EPS ビーズ混入劣化によるモルタルの AE 挙動[†]

山本 清仁* 小林 晃** 青山 咸康***

Behavior of Acoustic Emission of Mortar Degraded by Mixing with Expanded Polystyrene Beads

by

Kiyohito YAMAMOTO*, Akira KOBAYASHI** and Shigeyasu AOYAMA***

Degraded specimens were prepared by mixing expanded polystyrene (EPS) beads with mortar, and sound specimens include no beads. Measurements of compressional elastic wave velocity (V_p) and acoustic emission (AE) were performed using an AE transducer. The relationships between air content and AE parameters were investigated based on the V_p measurements. The changes in AE behavior with increase in strain were measured by a uniaxial compression test and a splitting test. The AE parameters—rise time, count, frequency, average signal level, and event count rate—were evaluated, on average, every ten seconds. The following results were obtained. (1) In the uniaxial compression test, the volumetric contraction of the degraded specimens was small. This is because large volumetric expansion of the degraded specimens occurs with increase in axial strain. (2) It is difficult to measure the degree of degradation due to increase in porosity using only one AE transducer. The degree of degradation can be evaluated qualitatively using two AE parameters (mean value of count and standard deviation of rise time). (3) It is inferred that the area of observation can be recognized as degraded by increase in cracks when the behavior of average signal level and event count rate for monotonic load is similar to that for cyclic load. (4) It is also inferred that the failure type can be determined as either extensive compression or local tension by long-term observation of reverberation frequency and rise time.

Key words : Mortar, Acoustic emission, EPS beads, Degradation, Uniaxial compression test, Splitting test, Cyclic loading

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、急峻な渓谷や沿岸を通る道路においては、斜面崩壊や岩塊崩落が危惧されるが、北海道豊浜トンネルの崩落事故¹⁾のような岩盤破壊を予測するためには、劣化等による岩盤物性および破壊挙動の変化を把握することが必要であると考えられる。一方、リサイクル材を用いたコンクリート活用²⁾の研究が進行している。このようなコンクリートは、従来のコンクリートと比べ強度的に劣る場合もあるが、環境保全に貢献することに加え、EPS(発泡スチロール)廃材を利用したコンクリートやモルタル³⁾においては防湿・防音に優れるとされている。このようなリサイクル材を用いたコンクリートを実用化するためには、その変形特性を把握することが肝要であると考えられる。

施設の維持管理において、鈴木⁴⁾は、AE発生頻度とエネルギーより配管施設の定量的診断を行っている。森ら⁵⁾は、導波棒を用いたコンクリート杭破損度のAE調査法を開発している。また、斜面崩壊について、塩谷ら⁶⁾は、砂質土系斜面崩壊について、AEの改良b値が崩壊監視に有効であることを見出している。そして、リサイクル材を用いたコンクリートについて、Watanabeら⁷⁾は、AE計測によりRA値と**I**b値を評価し、打設時の振

動の有効性を示している。松尾ら³⁾は、減容処理したEPS廃材を細骨材としたモルタルを作製し、その強度特性を調べ、耐久性(強度)と軽量性の2つ観点から適した配合の選定を行っている。

ここでは、モルタルにEPSビーズを混ぜて劣化試料を作製し、ビーズ未混入の健全試料と比較することにより、空隙量の多い劣化モルタルの変形挙動およびAE挙動を把握する。まず、劣化試料と供試体作製方法について説明する。次に、強度試験方法とAE計測方法について述べる。AE計測では、超音波発振による縦弾性波速度(V_p)計測と強度試験中供試体のAE計測を行う。最後に、強度試験とAE計測結果について説明し、劣化供試体と健全供試体の相違点、変形に伴うAE挙動について比較検討を行う。

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Table 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。

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

[†] 原稿受理 平成20年2月8日 Received Feb. 8, 2008 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 京都大学大学院農学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町, Grad. Sch. of Agr., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

** 京都大学大学院農学研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町, Grad. Sch. of Agr., Kyoto Univ., Sakyo-ku, Kyoto, 606-8502

*** 石川県立大学環境科学科 〒921-8836 石川県石川郡野々市町, Dept. of Environ. Sci., Ishikawa Pref. Univ., Ishikawa-gun, Ishikawa, 921-8836

Table 1 Mix proportion.

W/C (%)	50
Water (kg/m ³)	284
Cement (kg/m ³)	568
Fine aggregate (kg/m ³)	1421
Bulk density (g/cm ³)	2.27

クッションに利用されるもので、指先で潰すことができる柔軟性に富む球形の材料である。129 粒のビーズを用いて画像計測より求めたビーズの直径は $0.220 \pm 0.045\text{cm}$ であり、その直径と質量より求めた密度は 0.030g/cm^3 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。Fig. 1 のようにビーズは分布しており、円形を保っている。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、載荷重はロードセルにより計測した。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 AE 計測装置により記録した。AE データとひずみ・荷重データは同時に計測されるので、計測時刻より各データの同期を行うことができる。

3・1 一軸圧縮試験

長さ 30mm のひずみゲージを Fig. 2 (a) のように供試体中央に設置し、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 $11.4 \sim 19.0\mu\text{/sec.}$ 、軸圧縮応力速度は $214 \sim$

Fig. 1 Degraded specimen due to mixing EPS beads.

Fig. 2 Setting of strain gauges and AE transducer.

375kPa/sec. である。試験直前の質量測定による含水比は $5.1 \sim 9.5\%$ である。試験結果より、圧縮割線弾性係数 E_{33} 、圧縮割線ポアソン比 ν_{33} 、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_{33} と ν_{33} は圧縮強度 33% 時の応力とひずみより求めた。体積ひずみは軸ひずみ ϵ_a (Fig. 2 (a) ③④の平均) に周ひずみ ϵ_x (Fig. 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

割裂引張試験における供試体表面のひずみ分布は一軸圧縮試験のものより不均一であるので、分布の変化が小さい範囲でひずみを計測するために長さ 10mm のひずみゲージを Fig. 2 (b) のように供試体端面に設置した。縦ひずみ ϵ_l は Fig. 2 (b) ③④の平均、横ひずみ ϵ_x は Fig. 2 (b) ①②の平均である。健全供試体、2.55g 劣化供試体および 5.09g 劣化供試体は各 3 本ずつ用意した。単調載荷での縦ひずみ速度は $1.7 \sim 5.1\mu\text{/sec.}$ 、引張応力速度は $13 \sim 36\text{kPa/sec.}$ である。試験時含水比は $7.5 \sim 13.7\%$ 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_{lmax} 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、 P は最大荷重、 l は供試体の奥行き方向の長さ、 d 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とする。

4 AE 計測

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ース (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、設定された電圧しきい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しきい値電圧を設定した。AE 計測機を用いて、超音波発振による V_p 計測と強度試験中の供試体の AE 計測を行った。それらの条件を Table 2 に示す。ここで、しきい値電圧はプリアンプで 100 倍に増幅された値である。

4・1 超音波発振による V_p 計測

圧縮試験で用いたものと同形の供試体において、片方の端面でシャープペンシルの芯を折ることで超音波を発振させ、両端面に設置した AE センサで超音波を計測した。健全供試体、2.55g 劣化供試体はそれぞれ 4 本ずつ、

Table 2 Conditions of AE measurement.

	Strength test	V_p measurement
Transducer	R6	R6
Threshold (Volt)	40 dB _{AE} (0.01 V)	45 dB _{AE} (0.0178 V)
Number of transducer	2	2
High pass filter	10 kHz	10 kHz
Low pass filter	400 kHz	400 kHz

5.09g 劣化供試体は3本用意した。1本の供試体について15～25個の波形を取得し、Fig. 3に示すAEパラメータを記録し、それらの平均値、最大値および標準偏差を求めた。波形が電圧しきい値を越えるとその時刻がAEパラメータと同時に記録される。その時刻を用いて2つのセンサ間の超音波伝ば時間を求め、センサ間距離より縦弾性波速度 (V_p) を求めた。検討に用いたAEパラメータは、立上がり時間 (Fig. 3 ②)、カウント (Fig. 3 ④)、始動周波数 (Initiation frequency, Fig. 3 ⑦) および残響周波数 (Reverberation frequency, Fig. 3 ⑧) の計4つである。

4・2 強度試験における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。検討に用いたAEパラメータは、立上がり時間 (Fig. 3 ②)、残響周波数 (Reverberation frequency, Fig. 3 ⑧)、平均信号レベル⁸⁾ (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 (Fig. 2 (a) ⑤⑥) の時間差は70 μ sec.、割裂引張試験の場合 (Fig. 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。AEパラメータはイベントと判定されたものについて10秒間平均を行い、これを結果として用いた。イベント判定時間差は2つのセンサ間距離より換算して1.0km/sec.の速度に相当し、供試体の弾性波速度は4.0km/sec.以上 (Fig. 11 (a)) であるが、供試体の弾性波速度をAEイベント判定に適用すると、イベント数が激減してAE挙動の把握が困難になるために、把握が可能となるレベルまでAEイベント数を増加させるために上述のような値を採用した。载荷に伴うモルタルの弾性係数の減少や、センサ径の大きさ、しきい値電圧の影響を考慮して、イベント判定の速度は供試体の弾性波速度より小さくせざる得ないと判断した。そして、切断機により端面を平滑したこと以外は、端面摩擦の対策を施していないので、ここで示す結果には端面摩擦の影響も含まれる。よって結果の考察においては、供試体パターンおよび载荷方法の違いによる定性的な比較を行うこととする。

Fig. 3 Schematic view of AE parameters.

5 結 果

5・1 力学特性の変化

破壊供試体の写真を Fig. 4 に示す。破断面の拡大写真を Fig. 5 に示す。Fig. 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、Fig. 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ように見える。Fig. 5 は破断面にある顕著な亀裂を探して撮影したものであるが、健全供試体では明瞭な亀

Fig. 4 Specimens after strength test on monotonic loading.

Fig. 5 Fracture surface of specimens on monotonic loading.

裂は少なく, Fig. 5 (a) ①のように幅の極めて小さな亀裂が確認されるだけである. 一方, EPS ビーズを混ぜた Fig. 5 (a) ②③では, EPS ビーズ周囲に幅の大きな亀裂が認められた. このような亀裂の発生が Fig. 4 (a) ③のような中心部分膨張の原因となっていると推定される. また, Fig. 4 (b) ①を見ると, 破断面は平滑であるが, Fig. 4 (b) ③では粗い凹凸が見られる. 劣化供試体ではビーズに囲まれた細骨材が Fig. 5 (b) ③のように割れておらず, このような状況の骨材が増えると破断面が荒々しくなると考えられる.

EPS ビーズ混合量のパターンでそれぞれ平均した一軸圧縮試験の結果を Table 3 に, 割裂引張試験の結果を Table 4 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. ハイフン右側の文字は, 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 (Age), 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), 割線弾性係数 (E_{33}), 割線ポアソン比 (ν_{33}), 最大応力時軸ひずみ (ϵ_{amax}) および最大体積ひずみ (ϵ_{vmax}) を示している. 割裂引張試験では, 引張強度 (f_t) および最大応力時縦ひずみ (ϵ_{lmax}) 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 (Table 1) の密度より空気量を算出した. 乾燥密度, 吸水率および有効空隙率は, 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.

Table 3, 4 より圧縮 (f_c) と引張 (f_t) とともにビーズ量の増加に伴い強度が減少している. さらに Fig. 10 の強度と空気量の回帰直線より, 空気量 0% から 16% の圧縮強度の減少は 70% 程度であるが, 引張強度の減少は 45 ~ 50% 程度であり, ビーズ増加による強度減少は, 圧縮において著しいという結果になった. また, 一軸圧縮試験結果 (Table 3) の割線弾性係数 (E_{33}), 最大体積ひずみ (ϵ_{vmax}) 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_{33}) の変化は確認できない. また, Table 4 の引張試験結果における最大応力時縦ひずみ (ϵ_{lmax}) の変化も認められない.

一軸圧縮試験における圧縮応力一軸ひずみ関係および体積ひずみ一軸ひずみ関係で, 単調載荷のものを Fig. 6 に, 繰り返し載荷にものを Fig. 7 に示す. また, 割裂引張試験の引張応力一縦ひずみ関係と横ひずみ一縦ひずみ関係で単調載荷のものを Fig. 8 に, 繰り返し載荷のものを Fig. 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. 繰り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のみを示している.

Fig. 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がある. また, Fig. 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, 繰り返し載荷 (Fig. 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写真 (Fig. 4 (a) ③, Fig. 5 (a) ②③) の考察と一致する. Fig. 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

Table 3 Test results. (Uniaxial compression test)

Specimen	Age (day)	A (%)	ρ (g/cm ³)		n (%)	Q (%)	w (%)	f_c (MPa)	E_{33} (GPa)	ν_{33}	ϵ_{amax} (μ)	ϵ_{vmax} (μ)
			wet	dry								
IC-M	29	0.7	2.27	2.05	21.9	10.7	7.7	53.5	28.7	0.209	2786	1322
DC1-M	29	7.3	2.12	1.93	19.4	10.1	7.2	36.9	24.5	0.212	2049	952
DC2-M	29	14.6	1.98	1.81	17.7	9.8	5.9	22.1	18.1	0.197	1941	811
IC-C	37	0.5	2.27	2.06	21.5	10.4	7.8	53.5	26.9	0.198	3143	1571
DC1-C	37	7.6	2.12	1.92	19.6	10.2	8.7	37.4	24.5	0.216	2105	1000
DC2-C	36	15.8	1.96	1.79	17.7	9.9	6.1	20.6	15.6	0.200	1990	810

Table 4 Test results. (Splitting test)

Specimen	Age (day)	A (%)	ρ (g/cm ³)		n (%)	Q (%)	w (%)	f_t (MPa)	ϵ_{lmax} (μ)
			wet	dry					
IT-M	29	0.8	2.24	2.03	20.9	10.3	9.5	3.77	391
DT1-M	33	9.5	2.05	1.87	18.6	10.0	9.7	3.08	439
DT2-M	33	16.5	1.88	1.71	17.1	10.1	9.5	2.32	408
IT-C	39	1.0	2.24	2.03	20.9	10.3	9.1	4.25	472
DT1-C	39	10.5	2.03	1.85	18.6	10.1	6.0	2.96	432
DT2-C	38	17.5	1.89	1.71	17.2	10.0	7.4	2.30	409

Fig. 6 Mechanical parameter-axial strain relation.
(Uniaxial compression test on monotonic loading)

Fig. 8 Mechanical parameter-longitudinal strain relation.
(Splitting test on monotonic loading)

Fig. 7 Mechanical parameter-axial strain relation.
(Uniaxial compression test on cyclic loading)

Fig. 9 Mechanical parameter-longitudinal strain relation.
(Splitting test on cyclic loading)

においては局所的な破壊が起こっていると予測される。繰り返し載荷での 5.09g 劣化供試体の横ひずみ (Fig. 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。

5・2 V_p 計測による超音波伝ば特性の変化

圧縮強度および引張強度と空気量の関係をそれぞれ Fig. 10 (a) (b) に示す。ここで、丸のプロットは単調載荷を示し、四角のプロットは繰り返し載荷の結果を示す。また、 V_p および AE パラメータと空気量の関係をそれぞれ Fig. 11 に示す。Fig. 11 (b)~(d) において、受信側端面に設置した AE センサで得られた AE パラメータは四角のプロットで示しており、それ以外のプロットは超音波発振側端面のものである。AE パラメータの平均値、標準偏差および最大値の中で、空気量と相関が大きいものを図示している。

Fig. 10 (a) を見ると、圧縮強度と空気量の相関は良く、単調載荷と繰り返し載荷の相違は認められない。一方、Fig. 10 (b) では、引張強度と空気量の相関は認められるが、繰り返し載荷の引張強度が若干大きくなっている。これは、繰り返し載荷の供試体材令が高いためであると考えられる。以上より、空気量が増加すると、強度も概ね低下すると言える。

Fig. 11 より、 V_p と空気量 (Fig. 11 (a)) の相関はとても良く、劣化によるモルタルの強度低下を判断する場合、 V_p 計測は非常に有用である。カウントの増加 (Fig. 11 (d))、発振側残響周波数の増加 (Fig. 11 (c)) および受信側初動周波数 (Fig. 11 (c)) の減少は、EPS ビーズが弾性波を複雑に反射させ、散乱を生じさせているためであると推察される。また、空気量の増加により受信側の立上がり時間 (Fig. 11 (b)) が増加することは、ビーズ増加による剛

Fig. 10 Strength-air content relation.

Fig. 11 V_p , AE parameter-Air content relation. Fig. 12 AE parameter-axial strain relation.
(Uniaxial compression test on monotonic loading)

性低下に伴う弾性波速度の減少が原因であると推定される。そして、現地計測において簡易的に空隙量増加による劣化度推定を行う場合、発信源近傍に設置した1つのAEセンサを利用し、空気量との相関が大きいカウントの平均値および立上がり時間の標準偏差の2つを複数箇所計測し、それらの情報を計測箇所間で比較することにより劣化度推定を行うことが有効であると考えられる。

5・3 載荷過程におけるAE挙動の変化

一軸圧縮載荷により得られたAEパラメーター軸ひずみ関係で、単調載荷のものをFig. 12に、繰り返し載荷のものをFig. 13に示す。また、割裂引張試験における単調載荷のものをFig. 14に、繰り返し載荷のものをFig. 15に示す。ここで示す結果は、各供試体パターンより平均的な挙動を示すものを1つ選択して表示している。図中のプロットが正規化ひずみレベル1.0に到達しないものは、それ以前にAE計測が停止したものである。繰り返し載荷においては、各載荷ステップにおいて応力が最大になる時刻を含み、10秒間計測されたAEパラメータの平均値を示している(イベントカウントレートは積算

Fig. 13 AE parameter-longitudinal strain relation.
(Uniaxial compression test on cyclic loading)

Fig. 14 AE parameter-axial strain relation.
(Splitting test on monotonic loading)

値)。よって、载荷・除荷過程で計測されたAEパラメータの大部分は削除されている。供試体番号がIで始まるべた塗のプロットが健全供試体を表している。Dで始まる線描のプロットがEPSをビーズ混入した劣化供試体を示している。

全供試体について、破壊近傍において立上がり時間 (Fig. 12 ~ 15 (d)) が小さく、平均信号レベル (Fig. 12 ~ 15 (a)) とイベントカウントレート (Fig. 12 ~ 15 (b)) が増加していることが共通しており、それらAEパラメータの挙動は圧縮・割裂どちらの破壊についても適用できる破壊指標となり得ると考えられる。

単調载荷と繰り返し载荷の比較において、健全供試体の平均信号レベル (Fig. 12 ~ 15 (a)) とイベントカウントレート (Fig. 12 ~ 15 (b)) は単調载荷よりも繰り返し载荷で低い値となることが確認できる。これは繰り返し载荷により、供試体端面および内部亀裂の摩擦が繰り返し载荷の過程により減少したためと推定される。劣化供試体においては载荷初期より亀裂の発生や進展が起こり、それに伴う亀裂内の摩擦も増加するためにどちらの载荷

形式においても同様なAE発生挙動が観察されると推測される。このことより、繰り返し载荷で観測される平均信号レベルとイベントカウントレートが、単調载荷のものに比べて相対的に同等であれば、AE発信源近傍は空隙量増加による劣化度が大きいと推測される。

一軸圧縮試験と割裂引張試験の比較において、圧縮試験供試体の残響周波数 (Fig. 12, 13 (c)) は、ひずみレベル0.4を超えると安定あるいは減少に転じ、立上がり時間 (Fig. 12, 13 (d)) は安定あるいは増加に転じる。一方、割裂引張試験供試体の残響周波数 (Fig. 14, 15 (c)) は単調に増加し、立上がり時間 (Fig. 14, 15 (d)) は単調に減少する。载荷初期においては、供試体内部や端面摩擦のAEの影響により、残響周波数は小さく、立上がり時間は大きくなるが、载荷の進行に伴い亀裂破壊による突発型AEの占める割合が徐々に増加し、残響周波数は増加し、立上がり時間は減少する。このことは、割裂引張試験供試体のAE挙動の説明として推察されるが、圧縮試験のAE挙動においては、供試体が一様に圧縮され、それに伴い供試体の弾性係数も一様に減少し、結果として

Fig. 15 AE parameter-longitudinal strain relation.
(Splitting test on cyclic loading)

弾性波速度が減少することが、前述の説明に加わることで局所的な変形を呈する割裂引張試験供試体と異なるAE挙動になると推定される。また、圧縮試験において劣化供試体の立上がり時間 (Fig. 12, 13 (d)) は健全なものより大きく、残響周波数 (Fig. 12, 13 (c)) は小さいという傾向が現れた。これは、ビーズ量の増加が亀裂の発生を増進させ、载荷に伴う弾性係数の減少を顕著にさせているためと推定される。割裂引張試験においては、载荷に伴う弾性係数の低下が局所的であるために、このような傾向が確認されないと推定される。よって、長期監視において、残響周波数が安定あるいは減少し、立上がり時間が安定あるいは減少した場合は、広範囲の圧縮破壊が予測される。また、残響周波数の単調増加と立上がり時間の単調減少が観測される場合は、局所的な引張破壊が予測される。

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、超音波発振による V_p 計測を行った。また、一軸圧縮試験および割裂引張試験において AE 計測を行った。両計測ともに AE センサを用いて計測を行った。 V_p 計測では、 V_p および AE パラメータと空気量の関係を調べた。また、圧縮および割裂試験では、単調载荷と繰り返し载荷を実施し、ひずみの増加に伴う AE 挙動の変化を調べた。その結果、以下の知見が得られた。

(1) 圧縮試験において、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る。

(2) 発信源近傍に設置した 1 つの AE センサを利用し、カウントの平均値および立上がり時間の標準偏差の 2 つを複数箇所で計測し、それらの情報を計測箇所間で比較して空隙量増加による劣化度を定性的に推定する方法が提案できる。

(3) 平均信号レベルとイベントカウントレートを繰り返し载荷と単調载荷で比較して変化が認められない場合、空隙量増加による劣化が生じていると推測される。

(4) 長期において、残響周波数と立上がり時間の増減を観察することにより、広範囲の圧縮破壊か局所的な引張破壊かを予測できると考えられる。

参 考 文 献

- 1) The Japanese Geotechnical Society (JGS), Report on rock slope failure at Furubira (1997).
- 2) Public Works Research Institute, "Technical Manual for the Use of Recycled Materials Generated by Other Industries in Construction" (2006) Taisei Publishing.
- 3) E. Matsuo, K. Tamataki and W. Yasui, "Strength and segregation properties of super lightweight mortar made with expanded polystyrene waste as fine aggregate", Doboku Gakkai Ronbunshuu E, Vol.63, No.3, pp.368-378 (2007).
- 4) S. Tetsuya, S. Fujita and H. Itou, "Quantitative evaluation of repaired effect in service pipeline using detected water flow signals", Journal of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Rural Engineering, Vol.75, pp.907-910 (2007).
- 5) S. Mori and T. Shiotani, "Development of anew inspection method for concrete piles damaged due to earthquakes by acoustic emission waves from damaged portions", JSCE Journal of Structural and Earthquake Engineering, I-45, No.605, pp.61-77 (1998).
- 6) T. Shiotani, T. Aoki and K. Fujii, "Fundamental study on prediction of slope failure by acoustic emission", JSCE Journal of Geotechnical Engineering, III-32, No.523, pp.163-173 (1995).
- 7) T. Watanabe, S. Nishibata, C. Hashimoto and M. Ohtsu, "Compressive failure in concrete of recycled aggregate by acoustic emission", Construction and Building Materials, Vol.21, pp.470-476 (2007).
- 8) The Japanese Society for Non-Destructive Inspection (JSNDI), "Acoustic Emission Testing I", p.34 (2006).