

画像解析によるマグネシウム改良土の割裂破壊評価に関する研究

島本由麻・鈴木哲也*・森井俊広

(平成26年1月31日受付)

要 約

本研究は、もみ殻灰と酸化マグネシウムを用いた地盤改良土の割裂破壊特性を評価することを目的としている。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、力学特性を検討するとともに、破壊過程をAE法および画像解析により評価した。検討の結果、シリーズMRでは、縦ひずみの変化とAE発生挙動にシリーズMとの差異が確認された。AE法および画像解析結果より、ひずみの局所化とAEの関係が示唆された。

新大農研報, 66(2):141-146, 2014

キーワード：酸化マグネシウム、画像解析、AE（Acoustic Emission）、割裂試験

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水利施設においても例外ではなく、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急務な技術的課題となっている。

本報では、もみ殻灰を有効利用した植生基盤を開発するため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地盤改良土の力学特性を割裂試験により評価した結果を報告する。

もみ殻灰の主成分である SiO_2 は、ポゾラン性を有することが明らかにされており（石黒, 2000）、もみ殻灰を混和することでポゾラン反応に基づく自己治癒力を付加と地域資源の有効活用が可能になるものと推察される。同時に混和する酸化マグネシウムは、地盤改良材として、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（藤森ら, 2000；西形ら, 2006）。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行われておらず、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は不可欠である。

本報の実験的検討では、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AE（Acoustic Emission）法により行った。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。

実験方法

1. 配合設計

直径50mm、高さ $98 \pm 2\text{mm}$ の円柱供試体をJGS0811「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（表乾密度 2.57g/cm^3 、吸水率1.39%）、バーミキュライト（気中乾燥状態における密度 2.67g/cm^3 ）およびもみ殻灰（密度 2.32g/cm^3 ）である。含水比は最適含水比15%に5%を加えた20%とした。示方配合を表1に示す。なお、もみ殻灰は、市販の燐炭を $500\mu\text{m}$ 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、 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ で水中養生させ後に供試した。

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54kHzである。

3. 割裂試験

材齢7日においてJISA1113「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 0.0015N/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

表1. 示方配合設計

実験シリーズ	細砂 (g)	バーミキュライト (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	12.8	73.5

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。150kHz共振型センサを用い、しきい値を40dB、増幅値を80dBとした。検出波のフィルタリングをLower: 5kHz、Upper: 400kHzに設定した。

4. 画像解析

画像解析はデジタル画像相関法を用いて行った。デジタル画像相関法とは、カメラで撮影したデジタル画像を数値解析することにより、撮影範囲の変位量およびひずみ分布を推定する手法である。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 Research社製)であり、解像度は1384×1036pixel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カメラの撮影間隔を200Hzに設定し、撮影を行った。実験概要図を図1に示す。

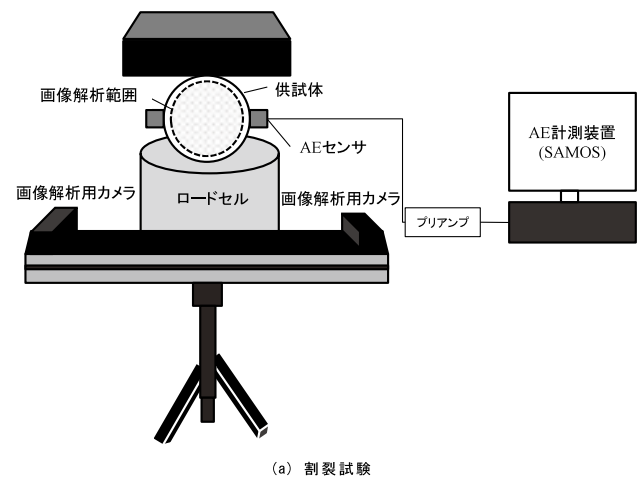
結果および考察

1. 供試体の力学特性

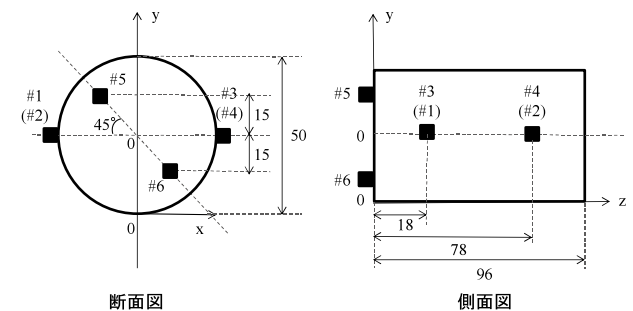
材齢7日における供試体の力学特性を表2に示す。割裂引張強度はシリーズM: 0.10N/mm^2 、シリーズMR: 0.76N/mm^2 であった。超音波伝播速度は、シリーズM: 1.336m/s 、シリーズMR: 1.864m/s であった。もみ殻灰を混入すると引張強度が約7倍、超音波伝播速度が約1.5倍増加することが確認された。これらのことから、割裂引張強度を用いて拘束圧下における固結砂のせん断抵抗の推定が可能だと考えられている。同様の試験結果は、香月ら(2004)の先行研究においても確認されており、割裂引張強度の増加はせん断抵抗の増加が主因と推察される。固結によるせん断抵抗の増加は、粒子塊の乗越えにともなうダイレイタンシー成分の増加として評価可能であり、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。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。シリカフュー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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ とシド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(荒井, 2002)。この反応はボゾラン反応であり、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 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ とが化合し、ボゾラン反応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。

2. 画像解析による局所ひずみの可視化

図2および図3は荷重レベル70%、80%、95%の際のAE源位置標定の結果と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。図2はシリーズM、図3はシリーズMR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、荷重レベル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增大することが確認された。塑性理論に基づくコンクリート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(Chen, 1985)。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



(a) 割裂試験



(b) AE センサ設置位置 (単位: mm)

図1 実験概要図

表2. 供試体の力学特性

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	0.10	1.336
MR	0.76	1.864

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。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。

3. AEパラメータ解析に基づく局所割裂破壊の特性評価

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、破壊試験などの荷重過程を定量評価するための優れた指標である(日本非破壊検査協会, 2000)。

図4および図5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4はシリーズM、図5はシリーズMRである。一般的に割裂破壊は、終

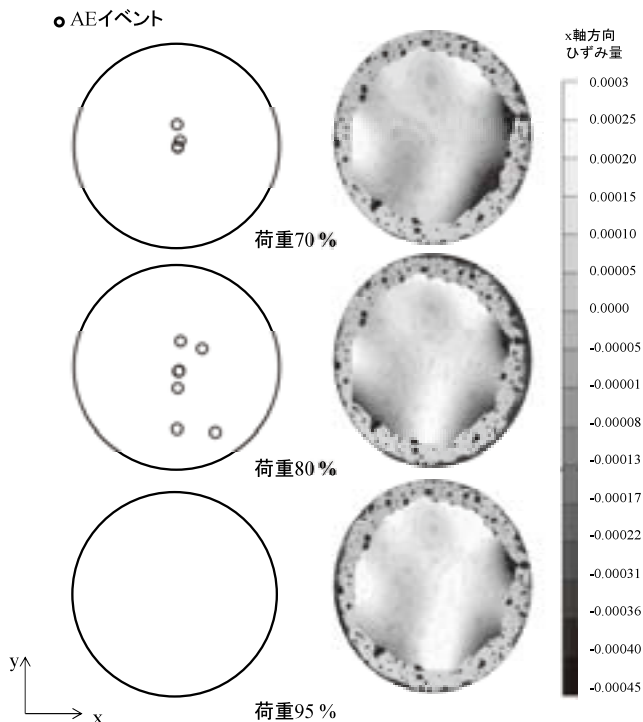


図2 ひずみ分布とAEの関係 (シリーズ M)

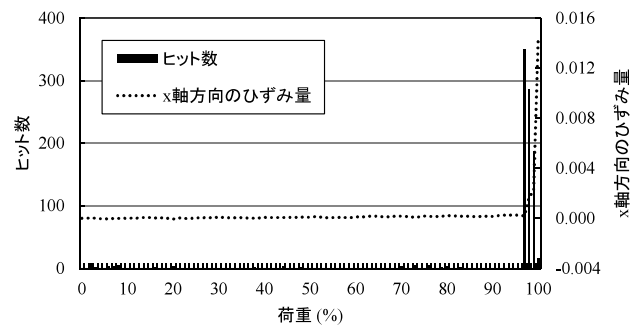


図4 AE ヒット数とひずみ量の関係 (シリーズ M)

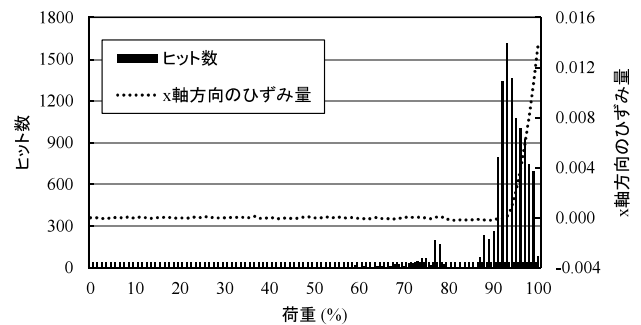


図5 AE ヒット数とひずみ量の関係 (シリーズ MR)

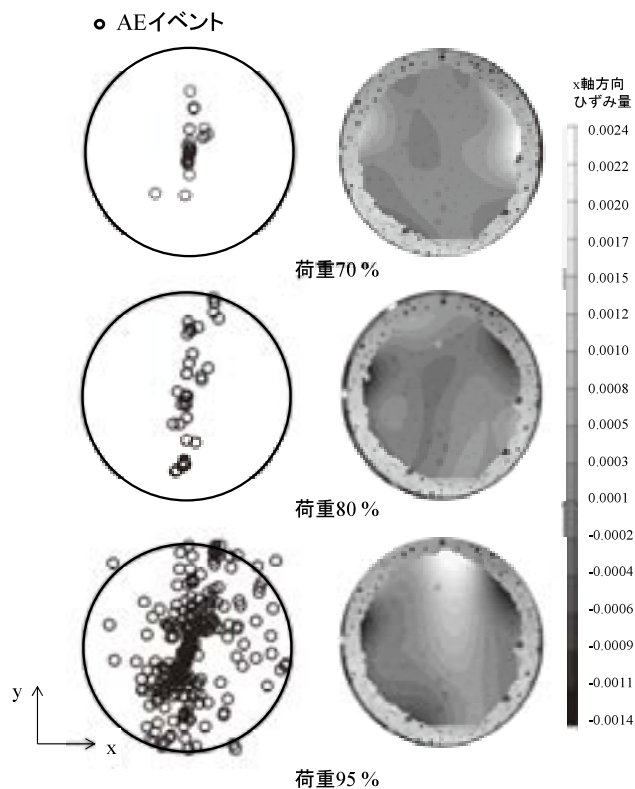


図3 ひずみ分布とAEの関係 (シリーズ MR)

局時に突然ひび割れが発達する。両シリーズとも荷重レベル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と、シリーズMにおいては荷重レベル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。一方、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(大津, 2005)。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。本研究では、シリーズMにおいてy軸方向のひずみ量がほぼ線形に減少したが、シリーズMRでは荷重レベル70%からy軸方向のひずみ量が非線形に減少を始めることが確認された。これより、AEの発生に影響を与える因子は、シリーズMではx軸方向のひずみ量だけであるが、シリーズMRでは両軸方向のひずみ量だと推察される。この違いがAEの発生挙動に違いを生じさせたと考えられる。載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。

3.2. AE発生位置評定とひずみ分布の関係

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、3次元位置評定による AE 源の発生位置の同定と割裂破壊過程の評価を試みた。図2および図3は荷重レベル70%、80%、95%のときの AE 源位置標定の結果と 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 においては、イベント発生数が5つと極めて少ない結果となった。図4に示したように、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。

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、供試体と載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（大津ら，2011）。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、直径の増加に伴い載荷面付近で AE イベントが集中することが報告されている（川瀬ら，2012）。AE 源位置標定の結果、シリーズ MR において荷重レベル70%では供試体中心部で AE が発生しており、荷重レベル80%で y 軸方向に、荷重レベル95%で x 軸方向に広がっていくことが確認された。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（畑中，1998）。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50mm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 AE イベントが頻発した一因と推察される。

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。以下に検討結果を列挙する。

- 1) シリーズ MR は、シリーズ M と比較して、引張強度が約7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。
- 2) x 軸方向ひずみ量の増加にともない、AE の頻発が確認された。シリーズ MR は、シリーズ M と比較して、AE ヒット数が約10倍増加することが確認された。
- 3) 割裂破壊過程において、発生した AE 源位置標定を行った結果、供試体中心部から最終破断面方向に AE の発生を確認した。

謝辞

本研究で実施した化学分析については、新潟大学工学部佐伯竜彦教授、斎藤豪准教授、工学部コンクリート研究室の皆様にご多大のお世話になりました。施設機能工学研究室においては実験・解析に岸直人君の協力を得ました。ここに記して感謝申し上げます。

参考文献

- a) 雑誌
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. 第68巻. 第12号. 1297-1300.
石黒覚，2000. 初級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. No.210. 83-88.
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ス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. Vol.53. No.1. 13-16.
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. Vol.34. No.1. 334-339.
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.
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. pp.27-38. 森北出版. 東京.
- b) 単行本
荒井康夫，2002. 改訂2版セメントの材料化学. pp.214-215. 大日本図書. 東京.
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. pp.437-442. 丸善. 東京.
畑中重光，1998. 力と変形. pp. 416-419. 笠井芳夫編著. コンクリート総覧. 技術書院. 東京.
日本非破壊検査協会，2000. NDIS2421-2000コンクリート構造物のアコースティック・エミッション試験方法.
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. 第22巻第3号. 27-34.

Evaluation of Splitting Characteristics of Magnesium Improved Soil by Image Analysis

Yuma SHIMAMOTO¹, Tetsuya SUZUKI^{2*} and Toshihiro MORII²

(Received January 31, 2014)

Summary

This paper shows that rice husk ash (RHA) changes the mechanical property of magnesium improved soil. 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). Thus, concentration of vertical stain and AE in splitting fracture appears different characteristics. By evaluating the mechanical properties from image analysis and AE parameters, the characteristic of improved soil is qualitatively evaluated.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 66(2):141-146, 2014

Key words : Magnesium oxide, Image analysis, Acoustic emission, Splitting test