

AE-SiGMA 解析による酸化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*

(平成26年8月10日受付)

要 約

もみ殻や稲わらは収穫後廃棄されることも少なくない。本研究は、もみ殻および稲わらを有効活用した構造材料の開発を目的としている。構造材料としての有効性を検証するために破壊挙動および力学特性の検討が必要である。本報では、もみ殻灰および稲わら繊維を混和した酸化マグネシウム改良土の力学特性を、割裂破壊挙動の際に発生する弾性波の観点から評価した結果を報告する。実験的検討では、混和物を変化させた3つのシリーズ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評価した。検討の結果、もみ殻灰を混和したサンプルにおいて、ボゾラン反応による割裂引張強度の増加が確認された。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、内部からの破壊の進行が示唆された。

新大農研報, 67(1):85-92, 2014

キーワード：酸化マグネシウム、AE-SiGMA 解析、割裂試験

はじめに

新潟県は、コメの生産量が全国で上位に位置している。平成25年度の農林水産省の調査によれば、コメの生産量は年間664,300 tである。収穫後のもみ殻や稲わらは廃棄されることも多い。

筆者らは、もみ殻および稲わらを有効活用した構造材料の開発を試みている(島本ら, 2014)。もみ殻はもみ殻灰混和材として、稲わらは繊維として利用を検討している。研究対象は農業水利施設である。

もみ殻灰の主成分である SiO_2 は、ボゾラン性を有することが明らかにされている(石黒, 2000)。もみ殻灰を混和することで、ボゾラン反応によって、長期間にわたり基盤が安定すると推察される。近年、セメント系材料においては、短繊維を混入することによる引張・圧縮時のじん性の向上が試みられている(菊田ら, 2012)。稲わら繊維を混和することで、引張耐力が改善されると推察される。同時に混和する酸化マグネシウムは、生態系への環境負荷の軽減を背景に多用されている(藤森ら, 2000; 西形ら, 2006)。酸化マグネシウム改良土は可溶性成分を多く含む火山灰土に対してセメント改良土と比較して優れた改良効果を示すことが明らかにされている(西形ら, 2006)。酸化マグネシウム改良土へのもみ殻灰の混和は有効であると推察される。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行われていない。構造材料としての有効性を検証するために破壊挙動を含めた力学特性の検討が必要である。

本報では、もみ殻灰および稲わら繊維を混和した酸化マグネシウム改良土の力学特性を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)、もみ殻灰と稲わら繊維混入土(以下、シリーズ MRF)および未混入土(以下、シリーズ M)において割裂試験を行った。載荷過程の変形挙動は画像解析から評価した。破壊挙動は Acoustic Emission (AE) 法により評価した。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動現象を検出する手法である。AE 法は、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(日本非破壊検査協会, 2006)。さらに、破壊過程を詳細に評価するために、AE-SiGMA 解析を用いて、AE の発生源位置および破壊モードの検討を試みた。これらの検討から、酸化マグネシウム改良土への稲副産物の利用と材料特性を考察した。

解析方法

1. SiGMA 解析

本研究では、AE 波に対して、SiGMA 解析を行った。SiGMA 解析から AE 発生源および破壊モードを同定した。せん断率 R_s から、ひび割れを引張りひび割れ・せん断ひび割れ・混合型ひび割れに分類した。分類は津村ら(2012)と同様に以下のようにした。AE イベント定義時間は $100 \mu\text{s}$ とした。

$R_s < 40\%$	引張りひび割れ
$40\% < R_s < 60\%$	混合型ひび割れ
$R_s > 60\%$	せん断ひび割れ

実験方法

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」に準じて作製した。シリーズは3つとした。供試数はシリーズ M およびシリーズ MRF が 6 本、シリーズ MR が 1 本である。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)、もみ殻灰(密度 2.32 g/cm^3) および稲わら繊維(長さ: $0.7 \sim 1.2$ cm、幅: 0.5 mm) である。水分量は、最適含水比である 25% とした。示方配合を表 1 に示す。なお、もみ殻灰は、市販のもみ殻燻炭を $425 \mu\text{m}$ のふる

表 1 示方配合設計

Series	fine sand (g)	vermiculite (g)	MgO (g)	rice husk ash (g)	rice straw fiber (cm ³)	water (g)
M	280.0	14.0	58.8	0.0	0.0	73.5
MR	266.0	13.3	58.8	12.3	0.0	73.5
MRF	266.0	13.3	58.8	12.3	5.3	73.5

表 2 供試体の力学特性

Series	Splitting tensile strength (N/mm ²)	Primary wave velocity (m/s)
M	0.12	1,336
MR	0.26	1,886
MRF	0.29	1,882

いにかけて後に、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 7 日水中養生させた後に供試した。

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、供試体の短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 54 kHz 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、JIS 規格の 1/100 となる毎秒約 0.0006 N/mm² とした。この理由は、コンクリートと比較して引張強度が小さく、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である。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。

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) である。カメラの解像度は 1384 × 1036 pixel である。CCD カメラの撮影間隔を 200 Hz に設定した。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

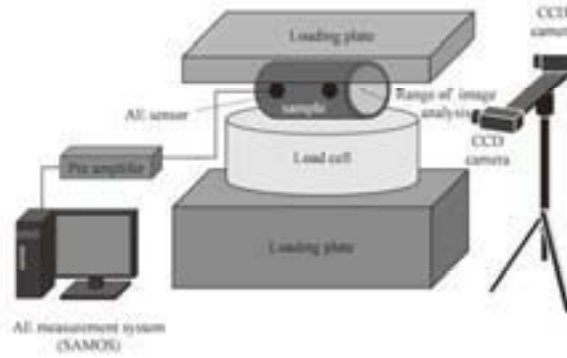
材齢 7 日における力学特性を表 2 に示す。シリーズ MR のサンプルサイズが 1 と小さいため統計処理は行っていない。もみ殻灰を混入すると引張強度が約 2 倍、超音波伝播速度が約 1.5 倍増加することが確認された。稲わら繊維の混和による違いは確認できなかった。XRD / Rietveld 解析より、Mg(OH)₂ はシリーズ M : 83.3%、シリーズ MR : 65.6% であった。もみ殻灰を混和することで、Mg(OH)₂ の減少が確認された。シリカフュームやフライアッシュには、もみ殻灰と同様に可溶性の SiO₂ が多く含まれている。セメントの水和反応において遊離する Ca(OH)₂ と SiO₂ とが化合して不溶性の C-S-H ゲルを生成する。このポズラン反応により、組織を密にすることが明らかになっている (荒井, 2002)。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いる (石黒, 2000)。本研究のシリーズ MR・MRF においても、材齢初期からもみ殻灰に含まれる可溶性 SiO₂ と Mg(OH)₂ とが化合し、ポズラン反応によって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

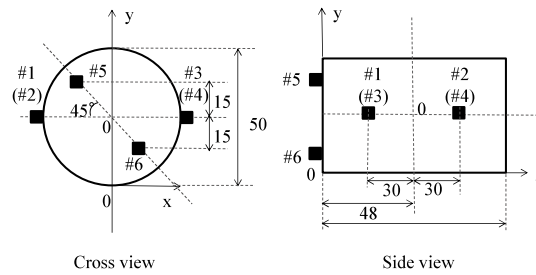
図 2 に画像解析による x 軸方向のひずみ分布を示す。荷重-変位曲線から、最大荷重以前の線形挙動域を弾性域、以後の非線形挙動域を塑性域と定義した。なお、シリーズ M では、載荷過程の進行に対してひずみ量の変化がほぼ確認されなかった。Chen (1985) は、セメント系材料の割裂破壊の数値解析により、水平方向に高い圧縮応力度が存在することで、載荷板付近での大きな塑性化領域の形成が認められるとしている。本研究では、シリーズ MR・MRF とともに、塑性域の終局時、特に載荷板接触部付近で局所的なひずみ量の増大が確認され、既往の研究と同様の結果を示した。

3. AE-SIGMA 解析結果

AE-SIGMA 解析を用いた AE 源の発生位置および破壊モードの同定を行った。図 3 は弾性域・塑性域におけるシリーズ MR および MRF の SIGMA 解析結果を示したものである。なお、



(a) 割裂試験



(b) AE センサ設置位置 (単位: mm)

図1 実験概要図

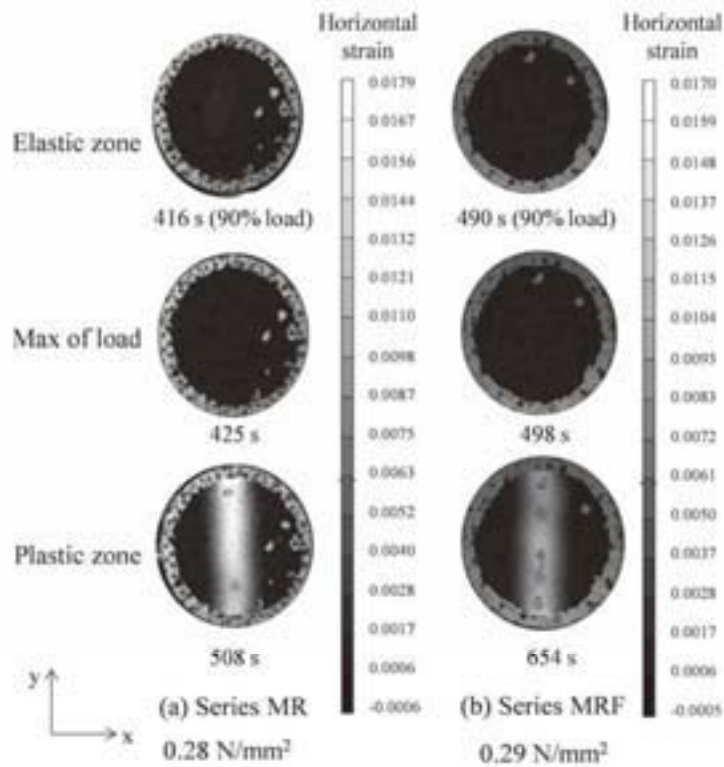


図2 画像解析による横ひずみ分布

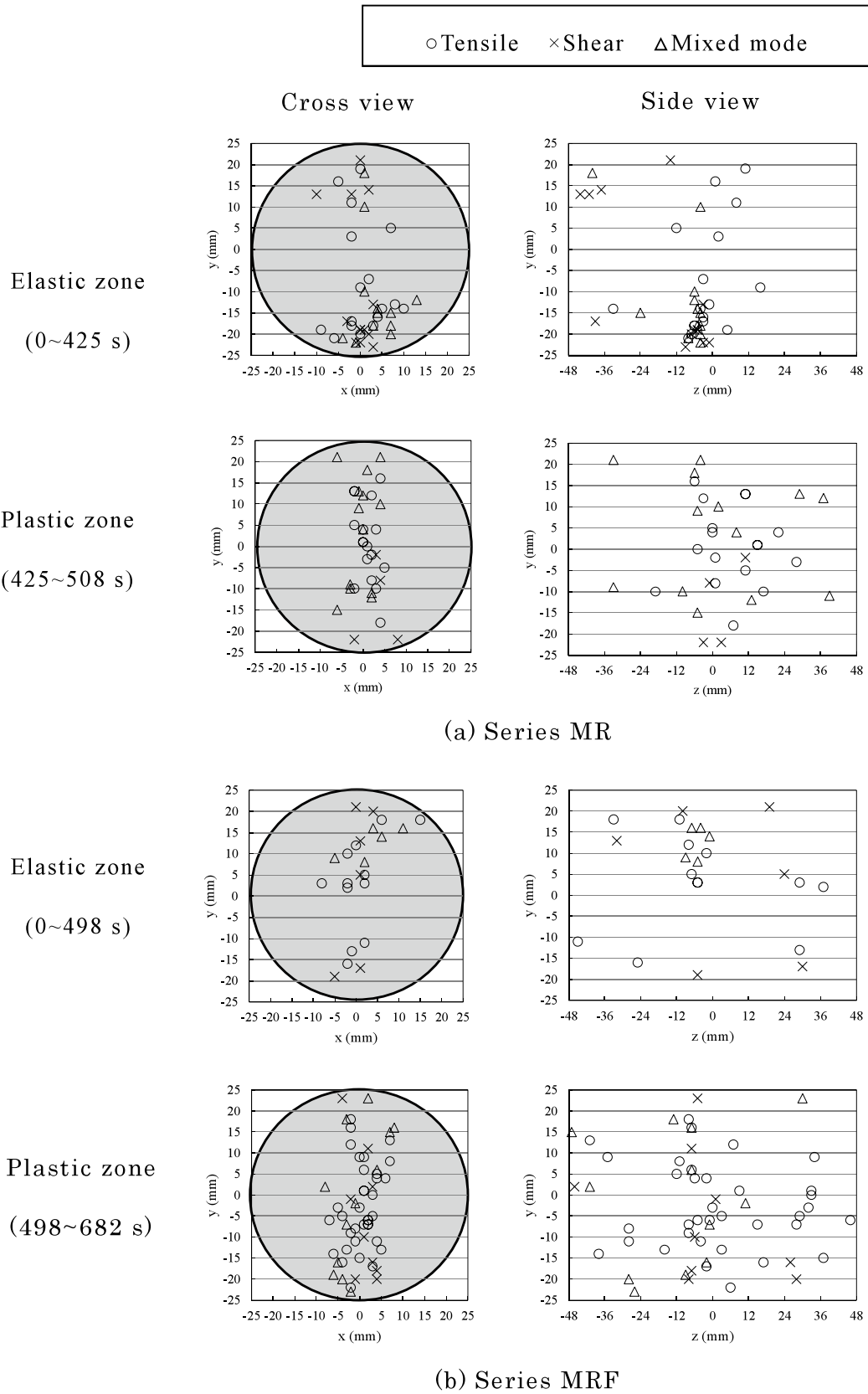
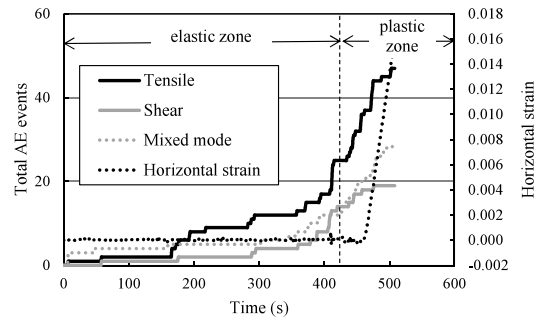
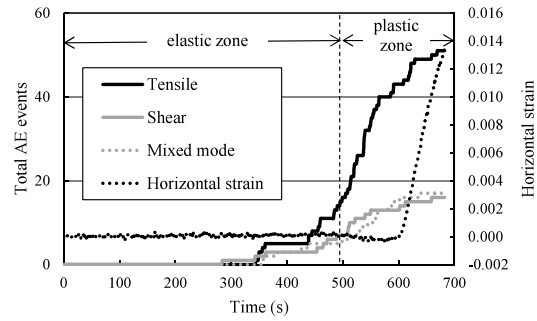


図3 SIGMA 解析結果



(a) Series MR



(b) Series MRF

図4 SiGMA 解析による破壊モード別のイベント数

シリーズ M においてイベントは検出されなかった。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。

シリーズ MR・MRF では、ほぼ同様の結果が確認された。弾性域では AE イベントが供試体断面中心から 0.2~0.4d 付近で確認された (図 3 Cross view)。塑性域では、供試体中心部に AE イベントが頻発することが確認された (図 3 Cross view)。奥行き方向 (z 軸方向) に関しては、弾性域では供試体側面中心部に AE イベントが集中し、塑性域で端面方向に AE イベントが広がっていくことが確認された (図 3 Side view)。以上から、供試体の一端部からひび割れが発生する。その後、破壊領域が y 軸方向では端面から中心部へ、z 軸方向では中心部から端面へ広がり、主破壊に至ることが明らかになった。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について、大津ら (2011) 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し、破壊領域が拡大により主破壊に至るとしている。しかし、この研究は載荷条件が繰り返し載荷であり、本研究とは異なる。川上 (1991) や上田ら (1993) の結果によれば、供試体断面中心から 0.3~0.4d (d: 供試体直径) 付近で破壊が開始するとしている。本研究では、供試体断面中心部に AE が頻発しており、既往の研究と異なる。AE のセンサ配置および供試体直径が 5 cm と小さいため、このような結果になったと推察される。

図 4 にシリーズ MR および MRF における AE イベント形成モード別発生頻度を示す。両シリーズにおいて、引張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。特に塑性域で急激に引張ひび割れが増加することが確認された。この理由としては、材料の塑性化にともない割裂破壊が起こるためだと推察される。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、拘束のない横方向へ供試体に変形し (畑中, 1998)、引張ひび割れが顕著に表れたと推察される。

両シリーズとも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が確認された (図 4)。特に引張ひび割れにおいては顕著にこの結果を示した。供試体内部から端面方向にひび割れが進展し、破断に至ると推察される。コンクリートにおける割裂試験では、z 軸方向に、ほぼ同時にひび割れが進展するとしており (大津, 2011)、本研究の結果とは異なる。供試体内部から端面方向へひび割れが進展した理由としては、3 層に分けて締固めを行ったことで供試体中央部が脆弱になったためだと考えられる。

実験的検討では、シリーズ MR および MRF において、有意な差を確認することができなかった。細砂体積 5% の繊維混和量では力学特性に変化を示さないと推察される。

おわりに

本研究では、もみ殻灰および稲わら繊維を混和した酸化マグネシウム改良土において割裂試験を行い、破壊過程を AE-SiGMA 解析と画像解析から検討した。検討の結果、もみ殻灰混和による割裂引張強度の増加が確認された。AE-SiGMA 解析および画像解析から構造材料の内部構造および破壊過程を詳細に評価できる可能性が示唆された。供試体内部から端面方向にひび割れが進展し、破断に至ることが明らかになった。細砂体積 5% の繊維混和量では力学特性に変化を示さないことが示唆された。今後、稲わら繊維の形状および混和量を検討する必要がある。

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.
- 川上英男. 1991. 骨材種類がコンクリートの力学的挙動に及ぼす影響. コンクリート工学年次論文集. Vol.13. No.1. pp.63-68.
- 菊田貴恒・三橋博三. 2012. 繊維補強コンクリートの構成要素と材料の基本的性能. コンクリート工学. Vol.50. No.5. pp.414-417.
- 石黒寛. 2000. 初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. No.210. 83-88.
- 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・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.
- 島本由麻・鈴木哲也・森井俊広. 2014. 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. 新大農報. 第66巻2号. pp.141-144.
- 上田稔・長谷部宣男・佐藤正俊・奥田宏明. 1993. コンクリートの割裂試験における破壊メカニズムの破壊力学的研究. 土木学会論文集. Vol.21. No.478. pp.61-70.

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. 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. pp.4-8. 日本非破壊検査協会. 東京.

Evaluation of Splitting Characteristics of Magnesium Improved Soil by AE-SiGMA Analysis

Yuma SHIMAMOTO¹ and Tetsuya SUZUKI^{2*}

(Received July 10, 2014)

Summary

Many rice husks and rice straws have been wasted in a rice-producing field. The purpose of this study is to develop structural material which uses rice husks and rice straws effectively. Test samples were magnesium improved soils mixed with rice husk ash (RHA) and rice straw fibers (RSF). In order to develop good structure materials of an agricultural canal, there needs to examine material properties by mechanical test. The splitting test was conducted on three types of soil sample (normal, mixed with RHA, and mixed with RHA and RSF). Fracture process was qualitatively evaluated by image analysis and acoustic emission (AE). As a result, the splitting tensile strength was detected upward trend in RHA and RSF samples. Image analysis suggested a concentration of the horizontal stain.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 67(1):85-92, 2014

Key words : Magnesium oxide, AE-SiGMA analysis, Splitting test