

異なる条件で乾燥したセメント硬化体内の有機溶媒および液状水浸透に関する研究

埼玉大学 学生会員 ○志連 凌太
埼玉大学 正会員 浅本 晋吾

1. 研究背景および目的

近年、鉄筋コンクリート構造物の劣化が全国的に大きな問題となっている。その主な劣化要因として、アルカリ骨材反応や塩害などが挙げられるが、これらはコンクリートへの水分浸透と深く関係している。2017年制定コンクリート標準示方書（設計編）¹⁾では、水分浸透速度係数が規定され、水分浸透速度係数を算出するための試験方法が制定されるなど、水分浸透への関心は高まってきている。この試験方法は、以下の Lucas-Washburn の液体浸透理論に基づいている。しかし、実際の水分浸透において、浸透初期では Washburn の式に従い、浸透深さと浸透時間の平方根に線形関係が見られるものの、時間の経過と共に次第に非線形関係が知られており（例えば²⁾）、この理由についての統一的な理論はないのが現状である。

そこで、本研究ではコンクリートに対する水分浸透の基本メカニズムを解明するために、異なる乾燥を施したセメントペーストに対しての液状水および有機溶媒の浸透について検討した。

2. 本研究で用いた空隙の定義

本研究では、セメントペースト内の空隙構造として、以下に仮定する毛細管空隙、微細空隙およびインクボトル空隙の観点から、各浸透試験の結果の考察を行った。毛細管空隙：毛管力により浸透し、円筒形状と仮定したときに半径 $3(\text{nm}) \sim 30(\mu\text{m})$ ほどの大きさの空隙、微細空隙：化学的な吸着などを伴いながら浸透し、ゲル空隙などが分類される毛細管空隙よりも微小なナノメートルスケールの空隙、インクボトル空隙：出入口に微細空隙に相当する径を有し、内部が出入口よりも大きい径を有している空隙で、出入口である微細空隙が乾燥しない限り内部の液状水が存在。

3. 実験方法

早強ポルトランドセメントを用い、 $5 \times 100 \times 50(\text{mm})$ の薄い板状のセメントペースト供試体を、 $W/C=0.6, 0.3$ の2種類作製した。打設後、1日で脱型し、 $20^\circ\text{C}60\%$ の恒温恒湿室内で7日間水中養生した。その後、 20°C 湿度 60% と 40°C 湿度 60% の恒温恒湿乾燥、 105°C 炉乾燥の3条件でそれぞれ24時間での質量変化率が 0.1% 以下になるまで乾燥を行い、乾燥終了後、浸漬面とその対面を除く4面をエポキシ樹脂でコーティングした（図1）。

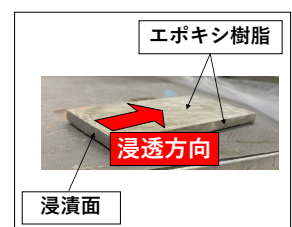


図1 供試体

その後、水、ヘキサン、ジエチルエーテルにそれぞれ浸漬させた。浸漬中は、常に供試体下部が $10 \pm 1(\text{mm})$ 各液体に浸るようにした。1ヶ月間浸漬させ、それぞれの計測期間で各液体の浸透深さおよび質量を計測した。

4. 実験結果および考察

(1) 105°C 乾燥における水および有機溶媒の浸透深さの比較

105°C 乾燥における各液体の浸透深さの経時変化（ $W/C=0.6, 0.3$ ）を図2に示す。図2より、有機溶媒の浸透に着目するといずれの水セメント比でも浸透深さと浸透時間の平方根の間に線形関係が見られる。既往の研究²⁾でも報告されているように有機溶媒は主に比較的大きな毛細管空隙に浸透し、Lucas-Washburn 式に従ったと考えられる。次に、水の浸透に着目すると、いずれの水セメント比も計測開始から12時間（ $\approx 3.46 \sqrt{\text{時間}}$ ）までは有機溶媒と同様に線形関係が見られるが、時間の経過と共に次第に非線形関係になった。浸透初期では比較的大きな毛細管空隙に液状水が浸透するため、Lucas-Washburn 式に従うが、その後、化学的な吸着などを伴いながら徐々に微細空隙に浸透し、インクボトル空隙の出入口の微細空隙にも徐々に浸透してから連結する不飽和の毛細管空隙に浸透するため、水の浸透が停滞したと考えられる。

キーワード セメントペースト、水分浸透、Lucas-Washburn 式、毛細管空隙、インクボトル空隙

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 048-858-3739

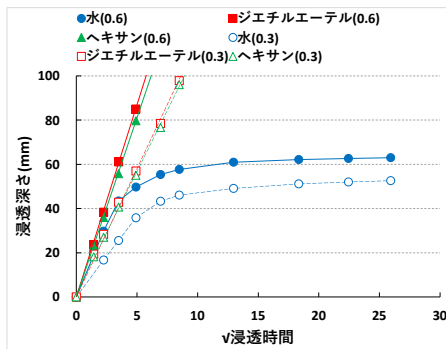


図2 各液体の浸透深さと浸透時間の平方根の関係

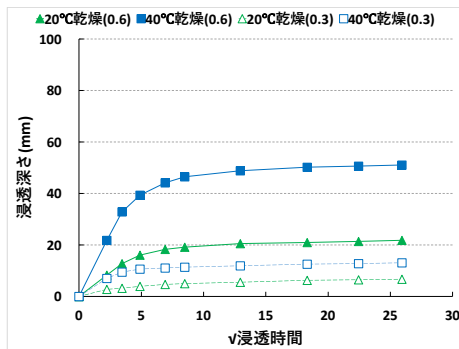


図3 水の浸透深さと浸透時間の平方根の関係

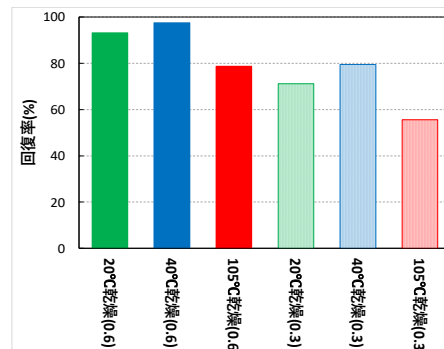


図4 ヘキサンの回復率

(2) 20°C乾燥および40°C乾燥における液状水浸透の検討

20°C乾燥および40°C乾燥後に、水の浸透深さの経時変化 ($W/C=0.6, 0.3$) を図3に示す。図3より、 $W/C=0.6$ ではいずれの乾燥条件でも105°C乾燥と同様に計測開始から12時間 ($\approx 3.46 \sqrt{\text{時間}}$) までは線形関係が見られたが、 $W/C=0.3$ では線形関係が見られなかった。105°C乾燥に対して、40°C乾燥および20°C乾燥は熱力学に安定であるため微細空隙内に液状水が残存し、この残存した液状水が不飽和の毛細管空隙の連結性を低下させ、毛細管空隙への液状水浸透を阻害すると考えられる。 $W/C=0.6$ では毛細管空隙の割合が大きいため、連結性が一部保たれ、105°C乾燥と同様に浸透初期に線形関係が見られたと考えられる。一方、 $W/C=0.3$ では $W/C=0.6$ に比べ毛細管空隙の割合が小さく、微細空隙の割合が大きいため、不飽和の毛細管空隙の連結性低下させたため、線形関係が見られなかったと考えた。

また、Kelvin 式より各乾燥の平衡状態で液状水が存在できる最大空隙半径を算出すると、40°C乾燥と20°C乾燥ではそれぞれ2.11(nm)と1.97(mm)となり、両者にあまり差がないことが分かる。しかし、図3における水の浸透は、20°C乾燥に比べ、40°C乾燥の方が水の浸透が早く、深さも大きくなっている。20°C乾燥では熱力学的にインクボトル内の水分が安定するのに対し、既往の研究³⁾で指摘されているように、40°C乾燥では不安定となり、僅かに微細空隙が乾燥することでインクボトル空隙内部の乾燥が起こる可能性がある。40°Cでインクボトル空隙が乾燥することで、空隙の連結性が増し、20°C乾燥よりも水分の浸透性が高まったと推察される。

(3) ヘキサンの浸透における回復率の検討

質量変化が一定になった平衡時のヘキサンの質量増加量より乾燥時の水分逸散に対する回復率を算出し、その結果を図4に示す。図4より、いずれの乾燥条件でも $W/C=0.3$ に比べ、 $W/C=0.6$ の回復率が大きくなっており、ヘキサンは毛細管空隙の多い高水セメント比セメントペーストに多く浸透していることが分かる。

また、40°C乾燥および20°C乾燥では主に毛細管空隙のみで乾燥が生じ、そこにはヘキサンが浸透するため、105°C乾燥よりも回復率が大きくなったと考えられる。一部のインクボトル空隙内部の水分が逸散すると推察される40°C乾燥では、その乾燥した内部空隙にヘキサンが浸透するため、20°C乾燥よりも回復率が大きくなったと考えた。

5. 結論

- (1) 毛細管空隙における各液体の浸透は Lucas-Washburn 式に従い、有機溶媒は主に毛細管空隙に浸透していることが分かった。
- (2) 実環境下で想定される40°C乾燥および20°C乾燥では、インクボトル空隙の乾燥の有無によって浸透深さに差が生まれ、この空隙の影響を正しく把握することが水分浸透のメカニズムの解明に繋がると期待される。

謝辞

本研究は、土木学会インフラマネジメント技術国際展開研究助成を受けて実施した。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】，土木学会，2018
- 2) M.Krus, K.Hansen, H.M.Kunzel：Porosity and liquid absorption of cement paste, Materials and Structures, 1997
- 3) 石田哲也ら：温湿度履歴に関するセメント硬化体中の水分平衡・移動モデルの高度化，土木学会論文集，No.795/V-68, pp.39-54, 2005