60%、20℃で湿度60%の3条件で乾燥させ、24時間の質量変化が0.1%以下になるまで乾燥させた。乾燥終了後、浸漬面とその対面を除く4面についてシールした。シール後の供試体を図-1に示す。短期の水掛かりを想定し、水圧の影響を少なくするために、浸漬中は常に供試体の下部の10±1mmを水に浸し、一面浸透とした。水への浸漬期間は5、24、48、72時間とし、それぞれで質量、水分浸透深さを測定した。



図-1 シール後の供試体

短期の水掛かりを想定し、水圧の影響を少なくするために、浸漬中は常に供試体の下部の10±1mmを水に浸し、一面浸透とした。水への浸漬期間は5、24、48、72時間とし、それぞれで質量、水分浸透深さを測定した。

3. 実験結果と考察

(1) 乾燥条件に対する水分逸散の検討

各乾燥条件で液状水が存在できる最大空隙径 r_s は、熱力学平衡によって、以下の Kelvin 式で計算される。

$$r_s = -\frac{2\gamma V_m}{RT \ln h}$$

ここで、 γ : 水の表面張力 ($72.75 \times 10^{-3} \text{N/m}$) V_m : 水のモル体積 ($18.02 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{mol}$)、 R : 気体定数 ($8.3144 \text{J/mol} \cdot \text{K}$)、 T : 絶対温度 (K)、 h : 相対湿度 (%)。本実験の 20℃、湿度 60% と 40℃、湿度 60% の各乾燥条件で空隙径 r_s を計算すると、それぞれ 2.10nm と 1.97nm であり、その差はごくわずかである。

各乾燥で平衡に至ったときの質量減少率に対する水分逸散を図-2に示す。Kelvin式では液状水の存在する最大空隙径が 20℃ と 40℃ 乾燥ではほとんど変わらないが、実験では 40℃ 乾燥は 20℃ 乾燥に比べ質量減少が大きくなった。材齢とともに水和反応は進行し微細な空隙が増え、Kelvin式によって考慮できない微細なゲル空隙や結合水を含む層間空隙の内の水分逸散が影響しているものと推察される。つまり、これらの微細な空隙内の水分は、物理的のみならず、化学的な作用によっても逸散する可能性があり、それらが 40℃ という比較的高い温度で逸散するため、上記の相違をもたらしたと推察できる。

(2) 質量変化と浸透深さの検討

水分浸透が浸漬時間の平方根に比例するという Lucas-Washburn 式の適用性を検討するため、浸漬時間の平方根に

キーワード セメントペースト、乾燥、水分浸透、Lucas-Washburn 式

連絡先 〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255 埼玉大学大学院理工学研究科 TEL 048-858-3556

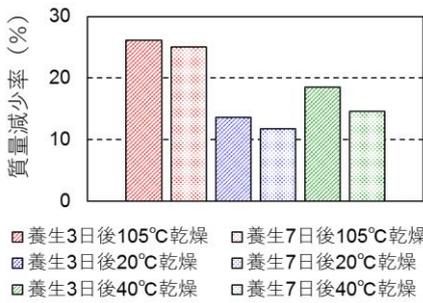


図-3 乾燥後の質量減少率

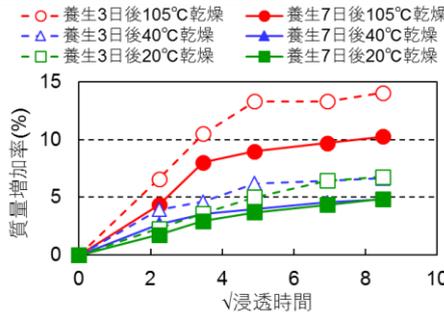


図-2 質量変化率

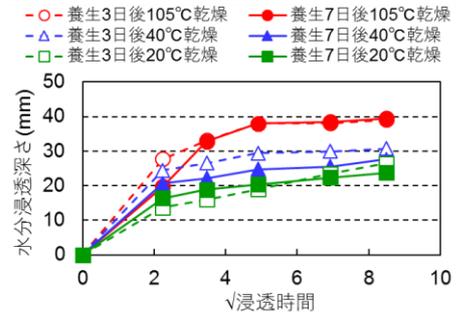


図-4 水分浸透深さ

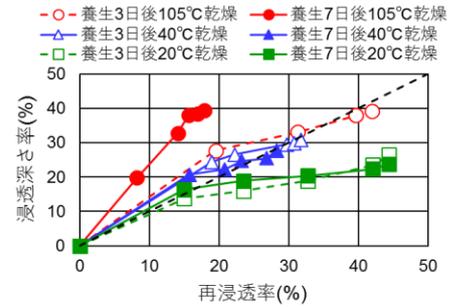


図-5 再浸透率と浸透深さ率の関係

対する各条件に対する質量変化率，浸透深さをそれぞれ図-3，図-4に示す。いずれも浸透時間の平方根には徐々に比例しなくなり，セメント硬化体への水分浸透は，時間の経過とともにLucas-Washburn式に従わないことが分かる。浸透初期は，比較的大きな毛細管空隙などに水分がまずは浸透するため，毛細管張力に基づく単純なLucas-Washburn式に従うが，その後，ゲル空隙などナノメートルスケールの微細空隙に化学的な吸着などを伴いながら徐々に浸透していくため，水分浸透が停滞すると考えられる。図-3より全ての乾燥条件において養生3日の供試体は養生7日に比べ，水分浸透による質量増加が大きくなった。これは養生期間が長いほど水和反応が進行し，空隙構造が緻密になり，水分が浸透できる空隙が減少したためと考えられる。図-4によれば，最大水分浸透深さは105°C乾燥では養生期間によって変わらず，20°Cと40°Cの乾燥と比較すると，養生7日に比べ養生3日の供試体の方が大きくなった。すべての空隙の液状水が逸散する105°C乾燥では，様々な径の空隙が不飽和の状態につながっており，毛細管空隙など比較的大きな空隙を選択的に水分が浸透していくため，水和による空隙緻密化の影響を受けなかったと考えられる。一方で，20°Cや40°C乾燥では，一部の空隙に液状水が残存しており，水分浸透に支配的な毛細管空隙にこれらの微細空隙が連結していることで，水分浸透を妨げ，微細な空隙の多い養生7日の方が水分の浸透が抑制されたと推察される。40°C乾燥で浸透深さが大きくなった理由は，上述のように，20°Cに比べ微細な空隙内の水分が逸散するため，不飽和の空隙の連結性が増え，毛細管空隙を中心とした不飽和空隙に水分が浸透しやすくなったためと考えられる。

(3)再浸透率と浸透深さの関係性

乾燥時後の質量減少量に対する浸漬時の質量増加量を再浸透率とし，再浸透率と浸透深さ率の関係性を図-5に示す。再浸透率と浸透深さが一致するという事は，水分が浸透した高さまで乾燥した空隙すべてに水が飽和したということになる。図-5より7日養生後105°C乾燥を除くと，105°Cと40°C乾燥において，浸漬初期では浸透深さ率が大きくなり最終値では浸透深さ率と再浸透率が一致した。これは，初期は比較的大きな連結した不飽和空隙に水分が浸透し，すべての空隙に浸透しなくても，水分の浸透高さは上昇し，その後，微細空隙に徐々に浸透し，浸透深さがさほど上昇しなくても質量が上昇するためと考えられる。20°C乾燥では浸透深さに対して再浸透率が大きくなった。これは，封緘養生であったために，水和によって乾燥前でも不飽和な空隙が存在し，これらの空隙に水分が浸透したために再浸透率が大きくなったと考えられる。

4. 結論

- (1)20°C，湿度60%に比べ，40°C，湿度60%の乾燥条件の方が水分逸散量は多く，40°Cでは，Kelvin式で考慮されない微細な空隙中の水分が逸散する可能性がある。
- (2)105°C炉乾燥を施した供試体においてはすべての空隙内の水分が逸散するために，養生期間の差による空隙の緻密化が浸透深さには影響しないことが分かった。
- (3)微細な空隙内の水分が逸散しない20°C乾燥の供試体では，105°C，40°C乾燥に比べ水分の浸透深さが低くなった。

参考文献

1)M. Krus, K. K. Hansen, H. M. Künzel: Porosity and liquid absorption of cement paste, Materials and Structures, 1997