

損傷パラメータを用いた劣化モルタルの力学特性評価手法

Evaluation method for mechanical properties of degraded mortar using damage parameter

山本清仁*・小林晃**・青山咸康***

Kiyohito Yamamoto, Akira Kobayashi, and Shigeyasu Aoyama

*正会員 京都大学助教 大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

**正会員 京都大学准教授 大学院農学研究科 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

***正会員 石川県立大学教授 生物資源環境学部 (〒921-8836 石川県石川郡野々市町末松1丁目308番地)

The change in mechanical characteristics of mortar due to degradation was investigated. Degraded specimens were prepared by mixing expanded polystyrene (EPS) beads with mortar, and sound specimens include no beads. These EPS beads are very soft compared with mortar; they have a diameter of 0.22 cm and a density of 0.03 g/cm³. Uniaxial compression test and a splitting test were carried out with these specimens. The mechanical behaviors are investigated on the basis of the differences between each type of material (degraded and sound), load (monotonic and cyclic), and failure (compression and splitting). The stress-strain relationship was examined, by which the damage parameters are determined.

Key Words: mortar, EPS beads, uniaxial compression test, splitting test

1. はじめに

日本の農業従事者数は減少傾向にあり、国内の食糧生産は減少していくことが予想される。農業水利構造物の維持管理は、農業従事者の負担によるところが大きいので、今後放置される水利構造物が増加する可能性がある。現状では深刻な事態は考え難いが、輸入食糧が不足して国内での増産が必要となった場合、放置されていた水利施設は使用不能になり、新規に建設する事態になることも予想される。そのような心配がないにしても、経済的な食糧生産を行うためには、既存の施設を大切に長期にわたり使用する工夫が必要である。既存の農業水利施設を維持して行くためには施設材料の劣化（損傷）を把握し、劣化度合いに応じた経済的な維持・改修を考える必要がある。

コンクリート材料の場合、ほとんどの劣化要因（中性化・塩害・凍結融解・化学的侵食）において部材表面にひび割れが生じてから著しく劣化（強度低下・脆性化）が進行する¹⁾。表面に亀裂が現れることを破壊として捉えると、表面に亀裂が確認される以前に材料内部では微小な亀裂が進展している²⁾と推察される。また、岩石（凝灰岩）の場合、凍結融解によって岩石内部の亀裂の量や幅が減少すると強度が増加して脆性化が低下する現象が起こることが確認されている³⁾。このように、脆性材料の破壊特性は内部の亀裂挙動と密接な関係があると考えられる。

脆性材料内部で進展する亀裂は破壊直前まで材料表面に現れず、破壊後に亀裂を視認することができる。この破壊が小規模な場合、表面に現れた亀裂の観察より材料の劣化状態を判断して対策を講じることができるが、大規模になると予測困難なコンクリートや岩塊の崩落事故⁴⁾に結び

付くと考えられる。よって、維持管理において、劣化が視認できる以前に材料内部の亀裂挙動を把握し、それがもたらす力学的影響を推定することは重要な課題の一つであると考えられる。

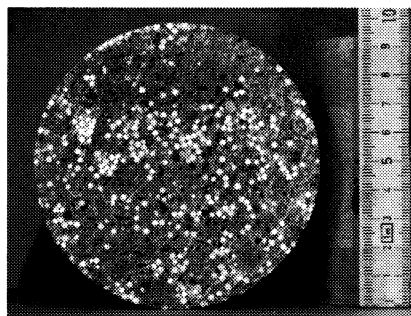
本論では、モルタル内部の空隙量が力学特性に与える影響を把握し、空隙量の増加による力学的な劣化と損傷パラメータの変化を比較することにより、モルタルの劣化指標を検討する。モルタルの空隙量増加をEPS（発泡スチロール）ビーズを混ぜることにより模擬するが、この手法はリサイクル材利用の研究^{5,6)}において本論とは別な目的により行われている。その実用化のための力学特性の把握においては、共通する面があると考えているが、ここではモルタル劣化指標の検討を主題として考察を行う。まず、劣化試料と供試体作製方法について説明する。次に、強度試験方法について述べ、変形特性を考察する際に用いる損傷パラメータについて説明する。最後に、強度試験結果と試験結果より求めた損傷パラメータを用いて、劣化供試体と健全供試体の変形特性について比較を行い、モルタルの劣化指標について検討する。

2. 供試体

一軸圧縮試験および超音波計測のために直径 5.00 ± 0.01cm 高さ 9.60 ± 0.37cm の円柱モルタル供試体を作製した。また、割裂引張試験のために直径 10cm 高さ 20cm の円柱モルタルを切断し、直径 10.02 ± 0.01cm 高さ 9.10 ± 0.26cm の円柱モルタル供試体を作製した。モルタルの配合を表-1に示す。14日以上水中養生を行い、その後、端面は切断機で平滑に整形し、空気中に放置した。

表-1 配合表

水セメント比 (%)	50
水 (kg/m ³)	284
セメント (kg/m ³)	568
細骨材 (kg/m ³)	1421
単位容積質量 (g/cm ³)	2.27

図-1 劣化供試体 (割裂引張試験用) ⁷⁾

EPS ビーズ (発泡ビーズ) を用いて供試体の内部に球形の弱部を分布させた。この EPS ビーズは、寝具の枕やクッションに利用されるもので、指先で潰すことができ、柔軟性に富む球形の材料である。画像計測により求めたビーズの直径は $0.220 \pm 0.045 \text{ cm}$ であり、質量測定より密度は 0.030 g/cm^3 と求められた。モルタル打設時に、1つの型枠に入れる量の未硬化モルタルをビーズの容積を考慮して取り分け、そこに1ℓ当たり2.55gおよび5.09gのEPSビーズを投入し、ビーズを潰さないように小型のシャベルで混ぜて型枠に流し込んだ。図-1のように、ビーズはランダムに分布しており、円形を保っている。ビーズの分布に偏りがある場合、著しい強度低下や偏心荷重による座屈が起きる。ここでは、著しい強度低下や偏心荷重を起こさない供試体についての結果を示すこととする。EPSビーズを混ぜない健全供試体と2種類のEPSビーズ混入供試体 (劣化供試体) の3パターンについて、試験および計測を行った。

3. 強度試験

圧縮試験機で載荷される供試体のひずみはひずみゲージで、載荷重はロードセルで計測した。ひずみゲージとロードセルはひずみ計測用アンプにつなぎ、アンプより出力される電圧を記録した。劣化および健全供試体について一軸圧縮試験と割裂引張試験を実施した。両試験では単調載荷と繰り返し載荷を行った。

3.1 一軸圧縮試験

長さ30mmのひずみゲージ (共和電業製: KFG ゲージ) を図-2(a)のように供試体中央に貼り付けて (同製: CC-35 接着剤) 一軸圧縮試験を行った。健全供試体は4本、EPSビーズ含有量2.55g/ℓ供試体 (2.55g 劣化供試体) とEPSビーズ含有量5.09g/ℓ供試体 (5.09g 劣化供試体) はそれぞれ3本用意した。単調載荷での軸ひずみ速度は11.4~19.0

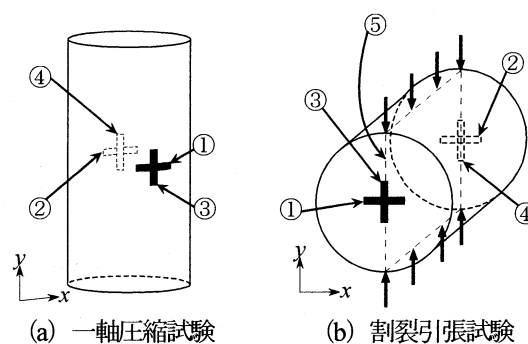


図-2 ひずみゲージの配置

$\mu/\text{sec.}$, 軸圧縮応力速度は214~375kPa/sec.である。試験直前の質量測定による含水比は5.1~9.5%である。試験結果より、圧縮割線弾性係数 E_{50}° , 圧縮割線ポアソン比 ν_{50}° , 圧縮強度 f_c , 最大応力時軸ひずみ ϵ_{amax} および最大体積ひずみ ϵ_{vmax} を求めた。ここで、 E_{50}° と ν_{50}° は圧縮強度50%時の応力とひずみより求めた。体積ひずみは平均軸ひずみ (図-2(a)③④の平均) に平均周ひずみ (図-2(a)①②の平均) の2倍したものを足して求めた。

3.2 割裂引張試験

長さ10mmのひずみゲージを図-2(b)のように供試体端面に設置し、割裂引張試験を行った。健全供試体、2.55g劣化供試体および5.09g劣化供試体をそれぞれ3本ずつ用意した。ここで用いる供試体は、ゲージの設置箇所にビーズによる大きな凹凸がないものであり、気泡による比較的小さな凹凸部分がその設置箇所にある場合は、そこに接着剤を満たしてゲージを貼り付けた。単調載荷における縦ひずみ速度は1.7~5.1 $\mu/\text{sec.}$, 引張応力速度は13~36kPa/sec.である。試験時含水比は7.5~13.7%である。試験結果より、引張強度 f_t と最大応力時縦ひずみ ϵ_{vmax} を求めた。圧縮を正とし、引張強度の算出には次式を用いた。

$$f_t = -\frac{2P}{\pi dl} \quad (1)$$

ここで応力の単位はPaである。また、 P (N) は最大荷重、 l (m) は供試体の奥行き方向の長さ、 d (m) は直径である。式(1)の P に荷重を代入したものを引張応力 σ_x とする。

引張弾性係数 E' と引張割線ポアソン比 ν' は、ひずみゲージ上の平均応力と平面応力の応力ひずみ関係より算出した。平均応力は、線形弾性体に線荷重が作用した場合 (図-2(b)) を仮定し、その応力分布⁸⁾より次式のようになる。

$$(\sigma_y)_{x=0} = 19.2 \frac{P}{l}, (\sigma_x)_{x=0} = -6.37 \frac{P}{l} \quad (2a)$$

$$(\sigma_x)_{y=0} = -6.28 \frac{P}{l}, (\sigma_y)_{y=0} = 18.9 \frac{P}{l} \quad (2b)$$

ここで、圧縮は正である。式中の各定数の有効数字はお桁として、全供試体の計算において直径を $d=0.100\text{m}$ とした。 $(\sigma_y)_{x=0}$ と $(\sigma_x)_{x=0}$ の $x=0$ は、縦ひずみゲージ上 (図-2(b) ③④) の応力を示し、 σ_y は縦方向応力、 σ_x は横方向応力を示す。また、 $(\sigma_x)_{x=0}$ は引張応力 σ_x と等しい。同様に $(\sigma_y)_{y=0}$ と $(\sigma_x)_{y=0}$

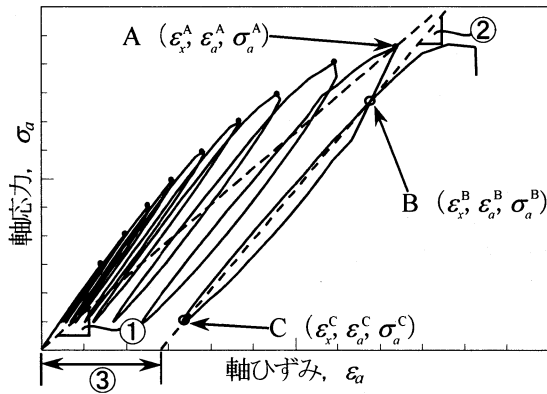


図-3 繰返し载荷の概要

は、横ひずみゲージ上 (図-2 (b) ①②) の応力である。そして、平面応力の応力ひずみ関係は次式で表せる。

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E^t} \left\{ (\sigma_x)_{y=0} - \nu^t (\sigma_y)_{y=0} \right\} \quad (3a)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E^t} \left\{ (\sigma_y)_{x=0} - \nu^t (\sigma_x)_{x=0} \right\} \quad (3b)$$

ε_x は横ひずみ, ε_y は縦ひずみである。式 (2) を連立させ、直径0.100mを考慮すると引張弾性係数および引張ポアソン比はそれぞれ次式のように求められる。

$$E^t = \frac{323P}{(6.37\varepsilon_x + 18.9\varepsilon_y)l} \quad (4)$$

$$\nu^t = -\frac{19.2\varepsilon_x + 6.28\varepsilon_y}{6.37\varepsilon_x + 18.9\varepsilon_y} \quad (5)$$

3.3 繰返し载荷

除荷時の応力ひずみ挙動を把握するために繰返し载荷を一軸圧縮試験と割裂引張試験で行った。各試験において、健全供試体、2.55g劣化供試体および5.09g劣化供試体をそれぞれ3本ずつ用意した。繰返し载荷では、残留ひずみ、等価弾性係数および等価ポアソン比を求めた。一軸圧縮試験の軸ひずみ速度は11.4~21.0μ/sec., 軸圧縮応力速度は142~508kPa/sec., 試験時含水比は5.5~9.6%である。また、割裂引張試験の縦ひずみ速度は1.8~5.5 μ/sec., 引張応力速度は17~32kPa/sec.である。

一軸圧縮試験の場合、単調载荷で求めた点Aと原点の勾配 (図-3①) である割線弾性係数に対して、圧縮等価弾性係数 E^{eq} を求める。 E^{eq} は図-3②で示される点Bと点Cの勾配として次式で示される。

$$E^{eq} = \frac{\sigma_a^B - \sigma_a^C}{\varepsilon_a^B - \varepsilon_a^C} = \frac{\dot{\sigma}_a}{\dot{\varepsilon}_a} \quad (6)$$

また、圧縮等価ポアソン比 ν^{eq} は次式より求めた。

$$\nu^{eq} = \frac{\varepsilon_x^B - \varepsilon_x^C}{\varepsilon_a^B - \varepsilon_a^C} = \frac{\dot{\varepsilon}_x}{\dot{\varepsilon}_a} \quad (7)$$

そして、図-3③に相当する残留縦ひずみ ε_y^cr と残留横ひずみ ε_x^cr はそれぞれ次式から求められることとした。

$$\varepsilon_x^cr = \varepsilon_x^C - \frac{\dot{\varepsilon}_x}{\dot{\sigma}_a} \sigma_a^C \quad (8a)$$

$$\varepsilon_a^cr = \varepsilon_a^C - \frac{\dot{\varepsilon}_a}{\dot{\sigma}_a} \sigma_a^C \quad (8b)$$

式 (6) ~ (8) の値は図-3の点Aと対応するとして、等価弾性軸ひずみ ε_a^{eq} は、 ε_a^A より ε_a^cr を引いた値とする。また、等価弾性横ひずみ ε_x^{eq} についても同様である。

割裂引張試験の場合、引張等価ポアソン比 ν^{eq} は、式 (5) 右辺の ε_x を $\dot{\varepsilon}_x$ に、 ε_y を $\dot{\varepsilon}_y$ に変更する。また、引張等価弾性係数 E^{eq} も同様に式 (4) の右辺を変更し、点BのPから点BのPを引いたものを式 (4) のPに代入することにより求める。引張残留ひずみ ε^{cr} は式 (8) の軸応力を引張応力に変更し、右辺のひずみを求めたい方向のひずみに変更して求める。

4. 膨張性損傷モデル

载荷に伴う弾性係数の減少と膨張するひずみに着目し、単調载荷時の力学挙動の把握を行う。ここでは、実験結果の応力-ひずみ関係に膨張性損傷モデル⁹⁾を適用し、それにより得られる損傷パラメータより、劣化および健全供試体の力学挙動を把握する。

4.1 基本概念

材料内部の損傷が増加して応力伝達に有効な断面積が減少すると、見かけの弾性係数は減少し、大きなひずみが発生すると考えられる。この挙動を弾性係数の減少率である損傷変数 D を用いて表現するのが損傷力学¹⁰⁾である。また、本モデルで導入する膨張ひずみは、材料の変形にともなって増加する亀裂や間隙の量が等方に膨張する体積ひずみとして現れると仮定したひずみである。そして、過去の経験より大きな損傷共役力 (弾性エネルギー) を受けると損傷変数と膨張ひずみが発生し、それらの発生量は損傷共役力との関係により決定されるという仮定に基づき以下の式を定める。

弾性ひずみ ε_{ij}^e と材料内部の損傷が原因となる等方な膨張ひずみ ε_{ij}^v の和が全ひずみ ε_{ij} であると仮定する。ここで、膨張ひずみは正で、圧縮は正值とする。

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^v \quad (9)$$

等方な損傷進展について、全応力 σ_{ij} と全ひずみの関係は次式によって示される。

$$\sigma_{ij} = (1 - D) \left\{ \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \right\} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^v (3\lambda + 2\mu) \delta_{ij} \quad (10)$$

λ と μ はラーメ定数で、また、等方膨張による体積ひずみ ε_{kk}^v (膨張は負値) は $\varepsilon_{kk}^v = 3\varepsilon_{11}^v$ の関係がある。相当損傷共役力 Y_{eq} と ε_{kk}^v および Y_{eq} と D の関係を、それぞれ次式で表す。

$$Y_{eq} = K_v \left(-\frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^v \right)^{n_v} + B_v \quad (11)$$

$$Y_{eq} = K_d D^{n_d} + B_d \quad (12)$$

n_v と K_v は膨張ひずみの進展を規定する損傷パラメータであり、 n_d と K_d は損傷変数の進展を規定する損傷パラメ

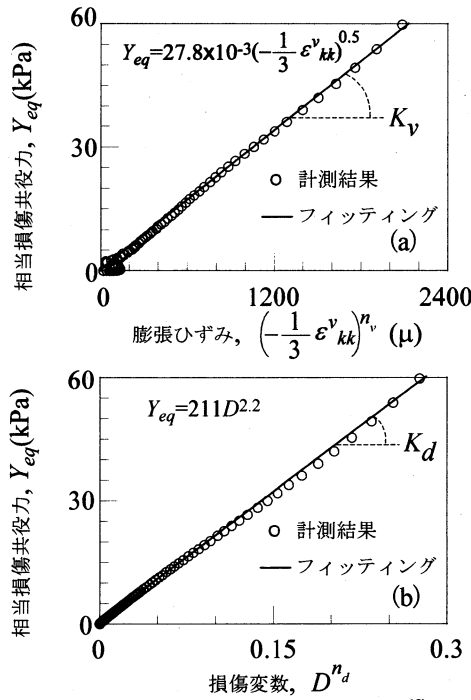


図-4 損傷パラメータ同定の概要¹²⁾

ータである。

損傷変数 D は Y_{eq} が初期損傷ポテンシャル B_0 より大きくなったときに発生する。この損傷規準¹¹⁾はポテンシャルの増加量 B とともに次式により示される。

$$F(Y_{ij}, B) = Y_{eq} - (B_0 + B) = 0 \quad (13)$$

また、膨張ひずみ ϵ_{kk}^v は、 Y_{eq} が初期膨張ポテンシャル B_0^v より大きくなったときに発生し、膨張規準を次式で表す。

$$F^v(Y_{ij}, B^v) = Y_{eq} - (B_0^v + B^v) = 0 \quad (14)$$

ここで、初期膨張ポテンシャルは B_0 と等しいとし、パラメータの同定においては $B_0^v = B_0 = 0$ とした。相当損傷共役力 Y_{eq} と損傷共役力 Y_{ij} は、次式のように表される。

$$Y_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} Y_{ij} Y_{ij}} \quad (15a)$$

$$Y_{ij} = -\frac{1}{2} (\lambda \epsilon_{kk}^e \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij}^e) \epsilon_{ij}^e \quad (i=1,2,3, j=1,2,3, \text{no sum.}) \quad (15b)$$

式 (15b) のラーメ定数を含む項は、次式で示される。

$$\sigma_{ij} = \lambda \epsilon_{kk}^e \delta_{ij} + 2\mu \epsilon_{ij}^e \quad (15c)$$

上式より、式 (15b) は応力と弾性ひずみの積であり、 $-Y_{ij}$ は弾性エネルギーと等価であることがわかる。

4.2 損傷パラメータの同定

損傷パラメータを同定する流れについて説明する。実験結果を式 (11), (12) にフィッティングすることで損傷パラメータを求めるが、载荷初期においては供試体に均一な分布荷重が作用せず、不安定なひずみ挙動が発生すると考えられるために、载荷が安定する载荷中期から供試体表面に巨視的な亀裂が現れる以前の最大応力までの応力-ひずみ関係についてフィッティングを行う。また、応力分布において供試体ごとに変化する(供試体固有の)不均一な部分は、载荷面直下が著しく、载荷面より離れるほど穏

やかになると考えられる。よって、図-2のように载荷面より離れて配置されるひずみゲージの計測値は、一軸圧縮および割裂引張で仮定される応力分布の値に近いと考え、計測値を供試体の代表値として損傷パラメータの同定に用いることとする。

(1) 一軸圧縮試験

まず、膨張ひずみ ϵ_{kk}^v の計算を行う。軸ひずみと横ひずみの関係 ($\epsilon_{22}^e = -\nu_0 \epsilon_{11}^e$) と膨張ひずみの関係 ($3\epsilon_{11}^v = 3\epsilon_{22}^v = \epsilon_{kk}^v$) および式 (9) より次式が求められる。

$$\frac{1}{3} \epsilon_{kk}^v = \frac{\epsilon_x + \nu_0 \epsilon_a}{1 + \nu_0} \quad (16)$$

ここで、 ν_0 は初期ポアソン比、 ϵ_a は軸ひずみ、 ϵ_x は横ひずみである。次に、損傷変数 D は次式で評価する。

$$D = 1 - \frac{\sigma_a}{E_0 \epsilon_a^e} \quad (17)$$

ここで、 ϵ_a^e は式 (9) により求められる弾性軸ひずみ、 σ_a は軸応力、 E_0 は载荷過程で最大の割裂弾性係数とする。相当損傷共役力 Y_{eq} は一軸圧縮条件においては軸方向の損傷共役力 Y_{11} のみ考慮するので次式のようになる。

$$Y_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2} \sigma_{11} \epsilon_{11}^e \right)^2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(-\frac{1}{2} E_0 \epsilon_a^e \epsilon_a^e \right)^2} \quad (18)$$

式 (11), (12) のフィッティングの概要をそれぞれ図-4 (a), (b) に示す。膨張ひずみの進展を規定する損傷パラメータの同定は、図-4 (a) に示すグラフにおいてプロットが線形になるように n_v を決め、線形近似式より K_v を決定する。損傷変数 D に関する損傷パラメータもほぼ同様に決定する。

(2) 割裂引張試験

まず、膨張ひずみ ϵ_{kk}^v の計算を行う。式 (5) のひずみを弾性ひずみ ϵ^e に、ポアソン比を ν_0 に置き換えて、式 (9) を用いて整理すると次式が得られる。

$$\frac{1}{3} \epsilon_{kk}^v = \frac{\nu_0 (6.37 \epsilon_x + 18.9 \epsilon_y) + 19.2 \epsilon_x + 6.28 \epsilon_y}{25.5 + 25.3 \nu_0} \quad (19)$$

次に、損傷変数 D は、式 (4) から得る次式により求める。

$$D = 1 - \frac{323 P}{E_0 (6.37 \epsilon_x^e + 18.9 \epsilon_y^e) l} \quad (20)$$

ここで弾性ひずみは式 (9) より求める。そして、相当損傷共役力 Y_{eq} は、式 (15a) について平面応力条件を考慮すると、次式のようになる。

$$Y_{eq} = \sqrt{\frac{1}{2} (Y_{11} Y_{11} + Y_{22} Y_{22})} = \sqrt{\frac{1}{2} (Y_x^2 + Y_y^2)} \quad (21a)$$

ここで、 Y_x および Y_y はそれぞれ次式により求められる。

$$Y_x = -\frac{E_0 (\epsilon_x^e + \nu_0 \epsilon_y^e) \epsilon_x^e}{2(1 - \nu_0^2)} \quad (21b)$$

$$Y_y = -\frac{E_0 (\epsilon_y^e + \nu_0 \epsilon_x^e) \epsilon_y^e}{2(1 - \nu_0^2)} \quad (21c)$$

上式はそれぞれ次式の平面応力時の応力から導かれる。

$$\sigma_{11} = \sigma_x = -\frac{E_0 (\epsilon_x^e + \nu_0 \epsilon_y^e)}{1 - \nu_0^2} \quad (21d)$$

$$\sigma_{22} = \sigma_y = -\frac{E_0 (\epsilon_y^e + \nu_0 \epsilon_x^e)}{1 - \nu_0^2} \quad (21e)$$

4.3 損傷パラメータによる力学特性評価

式 (11), (12) について, $B_0^v = B_0 = 0$ を考慮して変形するとそれぞれ次式のようになる.

$$\frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^v = - \left(\frac{Y_{eq}}{K_v} \right)^{\frac{1}{n_v}} \quad (22)$$

$$D = \left(\frac{Y_{eq}}{K_d} \right)^{\frac{1}{n_d}} \quad (23)$$

上式からわかるように, 同値の Y_{eq} において K_v が小さいほど膨張量が大きくなり ($-\varepsilon_{kk}^v$ が大きくなり), K_d が小さいと弾性係数の減少が大きくなる (D が大きくなる). また, $D < 1$ であり $\varepsilon_{kk}^v \ll 1$ であるので, n_v と n_d が大きいほど, 膨張量および弾性係数の減少が大きくなる. よって, 損傷パラメータの評価において, k_d が小さく n_d が大きい場合は, 損傷しやすい材料であるといえる. また, k_v が小さく n_v が大きい場合は, 膨張しやすい材料と評価できる. そして, k_d と k_v の変化よりも n_d と n_v の変化が損傷変数と膨張ひずみに大きな影響を与えるので, 考察では n_d と n_v の変化に注目することとする.

5. 結果

5.1 力学定数

破壊供試体の写真を図-5 に示す. 図-5 (a) ①のように健全供試体では両端面にわたり上下に亀裂が発生しているが, 図-5 (a) ③の場合, 供試体中心部分の膨張により亀裂が発生していることが確認でき, 劣化供試体では破壊に伴う膨張が著しい. また, 図-5 (b) ①を見ると, 破断面は平滑であるが, 図-5 (b) ③では粗い凹凸が見られる. これは, ビーズにより骨材とセメントペーストの接着が阻害されること, ひずみ分布が不均一になることにより破断面が荒々しくなると考えられる.

一軸圧縮試験の結果を表-2 に, 割裂引張試験の結果を表-3 に示す. 表中の供試体名において左より1番目の文字は, 健全供試体 (I) と劣化供試体 (D) の区別を示し, 2番目は一軸圧縮試験 (C) と割裂引張試験 (T) を表す. 劣化供試体の場合, 3番目の数字が1のものは2.55g 劣化供試体を表し, 2のものは5.09g 劣化供試体を表す. ハイフンで囲まれる文字は, 単調載荷 (M) と繰り返し載荷 (C) の区別を表す. 表中の試験結果では, 材令, 空気量 (A), 密度 (ρ), 有効空隙率 (n), 吸水率 (Q) および含水比 (w) を示しており, 一軸圧縮試験においては圧縮強度 (f_c), 圧縮割線弾性係数 (E_{50}^c), 圧縮割線ポアソン比 (ν_{50}^c), 最大応力時軸ひずみ (ε_{amax}) および最大体積ひずみ (ε_{max}) を示している. 割裂引張試験では, 引張強度 (f_t), 引張割線弾性係数 (E_{50}^t), 引張圧縮割線ポアソン比 (ν_{50}^t) および最大応力時縦ひずみ (ε_{ymax}) を示している. 表中の含水比における「*」は欠測を示している. 湿潤密度は水中養生直後の供試体質量より求め, この値と配合表 (表-1) の密度より空気量を算出した. 乾燥密度, 吸水率およ

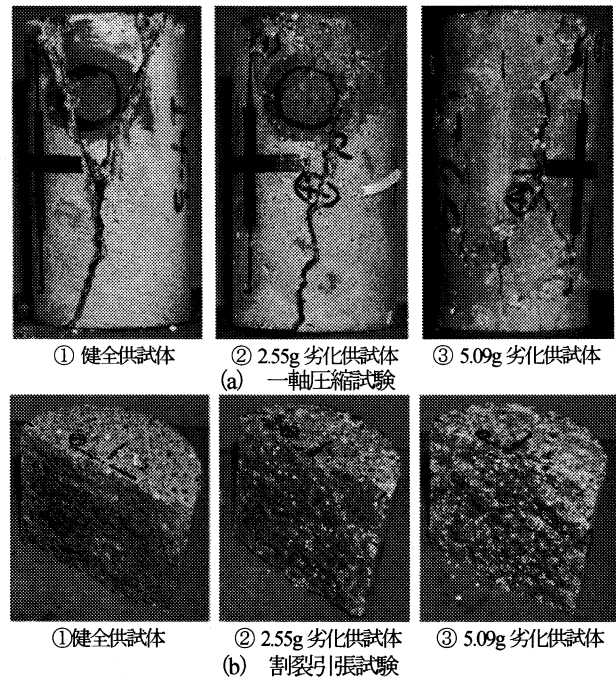


図-5 破壊供試体 (単調載荷) 7

び有効空隙率は, 強度試験終了後の供試体を7日間水中に浸漬させ, 水中重量と湿潤質量を測定し, 炉乾燥による乾燥質量を測定することにより求めた.

EPS ビーズ体積のみが空気に相当すると仮定した場合, 2.55g 劣化供試体の空気量は8.5%, 5.09g 劣化供試体では17.0%となるが, モルタル中に混入する空気量や供試体端面整形時に失うビーズ量等の影響を受けて供試体の空気量は一定していない. しかしながら, ビーズ混合量による3区分 (健全, 2.55g 劣化および5.09g 劣化) は, その空気量の違いを示すので, ここではこの区分で比較検討を行うこととする. また, ビーズ量の増加に伴い供試体の有効空隙率および吸水率が減少している. これは圧力勾配を与えないで飽和させているために EPS ビーズ内部に水が浸入しないためであると考えられる.

表-2, 3 より圧縮と引張ともにビーズ量の増加に伴い強度 (f_c, f_t) および割線弾性係数 (E_{50}^c, E_{50}^t) が減少している. また, 一軸圧縮試験結果 (表-2) の最大体積ひずみ (ε_{max}) および最大応力時軸ひずみ (ε_{amax}) は, ビーズの増加により減少するが, 割線ポアソン比 (ν_{50}^c) の変化は確認できない. また, 表-3 の引張試験結果における最大応力時縦ひずみ (ε_{ymax}) の変化も認められない.

応力分布を仮定して力学定数を算出しているため, 一概に比較はできないが, 圧縮と引張の比較において, 弾性係数とポアソン比は引張のものが大きい傾向にあるが, 弾性係数についてはどちらにおいても概ね同程度である. 割裂引張の場合, 5.09g 劣化供試体のポアソン比 (表-3 の ν_{50}^t) が大きなものとなっている. よって, 割裂引張においては, 空隙増加により体積変化を起こしにくくなると考えられる. また, 表-2, 3 において単調と繰り返しの載荷形式の違いによる力学定数の変化は認められない.

表-2 試験結果一覧 (一軸圧縮試験)

	材令 (日)	A (%)	ρ (g/cm ³) 湿潤 乾燥		n (%)	Q (%)	w (%)	f_c (MPa)	E_{50}^c (GPa)	ν_{50}^c	$\epsilon_{\max}$ (μ)	$\epsilon_{10\max}$ (μ)
IC-M-1	29	0.4	2.28	2.07	21.4	10.4	7.1	56.0	27.1	0.202	3071	1439
IC-M-2	29	0.3	2.26	2.04	22.6	11.1	8.3	53.9	29.0	0.224	2621	1273
IC-M-3	29	0.8	2.26	2.04	22.3	10.9	7.9	56.6	24.9	0.199	3255	1488
IC-M-4	30	1.1	2.28	2.06	21.4	10.4	7.6	47.3	28.5	0.205	2196	1089
DC1-M-1	29	9.9	2.11	1.92	19.3	10.1	5.3	36.6	22.4	0.202	2108	1037
DC1-M-2	29	5.6	2.12	1.92	20.3	10.6	9.5	43.3	23.6	0.215	2497	1026
DC1-M-3	30	6.4	2.13	1.95	18.5	9.5	6.9	30.7	25.0	0.220	1543	793
DC2-M-1	30	13.6	2.00	1.82	18.9	10.4	7.0	22.6	21.1	0.212	1494	721
DC2-M-2	29	14.3	1.99	1.82	17.3	9.5	5.1	24.8	17.5	0.209	1949	792
DC2-M-3	29	16.0	1.94	1.78	16.9	9.5	5.6	18.8	13.8	0.175	2380	921
IC-C-1	33	0.8	2.27	2.05	22.1	10.8	8.1	53.9	26.6	0.194	3615	1889
IC-C-2	45	0.0	2.28	2.08	19.8	9.5	*	51.7	28.1	0.209	2540	1189
IC-C-3	34	0.7	2.27	2.05	22.5	11.0	7.4	55.0	25.8	0.193	3274	1635
DC1-C-1	44	5.7	2.17	1.97	19.7	10.0	*	41.9	27.0	0.221	2155	1001
DC1-C-2	32	7.1	2.11	1.90	20.1	10.6	9.6	36.6	24.4	0.200	1987	1054
DC1-C-3	34	10.1	2.07	1.88	19.1	10.1	7.7	33.8	19.6	0.232	2172	944
DC2-C-1	32	13.8	2.00	1.82	18.3	10.1	6.6	25.3	17.9	0.194	2405	1168
DC2-C-2	42	17.7	1.94	1.76	17.8	10.1	*	18.9	13.2	0.226	1841	642
DC2-C-3	33	15.9	1.95	1.78	17.1	9.6	5.5	17.7	15.9	0.183	1724	620

表-3 試験結果一覧 (割裂引張試験)

	材令 (日)	A (%)	ρ (g/cm ³) 湿潤 乾燥		n (%)	Q (%)	w (%)	f_t (MPa)	E_{50}^t (GPa)	ν_{50}^t (μ)	$\epsilon_{\max}$ (μ)
IT-M-1	29	1.8	2.21	2.00	21.2	10.6	9.8	3.56	30.5	0.311	398
IT-M-2	29	0.6	2.24	2.03	21.1	10.4	9.6	4.04	32.3	0.307	431
IT-M-3	30	0.0	2.27	2.07	20.3	9.8	9.2	3.72	37.8	0.361	345
DT1-M-1	29	7.9	2.09	1.91	18.3	9.6	7.9	3.01	28.4	0.349	381
DT1-M-2	29	11.6	2.00	1.81	18.3	10.1	13.7	2.74	20.1	0.274	484
DT1-M-3	40	9.0	2.07	1.88	19.1	10.2	7.5	3.50	23.4	0.176	451
DT2-M-1	30	13.9	1.96	1.78	17.2	9.7	8.3	2.31	21.6	0.379	412
DT2-M-2	29	17.0	1.86	1.70	16.7	9.9	9.6	2.20	14.7	0.201	467
DT2-M-3	39	18.5	1.82	1.65	17.5	10.7	10.6	2.45	26.0	0.461	345
IT-C-1	42	0.8	2.25	2.05	20.7	10.1	8.7	4.89	29.7	0.261	548
IT-C-2	41	1.8	2.23	2.01	21.4	10.7	9.3	3.74	26.5	0.254	424
IT-C-3	35	0.4	2.24	2.04	20.7	10.2	9.4	4.13	30.6	0.296	443
DT1-C-1	35	11.5	2.01	1.82	18.7	10.3	4.1	2.98	25.6	0.360	390
DT1-C-2	41	12.0	1.99	1.81	18.3	10.1	10.5	2.97	19.2	0.220	489
DT1-C-3	41	8.0	2.10	1.91	18.8	9.8	3.5	2.93	21.0	0.132	416
DT2-C-1	34	17.4	1.89	1.71	17.7	10.3	7.7	2.36	27.1	0.452	287
DT2-C-2	41	15.2	1.93	1.75	17.8	10.2	*	2.19	20.5	0.407	374
DT2-C-3	40	19.8	1.84	1.68	16.1	9.6	7.0	2.36	16.7	0.309	566

5.2 載荷に伴う力学定数の挙動

一軸圧縮試験における載荷初期より破壊までの力学挙動について、単調載荷のものを図-6に、繰返し載荷のものを図-7に示す。また、割裂引張試験における単調載荷のものを図-8に、繰返し載荷のものを図-9に示す。ここで、横軸のひずみは最大応力時のひずみ値で割ることにより正規化をしている。繰返し載荷のグラフでは、載荷と除荷過程の曲線を描くと大変煩雑となるので、各載荷ステップで応力が最大となった時の値（一軸圧縮の場合、図-3●印）のみを示している。そして、ポアソン比について、各供試体パターンにおける典型例を図-10に示す。

応力およびひずみ挙動について、図-6(a)より、劣化供試体の中では最大応力付近を維持し、軸ひずみが増加する延性的な破壊を示すもの(DC1-M-3, DC2-M-3)がある。また、図-6(b)より、全体的に劣化供試体の体積ひずみ収縮量は小さい。これは、軸ひずみの増加に伴う劣化供試体の体積膨張量が大きいためであると考えられ、繰返し載荷(図-7(b))においても同様である。このことは前述の劣化供試体の破壊後写真(図-5(a)③)の考察と整合する。図-8の割裂引張試験での劣化供試体の挙動に

おいて、正規化縦ひずみレベルが0.8を超えた付近で乱れているものがあり、一部の劣化供試体においては局所的な破壊が起こっていると予測される。繰返し載荷での5.09g劣化供試体の横ひずみ(図-9(b))も急激に増加しており、部分的な破壊が起きていると考えられる。

弾性係数とポアソン比の挙動について、図-6(c)より、全供試体において圧縮載荷に伴い弾性係数は減少し、弾性ひずみより求めた弾性係数(図-7(c))においても同様に減少している。供試体間の比較において、2.55g劣化供試体から5.09g劣化供試体へと弾性係数は大きく減少している。また、ポアソン比の挙動(図-6, 7(d), 図-10(I), (II))を見ると、ひずみレベル0.6を超えたところで5.09g劣化供試体のポアソン比の増加が著しくなっている。このことより、2.55g劣化供試体の力学挙動は健全なものと同様な変形を呈するが、5.09g劣化供試体では著しい変形を起こす脆弱な材料となっているといえる。また、割裂引張において、弾性係数の挙動(図-8, 9(c))は、載荷初期と破壊近傍を除けば、平滑な挙動で一定の値となっている。EPSビーズの混入により、健全供試体と比べ劣化供試体の弾性係数は減少しているが、ばらつきが大きく、ビー

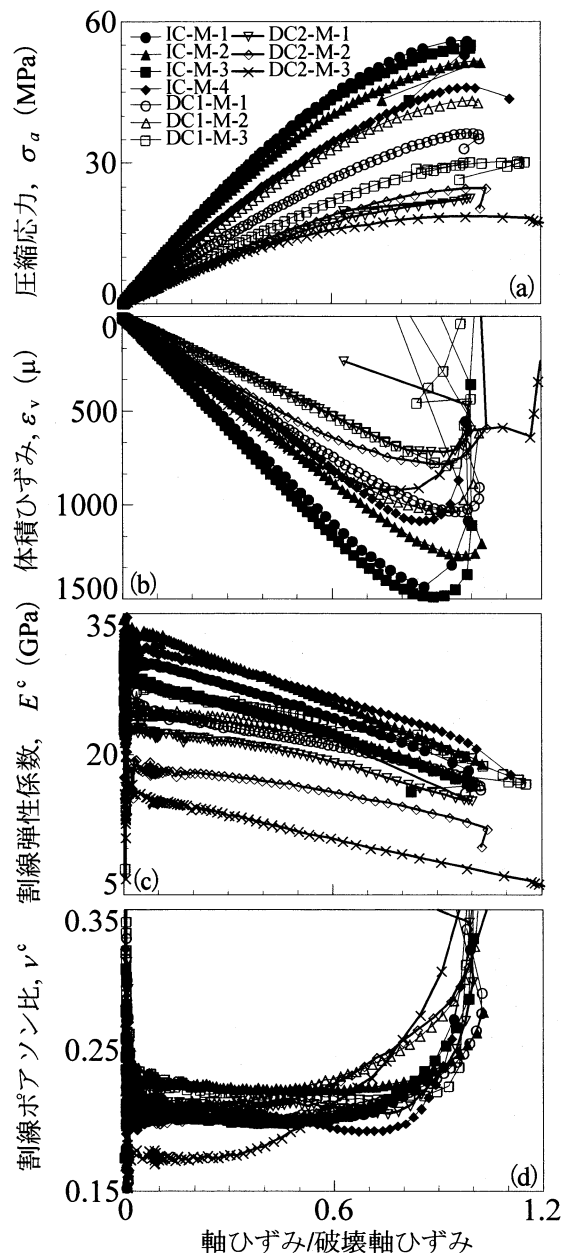


図-6 力学定数-軸ひずみ関係
(一軸圧縮試験・単調载荷)

ズ量の多い 5.09g 劣化供試体の弾性係数が 2.55g 劣化供試体のものより大きい場合がある。そして、ポアソン比の挙動 (図-8, 9 (d), 図-10 (III), (IV)) において、健全供試体より 2.55g 劣化供試体のポアソン比が小さいが、逆に 5.09g 劣化供試体のポアソン比は大きい。ビーズ混入により供試体内に仮定した応力分布とは異なる不均一な分布が生じていることが予想され、そのことがこのようなばらつきを発生させると考えられるが、定性的に議論すれば、ポアソン比の増加は膨張量の増加と関係があり、5.09g 劣化供試体では载荷に伴う亀裂発生が著しいために、ポアソン比が増加したと考えられる。

5.3 载荷に伴う弾性ひずみと残留ひずみの挙動

一軸圧縮試験における繰り返し载荷により求めた弾性ひずみおよび残留ひずみ-軸ひずみ関係を図-11 に示す。

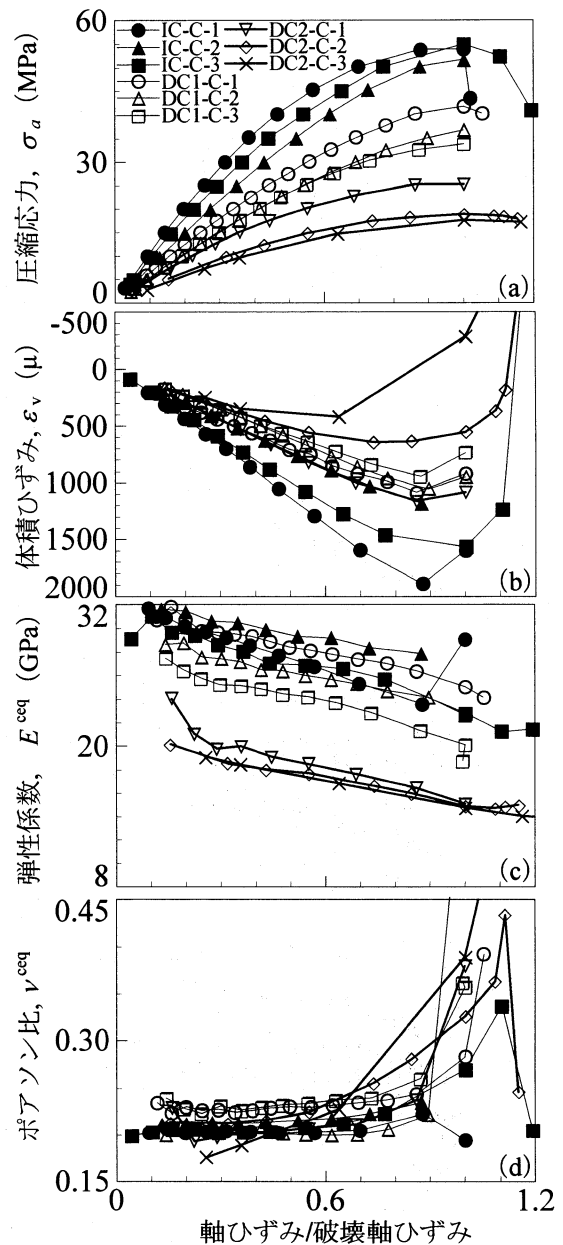


図-7 力学定数-軸ひずみ関係
(一軸圧縮試験・繰り返し载荷)

また、同様に割裂引張試験における縦ひずみとの関係を図-12 に示す。

一軸圧縮において、弾性軸ひずみおよび弾性横ひずみ (図-11 (a), (b)) は、EPS ビーズの増加に伴い減少している。しかしながら、残留ひずみ (図-11 (c), (d)) においては、2.55g 劣化供試体では減少しているが、5.09g 劣化供試体では健全供試体のレベルには達しないながらも増加している。2.55g 劣化供試体においては、健全供試体と同程度の残留ひずみが発生したとしても、EPS ビーズが増加することにより破壊軸ひずみ (表-2) が減少するので、残留ひずみは見掛け上減少すると推定される。そして、ビーズ量がさらに多くなると、モルタルにかかる応力が増加し、供試体内部に発生する亀裂量が急激に増加すると考えられ、5.09g 劣化供試体の残留ひずみは大きくなると推定される。

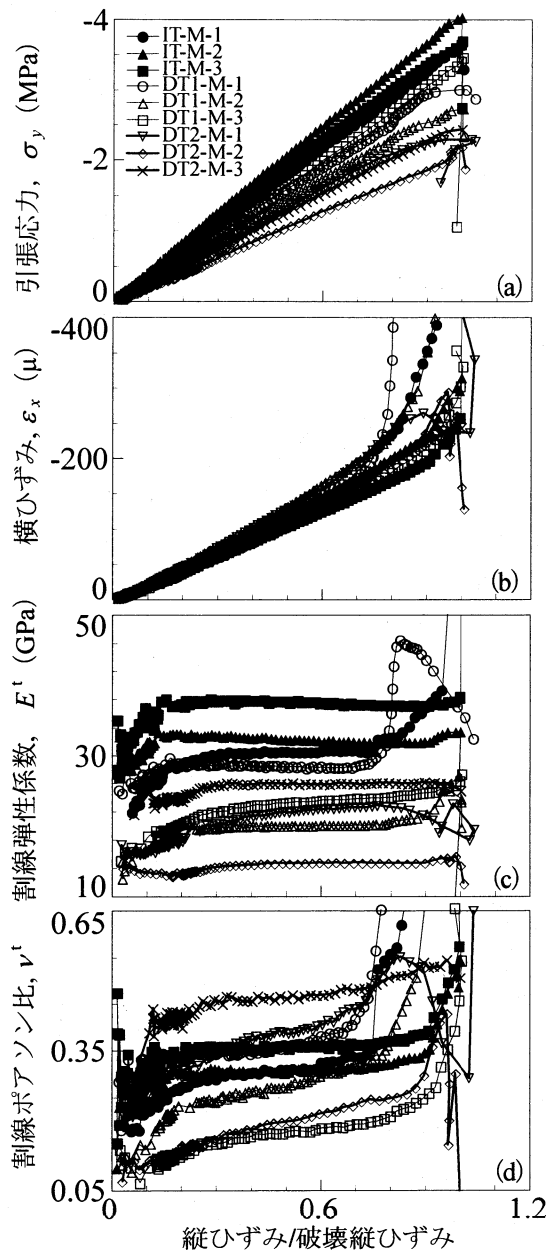


図-8 力学定数-縦ひずみ関係
(割裂引張試験・単調載荷)

割裂引張において、ビーズ混入の有無による弾性ひずみの違いは認められない。残留ひずみにおいては、ひずみが非常に小さいので安定した計測結果を得られなかったが、5.09g 劣化供試体の残留ひずみが若干大きい傾向が認められる。

圧縮と引張を比べると、圧縮の残留ひずみは大きく、全ひずみに占める割合が大きいものに対して、引張の残留ひずみの大きさおよび全ひずみに占める割合は極めて小さい。また、残留横ひずみ(図-11, 12 (d))が破壊近傍で大きな変化を示す。これは、供試体内部の亀裂が荷重方向と垂直に体積を増加させるためであると考えられ、このことは、破壊の監視において荷重と垂直方向の変位を計測することの有効性を示唆していると考えられる。

以上より、材料内部の亀裂と体積膨張挙動は密接に関係していると推察されるが、その因果関係は複雑であり、実

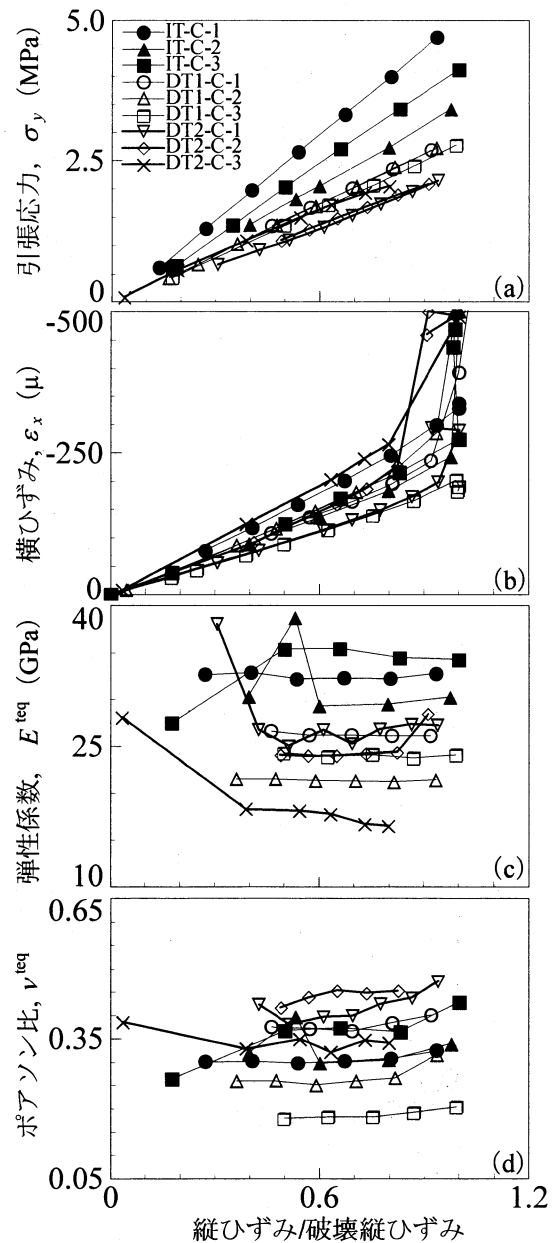


図-9 力学定数-縦ひずみ関係
(割裂引張試験・繰り返し載荷)

際の材料内部の応力分布や亀裂挙動が把握できないので、不明なところが多い。また、力学モデルの段階で、亀裂増加による膨張方向を考慮すると、パラメータが増加し、力学特性の判断が難しくなるので、ここでは亀裂挙動が単純に膨張ひずみと関係していると仮定し、次節で述べる損傷パラメータを用いて劣化指標の検討を行うこととする。

5.4 損傷パラメータの変化

単調載荷の一軸圧縮試験結果より求めた損傷パラメータを表-4に、割裂引張試験より求めたものを表-5に示す。損傷変数の増加は、図-6, 8 (c) の弾性係数の減少と対応しており、膨張ひずみの増加は図-6, 8 (d) のポアソン比の増加と対応している。よって、表-4, 5 の損傷パラメータはそれぞれ図-6, 8 の挙動を数値化したものと考えることができる。

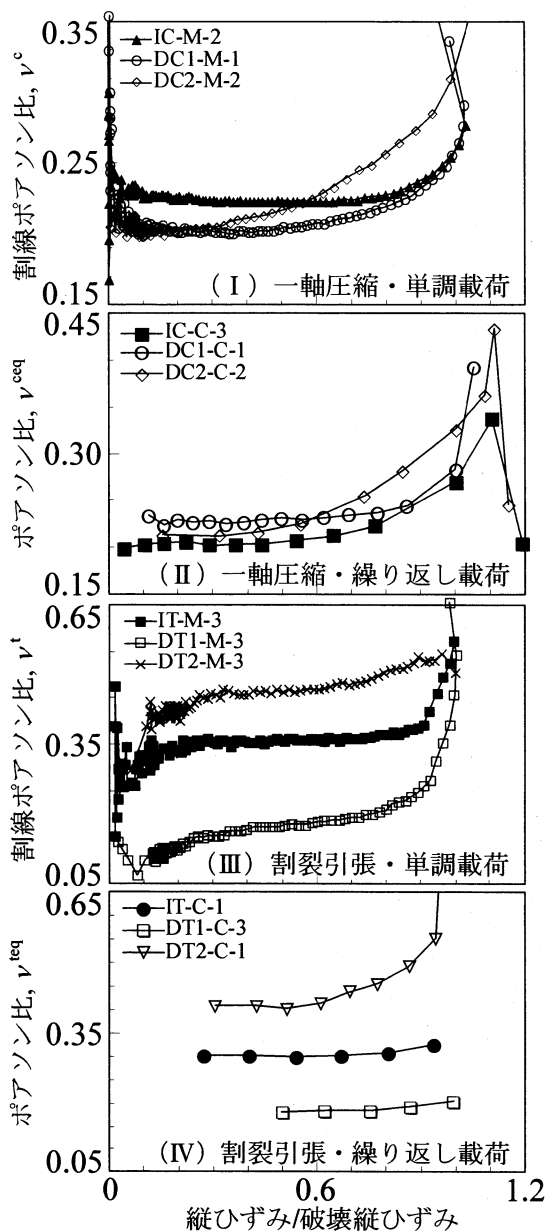


図-10 ポアソン比-縦ひずみ関係

表-4, 5 の E_0 は, 表-2, 3 の弾性係数より若干大きく, ν_0 は小さいが, これは, 損傷パラメータの E_0 と ν_0 を荷重初期の値としたためである. EPS ビーズの増加に伴う E_0 と ν_0 の傾向は表-2, 3 と同様である.

一軸圧縮について, n_d はビーズが増加するに従い減少する傾向にあり, 荷重に伴う弾性係数の減少は穏やかになっている. 一方, n_v は増加しており, ビーズ増加により膨張ひずみの発生量が大きい.

割裂引張において, ビーズ増加により n_d と n_v はともに増加しているので, 空隙が増加すると引張においては弾性係数の低下および体積膨張が著しくなる.

損傷パラメータより圧縮と引張を比較すると, 引張ではビーズ量が増加すると, 弾性係数の減少と体積膨張が急激に増加する突然な破壊になりやすい. また, ビーズ量増加に伴う膨張ひずみの増加が圧縮と引張で共通しており, 空隙量増加による劣化指標に n_v を用いることが有効であると考えられる.

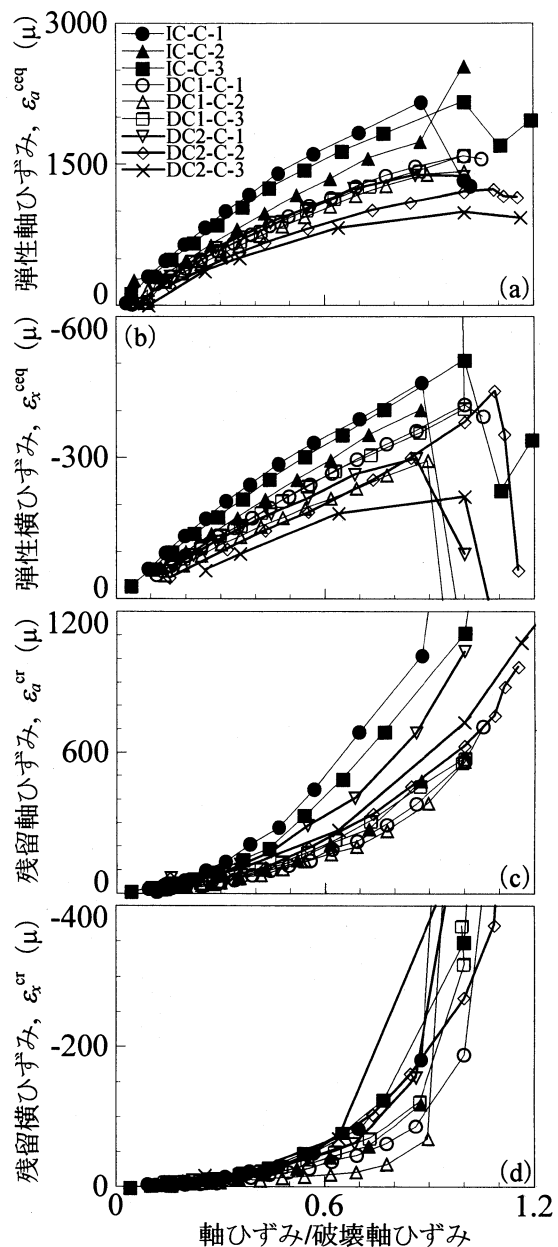


図-11 弾性および残留ひずみ-軸ひずみ関係 (一軸圧縮試験・繰り返し荷重)

6. まとめ

直径 0.22cm の EPS ビーズをモルタルに混ぜて, 劣化供試体を作製した. ビーズ混入量は, 2.55g/l と 5.09g/l の 2 パターンである. それら劣化供試体とビーズ未混入の健全供試体について, 単調荷重と繰り返し荷重の一軸圧縮試験および割裂引張試験を行った. 試験結果より力学定数と損傷パラメータを求め, 繰り返し荷重においては弾性ひずみと残留ひずみを求めた. その結果, 以下の知見が得られた.

- 1) 一軸圧縮試験結果より, ビーズ混入により強度は確実に減少するが, ビーズ混入量 2.55g/l のモルタル供試体の弾性係数とポアソン比の挙動は健全供試体と似た傾向がある. しかし, ビーズ混入量 5.09g/l では脆弱な材料となる.

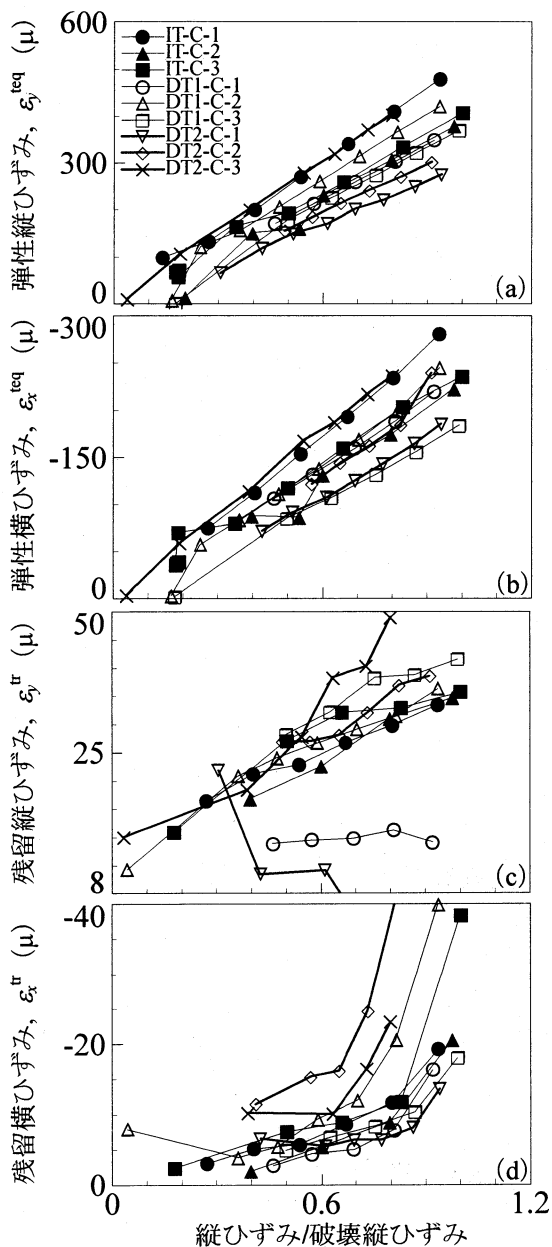


図-12 弾性および残留ひずみ-縦ひずみ関係
(割裂引張試験・繰り返し載荷)

- 2) 繰り返し載荷の試験結果より、圧縮の残留ひずみは大きく、全ひずみに占める割合が大きいものに対して、引張の残留ひずみの大きさおよび全ひずみに占める割合は極めて小さい。
- 3) 荷重方向と垂直な変位挙動が破壊時に顕著となる。このことは、その観測の有効性を示唆している。
- 4) 損傷パラメータより、割裂引張においてはピーズ量が増加すると、突然な破壊になりやすい。また、空隙量増加による劣化指標に膨張ひずみの発生度合いを示す n_v を用いることが有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会関西支部：コンクリート構造の設計・施工・維持管理の基本（施工・維持管理編），土木学会関西

表-4 損傷パラメータ（一軸圧縮試験）

	E_0 (GPa)	ν_0	K_d (kPa)	n_d	K_v (MPa)	n_v
IC-M-1	30.0	0.202	433	1.55	1.4	0.30
IC-M-2	32.3	0.222	328	1.55	1.4	0.30
IC-M-3	27.7	0.198	437	1.55	1.4	0.30
IC-M-4	31.2	0.189	278	1.50	0.48	0.24
DC1-M-1	24.7	0.200	197	1.40	1.7	0.40
DC1-M-2	25.9	0.217	261	1.40	1.9	0.40
DC1-M-3	26.8	0.199	115	1.30	205	0.90
DC2-M-1	22.3	0.200	79.2	1.30	0.20	0.25
DC2-M-2	18.7	0.207	119	1.35	2.2	0.50
DC2-M-3	15.4	0.164	96.8	1.75	11	0.70

表-5 損傷パラメータ（割裂引張試験）

	E_0 (GPa)	ν_0	K_d (kPa)	n_d	K_v (MPa)	n_v
IT-M-1	30.3	0.298	9.90	0.65	0.33	0.50
IT-M-2	32.8	0.312	10.6	0.65	0.017	0.20
IT-M-3	37.7	0.353	9.35	0.65	0.023	0.25
DT1-M-1	28.9	0.352	5.20	0.70	0.024	0.30
DT1-M-2	20.3	0.267	5.90	0.65	0.029	0.30
DT1-M-3	23.8	0.187	9.50	0.50	0.023	0.25
DT2-M-1	21.8	0.264	4.89	0.80	3.3	0.80
DT2-M-2	14.4	0.136	8.50	0.95	0.27	0.55
DT2-M-3	26.3	0.462	12.7	0.90	0.088	0.40

支部，pp.1-24，2003。

- 2) 吉本彰：コンクリートの変形と破壊，学献社 pp.23-47，1990。
- 3) 山本清仁・小林晃・藤居宏一：凍結融解による岩石の力学定数の変化，土木学会論文集，III-53，pp.35-44，2000。
- 4) 地盤工学会：北海道古平町国道 229 号岩盤崩落調査委員会報告書，地盤工学会，1997。
- 5) 土木研究所：建設工事における他産業リサイクル材料利用技術マニュアル，大成出版社，2006。
- 6) 松尾栄治，玉滝浩司，保井渉：発砲スチロール廃材を細骨材代替とした超軽量モルタルの材料分離性状および強度特性，土木学会論文集 E，Vol.63，No.3，pp.368-378，2007
- 7) 山本清仁，小林 晃，青山咸康：EPS ビーズ混入劣化によるモルタルの AE 挙動，材料，Vol.57，No.10，2008。（印刷中）
- 8) 中原一郎：応用弾性学，実教出版，pp.60，1977。
- 9) Yamamoto, K., Kobayashi, A. and Aoyama, S. : Change in damage parameters of rocks due to degradation, Proc. Of the international workshop on prediction and simulation methods in geomechanics, Athens, pp.49-52, 2003.
- 10) J.Lemaitre: A course on damage mechanics, Springer, pp.11-14, 1996.
- 11) Murakami, S. and Kamiya, K. : Constitutive and Damage Evolution Equations of Elastic-Brittle Materials Based on Irreversible Thermodynamics, Int. J. Mech. Sci. Vol. 39(No. 4), pp.473-486, 1997.
- 12) 山本清仁，小林 晃，青山咸康：異物混入劣化の影響によるモルタルの力学特性の変化，第 6 回環境地盤工学シンポジウム，pp.65-72，2005。

(2008 年 4 月 14 日 受付)