画像解析による酸化マグネシウム植生基盤材の割裂破壊 評価に関する研究

島本由麻¹⁾・鈴木哲也^{*2)}

1) 新潟大学大学院自然科学研究科 Graduate School of Science and Technology,
Niigata University

2) 新潟大学自然科学系 (農学部) Faculty of Agriculture, Niigata University

摘要: 近年, 地域資源の有効活用による植生基盤の構築・保全が推進されている。本研究では, もみ殻灰を有効利用した植生基盤材の開発を目的としている。このための基礎的検討として, 接合材に酸化マグネシウムを使用し, もみ殻灰を混合した植生基盤材の力学特性を割裂試験により評価した結果を報告する。実験的検討では, もみ殻灰混入土 (シリーズMR) および未混入土 (シリーズM) において割裂試験を行い, 破壊過程を AE 法および画像解析により詳細に評価した。検討の結果, シリーズMR は AE 発生挙動にシリーズM との差異が確認された。AE 法による SiGMA 解析および画像解析結果より, ひずみの局所化と AE の発生位置・形成モードに関係があることが示唆された。

キーワード: 酸化マグネシウム, 画像解析, 弾性波, SiGMA 解析, 割裂試験, 植生基盤

SHIMAMOTO, Yuma and SUZUKI, Tetsuya: **Evaluation of splitting characteristics of magnesium improved soil by image analysis.**

Abstract: In recent years, a large number of researches have focused on building and maintaining infrastructure used regional resources effectively. The purpose of this study is to develop new planting soil mixed with magnesium oxide and rice husk ash (RHA), the waste natural resource, for re-vegetation fields. In order to develop the good structure material, there needs to examine material properties of the magnesium improved soil mixed with RHA in splitting test. Splitting test was conducted on two types of soil (normal and mixed with RHA). Fracture process was qualitatively evaluated by image analysis and acoustic emission (AE). These results indicate that RHA changes the mechanical property of magnesium improved soil. Two improved soils tend to different characteristics of AE in spitting fracture. By evaluating from image analysis and SiGMA analysis, a relation between concentration of stain, AE event localization and crack mode is correlated.

Key words: Magnesium oxide, Image analysis, Acoustic Emission(AE), SiGMA analysis, Splitting test, Planting ground

1. はじめに

近年, 地域資源の有効活用による社会基盤施設の構築・保全が推進されている。本論の研究対象である農業用水路においても例外でなく, LCC 最小化に加えて地域環境の保全・再生に資する構造材料の開発が技術的課題となっている。

従来, 農業用水路にはコンクリートが使用されてきたが, 地域生態系の改質など種々の問題が指摘されている。本研究は, 植生基盤材によって, コンクリート水路から長期的な緑化による近自然型水路へ転換することを目的としている。筆者らは, 酸化マグネシウムと地域資源であるもみ殻灰を混合した植生基盤材の開発を検討しており, 筆者らによる試験材料を用いた栽培実験事例を写真-1 に示す。本試験は, 稲わら繊維を混入したマグネシウム改良土にトールフェスク (*Festuca arundinacea* Schred) を播種した事例である。基盤材

の損傷にともない, 基盤材のき裂に植物の根系が侵入し, 基盤材の上に植生が定着するものと考えられる。図-1 に本研究の流れを示す。

植生基盤材の水路への適用を検討した場合, 水流等による浸食を防止する機能を有する必要がある。酸化マグネシウムは, 舗装材として, 生態系への環境負荷の軽減等を背景に近年多用されている^{3), 10)}。本研究では, 水路壁面の軟弱地盤を研究対象としているため, 既往研究において舗装材として使用されてきた酸化マグネシウムを植生基盤材として利用し, 基盤材の安定性の向上を検討した。同時に混和するもみ殻灰の主成分である SiO₂ は, ポゾラン性を有することが明らかにされており⁵⁾, もみ殻灰を植生基盤材へ混和することでポゾラン反応に基づく供用下での構造材の安定と地域資源の有効活用が可能になるものと推察される。既往の研究では, 酸化マグネシウム改良土の力学特性や破壊過程の検討は十分に

* 連絡先著者 (Corresponding author) : E-mail : suzuki@agr.niigata-u.ac.jp

〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050 番地 8050 Ikarashi Nino-cho, Nishi-ku, Niigata, 950-2181, Japan

行われておらず、水路壁面への基盤材の導入を検討した場合、供用下における浸食防止性・安定性の観点から、構造材料としての有効性を検証するために力学特性の定量評価が不可欠である。基盤材の損傷部において植生が定着すると考えられることから、基盤材の破壊過程を詳細に評価することは重要な課題である。

本報では、基盤材開発の基礎的検討として、もみ殻灰と酸化マグネシウムを混合した植生基盤材の力学特性を割裂試験により評価した結果を報告する。実験的検討では、酸化マグネシウム改良土を対象にもみ殻灰混入土（以下、シリーズMR）および未混入土（以下、シリーズM）において割裂試験を行い、力学特性を検討する。載荷過程の変形挙動は、画像解析により3次元的に検出した。破壊挙動の定量評価は、弾性波の観点からAcoustic Emission (AE) 法により行った。AE法は固体材料内部の微小な破壊、あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波現象を検出する手法であり、微小破壊のモニタリングとして有効であることが明らかにされている⁹⁾。破壊過程を詳細に評価するために、AE法によるSiGMA解析¹⁵⁾からAEの発生源および破壊形成モードを同定した。これらの実験的検討から、局所的破壊挙動の検出とそれに基づく材料特性を評価した。

2. 解析方法

2.1 SiGMA 解析

AE法の波形処理としてモーメントテンソル解析の有用性が明らかになっており¹⁵⁾、簡易な解析方法としてSiGMA解析が提案されている。本手法は、6個以上のAEセンサによりAE波形を取得し、初動の到達時間差からAE発生源の位置と運動方向を決定する。初動振幅値と到達時間差からモーメントテンソル成分に関する線形連立方程式をつくり、成分を決定することができるものである。

本研究では、モーメントテンソル成分を決定したのちに、固有値解析を行い、固有値からせん断率 R_s を算出し、ひび割れを引張ひび割れ・せん断ひび割れ・混合型ひび割れに分類した¹⁴⁾。分類は大津ら¹⁴⁾と同様に式1のように分類した。

$$\begin{aligned} R_s < 40\% & \quad \text{引張ひび割れ} \\ 40\% \leq R_s \leq 60\% & \quad \text{混合型ひび割れ} \\ R_s > 60\% & \quad \text{せん断ひび割れ} \end{aligned} \quad (1)$$

なお、AEイベント定義時間は大津ら¹⁴⁾と同様に100 μ sとした。イベント定義時間とは、発生源に最も近いAEセンサでの到達時間と、その他の5個のAEセンサとの到達時間の差である。本実験では、最初に検出されたAE波から100 μ s以内にその他のすべてのAEセンサで信号が検出されたものをAEイベントと定義した。

2.2 画像解析

画像解析は、CCDカメラで撮影したデジタル画像を数値解

写真-1 栽培実験事例（供試植物：トールフェスク）

Photo 1 Examples of planting test (Testing plant : *Festuca arundinacea* Schred)

図-1 本研究の流れ

Fig. 1 Experimental and analytical flow

表-1 示方配合設計

Table 1 Specified mix proportion.

実験 シリーズ	細砂 (g)	パーミ キュライト (g)	酸化マグ ネシウム (g)	もみ殻灰 (g)	水 (g)
M	280.0	14.0	58.8	0.0	73.5
MR	266.0	13.3	58.8	12.3	73.5

析し、撮影範囲の変位量およびひずみ分布を推定した。本手法は計測対象表面に施されたランダム模様に基づき、変形前後の点の移動を追跡することにより変位方向、変位量を算出した。ひずみ分布の算出には、ある2点間の距離を基準とし、変形前後の変化をひずみとして算出した。

3. 実験方法

3.1 配合設計

直径 50 mm、高さ 98 ± 2 mm の円柱供試体を JGS 0811「安定処理土の突固めによる供試体作製方法」に準じて 6 本作製した。酸化マグネシウムを 20 % 添加したシリーズ M と、もみ殻灰を 5 % 外割り置換したシリーズ MR の 2 シリーズとした。使用した材料は、細砂（土粒子密度 2.65 g/cm^3 ）、パーミキュライト（気中乾燥状態における密度 2.67 g/cm^3 ）およびもみ殻灰（密度 2.32 g/cm^3 ）である。含水比は 25 % とした。パーミキュライトは、植生成長に必要な水分保持機能を高める目的で混和した。含水比においては、最適含水比を使用した。示方配合を表-1 に示す。なお、もみ殻灰は、市販の燐炭を $425 \mu\text{m}$ のふるいにかけた後に電気炉において 500°C で 1 時間燃焼させて製造した。XRD/Rietveld 解析¹²⁾によるもみ殻灰のガラス化率は 97 % であった。供試体は製作後 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ で 7 日水中養生させた後に供試した。本研究の予備実験において、材齢 7 日および 28 日で割裂引張強度がほぼ一定値をとったため、本研究では材齢 7 日の水中養生とした。

3.2 超音波伝播速度の測定

供試体の内部構造を把握するため、供試体の x 軸方向（図-3）に対して超音波伝播速度を測定した。計測装置は Pundit Lab（PROCEQ 社製）を使用した。計測は供試体中心部において行った。探触子にはグリスを薄く塗布し、供試体との密着性を高めた。入力超音波は周波数 54 kHz、入力電圧 500 V である。

3.3 割裂試験

材齢 7 日において JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に準じて割裂試験を実施した。載荷速度は、コンクリートと比較して引張強度が小さいことを考慮し、AE 計測でより多くの AE 信号を取得するとともに、断面内のひずみ分布を詳細に評価するため、JIS 規格の 1/40 となる毎秒 0.0015 N/mm^2 として載荷を行った。割裂試験では、破壊過程における AE 発生挙動の計測および AE 源の位置標定、画像解析を実施した。AE の計測装置は SAMOS（PAC 社製）である。AE センサは計 6 個設置した。150 kHz 共振型センサを用い、しきい値を 40 dB、増幅値を 80 dB とした。検出波のフィルタリングを Lower : 5 kHz, Upper : 400 kHz に設定した。実験概要図を図-2、センサ配置図を図-3 に示す。

3.4 画像撮影

画像解析はデジタル画像相関法（DICM）を用いて行った。実験的検討では、2 台の CCD カメラを用いて計測を行った。計測に用いた CCD カメラは CRAS-14S5M-C（Point Grey

図-2 実験概要図

Fig. 2 Experimental set up for splitting test.

図-3 センサ配置図（単位：mm）

Fig. 3 AE sensor location in splitting test (Unit: mm).

写真-2 材齢 7 日における供試体写真

（左：シリーズ M，右：シリーズ MR）

Photo 2 Overview of testing samples on 7 days.

（Left: Series M, Right: Series MR）

表-2 供試体の力学特性

Table 2 Mechanical properties.

実験シリーズ	割裂引張強度 (N/mm^2)	超音波伝播速度 (m/s)
M	0.12	1,336
MR	0.74	1,864

Research 社製) であり、解像度は 1384×1036 pixel である。計測前に校正プレートを用いて、位置および角度を変えながら 20 枚程度撮影し、画像のひずみ補正を行った。供試体の計測面には、白色のポストカラーで下地を塗布し、下地の上から黒色のランダム模様を塗布した。計測時の撮影では、計測表面を一定の明るさに保ち、CCD カメラで 1 秒間に 5 回撮影を行った。

4. 結果および考察

4.1 割裂破壊に基づく力学特性評価

材齢 7 日における供試体写真を写真-2、力学特性を表-2 に示す。もみ殻灰を混入すると引張強度が約 6 倍、超音波伝播速度が約 1.5 倍増加することが確認された。先行研究において、割裂引張強度の増加はせん断抵抗の増加が主因と推察されている⁶⁾。このことから、シリーズ MR はシリーズ M と比較してせん断抵抗が増加したものと推察される。なお、無ランニング水路の設計にあたっては、水路が力学的に安定し、流水に対して洗掘および浸食を生じない構造となるものが望ましいとされている¹¹⁾。このような初期強度におけるせん断抵抗の増加は、長期供用下においても、雨水や流水による基盤材の浸食を緩和するものと考えられる。以上より、本研究ではもみ殻灰混入の有効性が示唆されたものと考えられる。超音波伝播速度や強度値の増加傾向は、シリーズ MR がシリーズ M と比較して粒子の間隙が小さく密な内部構造に起因するものであると推察される。シリカフェウムやフライアッシュには、可溶性の SiO_2 が多く含まれており、セメントの水和反応において遊離する Ca(OH)_2 としだいに化合して不溶性の C-S-H ゲルを生成し、組織を一層密にすることが明らかになっている¹⁾。もみ殻灰を混入した供試材の初期発現強度は、高炉スラグ微粉末やフライアッシュと比較して大きいことが明らかになっており⁵⁾、本研究のシリーズ MR においても材齢初期からもみ殻灰に含まれる可溶性 SiO_2 と Mg(OH)_2 とが化合し、ポゾラン反応と同様の現象によって生成する水和物が組織を密にしていると推察される。

4.2 画像解析による局所ひずみの可視化

図-4 は応力レベル 80 %、95 % の際のシリーズ M およびシリーズ MR の x 軸方向のひずみ分布の解析画像の関係を示したものである。シリーズ M では、荷重過程の進行に対してひずみ量の変化はほぼ確認されなかった。シリーズ MR で、応力レベル 95 % で最終破断面におけるひずみ量の増大が確認された。特に荷重板との接触部付近で局所的にひずみ量が増大することが確認された。塑性理論に基づくセメント系材料の割裂破壊の数値解析によれば、水平方向に高い圧縮応力度が存在することにより、荷重板付近での大きな塑性化領域の形成が荷重初期から認められている²⁾。供試体に初期ひび割れが発生すると、円柱供試体の中央領域の急速な塑性化に基づく塑性領域の拡大が確認され、荷重荷重が最大値に達した際に直径方向の面にそって急激に破壊が引き起こされる。

図-4 画像解析による横ひずみ分布

Fig. 4 Horizontal strain distribution by image analysis.

図-5 AE ヒット数と横ひずみの関係 (シリーズ M)

Fig. 5 Relationship between AE hits and horizontal strain (series M).

図-6 AE ヒット数と横ひずみの関係 (シリーズ MR)

Fig. 6 Relationship between AE hits and horizontal strain (series MR).

本研究の実験的検討においても、割裂破壊過程は、終局時に最終破断方向にひび割れが急激に進展し、破断に至ることが明らかになった。

4.3 AEパラメータ解析に基づく局所割裂破壊の特性評価

4.3.1 AE ヒット数とひずみ量の関係

画像解析により割裂破壊時の局所ひずみの増加が確認されたことから、AE パラメータによる破壊挙動の特性評価を試みた。検討に使用した AE パラメータは AE ヒット数である。AE の発生挙動は、微小ひび割れの発生過程と対応している。この過程は、発生するひび割れ総数に依存し、既存の破壊域が次の破壊域の進展を支配すると考えられる。使用する AE パラメータである AE ヒット数は、単位時間当たりの AE 発生挙動を評価する指標であり、破壊試験などの载荷過程を定量評価するための優れた指標である⁸⁾。

図-5および図-6に AE ヒット数と画像解析によって求めた供試体中心部の x 軸方向のひずみ量の関係を示す。図-5はシリーズ M、図-6はシリーズ MR である。一般的に割裂破壊は、終局時に突然ひび割れが発達する。両シリーズとも応力レベル 90 %以上の終局時において、AE の頻発が確認された。x 軸方向ひずみ量の増加点で AE の頻発が確認されており、供試体の塑性変形にともない破壊が進行したものと推察される。

両シリーズの AE 発生挙動について考察する。シリーズ M においては応力レベル 96 %以上の終局時を除いて AE の発生がほとんど確認されなかった。シリーズ MR では 70~80 %で 100~200 程度の AE ヒット数が確認された後に、90 %前後から徐々に AE が発生し、破断に至った。AE 発生挙動と体積ひずみや横ひずみとは、非常に相関が高いことが指摘されている¹⁴⁾。応力ひずみ挙動における弾性域では、AE はほとんど確認されない。非線形挙動となる塑性域から AE が頻発し、体積ひずみがピーク点以後、体積膨張と加速度的な AE 発生が確認された後に破断に至ることが明らかにされている。载荷過程におけるひずみ挙動の変化が各シリーズにおいて異なるのは、せん断抵抗力の相違に影響を受けているものと推察される。

累積 AE ヒット数は、シリーズ M : 905 ヒット、シリーズ MR : 11,312 ヒットであった。シリーズ MR は、シリーズ M と比較して約 10 倍のヒット数が確認された。これは、シリーズ M は内部組織が疎であり、低強度かつ空隙構造の発達が AE 発生挙動に影響していると推察される。

4.3.2 AE イベント位置標定結果と形成モード

AE ヒット数が各シリーズで異なることが明らかになったことから、SiGMA 解析を用いた 3 次元位置評定による AE 源の発生位置および形成モードの同定と割裂破壊過程の評価を試みた。図-7は応力レベル 80 %, 95 %のときのシリーズ MR における AE イベント位置標定結果と形成モードを示したものである。なお、シリーズ M においてイベントは検出されなかった。この結果には 2 つの理由が考えられる。第 1 に、

図-7 AE-SiGMA 解析結果 (シリーズ MR)

Fig. 7 Results of the SiGMA analysis in splitting test (series MR).

図-8 AE イベント形成モード別発生頻度 (シリーズ MR)

Fig. 8 Relation between horizontal strain and crack generation on the stress level (series MR).

シリーズ M の低強度かつ空隙構造の発達が影響していると考えられる。図-5よりシリーズ M はシリーズ MR と比較して AE ヒットが少なく、位置同定が可能な程度の AE が割裂破壊過程において発生していなかったものと推察される。第 2 に、シリーズ M においては応力 96 %以上の終局時に急速に AE ヒット数が上昇していることから、各センサ間に到達時間差が生じず、イベントとして定義できなかったと推察される。

AE 法を用いたコンクリートの割裂試験におけるひび割れの進展過程は既往研究では、供試体と载荷板との接触により、供試体の一端部から破壊が進行する。その後、破壊領域が拡大し、主破壊に至ることが報告されている¹⁴⁾。また、供試体の破壊挙動と寸法効果との関連も指摘されており、直径の増加に伴い载荷面付近で AE イベントが集中することが報告されている⁸⁾。SiGMA 解析の結果、シリーズ MR において応力レベル 80 %で供試体中心部から供試体上部で AE が発生しており、応力レベル 95 %で y 軸方向 (最終破断面方向) に広がっていくことが確認された。破壊形成モードの発生位置を比較すると、引張ひび割れは供試体中央部近傍、せん

断ひび割れは載荷板の両端面において頻発することが確認された。コンクリートの割裂破壊では、供試体の端部と載荷板との間に摩擦が作用するため、コンクリートの横方向への膨らみが載荷板によって拘束される⁴⁾。このような横拘束の効果は供試体端面から離れるに従って減少するため、中央部において局所ひずみの増加に伴う AE の頻発が確認されるものと考えられている。本研究では、供試体の直径が 50 mm であり載荷板との接触面が小さいため、載荷板との接触による影響を受けにくい。このことも供試体中心部で引張りひび割れが頻発した一因と推察される。載荷板を固定していないため、応力レベルが増加するにしたがい、供試体と載荷板とのずれによって載荷板両端面においてせん断ひび割れが頻発すると考えられる。

図-8 にシリーズ MR における AE イベント形成モード別発生頻度を示す。図-8 より引張りひび割れがせん断ひび割れ・混合型ひび割れと比較して卓越していることが確認された。x 軸方向のひずみ量増加にともない、AE イベントの増加が確認された。すべての形成モードにおいて、x 軸方向のひずみ量の増加点より先に AE の発生が始まることもあわせて確認された。特に引張りひび割れにおいては顕著にこの結果を示した。画像解析面とセンサ配置面との関係によりこのような結果が出た可能性も否定できないが、画像解析による供試体表面におけるひずみ量の増加前に、供試体内部の微小なひび割れを検出している可能性が示唆された。

5. おわりに

本研究では、シリーズ M およびシリーズ MR において割裂試験を行い、破壊過程を AE 法と画像解析から検討した。

シリーズ MR はシリーズ M と比較して引張強度・超音波伝播速度がともに増加することから、流水による基盤の浸食が防止され、水路壁面に使用する構造材料として有効であると推察される。画像解析・AE 計測によって植生基盤材の内部構造・破壊過程を詳細に評価できる可能性が示唆されたものと考えられる。

割裂試験のみでは水圧や環境因子等を考慮しておらず、水路における基盤材の損傷のしやすさを直ちに示すものではない。植生基盤材の水路への適用性を検討した場合、実環境への導入試験をふまえ、基盤材の損傷・破壊過程とそれに伴う植生定着をモニタリングする必要がある。今後、本研究で検討した AE 法および画像解析による破壊過程の評価とともに、植生実験を実施し、より適切な植生の導入方法等を検討していく必要がある。

引用文献

- 1) 荒井康夫 (2002) 改訂 2 版セメントの材料化学, 大日本図書: 214-215.
- 2) Chen, W.F., 色部誠ほか監訳 (1985) コンクリート構造物の塑性解析, 丸善: 437-442.
- 3) 藤森新作・小堀茂次 (2000) 自然環境にやさしい土壌硬化剤マグホワイトの開発, 農業土木学会誌, 68(12): 1297-1300.
- 4) 畑中重光 (1998) 力と変形, 笠井芳夫編, コンクリート総覧, 技術書院: 416-419.
- 5) 石黒寛 (2000) 粉殻灰混合セメントを用いたモルタルの強度特性, 農業土木学会論文集 210: 83-88.
- 6) 香月大輔・中田幸男・兵動正幸・吉本憲正・村田秀一 (2004) 割裂強度およびダイレイタンシー特性に着目したセメント固化粒状材料のせん断強度特性の評価, 材料, 53(1): 13-16.
- 7) 川瀬麻人・大野健太郎・宇治公隆・上野敦 (2012) コンクリートの割裂引張強度試験における破壊過程に関する考察, コンクリート工学年次論文集, 34(1): 334-339.
- 8) 日本非破壊検査協会 (2000) コンクリート構造物のアカースティック・エミッション試験方法, NDIS2421-2000.
- 9) 日本非破壊検査協会 (2006) 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 I, 日本非破壊検査協会: 4-8.
- 10) 西形達明・山田哲司・西田一彦・松田豊 (2006) 酸化マグネシウムの地盤改良への適用について, 土と基礎, 54-7: 19-21.
- 11) 農林水産省農村振興局 (2001) 土地改良事業計画設計基準設計「水路工」基準書 土地改良事業計画設計基準設計「水路工」技術書, 農業土木学会: 376-378.
- 12) 大沢栄也・坂井悦郎・大門正機 (1999) フライアッシュ-セメント系水和におけるフライアッシュの反応率, セメント・コンクリート論文集 53: 96-101.
- 13) 大津政康 (2005) 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: 27-38.
- 14) 大津政康・野崎渉太・川崎佑磨 (2011) AE-SiGMA 解析によるコンクリート割裂破壊の考察, コンクリート工学論文集, 22(3): 27-34.
- 15) Reinhardt.H・Grosse.C・Kurz.J (2008) Localization and mode determination of fracture events by acoustic emission, In: Acoustic Emission and Critical Phenomena, (eds. Carpinteri.A and Lacidogna.G) pp.41-66, Taylor & Francis, London.

(2014.6.18 受理)