

劣化モルタルの載荷損傷過程*

岩手大学農学部 山本清仁

京都大学大学院農学研究科 小林 晃

石川県立大学生物資源環境学部 青山咸康

1. はじめに

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。また、劣化による材料の力学挙動を把握することは、コンクリートや岩盤の崩落の予測において重要であると考えられる。ここでは、モルタルに EPS ビーズを混ぜて劣化による弱部を模擬した試料を作製し、一軸圧縮試験および割裂引張試験を行い、劣化による力学定数の変化を調べた。また、試験中の載荷に伴う AE (アコースティック・エミッション) パラメータと損傷変数および膨張ひずみの変化を調べた。

2. 供試体

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、端面を切斷機で平滑に整形し、空气中に放置した。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 (図-1)。ビーズの直径は0.22cmであり、密度は0.03g/cm³である。モルタル打設時に、1L 当たり 2.55g および 5.09g の EPS ビーズが混入するように EPS ビーズを均一に混ぜた。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が、ここでは著しい強度低下や偏心荷重を起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 (2.55g 劣化供試体、5.09g 劣化供試体) の3パターンについて、一軸圧縮試験と割裂引張試験 (強度試験) を行った。

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 (kg/m ³)	2270

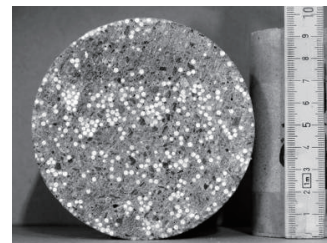


図-1 劣化供試体端面 (割裂引張試験用)

3. 強度試験およびAE計測

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。劣化供試体および健全供試体について単調載荷の一軸圧縮試験と割裂引張試験 (強度試験) を実施した。また、AE センサーにより強度試験中に供試体から発せられる AE を計測した。

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

*Damage progress with loading of degraded mortar by Kiyohito Yamamoto, Akira Kobayashi and Shigeyasu Aoyama

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。軸ひずみ速度は 11.4~19.0 μ /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}^c 、圧縮割線ポアソン比 ν_{50}^c 、圧縮強度 f_c および最大応力時軸ひずみ ε_{\max} を求めた。

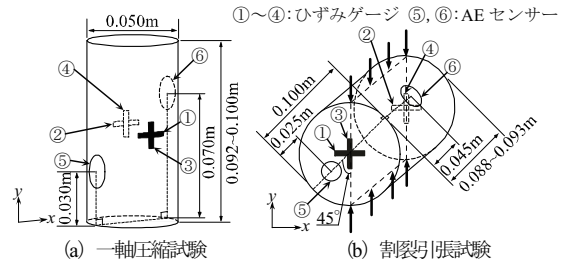


図-2 ひずみゲージと AE センサーの配置

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設置箇所にある場合は、接着剤を満たしてゲージを貼り付けた。縦ひずみ速度は 1.7~5.1 μ /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_{\max} を求めた。圧縮を正值とし、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 に载荷中の荷重を代入したものを引張応力 α_x とする。

引張弾性係数 E^t と引張ポアソン比 ν^t 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¹⁾より次式のようになる。

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

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

ここで、圧縮は正值である。式中の各定数の有効数字は 3 桁として、全供試体の計算において直径を $d=0.100$ m とした。 $(\sigma_y)_{x=0}$ と $(\alpha_x)_{x=0}$ 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、 α_x は横方向応力を示し、 $(\alpha_x)_{x=0}$ は引張応力 α と等しい。同様に $(\sigma_y)_{y=0}$ と $(\alpha_y)_{y=0}$ 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のようになる。

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

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

ε_x は横ひずみ、 ε_y は縦ひずみである。式 (2) (3) より、供試体の直径を 0.100m とした場合の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。

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

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

引張強度 50%時の荷重とひずみより求めた引張割線弾性係数と引張割線ポアソン比をそれぞれ E_{50}^t 、 ν_{50}^t とする。

3.3 AE 計測

一軸圧縮試験と割裂引張試験において供試体から発せられる AE を計測した。日本フィジカルアコースティック社製 PCI-DSP と同製の R6 センサ（共振周波数 50kHz、直径 19mm）を用いて AE を計測した。供試体と AE センサの接着にはシリコングリス（信越シリコン製 G30M）を用いた。AE センサで受信した AE 信号はプリアンプ（1220A）で 100 倍（40dB）に増幅され、出力電圧として AE 計測装置に送られ、設定された電圧閾値を超えるとその波形についての AE パラメータを記録する。AE 以外の微動やノイズの記録を避けることおよび記録が安定して行われることを考慮して閾値電圧を設定した。計測条件を表-2 に示す。ここで、閾値電圧はプリアンプで 100 倍に増幅された値である。検討に用いた AE パラメータは、立ち上がり時間（図-3②）、残響周波数（Reverberation frequency, 図-3⑤）、平均信号レベル²⁾（ASL）、イベントカウントレートの計4つである。

ここで、AE イベントの判定に2つのセンサ間の AE 記録時間差を用いた。一軸圧縮試験の場合（図-2 (a) ⑤⑥）の時間差は 70 μ sec、割裂引張試験の場合（図-2 (b) ⑤⑥）の時間差は 90 μ sec である。これらの時間差で計測されたものが同一震源の AE であるとし、これを1つのイベントとして数え、10秒間のイベントの合計をイベントカウントレートとした。供試体外の弾性波形も計測されるので、AE 計測結果の考察においては供試体パターンおよび載荷方法の違いによる定性的な比較を行うこととする。

3.4 膨張性損傷モデル

載荷に伴う弾性係数の減少と膨張するひずみに着目し、単調載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³⁾を適用し、それにより得られる損傷変数と膨張ひずみより、力学挙動の変化を把握する。

(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³⁾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ように式を定める。

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。

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^v \quad (6)$$

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。

表-2 AE 計測条件

閾値 (電圧)	40 dB _{AE} (0.01 V)
センサ数	2
ハイパスフィルター	10 kHz
ローパスフィルター	400 kHz

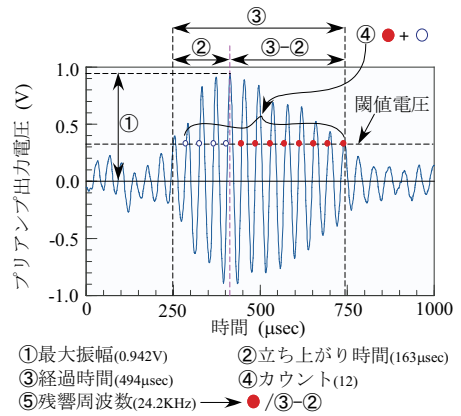


図-3 AE パラメータの概要

$$\sigma_{ij} = (1-D) \left\{ \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^v (3\lambda + 2\mu) \delta_{ij} \right\} \quad (7)$$

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。

(2) 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 ($\varepsilon_{22}^e = -\nu_0 \varepsilon_{11}^e$) と膨張ひずみの関係 ($3\varepsilon_{11}^v = 3\varepsilon_{22}^v = \varepsilon_{kk}^v$) および式 (6) より次式が求められる。

$$\frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^v = \frac{\varepsilon_x + \nu_0 \varepsilon_a}{1 + \nu_0} \quad (8)$$

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。

$$D = 1 - \frac{\sigma_a}{E_0 \varepsilon_a^e} \quad (9)$$

ここで、 ε_a^e は式 (6) により求められる弾性軸ひずみ、 σ_a は軸応力、 E_0 は載荷過程で最大の割線弾性係数とする。

(3) 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 (6) を用いて整理すると次式が得られる。

$$\frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^v = \frac{\nu_0 (6.37 \varepsilon_x + 18.9 \varepsilon_y) + 19.2 \varepsilon_x + 6.28 \varepsilon_y}{25.5 + 25.3 \nu_0} \quad (10)$$

次に、損傷変数 D は、式 (4) のひずみを弾性ひずみ ε^e 置き換えた式から次式のように表す。

$$D = 1 - \frac{323 P}{E_0 (6.37 \varepsilon_x^e + 18.9 \varepsilon_y^e) l} \quad (11)$$

ここで弾性ひずみは式 (6) より求める。

4. 結果

破壊供試体の写真を図-4に示す。図-4

(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-4 (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-4 (b) ①を見ると、破断面は平滑であるが、図-4 (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ったと考えられる。

一軸圧縮試験の結果を表-3に、割裂引張試験の結果を表-4に示す。表中の試験結果では、材令、空気量 (A)、および含水比 (w)

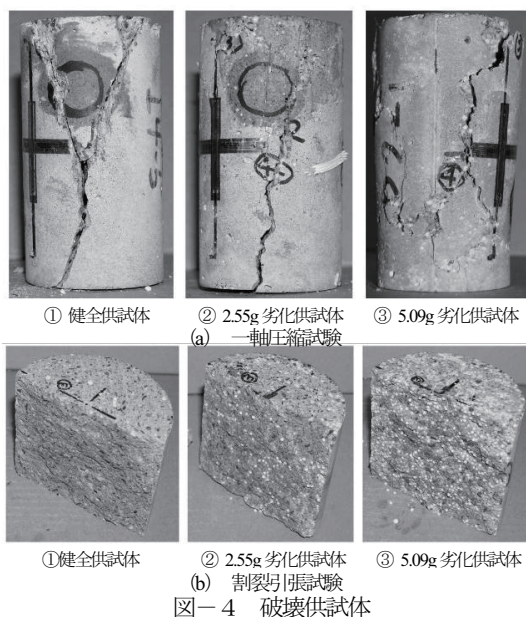


図-4 破壊供試体

表-3 試験結果 (一軸圧縮試験)

供試体	Age (day)	A (%)	w (%)	f_c (MPa)	E_{50}^c (GPa)	ν_{50}^c	ϵ_{max} (μ)
健全供試体	29	0.7	7.7	53.5	27.4	0.21	2786
2.55g 劣化供試体	29	7.3	7.2	36.9	23.7	0.21	2049
5.09g 劣化供試体	29	14.6	5.9	22.1	17.5	0.20	1941

表-4 試験結果 (割裂引張試験)

供試体	Age (day)	A (%)	w (%)	f_t (GPa)	E_{50}^t (GPa)	ν_{50}^t	ϵ_{max} (μ)
健全供試体	29	0.8	9.5	3.77	33.5	0.33	391
2.55g 劣化供試体	33	9.5	9.7	3.08	24.0	0.27	439
5.09g 劣化供試体	33	16.5	9.5	2.32	20.8	0.34	408

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_{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)、引張割線ポアソン比 (ν_{50}^t) および最大応力時縦ひずみ (ϵ_{max}) を示している。表中の各力学定数は複数ある供試体における平均値である。

表-3、4より圧縮と引張ともにピ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-3) において最大応力時軸ひずみ (ϵ_{max}) は、ピ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-4の引張試験結果における最大応力時縦ひずみ (ϵ_{max}) の変化も認められない。

一軸圧縮試験における AE パラメータおよび膨張ひずみと損傷変数の関係を図-5に、割裂引張試験によるものを図-6にそれぞれ示す。ここで、図中の平均信号レベル、残響周波数および立上がり時間は10秒間の平均値であり、各供試体パターンにおいて平均的な挙動を示す1本の供試体についての結果を示している。

圧縮と引張のいずれの関係においても健全供試体と劣化供試体との間に顕著な差異は認められないが、圧縮と引張の载荷形式において異なる傾向が観察された。圧縮においては損傷変数が0.1を超えた付近において膨張ひずみが増加し、AEパラメータの挙動が変化することが観察され、特に平均信号レベルと膨張ひずみの挙動が比較的良好に対応している。一方、引張においては膨張ひずみが漸次増加し、立上がり時間は減少、残響周波数は増加傾向にある。

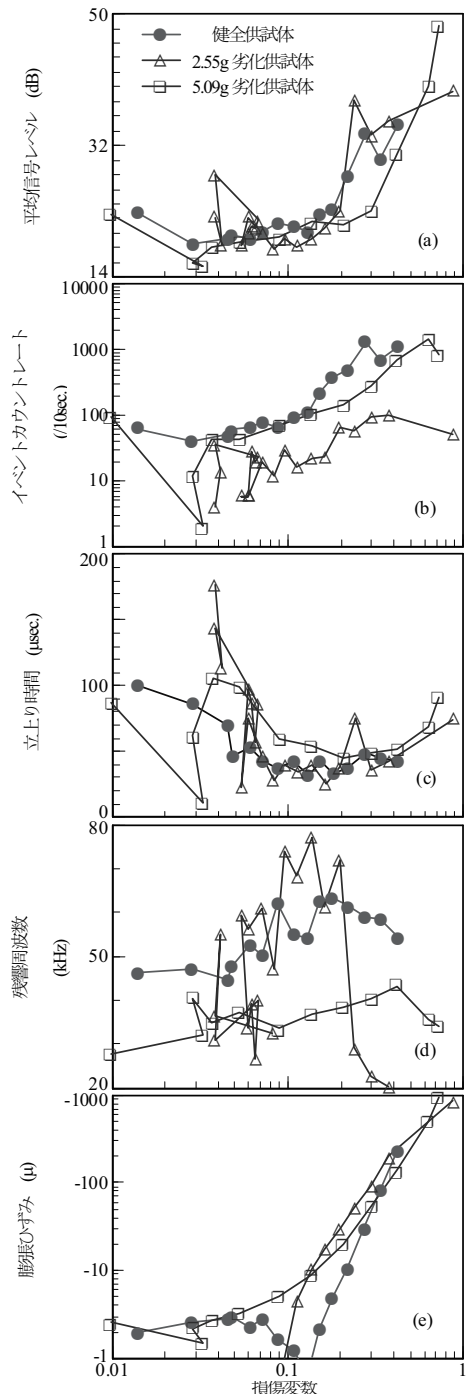


図-5 AEパラメータ・膨張ひずみ-損傷変数関係 (一軸圧縮試験)

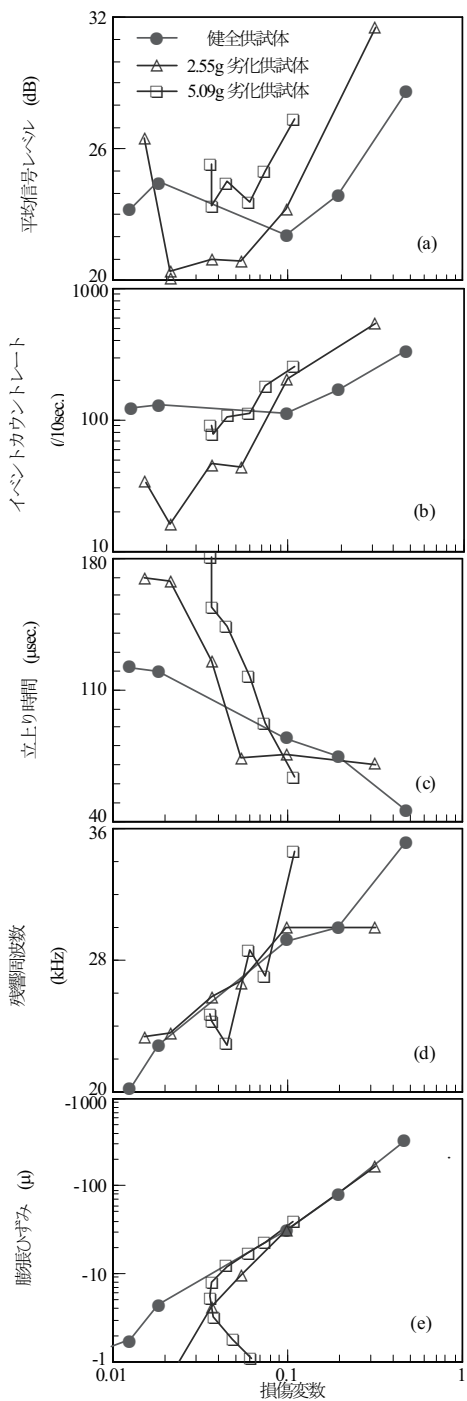
5. まとめ

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、一軸圧縮試験および割裂引張試験を行い、試験中にAEを計測した。試験結果よりAEパラメータ・膨張ひずみー損傷変数関係を求めた。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 圧縮と引張の両強度試験において劣化供試体の強度と弾性係数は健全なものとは比べて減少する。また、圧縮試験における最大応力時軸ひずみはビーズの増加により減少する。
- 2) AE計測結果において健全供試体と劣化供試体との間に顕著な差異は認められないが、圧縮と引張の载荷形式において異なる傾向が観察された。圧縮においては損傷変数が0.1を超えた付近において膨張ひずみと平均信号レベルが増加することが観察され、引張においては膨張ひずみが漸次増加し、立上り時間は減少、残響周波数は増加傾向にある。

参考文献

- 1) 中原一郎：応用弾性学、実教出版、pp.60、1977.
- 2) 日本非破壊検査協会：アコースティック・エミッション試験Ⅰ、pp.34、2006.
- 3) 山本 清仁、小林 晃、青山 咸康：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、応用力学論文集、Vol.11、pp.911-928、2008.



図ー6 AEパラメータ・膨張ひずみー損傷変数関係(割裂引張試験)