

平成 30 年 4 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K14301

研究課題名（和文）地盤材料のせん断破壊現象を対象とした高精度AE測定による微視的メカニズムの解明

研究課題名（英文）Study on microscopic mechanisms inducing shear failure behavior of geo-materials using high-accuracy AE measurements

研究代表者

古関 潤一（KOSEKI, Junichi）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・教授

研究者番号：30272511

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：粒状体である地盤材料が固結力を有していない場合には、微視的な「粒子間でのすべり」と「粒子自体の破碎」により、巨視的なせん断破壊が生じると考えられているが、これらの相互関係は十分には解明されていない。そこで、固結力のない地盤材料に対する室内せん断試験において、「近年になって格段に高精度化されたAE測定技術」を用いた非破壊計測を適用する研究を実施した結果、微視的な「粒子間すべり」と「粒子破碎」の発生状況と、巨視的なせん断層の形成過程を、非破壊で評価できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Macroscopic shear failure of granular geomaterials under no-bonding condition is induced by microscopic intergranular sliding and particle crushing. The link between the macroscopic behavior and the microscopic mechanisms is, however, not yet clearly understood. Thus, a series of laboratory shear testing on a non-bonded geomaterial is conducted, while employing a high-accuracy measurement of acoustic emissions (AEs) that has been improved drastically in recent years. As a result, it was confirmed that the AE measurement method and the data analysis procedures that are used and developed for the current study can identify the occurrence of the microscopic intergranular sliding and particle crushing and provide information of macroscopic shear band formation in a non-destructive manner.

研究分野：地盤工学

キーワード：地盤工学 土質力学 室内土質試験 AE測定 微視的メカニズム

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 構造物の支持地盤や、盛土・擁壁などの土構造物の建設材料として活用される地盤材料は、多種多様な土粒子の集合体である。そのために粒状体特有の力学的特性を示し、巨視的にはせん断破壊する場合でも、粒子レベルでのせん断破壊や粒子自体の破碎が生じているとは限らず、粒子の回転や粒子間のすべりが支配的な微視的メカニズムとなっていることが知られている。しかし、これらの微視的現象の発生状況の計測は技術的に困難だったため、十分な知見は得られていない。

(2) 物質が外力を受けて変形すると、構成粒子の転移や微小クラックの発生により弾性波が放出される。この現象は acoustic emission(以下では AE と称する)と呼ばれ、金属や岩石などの固体材料の非破壊計測手法、あるいは構造物の安全監視方法の一つとして注目されてきた。1960年代から1980年代にかけては、地盤材料の各種試験や実斜面の監視にも適用され、せん断試験中の体積変化特性が圧縮傾向から膨張傾向に転じると AE 特性も変化することなどが明らかにされてきた。

(3) その後の1990年代以降は、地盤材料に対する AE 測定の適用例は極めて限定的で、新たな知見はほとんど得られていない状況にあった。近年になってようやく、他分野における適用により格段に高精度化された最新 AE 測定技術を、杭基礎模型に鉛直荷重を載荷した際の固結力のない支持地盤中での挙動計測に用いる試みが行われ、杭の先端付近における粒子破碎の発生状況の推定に適用可能であることが明らかになった。

(4) 以上の背景のもとで、研究代表者がこれまでの主たる研究活動で局所変形計測や画像解析等の技術開発を行ってきた地盤材料の室内せん断試験に対して、この最新の AE 測定技術を適用し、さらに固結力を有する地盤材料の挙動計測にも適用を拡大する内容として、本研究を着想するに至った。

### 2. 研究の目的

(1) 固結力のない地盤材料の室内せん断試験における微視的「粒子間すべり」と「粒子破碎」の発生状況を高精度 AE 計測により明らかにする。

(2) また、これらの発生状況が巨視的なせん断層形成過程とどのように関係するのかを明らかにする。

(3) さらに、固結力を有する地盤材料のせん断中の微視的「固結力消失」現象の判別が AE 測定で可能かどうかを明らかにする。

### 3. 研究の方法

(1) 未固結な地盤材料で円柱形の密な供試体を作成し、図1に示すように供試体側面に複数の高感度 AE センサーを設置して非破壊計測しながら、せん断時の拘束圧や供試体密度および飽和状態を変えた圧密排水三軸圧縮試験を系統的に実施した。AE 波形を分析して波源の発生位置を算定し、その分布と発生頻度がせん断中にどのように変化するかについて検討した。研究代表者らが開発した水平可動ペDESTALを装着した試験装置を用いて、せん断層が形成され横ずれが始まっても載荷軸に過大な曲げモーメントが作用しないようにした。



図1 圧力セル内の円柱供試体と側面に設置した AE センサーの例

(2) (1)の試験で得られた巨視的な応力ひずみ関係および AE 波形分析結果を比較することで、巨視的なせん断破壊の進行過程、特にせん断層の形成過程における、微視的「粒子間すべり」と「粒子破碎」の発生状況とこれらの相互関係について検討した。

(3) 固定波源を用いたキャリブレーション試験結果を行い、その結果を参照しながら、室内土質試験中に計測した AE 波形から波源発生位置を精度よく推定する分析手法の改善の検討を行い、改善後の推定結果が各種試験条件の影響をどのように受けるかについても検討した。

### 4. 研究成果

(1) AE 測定を併用した未固結地盤材料の室内せん断試験では、AE 波源の発生位置の分布状況として、当初予期していた状況とは異なる結果が得られた。そのため、固結力を有する地盤材料に関する検討の優先度を低くするように当初の研究計画を見直し、代わりに未固結地盤材料における AE 波源の発生位置の推定手法の高精度化に関する検討を、基礎的な試験も含めて集中的に実施した。

(2) 平均粒径 0.47mm, 最大間隙比 1.137, 最小間隙比 0.712 の 5 号珪砂を用いて、直径 100mm, 高さ 200mm の円柱供試体を空中落下法で初期相対密度が 90%程度となるように作成し、飽和後に所定の拘束圧まで等方圧密して一定の軸ひずみ速度で排水三軸圧縮試験を実施した結果を図 2 に示す。拘束圧を 100, 200, 400, 600kPa の 4 通りに設定したが、拘束圧が大きくなるほどピーク強度が増加した。これらの試験で計測した AE 波の発生割合の変化を図 3 に示すが、図 2 に示した応力ひずみ曲線と対応する傾向を示した。供試体が変形する際には、その内部で「砂粒子間のすべり」と「砂粒子自体の破碎」が生じるが、後者は砂粒子に発生する応力が高くなるほど生じやすく、前者も高い応力下ほど明確な AE 波を放出するために、上記のような対応関係が得られたものと考えられる。

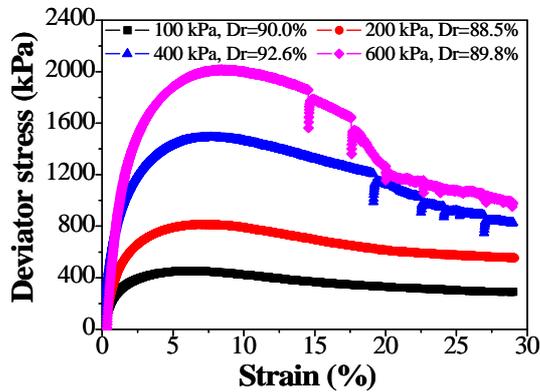


図 2 密な砂供試体の排水三軸圧縮試験結果

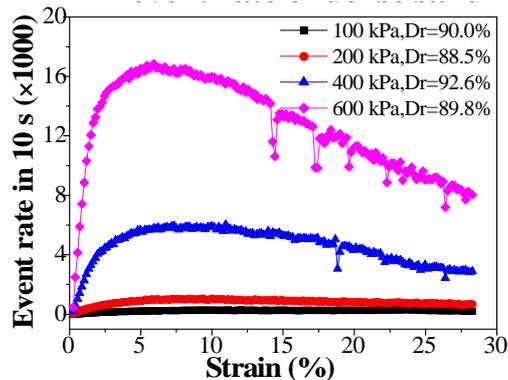


図 3 密な砂供試体の排水三軸圧縮試験中に計測した AE 波の発生割合の変化

(3) 2 つの砂粒子間ですべりを生じさせた場合の AE 計測波と、1 つの砂粒子を圧縮破壊させた場合の AE 計測波を対象として、これらの周波数特性を分析した結果を図 4, 5 に示す。前者は 100kHz 以下の比較的低い周波数特性を有し、後者は 100kHz 以上の比較的高い周波数特性を有していた。そこで、拘束圧 600kPa の排水三軸試験中に計測した AE 波を対象として、100kHz をしきい値として周波数の高い波と低い波に分類して発生割合を再整理した結果を図 6 に示す。ピーク強度を發揮する以前の載荷段階で粒子破碎の発生割

合が急激に増加し、その後は漸減する一方で、粒子間すべりの発生割合は軸差応力の増加・減少傾向とほぼ同様な変化を示した。

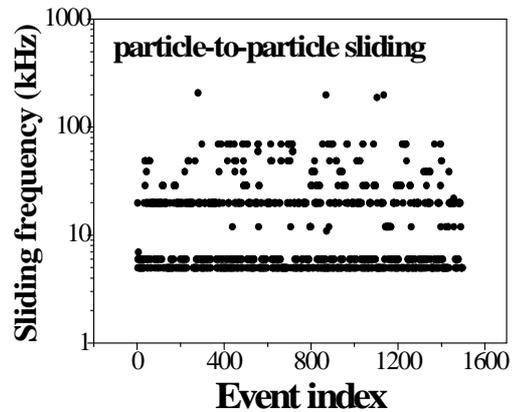


図 4 砂粒子間すべり発生時の AE 波の周波数特性

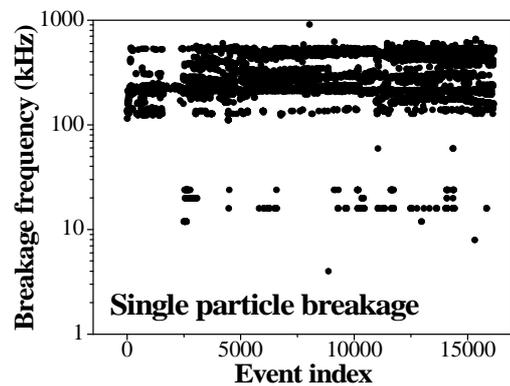


図 5 砂粒子破碎発生時の AE 波の周波数特性

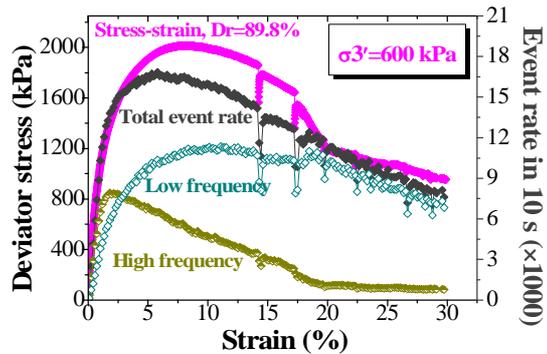


図 6 拘束圧 600kPa での排水三軸圧縮試験中に計測した高周波数/低周波数 AE 波の発生割合の変化

(4) 排水三軸試験中に発生した AE 波を複数の AE センサーで計測し、到達時刻の違いから波源発生位置を逆算した結果の例を図 7, 8 に示す。図 7 は軸圧縮変位量が 0-10mm および 10-20mm (それぞれ軸ひずみ 0-5% および 5-10%) の載荷過程で発生した AE 波源の分布であり、寒色から暖色になるほど多数の AE 波が発生したことを意味する。載荷の初期段階で供試体中央付近の広い範囲で AE 波が発生し、載荷の進行とともに発生範囲が狭まってきた。図 8 は軸圧縮変位量が 20-30mm および 30-40mm (それぞれ軸ひずみ 10-15% および 15-20%) の載荷過程で発生した AE 波源であるが、図の左上から右下にかけて傾斜し

た線状に卓越して分布している。この試験で観察されたせん断層の状況を図 9 に示すが、せん断層の位置が図 8 に示した AE 波源の卓越位置とほぼ一致していることから、载荷の後期段階での AE 波は、せん断層内で集中的に生じる土粒子間のすべりに起因して発生していると考えられる。

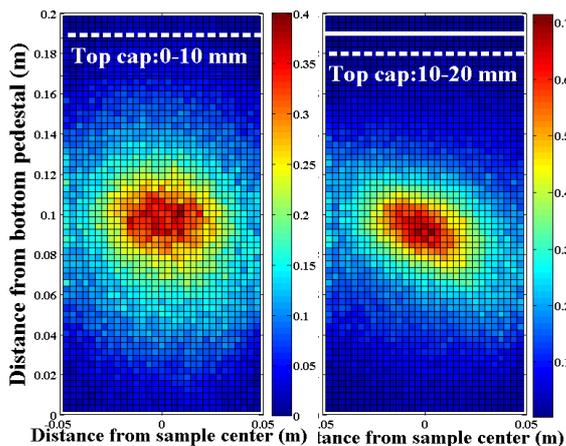


図 7 排水三軸圧縮試験中の軸圧縮変位量 0-10 および 10-20mm で計測した AE 波源位置の逆算結果

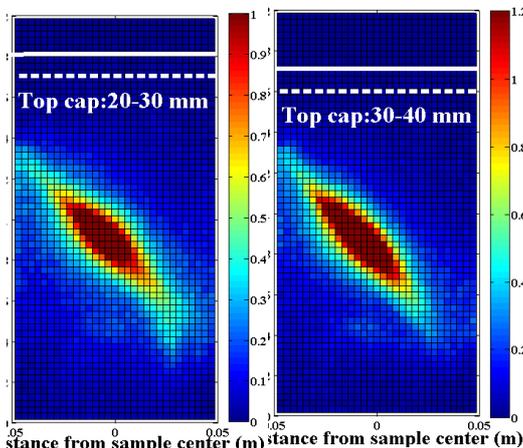


図 8 排水三軸圧縮試験中の軸圧縮変位量 20-30 および 30-40mm で計測した AE 波源位置の逆算結果

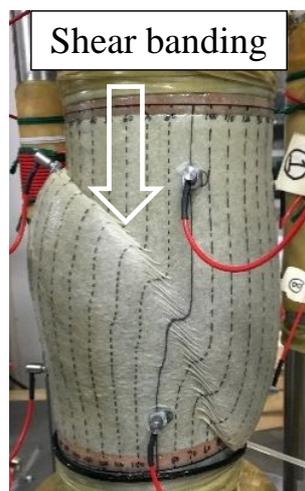


図 9 図 7,8 の排水三軸圧縮試験で観察されたせん断層の状況

(5) 以上のような検討成果から、本研究で開発した AE 計測・分析手法を活用することで、

微視的な「粒子間すべり」と「粒子破碎」の発生状況と、巨視的なせん断層の形成過程を、非破壊で評価できることを明らかにした。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

古関潤一：土構造物の維持管理に関わる近年の動向と地盤材料に対する非破壊計測手法の研究事例，地質と調査，査読なし，通巻 151 号，pp.4-7，2018.

〔学会発表〕(計 2 件)

Lin, W., Koseki, J. and Mao, W.: Acoustic emission response during shear band formation in triaxial compression test on sand,, 71st annual meeting of JSCE, 東北大学(宮城県・仙台), 2016.9.7-9

Lin, W., Mao, W. and Koseki, J.: Acoustic emission technology to investigate internal micro-structure behavior of shear banding in sands,, Proc. of International Workshop on Advances in Laboratory Testing & Modeling of Soils and Shales, Villars-sur-Ollon (Switzerland), 2017.1.18-20

〔その他〕

ホームページ等

<http://geotile.t.u-tokyo.ac.jp/portfolio/acoustic-emission-to-experimentally-investigate-the-micro-mechanism-of-shear-banding-in-sand/>

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

古関 潤一 (KOSEKI, Junichi)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：30272511

(2)研究分担者

( )

研究者番号：

(3)連携研究者

桑野 玲子 (KUWANO, Reiko)

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：80312974