

論文 液体浸漬によるセメント系材料の強度低下メカニズム

前田 春実*1・大槻 浩平*2・大下 英吉*3

要旨: セメント系材料の静的および動的強度は水分含有量の影響を受けており、加えてその値は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。本研究では、セメント系材料を固体と液体の二相多孔質材料であると仮定して構築した解析モデルに、キャビテーション現象を組み込んだ新しいモデルの構築を目的とする。また、数種類の液体について解析を行い、固相壁面の気泡の壊食作用の影響を推定および比較することによって、表面張力の作用メカニズムを明らかにする。

キーワード: 二相材料, 表面張力, キャビテーション, 衝撃力

1. はじめに

セメント系材料の圧縮、引張および曲げ強度などの静的または動的強度は含水状態で大きく異なり、それら各種強度は含水率の増加に伴って放物線的に低下することが、既往の研究において数多く報告されている^{1)~4)}。Benedicks³⁾、堀⁵⁾は、水分を含むセメント系材料においては、液体の存在によって固相の表面エネルギーが液相の表面エネルギーだけ低下し、マイクロクラックが進展しやすくなることで強度低下が生じると指摘している。すなわち、各強度は液体の種類によって異なり、セメント系材料の強度低下は液体の表面張力の増加に伴って生じることを示している³⁾⁵⁾⁷⁾⁸⁾。しかしながら、固液界面エネルギーは単に強度特性を指標で表したに過ぎず、そのメカニズムについては未だ説明されていない。

一方、著者らの既往の研究⁶⁾においては水の移動が力学的特性に大きく影響を及ぼしていることを指摘した。荷重の載荷によって、弾性域では正の間隙水圧が分離圧として骨格に作用することによりマイクロクラックを発生させ、塑性域では体積膨張によって生じる正の間隙水圧が徐々に低下し、最終的に負圧となることによって最大応力となった後に破壊に至ると指摘した。

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。気泡内の圧力は Young-Laplace 方程式により値が求められ、気泡内の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。すなわち、気泡内の圧力は気泡半径の減少、あるいは表面張力の増加に伴い大きくなるといえる。一方、液体の蒸発が気泡方向に向かって緩やかに発生する場合は、気泡内の圧力は半径の増加に伴い小さくなる。最終的には、発生した気泡は

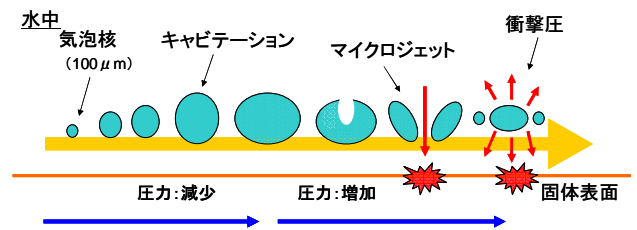


図-1 キャビテーションと壊食現象

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こととなる。その際の衝撃波の発生によって、固体壁面に壊食と呼ばれるマイクロクラックが生じる。(図1)

気泡の崩壊によって衝撃力を受ける固体壁面は、疲労破壊やエネルギー損失などを生じる。このようなキャビテーション現象の影響を受ける構造物として、具体的にはポンプや羽根車などの流体機械が挙げられる。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。

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説明することを目的とする。具体的には、まず筆者らが構築した荷重の作用によって細孔構造内部に生じる間隙水圧が、セメント系材料の骨格の強度特性に及ぼす影響をミクロレベルで評価する。そして、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って、強度に及ぼす発泡現象と壊食現象の影響を評価する。

*1 中央大学 理工学部都市環境学科 (学生会員)
 *2 中央大学 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)
 *3 中央大学 理工学部都市環境学科教授 工博 (正会員)

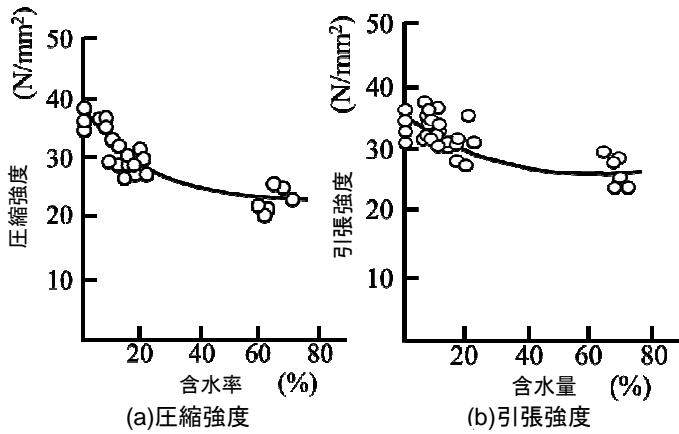


図-2 含水率²⁾

2. 既往の研究

2.1 固体強度に及ぼす液体の影響

コンクリートの水分状態が各種強度に及ぼす効果に関する代表的な研究²⁾で得られた結果を図-2に示す。圧縮および引張強度は、含水率の増加に伴い緩やかに減少しており、乾燥時の強度が最も大きくなっている。岡島ら²⁾は、式(1)に示すように Griffith の式に蒸気の吸着による固体の表面エネルギーの減少を考慮する項を導入することによって、強度の含水率依存性を表わした。

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{2E(\gamma_s - \Delta\gamma)}{\pi C}} \quad (1)$$

ここで、 σ_t は引張強度、 E はヤング係数、 C はクラック半長、 γ_s は固相表面エネルギーであり、 $\Delta\gamma$ は、Gibbs 式として示される相対湿度関数である固相と液相間の界面エネルギーを表す。

しかしながら、このモデルはひび割れ先端の応力集中やマイクロクラックを表現したものではないため、実験値との一致を示してはいない。

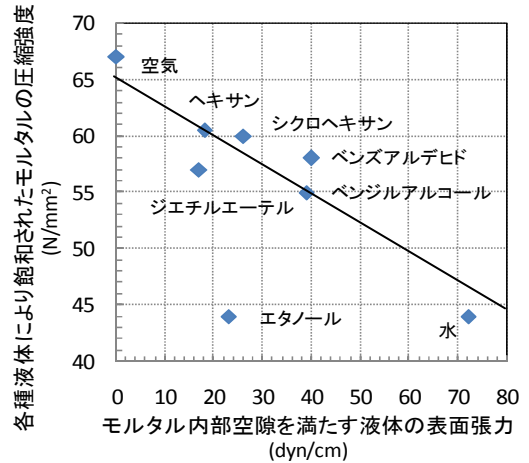
2.2 固体強度に及ぼす表面張力の影響

表面張力の異なる各種液体によって内部空隙が完全に飽和されたモルタルの各種強度特性に関する代表的な研究で得られた結果⁵⁾を図-3に示す。

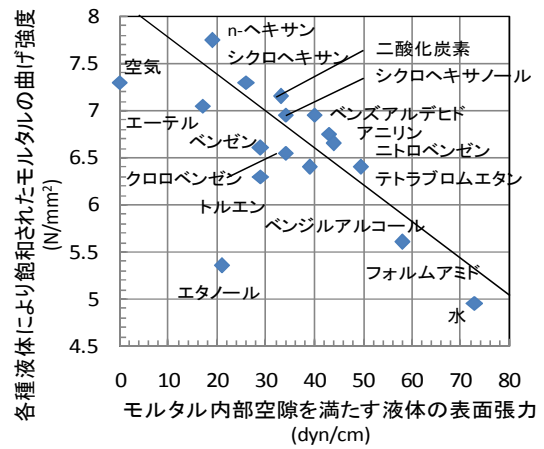
エタノールを除いて、液体の表面張力が大きいほど各強度は線形的に減少している。このような液体の表面張力に依存する強度特性は、液相の表面エネルギーの分だけ固相の表面エネルギーが減少し、マイクロクラックが進展しやすくなることによってしている⁵⁾。すなわち、強度は式(2)に示すように、固体と液体の界面エネルギーに比例すると考えられている²⁾。

$$\gamma_{sl} = \gamma_s - \gamma_l \rightarrow \sigma_t \propto \gamma_s - \gamma_l \quad (2)$$

ここで、 γ_{sl} 、 γ_l はそれぞれ固液相界面エネルギー、液相表面エネルギーを表す。しかし、松下ら⁸⁾は強度挙動の液体の表面張力の影響がモルタルおよびコンクリー



(a) 圧縮強度



(b) 曲げ強度

図-3 液体の表面張力の影響⁵⁾

ト材料の水セメント比(W/C)、空隙構造によって異なり、水セメント比の増加に伴って表面張力の影響が大きくなることを指摘した。すなわち、強度は液体の表面張力に大きく依存するが、固液相界面エネルギーには直接的には依存するとは言えないということを示唆している。したがって、モルタルやコンクリート材料などの多孔質材料の強度特性が液体の表面張力による影響を受けることに疑いはないが、ひび割れの発生および進展や破壊にどのように関与するのかは未解明なままである。

3. 水・コンクリート骨格連成的解析手法⁶⁾

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荷重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ている。本章では本手法の概要を示したうえでモルタル一軸圧縮状態に対して本手法を適用し、その特徴を述べることにする。

本手法において、コンクリートは骨材、セメントペー

スト、水から成る多孔質材料として扱う。なお、セメントペーストが弾塑性かつ透過性を持つ材料と想定されているとき、骨材は完全弾性材料とみなしている。

まず平衡方程式の定式化を行う。間隙水圧 p 存在下で、有効応力と全応力との関係は次のようになる。ここで、引張強度の符号は正であり、 $\{m\} = \{111000\}^T$ である。

$$\{\sigma\} = \{\sigma'\} - \{m\}p \quad (3)$$

また、コンクリートの増分有効応力-ひずみ関係は式(4)のように表す。

$$d\{\sigma'\} = [D_s^{ep}] \left(d\{\varepsilon^t\} - d\{\varepsilon^{pr}\} - d\{\varepsilon^h\} - d\{\varepsilon^{cr}\} \right) \quad (4)$$

ここで、 $[D_s^{ep}]$ は空隙が水で飽和されていない弾塑性マトリックスであり、 $d\{\varepsilon^{pr}\}$ は間隙水圧増分 $d\{p\}$ から生じる応力増分である。コンクリートの弾塑性剛性は、以下のように固相の平均弾塑性剛性マトリックス $[D_s^{ep}]$ と空隙率 ξ で表わすことができる。

$$[D_T^{ep}] = (1 - \xi)[D_s^{ep}] \quad (5)$$

$$d\{\varepsilon^{pr}\} = -D[D_s^{ep}]^{-1}\{m\}dp \quad (6)$$

次に、仮想仕事の原理および形状関数を用いることによって、平衡微分方程式は式(7)のように書ける。

$$K_T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - L \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} - \frac{d\{\bar{f}\}}{dt} = 0 \quad (7)$$

ここで、行列 K_T は接線剛性、 L は間隙水圧と固相の体積変化の効果である。また、ベクトル $\{f\}$ は変位に外力の影響を表わしている。

$$K_T = (1 - \xi) \int_{\Omega} B^T D_s^{ep} B d\Omega, \quad L = \xi \int_{\Omega} B^T \{m\} \bar{N} d\Omega$$

$$\{\bar{f}\} = \int_{\Omega} N^T \{b\} d\Omega + \int_{\Gamma} N^T \{t\} d\Gamma \quad (8)$$

また、 N および \bar{N} は、それぞれ変位、間隙水圧の形状関数であり、 B は変位-ひずみマトリックスである。

次に、流量連続方程式の定式化である。水頭 h は次式のようにかける。

$$h = z + \frac{p}{\gamma} \quad (9)$$

z は上方向に対して正である点の垂直座標であり、 γ は流体の比重である。質量保存の法則から、単位体積の体積変化 ΔV は、その体積からの流入量 q と流出量の差に等しく、これは次式のように書ける。

$$\Delta V = q - \nabla^T \{v\} \quad (10)$$

v はダルシーの法則によって考えられている流速である。体積変化に寄与する要因は以下のようにまとめることができる。

全ひずみ変化に起因する
静水圧の変化によって引き起こされた粒子の体積の変化に起因する

流体量の変化に起因する

効果的なストレスによって粒径の変化による

これらの要因を式(10)に代入しガラーキン法を適用すると、以下ようになる。

$$H\{\bar{p}\} + S \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} + L^T \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} - \{f_p\} = 0 \quad (11)$$

$$H = \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T k \nabla \bar{N} d\Omega \quad (12)$$

$$S = \int_{\Omega} \bar{N}^T s \bar{N} d\Omega \quad (13)$$

$$L^T = \int_{\Omega} \bar{N}^T \{m\}^T B d\Omega \quad (14)$$

$$\{f_p\} = \int_{\Omega} \bar{N}^T q d\Omega - \int_{\Omega} (\nabla \bar{N})^T k \nabla \gamma z d\Omega \quad (15)$$

$$s = \frac{\xi}{k_f}, \quad k' = \frac{k}{\gamma}$$

次に連立方程式の定式化を行う。力の平衡と連続条件を満たす結合方程式は次の行列形式で記述することができる。

$$\begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & -[H] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_T] & -[L] \\ -[L]^T & -[S] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} \\ \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{d\{f\}}{dt} \\ -\{f_p\} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

式(16)において、初期条件が既知ならば変位と間隙水圧の両方について解くことができる。また、式(16)は次のような形式に変換することができる。

$$\begin{bmatrix} [K_T] & -[L] \\ -[L]^T & -\Delta t[H] - [S] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta \bar{u}\} \\ \{\Delta \bar{p}\} \end{Bmatrix} = \Delta t \left[\begin{Bmatrix} \frac{d\{f\}}{dt} \\ -\{f_p\} \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & -[H] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\Delta \bar{u}\}_i \\ \{\Delta \bar{p}\}_i \end{Bmatrix} \right] \quad (17)$$

$\{\Delta \bar{u}\}$ 、 $\{\Delta \bar{p}\}$ は節点変位と前のステップにおける節点間隙水圧である。しかしながら、分析では間隙水圧による固体の非圧縮性、気孔率 ξ を想定しており、固相のひずみ増分、増分気孔から生じた上記の式では無視される。

以上のように構築した本手法を用いて、湿潤状態および乾状態のモルタルについて一軸圧縮状態において行った解析の結果を図-4に示し、比較を行う。図-4(a)および(b)は、それぞれモルタルの応力とひずみの関係および間隙水圧とひずみの関係を示している。同図(a)はモルタル表面への作用応力であり、同図(b)は空隙内の間隙水圧を示している。両図とも実線は湿潤状態のモルタル、破線は乾燥状態のモルタルに対応している。

同図(a)に示すように、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り、ほ

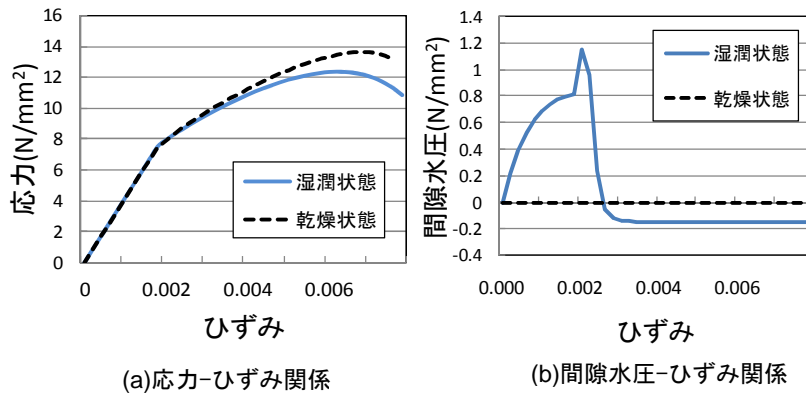


図-4 解析結果

ほぼ同じひずみにおいて応力が最大となる。一方、同図(b)に示す間隙水圧は、乾燥状態では当然ながら発生しないが、湿潤状態では荷重の作用により正の水圧が生じ、塑性状態に達すると塑性体積膨張により負の水圧増分が生じることによって徐々に低下していく。そして、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ことによって急激に低下し、負圧を生じた後にほぼ一定値となる。

応力特性を間隙水圧挙動に関連付けて考えてみると、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、それが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。その現象が荷重の増加とともに徐々に進行し、間隙水圧が負圧となることによって最大応力となった後に破壊に至るものである。

4. 細孔空隙内におけるキャビテーション現象

4.1 キャビテーションモデル

キャビテーション壊食を推定する解析手法は、主として界面追跡、捕獲モデルおよび気泡流法がある。前者は1つあるいは数個程度の気泡を対象に気泡の相変化を考慮した液体と蒸気の界面を追跡、捕獲する気泡流の推定である。後者は均質流モデルと呼ばれる1密度と1速度を考慮した1流モデルあるいは気泡流モデルと呼ばれる2密度と2速度と構成方程式を考慮した2流モデルによって、気泡を含む液体の流れを推定する。本研究においては後者を用いることとした。このモデルは、Rayleigh-Plesset式、気泡の核密度数分布保存則、および気泡流の運動保存則などの気泡の運動方程式を満たす連成手法であり、本研究においてセメント系材料のマイクロ多細細孔内の液体流れに適用される。

気泡の体積運動と壊食挙動を説明する Rayleigh-Plesset 式を式(18)に示す。

表-1 各種液体の物性値

	エタノール	水	海水
蒸気圧 [N/mm ²]	6.0E-03	2.0E-03	2.0E-03
表面張力 [dyn/cm]	22.5	72	75.5
密度 [kg/mm ³]	8.0E-07	1.0E-06	1.0E-06
体積弾性係数 [GPa]	0.97	2.19	2.1

$$r_G \frac{\partial^2 r_G}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial r_G}{\partial t} \right)^2 = \frac{p_G - p_L}{\rho_L} + \frac{1}{4} (v_{Li} - v_{Gi})(v_{Li} - v_{Gi}) \quad (18)$$

ここで、 r_G は気泡半径、 v_{Li} 、 v_{Gi} はそれぞれ気泡と液体の速度を、 p_L は液体圧力を、 ρ_L は液体の密度を、 t は時間、 i は方向を表わす。気泡内圧力 p_G は、式(19)のように表すことができる。

$$p_G = p_B + p_v - \frac{2\gamma}{r_G} - 4\mu \frac{1}{r_G} \frac{\partial r_G}{\partial t} \quad (19)$$

ここで、 p_B は気泡内の不凝縮ガスであり、 p_v は飽和蒸気圧、 μ は粘性係数、 γ は表面張力を表わす。

ボイド率 f_G は気泡を球形とみなすことにより、式(20)で表わされる。

$$f_G = \frac{4}{3} \pi r_G^3 n_G \quad (20)$$

ここで、 n_G は気泡核密度数を表わす。

気泡を含む液体の密度 ρ は、気泡の密度を 0 とみなすことにより式(21)のように表わされる。

$$\rho = (1 - f_G) \rho_L \quad (21)$$

また、粘性係数は式(22)のように表わすことができる。

$$\mu = (1 - f_G) \mu_L + f_G \mu_G \quad (22)$$

ここで μ_G 、 μ_L はそれぞれ液体および気体の粘性係数を表わす。

気泡が固体壁面で崩壊する際に発生する衝撃力は、式(23)から求められる。

$$F_1 = \frac{4}{3} \pi r_{G0}^3 \rho_l \frac{\partial^2 r_G}{\partial t^2} \quad (23)$$

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

ここで、 F_1 はNewtonの慣性法則より、圧力低下によって発生する気泡が液体を押しつける力が衝撃力に保存していることから導かれる。一方、 F_2 はNewtonの粘性抵抗より、気泡が受ける抵抗速度の2乗に比例すること

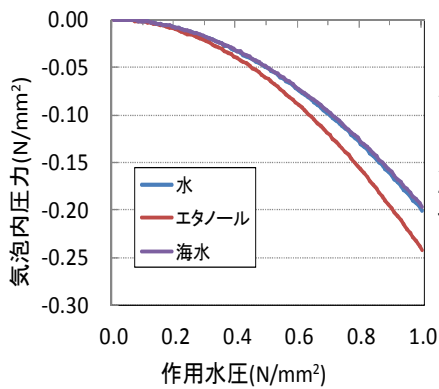
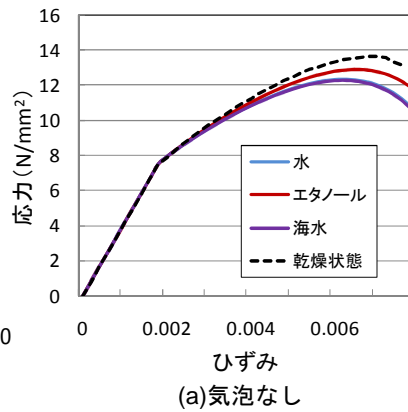
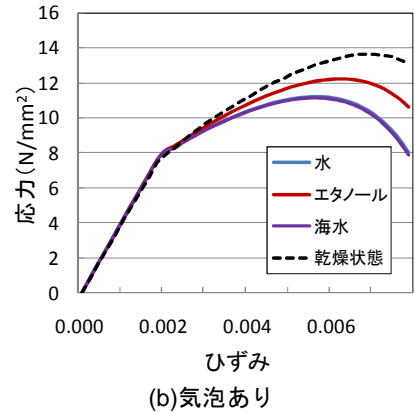


図-4 気泡内圧力



(a)気泡なし



(b)気泡あり

図-6 応力-ひずみ関係

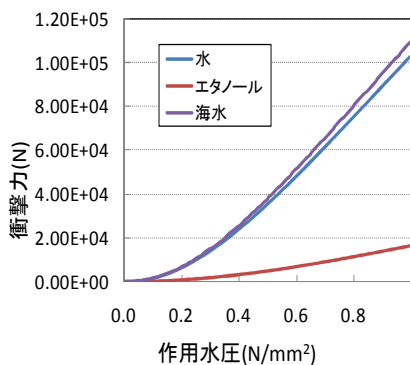
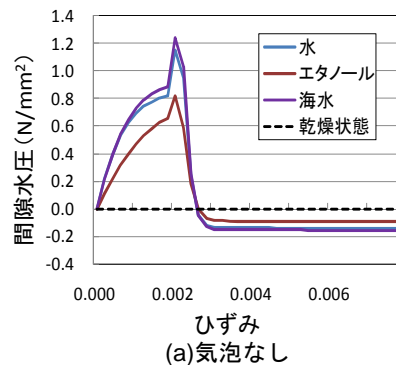
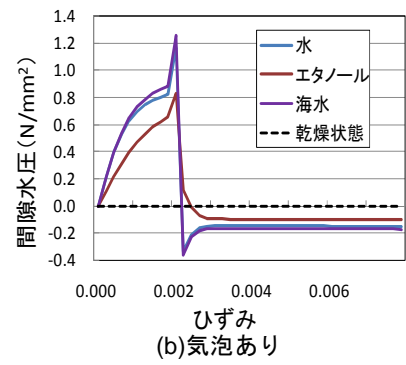


図-5 衝撃力



(a)気泡なし



(b)気泡あり

図-7 間隙水圧-ひずみ関係

から導かれる。すなわち F_1 と F_2 の和が、気泡崩壊時に発生する衝撃力を表わすことになる。

水、エタノールおよび海水を対象として、気泡内圧力を図-4に示す。ここで、表面張力が大きい液体ほどその値は大きくなることが確認できる。各液体に発生する気泡崩壊時の衝撃力については図-5に示す。衝撃力は作用水圧の増加に伴って大きくなり、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いうこととなる。

4.2 キャビテーションを導入した固体強度の評価

本研究は、セメント系材料のマイクロ細孔内における、キャビテーション壊食の固体強度へ及ぼす影響を推定する基本的研究として位置づけることとする。したがって、本研究では、以下の条件を考慮して解析を行う。

- 1) 気泡は圧縮性であり、液体は非圧縮性である
- 2) 全ての気泡は球形とみなし、気泡同士の結合および分離は発生しないものとする
- 3) 気泡は空気および水蒸気で飽和されている
- 4) 気液界面での相は変わらず、材料の移送はしない
- 5) 気泡密度は液体密度に比べて十分小さく、無視できるものとする
- 6) 液体速度と気泡速度の値は同一である

これらを踏まえ、本研究ではモルタル内部の空隙には、

水、エタノールおよび海水で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種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。なお、各液体の物性値は表-1に示す。

本章では、3章に示した水・コンクリート骨格連成解析手法に、前節で示したキャビテーション現象を導入することにより、強度に及ぼす液体種の影響に関する議論を行う。

解析パラメータは、モルタルが完全に乾燥した状態、モルタルを各種液体で完全に飽和させた状態および細孔内の液体にキャビテーション気泡が発生している状態である。なお、想定する各種液体の表面張力は表-1に示したとおり異なり、解析で想定したモルタルのヤング率は25GPaとしている。塑性域において、初期粘着力は圧縮強度の1/2とし、最終内部摩擦角は27°とした。また、透水係数は $1.67 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ であり、境界条件は、コンクリート表面が大気圧と等しいと仮定する。

図6で示す応力とひずみの関係より、前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大きくなっている。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くなっている。このことから、気泡の存在が応力低下に影響を与えていることが予想される。

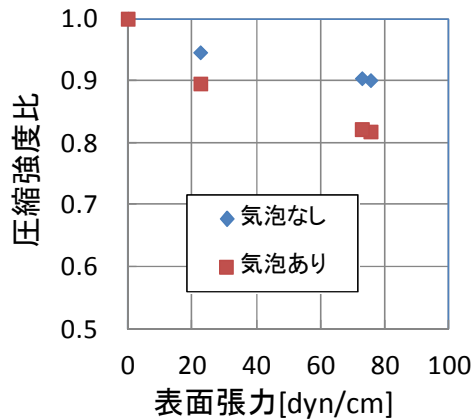


図-8 圧縮強度比

図-7 は、間隙水圧とひずみの関係を表わしたものである。弾性域において正の間隙水圧が発生し、コンクリートの弾性限界で最大値となる。弾性域においては、各種液体とも気泡の有無にかかわらず間隙水圧に差は見られない。しかしながら、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は気泡の存在しない状態に比べて急激に低下を生じる。すなわち、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ており、これはひび割れが進展しているということを示唆している。そして、このひび割れ進展の原因こそがキャビテーション崩壊によるものであると考えられる。

図-8 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、液体浸漬したモルタルの強度を絶乾状態のモルタル強度で正規化したものとして定義されている。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考えられる。

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っており、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。

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とき、材料の圧縮強度を低下させる力が発生していることが図-8 から予想され、その力は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、前章で述べたとおり液体の表面張力が大きいほど衝撃力は大きく、固体壁面近傍で発生し作用する衝撃力は、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。

以上から、二相多孔質材料であるセメント系材料の圧縮強度は、液体表面張力の影響を受ける。特に、強度低

下メカニズムは二相多孔質材料の細孔内に生じるキャビテーション現象によって説明できる。

今後の課題としては、本モデルに細孔径分布および水分移動による細孔壁面に生じるせん断力の影響を導入するとともに、部分的に液体で飽和された状態に対しても適用可能なモデルの拡張である。併せて、実験的手法により、細孔内に生じるキャビテーションの定性的かつ定量的評価も必要である。

5. まとめ

本研究から得た結果を以下にまとめる。

- (1) セメント系材料の強度低下は、材料が含む液体の表面張力の増加に依存する。
- (2) 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場合、キャビテーション現象が発生しやすく、発生する気泡が崩壊する際には衝撃力を伴う。
- (3) キャビテーション現象により発生する気泡内の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。
- (4) セメント系材料内の液体に気泡が存在するとき、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) Gilkey, H. J., *Eng. News Record*, Vol 119, 1937, pp.630-633.
- 2) 岡島達雄:セメント・コンクリート, No.464, pp.18-26, 1985
- 3) Arthur, P. D., Earl, J. C. and Hodgkiess, T., *Fatigue of Reinforced Concrete in Seawater*, *Concrete*, 1979, pp.26-30.
- 4) Benedicks, M. C., *Comp. Rend.*, 1951, p.232, p.2435.
- 5) 堀素夫:表面エネルギーからみたセメント硬化体の強さ, 窯業協会誌, Vol.70, No.7, pp.54-59, 1962
- 6) Oshita, H. and Tanabe, T., *Creep Mechanism of Early Age Concrete Modelling with Two Phase Porous Material*, *Creep and Shrinkage of Concrete*, RILEM, 1993, pp.465-470.
- 7) 大岸佐吉, 小野博宣, 棚橋勇:セメントモルタルの強度, 変形に及ぼす含浸液体の表面張力の影響, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.101-10, 1981.
- 8) Matsushita, H. and Onoue, K., *Influence of Surface Tension of Liquid Stored in Internal Void on Compressive Fatigue Strength of Concrete*, *Conc. Res. and Tech.*, Vol.17, No.1, 2006, pp.19-30.
- 9) 加藤洋治:キャビテーション, 1990, 槇書店