

論文 AE 法による中空粒子混和樹脂 - モルタル複合材の引張破壊特性評価

高橋 航*1・鈴木 哲也*2・藤井 伸之*3

要旨：硬度の異なる 2 種類のひび割れ注入用樹脂材に中空粒子を混和し、力学特性を評価した。実験は、各樹脂材とモルタルとの複合材を作成し、AE 法による弾性波計測を援用した一軸引張試験を行った。検討の結果、中空粒子を混和した軟質樹脂では力学特性の向上効果が明らかになった。軟質樹脂への中空粒子の混和率、粒径を変化させ同様の試験を行った結果、粒径の減少に伴い引張り強さの増加が確認された。AE エネルギーの重心位置から中空粒子の混和率と破壊挙動との関連が示唆された。これらのことから、力学特性の観点からコンクリートひび割れ補修への中空粒子混和樹脂の有用性が示唆された。

キーワード：中空粒子混和樹脂 - モルタル複合材, 一軸引張試験, AE 法, 超音波法

はじめに

近年、高度経済成長期に施工され、供用 50 年を超え損傷が著しい構造物が増加している。コンクリート構造物には種々の原因によりひび割れが発生する。ひび割れ部には有効断面の減少により力学的な強度低下が発生する。また、空隙部からの劣化因子の侵入による鉄筋の腐食の発生など構造物の耐力を著しく損ねるため補修が必要である。

ひび割れ部の補修には、樹脂注入工法が提案されている¹⁾。これはエポキシ樹脂をひび割れ部に充填しひび割れ部分を接着する手法であり、エポキシ樹脂の剛性や接着性からひび割れの一体化による力学的な強度改善も図れる。このため、ひび割れ補修材として優れている²⁾。

このような樹脂は、橋梁など実構造物に適応されると、温湿度の変化や、橋梁の微細な振動による外力によって変形する。それにより樹脂の接着力の低下や剥げにより補修部に再劣化が発生する場合がある¹⁾。これらのことから、構造物の長寿命化のために力学特性や変形追従性を考慮したひび割れ注入樹脂の十分な選定が不可欠である。

そこで本研究では、異なる 2 種類のひび割れ注入用樹脂を対象にそれぞれ中空粒子を混和し、力学的特性の観点からひび割れ注入材に適した樹脂の検討を行った。

また、同一樹脂で中空粒子の混和率と粒径を変更し超音波の内部減衰と AE エネルギーの放出位置から中空粒子混和による樹脂の力学的特性の向上の検討を行った。実施試験は一軸引張試験と、超音波計測法 (Acousto-Ultrasonic 法) を行った。解析はアコースティック・エミッション法 (AE 法) と内部減衰 Q 値の導出を行った。

2. 試験方法

2.1 試験樹脂

検討に用いた樹脂は硬質樹脂 (CP)、軟質樹脂 (HP) の 2 種類を使用した。いずれもエポキシ樹脂をベースとした熱硬化性の樹脂である。足立³⁾により球形粒子を充填したエポキシ樹脂複合材は熱的、力学的特性の向上が報告されている。本研究において硬質、軟質樹脂に中空粒子を混和した硬質樹脂を (CPG)、軟質樹脂を (HPG) とした。混和率は体積含有率で 0.5 とした。表-1 に中空粒子の仕様を示す。中空粒子はガラスバブルス (3M 社) を用いたため以後、GB と記す。

ひび割れ注入材として検討を行うため各ケースにおいてセメントモルタル-樹脂の複合構造として力学特性の変化を比較した。

表-2 に引張り試験に先立ち、各樹脂単体の物性値を導出した結果を示す。表中の引張り強さは長さ 115.0 mm、幅 10.0 mm、厚さ 5.0 mm のダンベル型供試体を作成し一軸引張試験により算出した (JIS K7161 準拠⁴⁾)。

2.2 供試体 (中空粒子混和樹脂 - モルタル複合材)

図-1 に使用供試体の概要を示す。樹脂の注入材としての性質を検討するためモルタルとの複合材を作成し供試体とした。実構造物を対象とする注入材のためコンクリートの使用が望ましいが、小型の供試体を安定して作

表-1 中空粒子仕様一覧

試験体	真密度 (g/mm ³)	耐圧強度 (N/mm ²)	メジアン径 (μm)
M	0.38	28	40

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科 修士 (農学) (学生会員)

*2 新潟大学 自然科学系 (農学部) 教授 博士 (工学) (正会員)

*3 株式会社福田組 技術部維持更新課 学士 (工学) (正会員)

表-2 樹脂物性値一覧

樹脂性状	供試体寸法 (mm)	GB 濃度 (%)	粘度 (mPa*s)	引張り強さ (N/mm ²)	伸び率 (%)	密度 (g/mm ³)
硬質樹脂 (CP)	115.00× 10.00×5.00	-	1,100	54.00	3.10	1.16
硬質樹脂+GB (CPG)		50.00	4,500	29.50	1.60	0.91
軟質樹脂 (HP)	115.00× 10.00×5.00	-	1,200	0.45	56.00	1.15
軟質樹脂+GB (HPG)		50.00	4,500	0.61	39.00	0.94

成する観点から作成時のばらつきの少ないモルタルを使用した。供試体は 80×20×10 mm の直方体モルタル 2 本の間 10 mm の厚さで樹脂を注入した。樹脂注入後表面をナイフとやすりで平滑化した。硬質樹脂を注入したものを MCP, GB 混和硬質樹脂を注入したものを MCPG, 軟質樹脂を注入したものを MHP, GB 混和軟質樹脂を注入したものを MHPG とした。各供試体を 6 本作成し同寸法のモルタル 5 本を加え超音波試験法を実施した。全供試体から樹脂内に気泡がなく作成精度が高いものを各 3 本選出し、一軸引張試験を実施した。

2.3 超音波計測試験 (Acousto-Ultrasonic 法)

本試験では送波用探触子より弾性波を入力し、受信端子である各 AE センサへの到達時間の差から波速と、最大振幅値の減衰を求める試験である。図-2 に実験装置概要を示す。弾性波の入力装置は超音波パルサー・レーザー (ジャパンプロープ株式会社製) を用いた。超音波送波用探触子は 2Z20N (周波数 2 MHz) を用い供試体端部から 20 mm の位置にエレクトロニックスにて貼付した。入力波は 1 波で入力電圧は 100 V, 入力周波数は 2 MHz であった。

AE 計測には、AE Win SAMOS (Physical Acoustic Corp. 社製) を使用した。AE センサは R15-α (共振周波数 150 kHz) を 2 つ用い、Ch.1 を探触子から 20 mm, Ch.2 を探触子から 110 mm の位置にエレクトロニックスにて貼付した。しきい値は 40 dB, 増幅値は 60 dB とした。

2.4 一軸引張試験

試験は 2017 年 5 月 9 日に新潟県工業技術総合研究所 下越技術支援センターにて実施した。使用試験機は精密万能試験機 AG-250kNI (島津製作所製) を用いた。ロードセル容量は 250 kN, 最大ストロークは 800 mm であった。図-3 に試験の概要を示す。試験は一軸引張試験で、モルタルの端部から 20 mm をつかみ治具で固定した。载荷は 0.5 mm/min で行い供試体が破断および降伏するまで続した。

破壊に伴う弾性波動現象の発生を検出するため、载荷初期から停止まで AE 頻度計数と波形の記録を行った。AE 計測と同時に試験機から荷重と変位を記録した。AE 計測には、AE Win SAMOS (Physical Acoustic Corp. 社製)

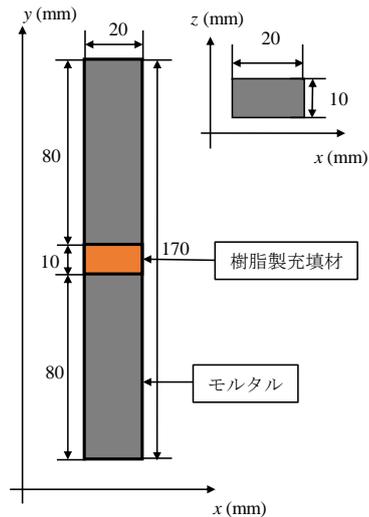


図-1 使用供試体概要図

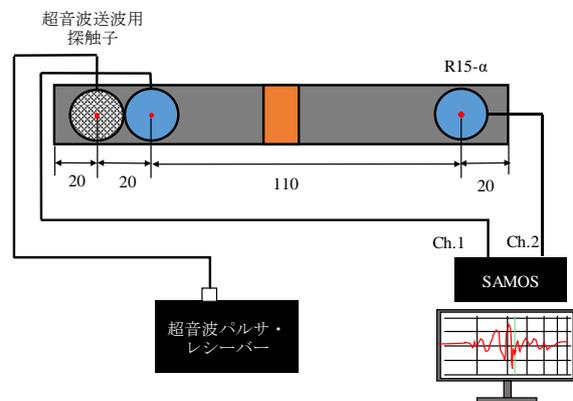


図-2 超音波計測試験概要図

を使用した。AE センサは R15-α (共振周波数 150 kHz) を 2 つ用い、AE センサは供試体両端部から 50 mm の位置にエレクトロニックスを用い貼付した。計測周波数帯は 5 kHz から 400 kHz であり、しきい値は 42 dB, 増幅値は 40 dB である。供試体とつかみ治具の摩擦による供試体のつかみ部での破断と AE 波の発生防止のため上下つかみ部と供試体間にゴムシートを挿入した。供試体は破壊の進展の観察のため 3 本中 2 本に樹脂部に切り欠きを作成したが本研究では切り欠きのない供試体について考察した結果を示す。

3. 解析方法

3.1 波動の粘性減衰評価

点震源から実態波が物体内を自由表面に沿って伝播すると振幅は距離の2乗に反比例することがわかっている。波動の広がりによって生じる距離減衰は一般に式(1)によって示される⁵⁾。

$$u = u_0 r^{-n} \quad (1)$$

ここで u は震源から距離 r なる地点の振幅 (V), u_0 は震源における振幅 (V), r は震源からの距離 (m), n は波の形態により異なる定数を示し、本研究で扱う半無限体を伝播する実態波の場合は $n=2$ となる。

式 (1) は波動の媒体内部での粘性による減衰を考慮しておらず、GB の混和により内部状態が異なる樹脂の解析には不十分である。よって粘性による内部減衰を考慮した式 (2) を用いた。

$$u = u_0 e^{-\lambda r} r^{-n} \quad (2)$$

ここで λ は式 (3) で示される。

$$\lambda = \frac{2\pi h f}{V} \quad (3)$$

ただし、 h は媒体の内部減衰比、 f は波動の振動数 (Hz), V は波動の伝播速度 (m/s) を示す。ここで式 (4) に示すように式 (2), 式 (3) より求めた h の逆数を取り波動の内部減衰 Q とした。

$$Q = \frac{1}{2h} \quad (4)$$

Q の値が低いほど波動は減衰している。一般に物体中を伝播する波速は密度と反比例の関係にあるため低密度の物体ほど波速が低下し大きく減衰する。減衰の大きな物体ほどコンクリートとの波動伝播特性の差から検出精度が高くなるため注入材に適すると考えられる。

3.2 AE パラメータ解析

AE (アコースティック・エミッション) とは物体に内部変形が生じた際に放出される弾性波動である。ここで、AE は「個体材料内部の微小な破壊、あるいはそれと同様

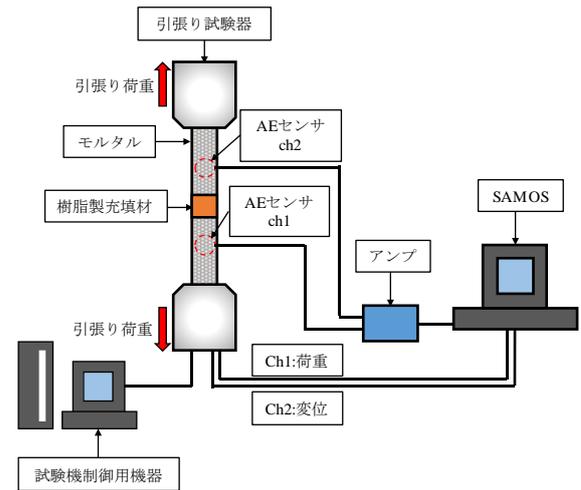


図-3 一軸引張試験概要図

なエネルギー解放過程によって発生する弾性波現象」と定義されている⁶⁾。AE 法は物体表面に設置した AE センサにより弾性波を検出する手法である。

AE の解析には種々の方法が用いられるが今回は AE エネルギー (AE energy) を用いた⁷⁾。AE エネルギーは、AE 信号波形の大きさに着目したパラメータで AE 信号振幅値を2乗した値、AE 信号の2乗の持続時間にわたる積分値などがある。本研究では、式 (5) に示す AE の最大振幅値を二乗した値を AE エネルギーとして、解析を行った。

$$E_{AE} = (a_p)^2 \quad (5)$$

ここで、 a_p は最大振幅値 (V) を示す。 a_p は AE パラメータとして得られる AMP (dB) を式 (6) より電圧値 (V) に変換した値とする。

$$AMP = 20 \log \left(\frac{V}{1\mu \text{ volt}} \right) - \text{Preamplifier dB} \quad (6)$$

4. 結果

4.1 内部減衰特性

表-3 に全供試体の AU 法の結果を示す。表には各供試体 6 本の重み付け平均を記載する。モルタルの内部減衰 Q が 34.59 に対し、MCP が 36.77, MCPG が 35.92 と

表-3 AU 法結果一覧

供試体	ch.1 到達時間 t_1 (s)	ch.2 到達時間 t_2 (s)	速度 V (m/s)	原点最大振幅値 u_0 (V)	遠点最大振幅値 u (V)	内部減衰比 h	内部減衰 Q
モルタル	2.08	2.08	3933	2.67	1.46	0.014	34.95
MCP	2.43	2.43	3350	2.95	0.82	0.014	36.77
MCPG	1.60	1.60	3426	3.44	1.03	0.014	35.92
MHP	1.41	1.41	2939	3.21	0.28	0.015	34.32
MHPG	1.57	1.57	2897	3.04	0.15	0.016	32.11

なった。GBの増加により減衰量は0.86増加したがモルタルの内部減衰を下回った。MHPは34.32, MHPGは32.11となった。GBの混和により軟質樹脂のQは2.21減少し、モルタルを上回った。これは中空のGBの混和により、樹脂密度が減少し超音波の波速と最大振幅値が低下したためと考えられる。このことより、軟質樹脂が硬質樹脂に比べよりGBの混和による超音波の内部減衰が大きくAEセンサを用いた検出に適していた。

4.2 力学特性（一軸引張強度試験）

供試体の一軸引張試験の結果を図-4に示す。モルタルと硬質樹脂、軟質樹脂の結果をそれぞれ示す。縦軸が荷重(N)、横軸に変位(mm)を表す。モルタルと硬質樹脂は供試体の破断時点で、軟質樹脂は降伏点以降で荷重を停止した。モルタルは最大荷重697N、最大変位0.76mm, MCPは最大荷重1179N、最大変位0.73mm, MCPGは最大荷重413N、最大変位0.74mmでありGBの混和による強度改善効果はみられなかった。図-5に各供試体の破断状況を示す。硬質樹脂注入供試体はすべてモルタル部で破壊しており、破断点変位が一定であった。このため硬質樹脂のコンクリートの変位に対する変形追従性は低くひび割れ部の進展を促す可能性が示唆された。MCPとMCPG, モルタルの最大荷重に差が生じた。これは、MCPは供試体中央部のモルタル部で破壊し、MCPGとモルタルはつかみ部でのねじりによる破壊が発生し強度が低下したと考えられる。MHPが降伏点荷重49N, 変位1.41mm, MHPGが降伏点荷重101N, 変位1.64mmであった。軟質樹脂注入供試体は、GBの混和により最大荷重、降伏点変位が増加、強度が上昇し、変形追従性も向上した。以上の結果より、ひび割れ注入材としてGB混和軟質樹脂が適していることが示された。以下、軟質樹脂について更なる検討結果を示す。

4.3 GB混和率の検討結果

4.3.1 使用GB決定

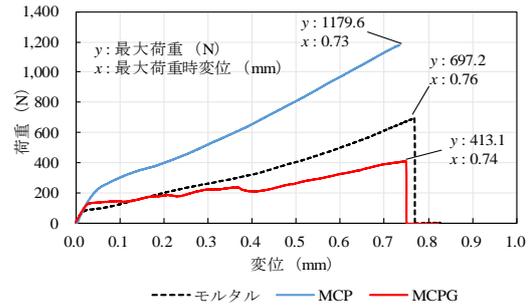
樹脂素材において充填する微粒子の粒径と充填量で強度改善効果を決定できることがNielsenにより示されている⁸⁾。そこで軟質樹脂を対象にGBの粒径、混和率を変更し同一の試験を実施し樹脂の強度を内部減衰, AEエネルギーの観点から検討した。

表-4に各GBの仕様を示す。充填粒子は粒径16 μ m, 40 μ m, 60 μ mを用いS, M, Lとした。混和率は体積含有率0.1, 0.18, 0.5とし各ケースで4本, 計36本作成した。以下、各供試体の名称は「MHPG_GB名称_混和率」で示す。

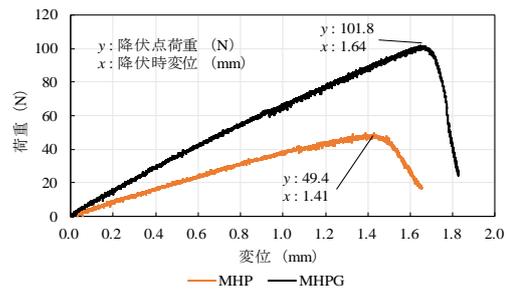
供試体寸法, 試験方法共に上述と同条件で試験実施した。

4.3.2 内部減衰解析結果

表-5に2.3, 2.4同様に行ったAU法および一軸引張

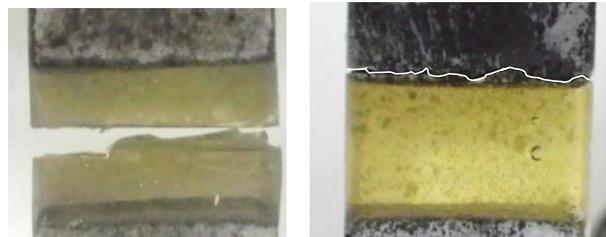


(a) モルタル・硬質樹脂



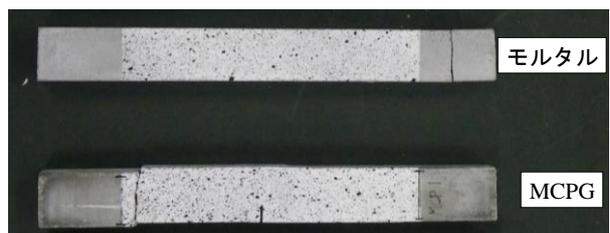
(b) 軟質樹脂

図-4 一軸引張試験結果



(a) MHP

(b) MCP



(c) モルタル, MCPG (上: モルタル, 下: MCPG)

図-5 一軸引張試験供試体破壊状況

表-4 GB仕様一覧

試験体	真密度 (g/mm ³)	耐圧強度 (N/mm ²)	メジアン径 (μ m)
S	0.6	186	16
M	0.38	28	40
L	0.15	2.1	60

試験で取得した物性値一覧を示す。最大荷重と最大変位は樹脂が降伏した際、試験機が記録した最大値を用いた。引張り強さはモルタルと樹脂との付着面積 200 mm² を用いて算出した。内部減衰 Q_{ave} は各供試体 4 本の計測結果の重みづけ平均をとった値を示す。

図-6 に粒径、混和率毎の供試体の内部減衰の比較結果を示す。縦軸に Q_{ave} 、横軸に供試体名を表す。エラーバーは標準偏差を表す。粒径の減少に伴い Q_{ave} が低下した。同一粒径の GB においては混和率の増加に比例して減衰率が低下した。 Q_{ave} の最大値が MHPG_L_0.1 で 34.28、最小値が MHPG_S_0.5 で 30.77 となった。全供試体で GB の混和による内部減衰の低下を確認した。粒径が小さいほど粒子同士の隙間が小さく密に充填できるため伝播経路が阻害され Q_{ave} が低下したと思われる。このことから粒径の小さな GB を体積含有率で 0.5 混和した時、 Q を用いた樹脂部の検出が最も効果的であることが示された。

4.3.3 内部減衰と力学特性比較

図-7 に一軸引張試験に用いた供試体の内部減衰 Q と引張り強さの相関について検討した結果を示す。

検討の結果、粒径の異なる GB の同一混和率で比較した際、引張り強さと内部減衰の間に負の相関が確認された。混和率 0.1, 0.18 において GB の粒径の減少に伴い引張り強さが上昇し、内部減衰 Q は減少した。混和率 0.1 の時 MHPG_L_0.1 が応力:0.45, Q :34.28 で MHPG_S_0.1 が応力:0.58, Q :30.90 となり、混和率 0.18 の時 MHPG_L_0.18 が応力:0.47, Q :32.96 で MHPG_S_0.18 が応力:0.49, Q :30.85 となった。

混和率 0.5 は各粒径で引張り強さは上昇したが内部減衰に変化は見られなかった。これは GB の混和率が多く伝播経路が大きく阻害されたため波動が樹脂の多く残存する供試体表面を伝播したためと考えられる。

MHPG_S_0.5 は応力が大きく低下したがこれは試験時のつかみ治具との滑りや、ねじりが加わった等によるエラーであると考えられる。同一粒径の GB の各混和率による結果を比較した結果、いずれの場合も内部減衰との明確な相関はみられなかった。

以上のことから本研究に用いた粒径の異なる GB を混和した樹脂注入材それぞれの波動の減衰特性を用い力学的性質の改善効果を検出できることが示唆された。

4.3.4 一軸引張応力下での AE エネルギー特性

前項に示した通り、内部減衰を用いた同一粒径 GB の混和率毎の力学特性の変化は確認されなかった。そこで AE エネルギーを用いて破壊の進展時のエネルギー解放特性の観点から混和率毎の力学特性の改善効果を検討した結果を示す。既往の研究により、損傷が進行したコンクリート構造物は破壊の初期段階で多くの AE エネルギーを放出し、健全な構造物は主破壊近傍で AE エネルギーを放出

表-5 各供試体取得物性値一覧

供試体名	最大荷重 (N)	引張り強さ (N/mm ²)	最大変位 (mm)	内部減衰 平均 Q_{ave}
MHPG_S_0.1-3	115.31	0.58	2.17	30.90
MHPG_S_0.18-3	97.81	0.49	1.56	30.85
MHPG_S_0.5-3	110.94	0.55	0.90	30.77
MHPG_M_0.1-3	109.69	0.55	2.17	32.01
MHPG_M_0.18-3	92.50	0.46	1.57	31.10
MHPG_M_0.5-3	144.38	0.72	1.14	30.89
MHPG_L_0.1-3	89.69	0.45	1.71	34.28
MHPG_L_0.18-3	93.44	0.47	1.89	32.96
MHPG_L_0.5-3	128.13	0.64	1.30	32.11

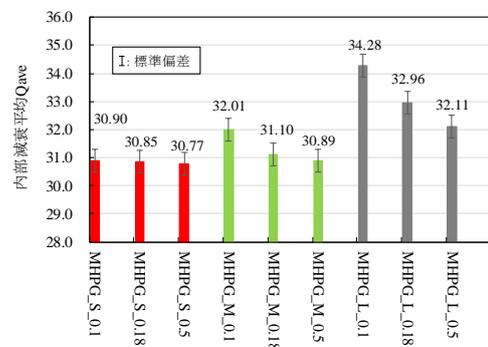


図-6 各供試体内部減衰比較結果

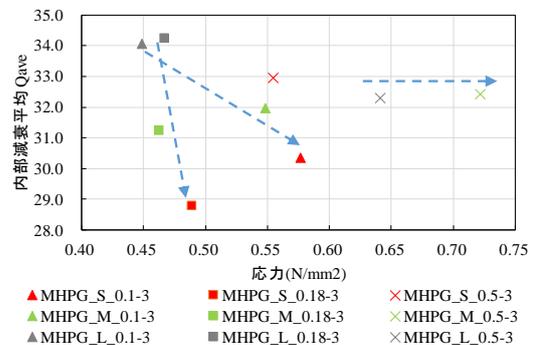


図-7 引張り強さ、内部減衰平均比較結果

することが報告されている^{9),10)}。そこで一軸引張試験時に放出された AE エネルギーの重心位置を変位量より求め、その時点の荷重を「重心荷重」と定義した。供試体の最大荷重と重心荷重を与えた変位の差から、混和 GB の粒径毎に AE エネルギーの発生位置の特徴を求めた。AE エネルギーの重心変位と最大変位の差が小さいほど荷重の後半にエネルギー放出し樹脂の強度が高いと考えられる。図-8 に AE エネルギーの重心位置の例として MHPG_L の結果を示す。縦軸は第 1 軸に荷重、第 2 軸に AE エネルギーを示す。表-6 に粒径毎の供試体の重心荷重と最大荷重お

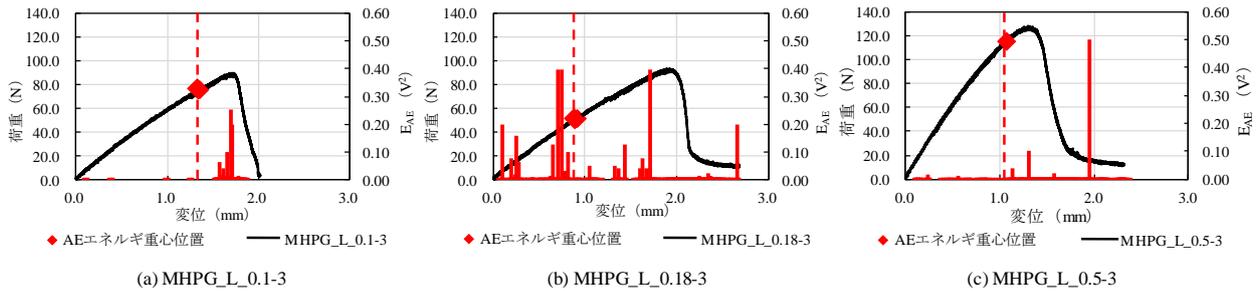


図-8 AE エネルギー重心位置評価の一例

よび最大変位と重心変位の差を示す。表より、混和率 0.5 が最も重心荷重が大きく载荷後半で AE エネルギーが発生し最大荷重も高くなった。混和率 0.18 が最も重心荷重が小さく初期に AE エネルギーが放出し最大荷重も低くなった。

以上の結果より、AE エネルギーの重心位置を用いて GB の充填量による強度上昇効果を検出できることが示唆された。

5. まとめ

2 種類のひび割れ注入用樹脂を対象に中空粒子を混和し、AU 法、一軸引張試験を実施。波動の内部減衰と力学的特性の観点からひび割れ注入材に適した樹脂の検討を行った。中空粒子の混和率と粒径を変更し超音波の内部減衰と AE エネルギーの放出位置から力学的特性の向上効果の検討を行った。結果以下のことが明らかになった。

- 1) 硬質樹脂は変位量が小さく変形追従性が低かった。軟質樹脂は変形追従性が高く中空粒子の混和により強度が上昇し、弾性波を用いた検出が容易となり、軽量化から現場施工にも有用と示唆された。中空粒子混和軟質樹脂がひび割れ注入材として有効であることが示された。
- 2) 超音波の内部減衰特性と引張り強さの相関を確認した。混和中空粒子の粒径が小さいほど注入樹脂の強度が上昇することが示唆された。AE エネルギーの放出位置から中空粒子の充填量増加に伴う強度増加を確認した。中空粒子の粒径、混和率と強度の関係を推定した。

参考文献

- 1) 国立研究開発法人土木研究所：コンクリート構造物の補修対策施工マニュアル，2016
- 2) 田中享二，申洪澈，安藤紀明：エポキシ樹脂注入によるコンクリート・モルタルのひび割れ補修部の疲労試験，日本建築学会構造系論文集，Vol.554, No.67, pp.21-27, 2002

表-6 重心荷重，重心変位一覧

供試体名	最大変位- 重心変位 (mm)	重心荷重 (N)	最大荷重 (N)
MHPG_S_0.1-3	0.33	75.9	115.3
MHPG_S_0.18-3	0.97	51.6	97.8
MHPG_S_0.5-3	0.24	115.0	110.9
MHPG_M_0.1-3	0.34	96.3	109.7
MHPG_M_0.18-3	0.87	46.3	92.5
MHPG_M_0.5-3	0.29	114.7	144.4
MHPG_L_0.1-3	0.68	67.5	89.7
MHPG_L_0.18-3	0.88	60.0	93.4
MHPG_L_0.5-3	0.75	20.3	128.1

- 3) 足立忠晴，荒木稚子，樋口理宏：エポキシ樹脂複合材料の力学特性に及ぼすシリカ粒子充填の効果，日本接着学会誌，Vol.46, No.6, pp.222-229, 2001
- 4) 一般財団法人 日本工業規格 JIS K 7161, プラスチック - 引張特性の求め方 -, 2014
- 5) 守田栄：騒音・振動対策ハンドブック，技報堂出版，pp.27, pp.426-427, 1963
- 6) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論（第2版），森北出版，1988
- 7) 社団法人 日本非破壊検査協会：[非破壊検査技術シリーズ] アコースティック・エミッション試験 II Acoustic Emission Testing, pp.60-61, 2008
- 8) Nielsen, L. E.: Mechanical properties of polymers and composites, CRC Press, 1993
- 9) 島本由麻，永田瑞穂，鈴木哲也：AE エネルギー指標に基づく道路橋 RC 床版部の蓄積損傷の同定に関する研究，農業農村工学会農道研究会報，Vol.26, pp.23-27, 2016
- 10) 鈴木哲也，島本由麻：コンクリート圧縮荷重過程で発生する AE エネルギーを指標とした損傷度評価の試み，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.17, pp.157-165, 2017