

液体浸漬によるセメント系材料の強度メカニズム

中央大学 学生会員 ○前田 春実

中央大学 正会員 大下 英吉

1. はじめに

セメント系材料の強度は水分含有量の影響を受けており、その値が表面張力の大きさに依存することはよく知られている。しかしながら、固体の強度における液体の表面張力の作用メカニズムは未だ明らかになっていない。そこで本研究では、乾湿および表面張力が異なる液体やその含水率がセメント系材料の各種強度低下に及ぼすメカニズムを、ミクロ的な観点から解明することを目的とする。具体的には、セメント系材料の骨格の強度特性に、荷重の作用によって細孔構造内部に生じる間隙水圧が及ぼす影響をミクロレベルで評価する。さらに、そのモデルに液状水流れに間隙水圧と表面張力とのバランスで生じる発泡現象を導入することによるものである。

2. 水・コンクリート骨格連成解析手法

コンクリートのような多孔質材料の変形および透水に関する支配方程式は、力の釣り合い式と間隙水の質量保存則を同時に満足しなければならない。著者らは、多孔質材料が荷重の载荷によって均質から不均質に至る状態に対しても変形および透水特性を評価可能とする、水・コンクリート骨格連成解析手法を提案した¹⁾。

本研究では、コンクリート一軸圧縮状態に対して本手法を適用した。乾燥状態および飽和状態のコンクリートに発生する応力は、弾性状態まではほぼ両者に差異はないが、塑性状態になると徐々に乾燥時のほうが湿潤時よりも大きくなる。一方、間隙水圧は飽和状態では塑性状態において塑性体積膨張により負の水圧増分が生じるため低下していく。その後、ひび割れの進展ならびにひび割れ幅の増加によって透水係数が大きくなるため、間隙水圧は急激に低下し、負圧を生じた後はほぼ一定値となる。応力特性を間隙水圧挙動に関連付けて考えると、間隙水圧が分担していた正圧が微細ひび割れによって解放され、急激に骨格に伝達することによって骨格の圧縮応力が増加し、ひび割れが進展することにより応力が低下する。荷重の増加とともに

に徐々に現象が進行し、間隙水圧が負圧となるため最大応力となった後に破壊に至る。

3. 細孔空隙内においてキャビテーション現象を導入した固体強度の評価

一般に、液体の圧力が飽和蒸気圧以下になると沸騰現象により液体が蒸発するため、空気や粒子を核としたキャビテーションと呼ばれる気泡が発生する²⁾。気泡内の圧力は Young-Laplace 方程式により求められる。気泡内圧力は周囲の液体圧力よりも大きく、その差は液体の表面張力および気泡半径に依存する。発生した気泡は、最終的に液体の移動により固体の壁面にぶつかり、あるいは付着し、周囲の液体が気泡を崩壊する。その際に発生する衝撃力により固体壁面に壊食が生じ、疲労破壊やエネルギー損失などが起こる。

セメント系材料の場合、細孔壁面の凹凸度は大きく緻密であるため核となる空気、塵や未反応のセメントのような微粒子などが存在する。そのため、飽和蒸気圧を下回る液体圧力が作用する環境下であれば、キャビテーション現象が容易に発生すると考えられる。気泡の体積運動と壊食挙動を説明する Rayleigh-Plesset 式を式(1)に、気泡内圧力 p_G の式を式(2)に示す。

$$r_G \frac{\partial^2 r_G}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial r_G}{\partial t} \right)^2 = \frac{p_G - p_L}{\rho_L} + \frac{1}{4} (v_{Li} - v_{Gi}) (v_{Li} - v_{Gi}) \quad (1)$$

$$p_G = p_B + p_v - \frac{2\gamma}{r_G} - 4\mu \frac{1}{r_G} \frac{\partial r_G}{\partial t} \quad (2)$$

ここで、 r_G は気泡半径、 p_L は液体圧力、 v_L および v_G はそれぞれ気泡と液体の速度、 ρ_L は液体の密度、 t は時間、 i は方向を表わす。 p_B は気泡内の不凝縮ガスの圧力であり、 p_v は飽和蒸気圧、 μ は粘性係数を表わす。

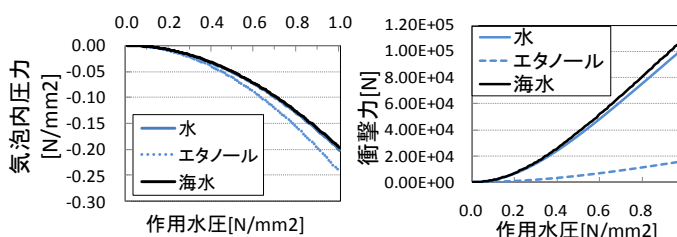


図-1 気泡内圧力

図-2 衝撃力

キーワード 表面張力 キャビテーション 衝撃力

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学 理工学部 都市環境学科 TEL 03-3817-1892

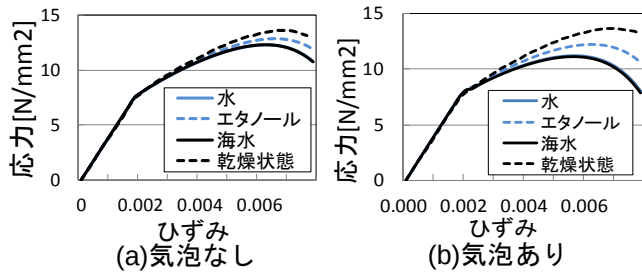


図-3 応力-ひずみ関係

また、気泡が崩壊する際に発生する衝撃力は、Newtonの慣性則により表わされた式(3)と Newton の抵抗則により表わされた式(4)の和から求められる。

$$F_1 = \frac{4}{3} \pi r_{G0}^3 \rho_l \frac{\partial^2 r_G}{\partial t^2} \quad (3)$$

$$F_2 = 4 \pi r_{G0}^2 \rho_l \left(\frac{\partial r_G}{\partial t} \right)^2 \quad (4)$$

本研究ではモルタル内部の空隙に水、エタノール、および海水が飽和されているものと仮定し、モルタルの強度に及ぼす液体の影響を間隙水圧と気泡圧に関連付けて議論することとする。各液体の表面張力はそれぞれ 72[dyn/cm], 22.5[dyn/cm], 75.5[dyn/cm]とする。

各液体の気泡内圧力は、表面張力が大きい液体ほど大きくなるのが図-1より確認される。また、図-2に示す通り気泡崩壊時の衝撃力は表面張力が大きい液体ほどその値は大きい。すなわち、固体と液体の二相多孔質材料において、液体の表面張力が大きいほど固体壁面へ作用する力が大きいと考えられる。

図-3で示す応力とひずみの関係より、2章で述べたとおり乾燥状態よりも湿潤状態の方が塑性領域における応力は小さく、さらに表面張力が大きい液体ほどその値は小さくなっている。また、気泡の有無で比較すると気泡が存在する方が応力の最大値が小さい。一方、図-4で示す間隙水圧とひずみの関係より、乾燥状態では間隙水圧は発生しないが、湿潤状態においては表面張力が大きい液体ほど大きくなっていることがわかる。気泡の有無で比較すると、間隙水圧の最大値を過ぎてから気泡が存在する状態において急激に低下を生じていることから、モルタルが塑性状態となった直後に液体中の気泡が間隙水圧の値を減少させるということである。さらに、図-5は圧縮強度比と液体の表面張力の関係を示している。圧縮強度比は、乾燥したモルタルの強度によって正規化された液体浸漬したモルタルの強度として定義している。同図より、液体浸漬によってモルタルの圧縮強度比が減少していることは

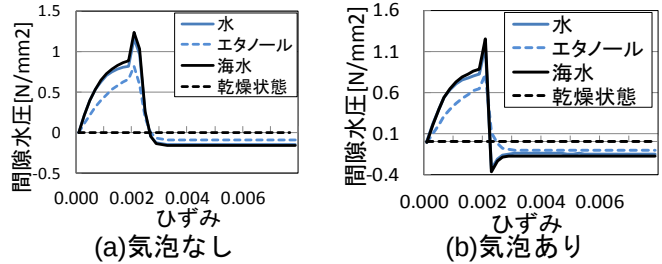


図-4 間隙水圧-ひずみ関係

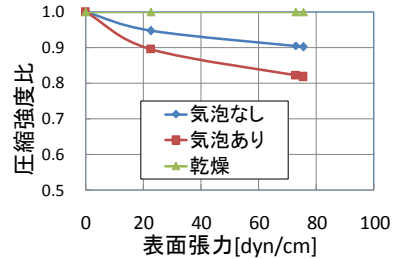


図-5 圧縮強度比

明らかである。また、気泡が存在する液体の圧縮強度がさらに減少していることから、気泡の存在もまた圧縮強度を減少させる要因であるといえる。ここで、気泡の有無による圧縮強度比の差に注目すると、液体の表面張力が大きいほどその差は大きくなり、圧縮強度は液体の表面張力の増加に伴い減少するといえる。すなわち、気泡の内部と外部の圧力差が大きいほど圧縮強度は小さくなるということである。

以上から、二相多孔質材料の細孔内を満たす液体中に気泡が存在する際、材料の圧縮強度を低下させる力が発生しており、その力が気泡崩壊時に発生する衝撃力であると考えられる。すなわち、固体壁面近傍で発生し作用する衝撃力の値は、液体の表面張力が大きいほど大きくなり、表面張力の増加に伴う圧縮強度の低下および間隙水圧の減少を説明することができる。

4. まとめ

- (1) 液体浸漬したセメント系材料の細孔内で液体圧力が低下する際、キャビテーションが発生しやすく、気泡が崩壊する際には衝撃を伴う。
- (2) キャビテーションの気泡内圧力および衝撃力の増加は液体の表面張力の増加に依存する。
- (3) セメント系材料内の液体に気泡が存在する際、間隙水圧および圧縮強度は液体のみの場合と比較して小さい。

【参考文献】

- 1) Oshita, H. and Tanabe, T.: Creep Mechanism of Early Age Concrete Modelling with Two Phase Porous Material, Creep and Shrinkage of Concrete, RILEM, pp.465-470 (1993).
- 2) 加藤洋治: キャビテーション, 槇書店 (1990)