

部分的に水で飽和された多孔質材料としての コンクリートの破壊エネルギーに関する研究

大下英吉¹・谷口幸弘²

¹正会員 工博 中央大学助教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²正会員 工修 オリエンタル建設 大阪支店工事部 (〒530-0012 大阪市北区芝田2-7-18)

本研究では、部分的に水で飽和された多孔質材料としてのコンクリートの破壊エネルギーをどのように捉えるべきであるかについての解析的および実験的検討を行った。まず、破壊エネルギー基準を導入した水・コンクリート骨格連成解析の構築を行い、間隙水圧を考慮した有効応力により定義される破壊エネルギーの解析的評価を実施した。そして、コンクリートの破壊性状に及ぼす間隙水圧の影響および間隙水圧が発生する場合のコンクリートの破壊エネルギーに関する実験的評価を実施した。

Key Words : fracture energy, pore water pressure, total stress, effective stress, porous material, water migration

1. はじめに

コンクリートの材料特性値として考えられている破壊エネルギーにより、コンクリートの変形性状を表現していく研究が盛んに進められている。これは、コンクリート構造物のひび割れ発生から破壊に至る一連の現象が、コンクリート内部での微細ひび割れの発生、凝集による破壊面の形成という過程によって統一的に説明できることによるものと考えられる。さらに、破壊エネルギーと引張軟化曲線を用いることにより、変形性状の寸法依存性を表現することも大きな理由であろう。すなわち、破壊エネルギーはひび割れ進展現象をマクロ的詳細にモデル化した量であることに由来するものと考えられる。

破壊エネルギーは、引張応力を全く伝達しないひび割れ面を形成するために要する単位面積当たりのエネルギーで定義される。一軸引張試験では、ひび割れ面に作用する引張応力(全応力)とひび割れ幅のマクロ的な関係、曲げ試験では曲げ応力(全応力)とひび割れ開口変位の関係である引張軟化曲線によって囲まれる面積として求められているわけである。一般に、これらの量で定義される破壊エネル

ギーは、コンクリート固有の値である材料特性値として捉えられているが、その値は広範囲に渡るバラツキを示すと言われている。この詳細な理由は未解明のままであり、材料特性値として捉える事のできる推定精度の向上およびバラツキに影響を及ぼす主要因の同定が不可欠である。では仮に、推定精度の向上等によりコンクリートの破壊エネルギーが材料特性値として捉える事ができたとする。この場合、如何なる環境条件下のコンクリート構造物に対しても、室内実験により得られた破壊エネルギーが適用可能なのであろうか。言い換えれば、地中或いは水中コンクリート構造物のような非常に高含水状態であり、しかも土圧や水圧などの外力によりコンクリート内部で水分移動が生じるものに適用可能なのであろうか。

大下ら^{2), 3), 4)}は、地中或いは水中コンクリート構造物を対象として、外力の作用による応力性状を実験的および解析的に評価している。その中で、コンクリートの内部空隙に存在する水には、MPaオーダーの間隙水圧が発生し、コンクリート応力に対して無視する事ができないと指摘している。このことから類推されるのは、このような環境条件下のコン

クリートに対しては、環境条件を詳細に模擬した室内実験により破壊エネルギーを求める事、さらに従来の全応力ではなくコンクリート骨格に直接作用する有効応力により破壊エネルギーを定義する事が必要であるという事である。この典型的な例が、田澤・大下らが行った側面水圧を受ける円柱供試体の破壊性状に関する実験的研究であり、その中でコンクリート供試体の破壊があたかも一軸引張を受けたかのような劈開により生じ、間隙水圧により発生する軸方向の有効応力が破壊に大きな影響を及ぼす事を指摘している。このことから、破壊エネルギーをコンクリート骨格に直接作用する有効応力により定義する必要があるものと推測される。

しかしながら、現在までのところ、コンクリートを2相或いは3相多孔質材料とし、コンクリート構造物が置かれる環境条件までも考慮に入れた破壊エネルギーの定義を行った研究は皆無の状態である。

本研究は、上述の実験的知見を基に、部分的に水で飽和された多孔質材料としてのコンクリートの破壊エネルギーをどのように捉えるべきであるかについての解析的および実験的検討を行ったものである。解析的検討では、大下らによって提案されている多孔質材料としてのコンクリートの透水および変形特性に関する解析理論⁹⁾を拡張させ、破壊エネルギー基準を導入した解析理論⁷⁾の構築を行い、そのモデルを三主応力空間における各方向のひび割れの程度を統一的に評価可能なように拡張した。そして、間隙水圧を考慮した有効応力により定義される破壊エネルギーの解析的評価を実施するとともに、従来の全応力で定義される破壊エネルギーとの比較を行った。実験的検討では、コンクリートの破壊性状に及ぼす間隙水圧の影響評価を行い、間隙水圧が発生する場合のコンクリートの破壊エネルギーを実験的に評価した。

2. 破壊エネルギーに基づく水分移動モデルの開発

一般に、コンクリートは骨材とセメントペーストおよびそれらの空隙には部分的に水で満たされた弾塑性多孔質不飽和透水性材料であり、このような材

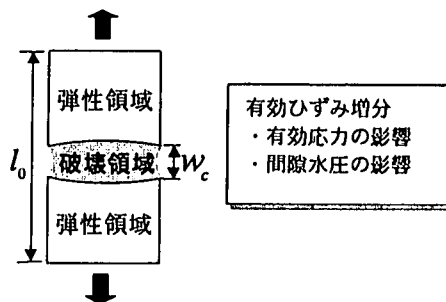


図-1 分布ひび割れモデル

料に外力が作用すると、固体相には有効応力、液体および気体相には間隙圧が発生することになる。このような現象を解析により詳細に評価するためには、力の釣り合いと間隙水の質量保存則を満足したものでなくてはならない。本研究では、骨材は完全等方弾性体、セメントペーストは弾塑性体と仮定し、セメントペーストの降伏関数は損傷パラメータ μ および破壊エネルギー G_f の関数とし、要素寸法には依存しない客観性のある結果を得るための解析理論の構築を行った。

(1) 破壊進行領域におけるひずみと幅

コンクリートの破壊進行領域における有効ひずみ増分 $d\{\epsilon_i'\}$ は、図-1に示す分布ひび割れモデルに対して次式のように表される。

$$d\{\epsilon_i'\} = d\{\epsilon_e^{\sigma'}\} + [\beta]d\{\epsilon_p^{\sigma'}\} + d\{\epsilon_e^{p' r}\} + [\beta]d\{\epsilon_p^{p' r}\} \quad (1)$$

ここで、 $d\{\epsilon_e^{\sigma'}\}$ および $d\{\epsilon_p^{\sigma'}\}$ は、有効応力による骨格の弾性および塑性ひずみであり、 $d\{\epsilon_e^{p' r}\}$ および $d\{\epsilon_p^{p' r}\}$ は、それぞれ間隙水圧による骨格の弾性および塑性ひずみである。また、 $[\beta]$ は、コンクリートの要素寸法 l_0 (メッシュサイズ) と破壊進行領域の幅 w_c (ひび割れ領域幅) の比であり、次式で示すマトリックスである。

$$[\beta] = \frac{w_c}{l_0} \begin{bmatrix} \epsilon & 0 & 0 \\ & \eta & 0 \\ sym. & & \xi \end{bmatrix} \quad (2)$$

式(2)中の ϵ, η, ξ は、各軸方向の微細ひび割れ領

域の程度を表わすパラメータであり、このパラメータを用いることにより、例えば一方向の主応力に直行する方向に大きなひび割れ群が発生し、他方向には小さなひび割れ群が発生するような問題にも適用可能になるわけである。

そして、ひび割れ幅増分 $d\{w\}$ は、全変形量と弾性変形量の差で表わすと次式となる。

$$d\{w\} = l_0 d\{\varepsilon'_t\} - l_0 d\{\varepsilon_e^{\sigma'pr}\} \quad (3)$$

ここで、 $d\{\varepsilon_e^{\sigma'pr}\}$ は、有効応力および間隙水圧による骨格の弾性ひずみであり、次式で示される。

$$d\{\varepsilon_e^{\sigma'pr}\} = d\{\varepsilon_e^{\sigma'}\} + d\{\varepsilon_e^{pr}\} \quad (4)$$

また、ひび割れ幅増分 $d\{w\}$ は、塑性ひずみ増分を用いて次式のようにも表わされる。

$$d\{w\} = l_0 [\beta] d\{\varepsilon_p^{\sigma'pr}\} \quad (5)$$

ここで、 $d\{\varepsilon_p^{\sigma'pr}\}$ は、有効応力および間隙水圧による骨格の塑性ひずみであり、次式で表わされる。

$$d\{\varepsilon_p^{\sigma'pr}\} = d\{\varepsilon_p^{\sigma'}\} + d\{\varepsilon_p^{pr}\} \quad (6)$$

そして、式(5)で示されるひび割れ幅増分は、破壊進行領域の幅 w_c と間隙水圧を考慮した骨格の塑性ひずみ増分 $d\{\varepsilon_p^{\sigma'pr}\}$ により次式のように書き直される。

$$d\{w\} = w_c [\beta'] d\{\varepsilon_p^{\sigma'pr}\} \quad (7)$$

ここで、マトリックス $[\beta']$ は次式である。

$$[\beta'] = \begin{bmatrix} \varepsilon & 0 & 0 \\ & \eta & 0 \\ sym. & & \xi \end{bmatrix} \quad (8)$$

このように、ひび割れ幅増分が式(7)で示すように破壊進行領域の幅と間隙水圧を考慮した骨格の塑性ひずみ増分で表わされたわけであり、これに間隙

水圧を考慮した骨格に作用する応力である有効応力に乗じることにより、多孔質材料としてのコンクリートの破壊エネルギーを定義することが可能になるわけである。

(2) 多孔質材料としてのコンクリートの破壊エネルギー

一般に、コンクリートの破壊エネルギー G_f は、コンクリートを一相材料と仮定し作用応力である全応力により表わされているわけである。本研究では、コンクリートを二相材料として捉え、間隙水圧を考慮した有効応力 $\{\sigma'\}$ より、次式で表わすものとする。

$$G_f(\mu) = w_c \int \{\sigma'\} [\beta'] d\{\varepsilon_p^{\sigma'pr}\} \quad (9)$$

ここで、 μ は塑性の程度を表わす損傷パラメータであり、次式で定義する。

$$\mu = \frac{m_1 \int dG_f(\mu)}{w_c f_t \varepsilon_0} \quad (10)$$

f_t : 引張強度, $\varepsilon_0 = f_t / E$

ここで、 m_1 は材料定数である。

式(9)と従来の破壊エネルギーとの相違は、間隙水圧を考慮した骨格の有効応力および塑性ひずみで表わしていることであり、このことによりコンクリート材料のみならず、その他の多孔質材料にも適用可能な一般性を有したものである。

(3) コンクリートの弾塑性マトリックス

本研究では、コンクリートを骨材、セメントペーストおよびその空隙には水で満たされた2相多孔質材料として捉え、骨材は等方完全弾性体、セメントペーストは弾塑性体と仮定したモデル化を行う。

まず、セメントペーストの弾塑性マトリックスを示すことにする。セメントペーストの降伏関数 f は、次式に示すように間隙水圧を考慮した有効応力場および破壊エネルギーの関数として表わされる。

$$f = f(\{\sigma'\}, G(\mu)) = 0 \quad (11)$$

ここで、塑性挙動と破壊挙動の関連性であるが、破壊は塑性ポテンシャル曲面上のある一つの状態を表わしているものとして考えることにより、塑性挙動と破壊挙動を統一的に表現可能と考えられる。

そして、降伏関数にDrucker-Pragerタイプのものを用いることにより、セメントペーストの弾塑性マトリックス $[D_c^{ep}]$ は次式で表わすことができる。

$$[D_c^{ep}] = [D_c^e] - \frac{[D_c^e][\beta] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \{\sigma'\}} \right\} \left\{ \frac{\partial f}{\partial \{\sigma'\}} \right\}^T [D_c^e]}{\left\{ \frac{\partial f}{\partial \{\sigma'\}} \right\}^T [D_c^e] \left\{ \frac{\partial f}{\partial \{\sigma'\}} \right\} - w_c \frac{\partial f}{\partial G(\mu)} \{\sigma'\}^T \left\{ \frac{\partial f}{\partial \{\sigma'\}} \right\}} \quad (12)$$

ここで、マトリックス $[D_c^e]$ は、セメントペーストの弾性マトリックスである。

最終的に、コンクリートの弾塑性マトリックス $[D_c^{ep}]$ は、コンクリートの有効ひずみ増分を骨材とセメントペーストの有効ひずみ増分にそれぞれの体積比を乗じた和で表わすと、次式で表わすことができる。

$$[D_S^{ep}] = \left[\frac{V_A}{V} [D_A^e]^{-1} + \frac{V_C}{V} [D_C^{ep}]^{-1} \right]^{-1} \quad (13)$$

ここで、 V 、 V_A 、 V_C はそれぞれコンクリート、骨材およびセメントペーストの体積であり、 $[D_A^e]$ は骨材の弾性マトリックスである。

(4) 多孔質材料の変形・透水特性に関する支配方程式^{3), 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。大下ら^{3), 6)}は、既に多孔質材料としての変形および透水特性に関する支配方程式として、次式に示す水・コンクリート骨格連成解析手法を提案している。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -H \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\bar{u}\} \\ \{\bar{p}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_T & -L \\ -L^T & -S \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \frac{d\{\bar{u}\}}{dt} \\ \frac{d\{\bar{p}\}}{dt} \end{Bmatrix}$$

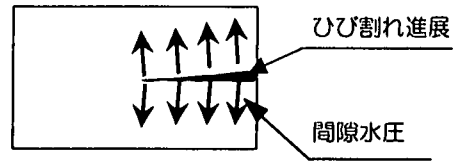


図-2 局所の間隙水圧によるひび割れ進展

$$= \left\{ \begin{array}{l} \frac{d\{\bar{f}\}}{dt} + A \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} \\ W \frac{d\{\bar{T}\}}{dt} - \frac{d\{f_p^{ve}\}}{dt} - \{f_p^{ext}\} + \frac{d\{g_p\}}{dt} \end{array} \right\} \quad (14)$$

式(14)は、節点変位ベクトルと節点間隙水圧を未知数として境界条件を代入することにより、コンクリートの変形性状および透水性状を自動的に求めることができるものであった。なお、式中の各マトリックスおよびベクトルは文献を参照されたい。

本研究では、式(14)中の接線剛性マトリックス K_T に式(13)を代入することにより、間隙水圧を考慮した多孔質材料としての破壊エネルギー基準に基づくコンクリートの変形および透水性状に関する支配方程式の構築を行ったわけである。

このように、破壊エネルギー基準を水・コンクリート骨格連成解析手法に導入することにより、コンクリート構造物が置かれた環境条件を考慮した変形および透水性状を求めることが、また逆に環境条件を考慮した破壊エネルギー自体の予測も可能となるわけである。さらに、図-2に示すように局所の間隙水圧によるひび割れ進展状況の評価も可能となるわけである。

次に、破壊エネルギー基準を導入した水・コンクリート骨格連成解析手法により、コンクリートの含水状態を変数としたパラメータスタディを行い、破壊エネルギーに対する間隙水圧の影響評価を行うことにする。このことは、水中或いは地中コンクリート構造物と地上のコンクリート構造物との破壊エネルギーの相違を評価することであり、言うなれば環境条件までも考慮したコンクリートの破壊エネルギーを評価することになるわけである。

表-1 解析に用いた材料定数

引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	空隙率	内部摩擦角(°)		初期 粘着力 (MPa)	透水係数 (cm/sec)	水の体積弾性係数 (GPa)	
				初期	最終			含水率 大	含水率 小
				30.0	35.0				
2.5	30.2	0.2	0.15			2.2	2×10^{-11}	2.2	0.022

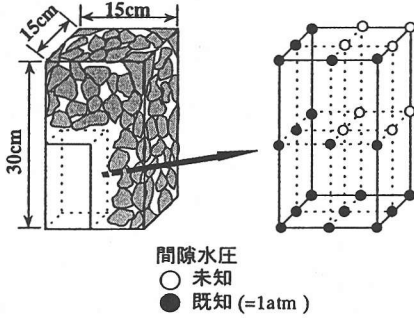


図-3 一軸引張モデル

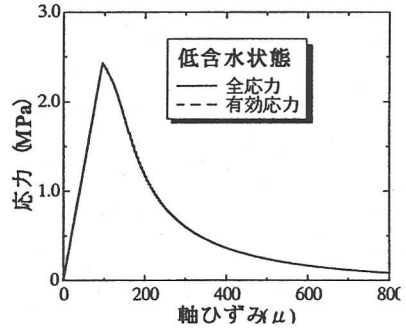


図-4 コンクリート応力性状 (低含水状態)

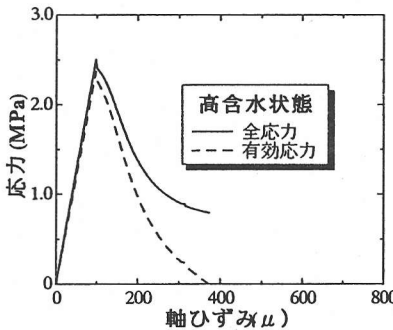


図-5 コンクリート応力性状 (高含水状態)

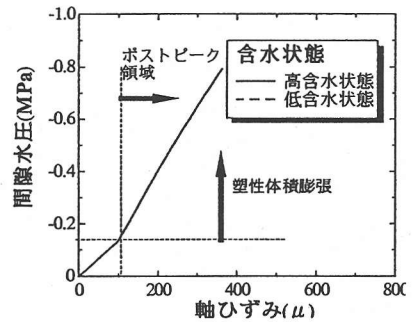


図-6 間隙水圧性状

3. 間隙水圧性状によるコンクリートの破壊エネルギー

コンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧は、コンクリート応力に比べて無視し得ない程の大きさで生じ、コンクリートの破壊に大きな影響を及ぼすことが、既に大下ら²⁾ 4)により指摘されている。

そこで本章では、地中或いは水中コンクリート構造物のような高含水状態で、しかも外力の作用により間隙水圧が発生するようなコンクリートについて、破壊エネルギーをどのように取り扱うかに対する解析的評価を行う。そして、従来の一相材料としての破壊エネルギーとの差異に対する議論を行う。

(1) 解析モデル

解析の対象としたモデルは、図-3に示すように15cm×15cm×30cmの形状寸法をした角柱供試体の

1/8モデルとし、これを8要素に分割したものである。解析は一軸引張状態を想定し、間隙水は排水状態で実施し、解析に用いたパラメータは表-1に示す通りである。

解析パラメータである含水状態は、空(水)隙内の体積弾性係数を変動させることにより評価した。地中或いは水中コンクリート構造物のような高含水状態を解析的に模擬するためには、空(水)隙には表-1に示すように通常の水の体積弾性係数を適用することが妥当と考えられる。一方、地上コンクリート構造物のような低含水状態を模擬するためには、コンクリートの内部空隙には空気などの気体の占める割合が大きく、空隙内の体積弾性係数は水に比べ無視できる程に小さいものと想定されるため、空(水)隙には水に比べ非常に小さい体積弾性係数を適用することが妥当と考えられる。

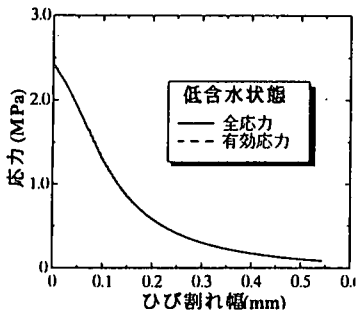


図-7 応力～ひび割れ幅関係
(低含水状態)

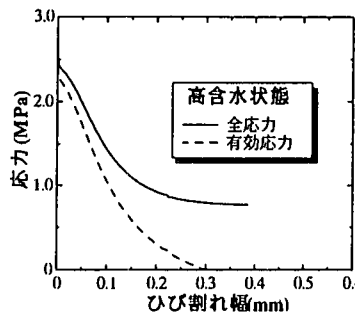


図-8 応力～ひび割れ幅関係
(高含水状態)

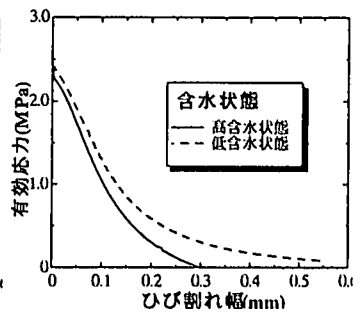


図-9 含水状態による
破壊エネルギー

(2) コンクリート応力に及ぼす間隙水圧の影響

図-4, 図-5は, それぞれコンクリート供試体の低含水状態のケースと高含水状態のケースにおけるコンクリート応力に関する解析結果であり, 各図中の実線は全応力～軸ひずみ関係, 破線は有効応力～軸ひずみ関係を表している. また, 図-6は各ケースにおける間隙水圧～軸ひずみの関係を表している.

コンクリート中に発生する間隙水圧は, 図-6に示すように低含水状態のケースについては殆ど発生していないため, 図-4に示す全応力と有効応力に差異がない. 一方, 高含水状態のケースについては, 図-5に示す全応力に対して無視できない程の間隙水圧が発生しており, 全応力と有効応力に大きな差異が生じている. すなわち, 高含水状態のコンクリート供試体においては, 無視できない程の間隙水圧が発生し, コンクリートの破壊に大きな影響を及ぼすことが考えられる.

(3) 破壊エネルギーに及ぼす間隙水圧の影響

図-7, 図-8は, それぞれ低含水状態のケースと高含水状態のケースにおける破壊エネルギーに関する解析結果であり, 図中の実線は全応力～ひび割れ幅, 破線は有効応力～ひび割れ幅関係を表している. 図-7に示す低含水状態のケースでは, 間隙水圧が殆ど発生しないことから, 全応力および有効応力とひび割れ幅の関係には差異がない. 一方, 図-8に示す高含水状態のケースでは, 間隙水圧の影響により差異が生じている. 図-6に示したように, 一軸引張状態において発生する間隙水圧は負の圧力(引張)となり, 有効応力は全応力より間隙水圧の

値だけ小さくなる. 一般に, コンクリートのような多孔質材料の強度特性は, コンクリート骨格に生じる有効応力により評価されるため, 破壊現象の定義も全応力ではなく有効応力により評価されなければならないであろう. 特に, 高含水状態のコンクリートの破壊エネルギーを定義する際には, 間隙水圧の影響を考慮した有効応力とひび割れ幅の関係により表すことが重要であるものと考えられる. このことは, 図-9に示す含水率の違いによる有効応力とひび割れ幅関係からも明らかであるように, コンクリートの破壊エネルギーは含水率の増加とともに小さくなることが再確認される. 勿論, 含水率が比較的小さいコンクリートにおいては, 間隙水圧が殆ど発生しないことから, 従来の全応力により評価可能であると考えられる.

このような含水によるコンクリートの強度低下は, 吸水により固体の表面エネルギーが低下することによるものであるとも言われており, 本解析結果はこのような現象にも対応している. しかしながら, コンクリートは固体単体ではなく内部に多くの空隙或いは水隙を含んでいるため, 詳細に強度低下を表すには上述に示す間隙水圧特性の考慮が必要である.

このように, コンクリートの破壊エネルギーはたとえ材料特性値であっても, 置かれる環境条件によって異なることが分かった. すなわち, コンクリートの内部空隙において間隙水圧が発生する場合としない場合とでは, 破壊エネルギーが異なるということである. このことは, 地中或いは水中コンクリート構造物と地上のコンクリート構造物とでは, 破壊エネルギーが異なるということが推測される. では, コンクリートの内部空隙に間隙水圧が発生す

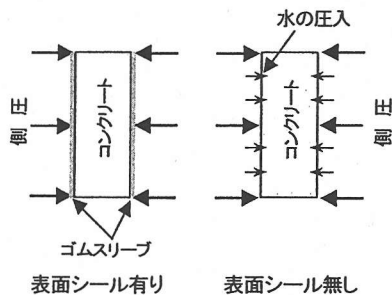


図-10 表面の処理方法

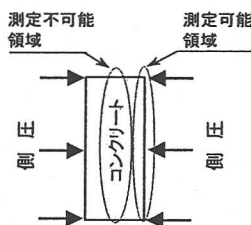


図-11 間隙水圧測定可能および不可能領域

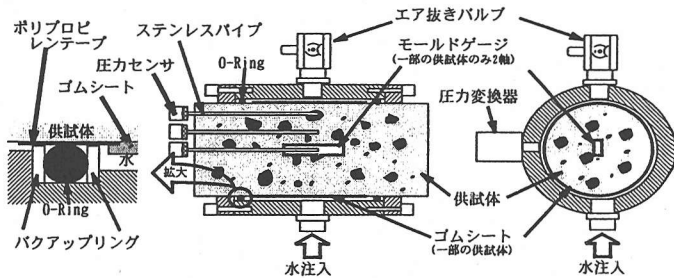


図-12 側面水圧載荷用セル概要図

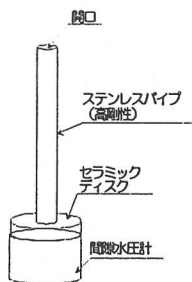


図-13 間隙水圧測定次具

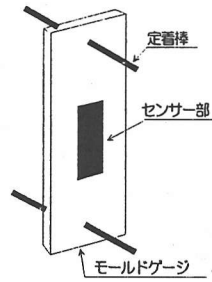


図-14 モールドゲージ処理方法

る場合の破壊エネルギーを室内実験により評価するには、どのようにすれば良いのであろうか。当然のことながら、従来の室内標準実験手法では、評価は不可能である。なぜなら、供試体寸法が小さいことにより断面内での導水勾配分布が存在せず、仮に分布が存在したとしても無視できる程に小さいからである。そこで次章では、間隙水圧が発生する場合のコンクリートの破壊エネルギー測定実験を行い、コンクリートの変形挙動および破壊エネルギーに及ぼす間隙水圧の影響評価について議論する。

4. 側面水圧作用下におけるコンクリートの変形性状

田澤・大下ら⁹⁾は、単調増加型側圧を受ける円柱供試体の強度特性および破壊現象に対する実験的評価を行い、その中で等二軸圧縮応力場であるにも拘わらずコンクリートの破壊時の側圧は一軸圧縮強度に比べ非常に小さく、コンクリートの破壊性状は軸方向に直交する単一面で切断されたような劈開破壊を生じ、あたかも軸方向に一軸引張試験を行ったかのような破壊性状であったことを指摘している。さらに、コンクリート破壊時の側面水圧は、図-10

に示すように、コンクリート内部への水の圧入を許す場合（水が表面に直接作用）の方が許さない場合（表面のシール）に比べて小さいことも指摘している。すなわち、水の圧入により生じる内部空隙の間隙水圧が、強度特性に大きな影響を及ぼすことを示している。このことから類推されるのは、間隙水圧の発生によりコンクリートの破壊エネルギーが小さくなるということである。

しかしながら、田澤・大下らの実験では、供試体が飽和に近い状態ではなかったこと等により、測定された間隙水圧は図-11に示す表面部近傍のみであり、中心部近傍の2箇所においては殆ど測定されていないため、強度特性に及ぼす間隙水圧の影響がそれほど顕著には現れてはいなかった。

そこで本章では、間隙水圧がコンクリートの破壊現象にどれほどの影響を及ぼすのか、また間隙水圧が破壊エネルギーにどのような影響を及ぼすのかについて実験的に明らかにするため、供試体内部の各断面で間隙水圧の測定が可能となるように改良した実験を行った。そして、本研究で構築した解析手法を実験結果に適用することにより解析的にも間隙水圧の影響評価を実施した。

表-2 コンクリートの配合

スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位体積重量(kg/m ³)				圧縮強度 (MPa)
				水	セメント	細骨材	粗骨材	
10±2	2.5±1	60	54	226	377	906	732	10.8

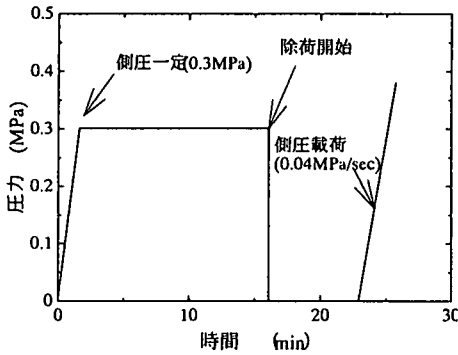


図-1 5 側面水圧荷重履歴

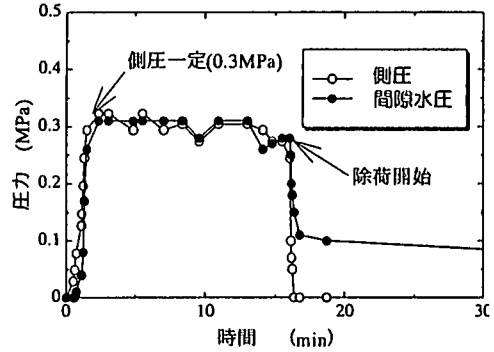


図-1 6 間隙水圧特性

(1) 実験概要

a) 実験方法

側圧荷重用セルは、図-1 2に示すように鋼製の円筒容器からなっており、その中央部に $\phi 15 \times 30$ cmのコンクリート供試体が配置される。この際、セルと供試体の隙間から外部への水の漏水を防止するために、セルの上下端にO-Ring、バックアップリングおよびポリプロピレンテープが配置されている。実験は、コンクリート供試体の材齢が3日の時点でセルと供試体との隙間に外部から水を圧入することにより行われ、手動ポンプの能力から圧入速度は圧力に換算して約0.04MPa/secの一定値である。なお、コンクリートの配合は表-2に示す通りである。コンクリートの内部空隙に発生する間隙水圧を本実験のような短時間で測定するためには、コンクリート内部における透水が早期に生じる、すなわちコンクリート内部の最大連続空隙径が極力大きくする必要があり、このような現象を再現するためには材料分離が生じない程度の高水セメント比を有する若材齢コンクリートが最も有効である。本来ならば、実コンクリート構造物と全く同一の条件における実験の実施が必要であるが、長期に渡る水の浸透を経て部分的に飽和した実コンクリート構造物の間隙水圧特性は上述の実験供試体である程度評価可能であるものと考えられる。

b) 測定項目

本実験における測定項目は、作用側圧、コンクリートひずみ、間隙水圧である。作用側圧は、図-1 2に示す圧力変換器により測定し、コンクリート内部の間隙水圧の測定は、予め供試体内部に埋め込んだ $\phi 1$ mmのステンレスパイプ内に水を満たし先端に間隙水圧計を取り付けることにより実施され、測定位置は供試体中心から2.5cm毎の3箇所である。なお、間隙水圧計の細部は図-1 3に示すように、間隙水圧のみを測定するため供試体内部におけるパイプの先端は開口状態であり、パイプと間隙水圧計の間には水と空気のみを通すセラミックディスクが設置されている。また、コンクリートひずみは、図-1 4に示すように供試体との定着を十分に確保するために上下端に定着棒を取り付けたモールドゲージにより測定され、軸方向および軸直交方向(周方向)のひずみが測定された。

c) 側圧荷重方法

側圧の荷重は、一定側圧作用時の変形特性および単調増加型の側圧作用時における変形特性を調べる目的およびコンクリート供試体を極力飽和に近い状態にする目的で、図-1 5に示す荷重履歴により供試体が破壊するまで行われた。まず、側圧がコンクリート供試体の引張強度の約1/3 (0.3MPa)になるまで徐々に荷重し、側圧が0.3MPaとなった時点から約15分間一定側圧が保持され、その後側圧の除荷

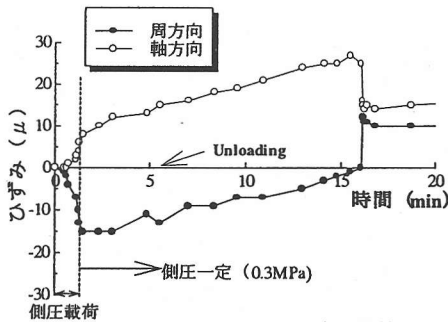
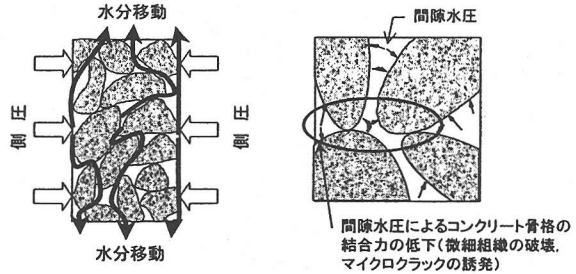


図-17 コンクリートの変形特性



(a) 水分移動 (b) 間隙水圧の影響
図-19 水分移動と間隙水圧が及ぼす影響

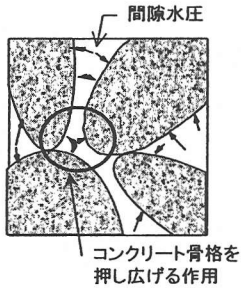


図-18 水の圧入現象による骨格の変形

を行う。そして、コンクリート内部に配置された3箇所の間隙水圧がほぼゼロとなった時点から、0.04MPa/secの一定応力速度で側圧を載荷し、コンクリートが破壊に至るまで実施された。なお、一定側圧の保持時間は、図-12に示す供試体の上下表面に内部からの浸透により水滴が発生するまでの経過時間であり、コンクリート供試体が十分な飽和度を呈するように設定した。

(2) 一定側圧を受けるコンクリートの変形挙動

a) 間隙水圧発生状況

0.3MPaの側圧を約15分間保持した後に側圧を除荷した場合の間隙水圧特性を、図-16に示す。図中の記号○は側圧を表し、記号●は間隙水圧履歴である。なお、図中の間隙水圧は中心部の値を示しており、表面部の間隙水圧は側圧とほぼ同じ履歴であるため図中には記載していない。

間隙水圧は、側圧載荷後約16分までは側圧に追従して殆ど同じ値を示しているが、側圧を除荷した後は急激に低下し、その後は約0.1MPaの一定値を示す残留応力となる。このように、間隙水圧が側圧を

除荷したにも拘わらず残留応力となることは、コンクリートの組織の緻密さによるものであると考えられ、組織が緻密になるほどまた部材寸法が大きくなるほど、残留応力としての間隙水圧の値は大きくなるものと考えられる。

b) コンクリートの変形特性

図-17は、0.3MPaの側圧を約15分間保持した後に側圧を除荷した場合における周方向ひずみおよび軸方向ひずみを表している。

まず、側圧載荷過程では周方向には圧縮ひずみが生じ、軸方向にはポアソン効果により数μ程度の引張ひずみが生じる。その後、周方向においては側圧載荷過程にも拘わらず、ひずみの回復現象(圧縮ひずみの低下)が側圧載荷後約2分経過した後に生じている。そして、一定側圧過程では周方向には上述と同じひずみの回復現象を生じ、軸方向には徐々に引張ひずみの増加が生じる。このような一定側圧下における変形挙動は、図-18に示すように、コンクリート内部に水が圧入することにより正(圧縮)の間隙水圧が発生し、コンクリート骨格が間隙水圧により押し広げられる現象によるものである。すなわち、周方向では間隙水圧が徐々に大きくなり上述の現象により圧縮ひずみが低下し、側圧の除荷直前においては側圧と間隙水圧とが釣り合い状態になることにより完全にひずみが回復している。一方、軸方向には外力が作用していないことから、次式に示す関係から外力すなわち全応力をゼロとすることにより間隙水圧(圧縮)とコンクリート骨格に作用する有効応力(引張)とが釣り合い状態となり、理論的には変形が生じないことになる。

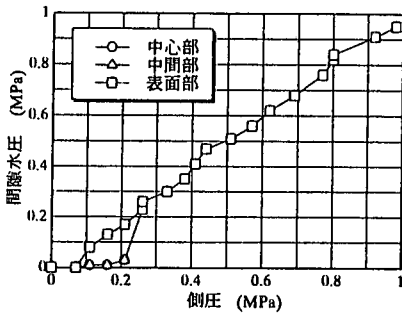


図-20 単調増加型側圧による間隙水圧特性

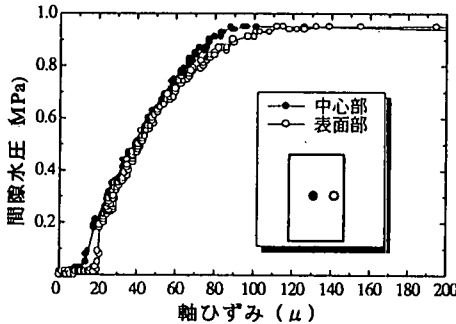


図-21 断面内の間隙水圧分布

$$\sigma = \sigma' - p \quad (15)$$

ここで、 σ 、 σ' および p は、それぞれ全応力、有効応力および間隙水圧であり、応力に関しては引張を正、圧力に関しては圧縮を正にしている。

しかしながら、現象的には図-19に示すように、供試体側面から上下端面に向かって水の移動が定常的に生じており、その影響により微細組織の破壊或いはマイクロクラックの進展としての変形が生じるものと考えられる。この現象はすなわち、水を荷重伝達媒体としたクリープ現象とも考えることができ、クリープ現象の統一的な確立に向けて今後考慮すべき重要な課題であろう。

側圧除荷過程においては、除荷直前までに発生していた間隙水圧が低下することにより、周方向では力の釣合いを満足するようにコンクリート骨格に引張応力が発生し、急激な引張ひずみが生じるものと考えられる。また、軸方向では間隙水圧が低下することすなわち有効応力(引張)が低下することにより、急激な引張ひずみの減少が生じるものと考えられる。

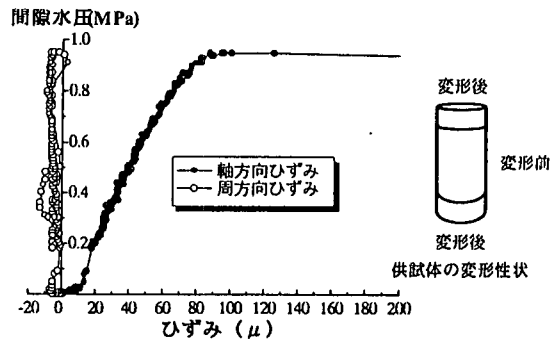


図-22 間隙水圧による軸方向、周方向ひずみ

このように、一定側圧を載荷することにより間隙水圧は各断面でほぼ側圧と同じ値を示すということから、コンクリート供試体はほぼ飽和に近い状態になったものと推測される。すなわち、次節の単調増加型側圧を載荷した場合に生じる間隙水圧の変形或いは破壊性状に及ぼす影響は、任意断面で等しいことが予測されるわけである。

(3) 単調増加型側圧を受けるコンクリートの変形挙動

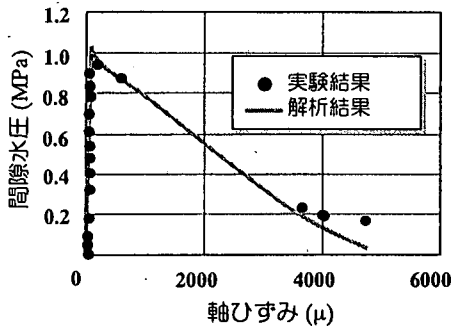
a) 間隙水圧発生状況

図-20は、図-12に示す供試体内部の3断面に配置された間隙水圧の測定結果であり、記号○、△、□は、それぞれ中心部、中心部から2.5cmおよび表面部の間隙水圧～側圧関係を表している。また、図-21は軸方向ひずみ～間隙水圧関係を表しており、実線および破線はそれぞれ中心部および表面部の結果である。

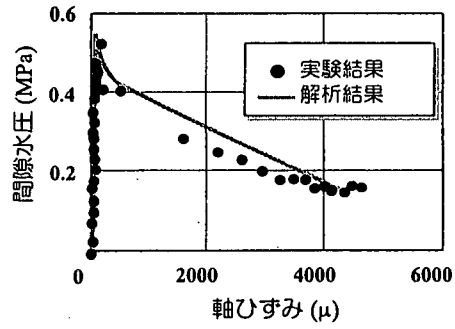
図-20から、コンクリート内部に発生する間隙水圧は各測定断面においてほぼ同じであり、その値は作用側圧とほぼ同じであることから、コンクリート供試体がほぼ飽和に近い状態であることを示しているものと考えられる。また、図-21に示す供試体中心部と表面部における軸ひずみに殆ど差異が無いことから、コンクリート供試体の変形特性に及ぼす間隙水圧の影響は、どの断面でも同じであることが言えるであろう。

b) コンクリートの変形特性

図-22は、供試体中心部における間隙水圧～ひずみ関係を表しており、記号●および○は、それぞれ軸方向および周方向を表している。コンクリート



(a) 載荷材齢 3 日



(b) 載荷材齢 1 日

図-2.3 間隙水圧測定結果に対する解析的評価

供試体は、間隙水圧の増加に伴い直線的に軸方向に引張ひずみが生じ、約0.98MPa（軸ひずみが約126 μ ）となった時点で破壊に至った後、供試体が劈開破壊を生じたことにより間隙水圧は徐々に低下している。なお、上述の現象は一軸引張試験とほぼ同じ傾向を示していることが確認される。

コンクリート供試体の変形特性は、周方向には圧縮ひずみが生じるが、その値は数 μ 程度であり軸方向ひずみに対して殆ど無視できる。すなわち、本研究のようにコンクリートがほぼ飽和に近い状態では、載荷された側面水圧は間隙水圧によりその殆どが受け持たれるため周方向ひずみが殆どゼロとなり、骨格を伝達媒体としたポアソン効果による軸方向変形は無視し得るものと考えられる。また、このことに加えて各断面内に生じる間隙水圧が側圧とほぼ同じ値であることから、周方向の有効応力は式(15)からほぼゼロと考えることができる。

次に、軸方向の変形特性を考察してみる。一般に、コンクリートのような多孔質材料では、骨格に作用する有効応力によりその変形特性を定義する。本実験のような境界条件では、軸方向については式(15)中の全応力 σ をゼロとした次式の関係が成り立つものと考えられる。

$$\sigma' = p \quad (16)$$

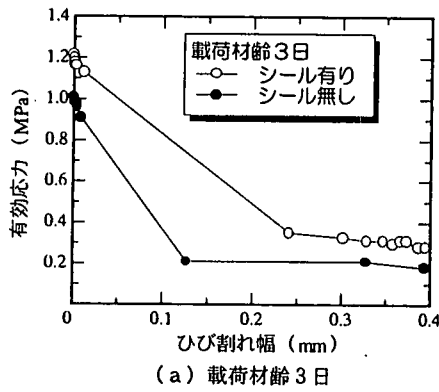
すなわち、軸方向に発生する有効応力 σ' は、内部空隙に発生する間隙水圧に等しく、コンクリートの破壊は有効応力が引張強度よりも大きくなること

により発生するものと考えられる。そこで次節では、コンクリートの変形特性や破壊現象に及ぼす間隙水圧の影響を詳細に評価するために、実験結果に対する解析的評価も実施することにした。

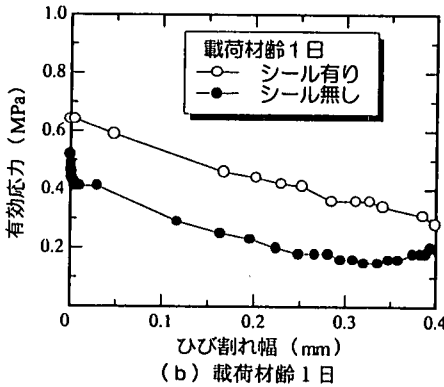
(4) 実験結果に対する解析的評価

2章で構築した破壊エネルギー基準を導入した水・コンクリート骨格連成解析モデルでは、骨材を完全弾性体、セメントペーストを弾塑性体とし、降伏関数にはDrucker-Pragerタイプを適用している。本解析では、Drucker-Pragerの破壊曲面を引張り午線($\theta = 0^\circ$)でMohr-Coulombの曲面と一致させることにより、破壊が引張応力条件下で生じるという定義を行った。すなわち、解析結果が実験結果を比較的良好に評価していれば、間隙水圧により生じた引張応力状態にある有効応力により破壊が生じたものと考えることができる。

図-2.3は、コンクリート供試体中心部における間隙水圧～軸方向ひずみ関係を示しており、図中の実線は解析結果を、記号●は実験結果をそれぞれ表している。同図(a)は、載荷材齢が3日、同図(b)は本文には記載されていないが載荷材齢が1日における結果である。解析結果は実験結果と比較的良好な一致を示しており、間隙水圧の最大値は材齢1および3日でそれぞれ0.53、1.0MPaであり、それぞれ圧縮強度の約1/10であり、ほぼ引張強度に等しい値となっている。すなわち、コンクリートの破壊は間隙水圧に起因する有効応力が引張強度よりも大きくなることにより生じたものと解析的にも考えられるわ



(a) 載荷材齢 3日



(b) 載荷材齢 1日

図-24 間隙水圧性状による破壊エネルギー

けである。

このように、コンクリート内部に発生する間隙水圧は、コンクリートの破壊に多大なる影響を及ぼすことが実験的・解析的検討により明らかになったわけである。また、3章で示した破壊エネルギーに関する解析的検討では、破壊エネルギーは間隙水圧性状により異なることも示された。そこで次節では、このことを実験的にも明らかにするために、間隙水圧性状による破壊エネルギーに関する実験的評価を実施した。

(5) 間隙水圧性状によるコンクリートの破壊エネルギー

コンクリートの破壊エネルギー同定に関する実験は、本実験装置をそのまま適用し、図-10に示すようにコンクリート供試体表面をゴムスリーブでシールした場合（シール有り）とシールしない場合（シール無し）とで行われた。このことはすなわち、外部から供試体内部への水の圧入現象が存在するかしないかの違いであり、間隙水圧性状の違いが破壊

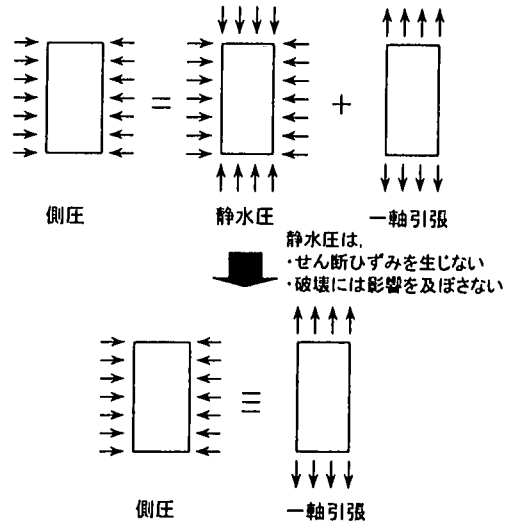


図-25 Bridgmanのモデル

エネルギーに及ぼす影響評価を行うことを意味しているわけである。

図-24は、有効応力～ひび割れ幅関係を示しており、図中の記号●および○は、それぞれ供試体表面をシールしない場合およびシールした場合の結果を表わしている。同図(a)は、載荷材齢が3日、同図(b)は載荷材齢が1日における結果である。すなわち、各図の曲線によって囲まれる面積が破壊エネルギーであり、記号●および○によって囲まれる面積の差異が間隙水圧性状による影響を表わしていることになる。

図中の縦軸である有効応力に関してであるが、記号●で示すシール無しの場合は、前節のことから内部空隙に発生する間隙水圧が軸方向の有効応力となる。一方、記号○で示すシール有りの場合は、低含水状態においては側面水圧および等方圧を作用させても間隙水圧は殆ど発生しないという実験結果から、図-25に示すBridgmanのモデル¹⁰⁾に従うものと仮定した。図-25は、円柱供試体の側面だけに水圧を加えた状態は静水圧環境下で軸方向に引張力を加えた状態と等価であるということを示している。そして、静水圧はせん断ひずみを生じさせず、材料の体積変化は生じてでも破壊には何ら影響を与えないとし、静水圧の影響を無視できるというものである。その適用範囲は無孔質材料に限られているが、コンクリート材料に対しては、側圧、静水圧および引張力の作用により間隙水圧が全く発生しない場合に

限っては、そのモデルの適用が可能であると考えられる。したがって、シール有りで低含水状態のコンクリート供試体の有効応力は、側面水圧の値と等価であると考えても良いであろう^{2), 3)}。勿論、シール無しのコンクリート供試体では、内部で間隙水圧が発生することにより、そのモデルの適用は不可能である。

間隙水圧性状による破壊エネルギーに関する実験結果に対する検討を以下で行うことにする。

まず、シール有り無しによる有効応力或いは破壊エネルギーの差異を検討する。どのひび割れ幅においても有効応力は、シール無しの方がシール有りに比べ、すなわち間隙水圧の発生する方が小さな値となっており、この傾向は図-9で示した解析結果とも良好な一致を示している。言い換えれば、コンクリートの破壊エネルギーは、間隙水圧の発生する方が発生しないものに比べ、小さくなるということである。このような現象の大きな理由は、水の圧入現象により局所的な間隙水圧が至る所で発生することおよびそれに伴う微細組織の破壊やマイクロクラックの進展が至る所で生じることによるものと推測される。

次に、載荷材齢による有効応力或いは破壊エネルギーの差異を検討する。当然のことではあるが、コンクリート供試体の強度の大きい載荷材齢3日の有効応力の最大値或いは破壊エネルギーは、載荷材齢1日のものに比べ大きな値となっている。また、ひび割れ幅増加に伴う有効応力の低下の割合は、より脆性的挙動を示す載荷材齢3日の方が大きい。

このように、コンクリートの破壊エネルギーはたとえ材料特性値であっても、置かれる環境条件によって異なることが実験的にも明らかとなったわけである。すなわち、コンクリートの内部空隙において間隙水圧が発生する場合には、局所的な間隙水圧による微細組織の破壊やマイクロクラックの進展をもたらすことにより、間隙水圧が発生しない場合に比べ、破壊エネルギーが小さくなるということである。このことは、地中或いは水中コンクリート構造物と地上のコンクリート構造物とでは、破壊エネルギーが異なるということにつながるものと推測される。

5. 結論

本研究では、部分的に水で飽和された多孔質材料としてのコンクリートの破壊エネルギーをどのように捉えるべきであるかについての解析的および実験的検討を行った。解析的検討では、破壊エネルギー基準を導入した水・コンクリート骨格連成解析の構築を行った。そして、間隙水圧を考慮した有効応力により定義される破壊エネルギーの解析的評価を実施するとともに、従来の全応力で定義される破壊エネルギーとの比較を行った。実験的検討では、コンクリートの破壊性状に及ぼす間隙水圧の影響評価を行い、間隙水圧が発生する場合のコンクリートの破壊エネルギーを実験的にも評価した。以下に、本研究から得られた結果をまとめる。

(1) 多孔質材料としてのコンクリートの破壊エネルギーは、高含水状態のコンクリートに対しては、従来の全応力～ひび割れ幅関係ではなく有効応力～ひび割れ幅関係により評価すべきであると考えられる。

(2) 間隙水圧性状を考慮したコンクリートの破壊エネルギーに関する測定実験が確立された。

(3) コンクリートの破壊エネルギーは、間隙水圧性状により異なる。その値は、高含水状態のものほど間隙水圧の影響により小さくなる。

参考文献

- 1) 二羽淳一郎, 松尾豊史, 岡本享久, 田邊忠頭: セメントの種類とコンクリートの破壊力学特性値に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.43-52, 1996.
- 2) 大下英吉, 田邊忠頭: コンクリートに発生する間隙水圧の実測とその影響に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.514/V-27, pp.75-84, 1995.
- 3) 大下英吉, 田邊忠頭: コンクリート内部に発生する間隙水圧の予測とその影響評価に関する解析的研究, 土木学会論文集, No.526/V-29, pp.29-41, 1995.
- 4) 大下英吉, 田邊忠頭: コンクリートのポストピーク領域における間隙水圧に関する実験的・解析的研究, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.109-120, 1997.
- 5) 松林博文, 田澤榮一, 大下英吉, 梅津啓史: 側面水圧

- による円柱供試体の切断現象, コンクリート工学年次
論文集, Vol.18, No.1, pp.567-572, 1996.
- 6) 大下英吉, 田辺忠頭: 不均質材料の透水性に関するモ
デル化とその適用性評価, 土木学会論文集, No.526/V-
29, pp.63-77, 1995.
- 7) 谷口幸弘, 小池晃, 大下英吉, 田辺忠頭: 間隙水圧を
考慮したコンクリートの破壊エネルギーに関する研究,
コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.2, pp.573-
578
- 8) Denzil, R. L. : Fracture Mechanics based Analysis of
Thermal Crack Propagation of Massive Concrete, Doctoral
Thesis of Nagoya University, 1991.
- 9) 岡島達雄: コンクリートの力学的性質と水分, セメン
ト・コンクリート, No.464, pp.18-26, 1985.
- 10) Bridgman, P. N. : Phil. Mag., 24, 1912.

(1998. 8. 13 受付)

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL STUDY ON FRACTURE ENERGY OF CONCRETE AS A POROUS PERMEABLE MATERIAL PARTIALLY SATURATED WITH WATER

Hideki OSHITA and Yukihiro TANIGUCHI

The experimental and analytical study on the detailed estimation of the fracture energy of concrete as a porous permeable material, which is partially saturated with water, was performed. In the analytical estimation, at first, the coupled model with water and concrete solid in which the fracture mechanics was introduced was developed and then the analytical estimation for the fracture energy, which is, defined the effective stress considering the effect of pore water pressure was performed. In the experimental estimation, the effect of pore water pressure on the fracture pattern of concrete was estimated and then the experimental estimation for the fracture energy of concrete in which the pore water pressure occur was performed.