

AE計測とDEM解析に基づく 堆積軟岩の破壊過程に関する研究

青木謙治^{1*}・水戸義忠¹・黒川進¹・松井裕哉²・丹生屋純夫²・南将行³

¹京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

²(独)日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 (〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進432番2)

³東京電力株式会社 建設部土木・建築技術センター (〒100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-3)

* E-mail:aoki@kumst.kyoto-u.ac.jp

本研究では、堆積軟岩の破壊過程における応力変化とAE挙動の関連性を把握することを目的として、堆積軟岩の高剛性三軸圧縮試験時にAE計測を行い、AEパラメータと破壊過程における応力変化の関係を検討した。また、応力変化と破壊現象の関連性を把握することを目的として、粒状体個別要素法 (DEM) によって三軸圧縮試験のシミュレーションを行い、応力変化と破壊過程の関係を検討した。その結果、AEパラメータのうち卓越AE周波数の変化が堆積軟岩の破壊過程の評価に対して有効であることが明らかとなると同時に、応力変化と破壊過程の関連性が明らかになった。さらに、実際に観測されたボアホール・ブレイクアウト現象のシミュレーションを通して、DEM解析の原位置岩盤への適用性を検討した。

Key Words : excavation disturbed zone (EDZ), observational design and construction system, soft rock, acoustic emission (AE), distinct element method (DEM)

1. はじめに

一般に大深度高地圧下の岩盤内に空洞を掘削した場合、周辺岩盤において応力の再配分に伴う新規亀裂の発生や既存の微小亀裂の進展による掘削影響領域 (EDZ : Excavation Disturbed Zone) が形成される。将来建設が予定されている高レベル放射性廃棄物の地層処分施設においては、力学的・水理学的な長期安定性が求められており、EDZを高精度に評価することは、地層処分の安全評価や処分施設的设计・計測管理を行う上で極めて重要である。

高地圧下において、掘削影響領域の発生・進展は岩盤内の応力変化と強い関連性を持つことが知られている。

このため、掘削影響領域を高精度に評価するにあたって、岩盤の破壊および応力変化を鋭敏に検知する岩盤微小破壊音 (AE : Acoustic Emission) の計測が注目されている。

これまでに筆者らは、高地圧下における岩盤空洞周辺の掘削影響領域の評価手法として、AEの原位置計測と粒状体個別要素法による解析をベースとする情報化設計・施工システムを提案し、結晶質岩などの硬岩系の岩盤においてその有効性を確認してきた^{1,2)}。しかしながら、堆積軟岩においては、AEの発生数が少ない、エネルギーが小さい、距離減衰が大きい等の理由から、これまでにAE計測が掘削影響領域の評価に適用された事例

は世界的にもほとんど見当たらず、AE挙動と応力変化や破壊現象との関連性が十分に解明されていない。

そこで本研究では、まず、堆積軟岩の破壊過程における応力変化とAE挙動の関連性を把握することを目的として、堆積軟岩の高剛性三軸圧縮試験時にAE計測を行うことで、AEパラメータと応力変化の関係を検討した。次に、応力変化と破壊現象の関連性を把握することを目的として、亀裂の発生・進展過程を直接的に解析することができる粒状体個別要素法によって、試験のシミュレーションを行うことで、応力変化と破壊過程の関係を検討した。また、粒状体個別要素法解析の原位置岩盤への適用性を検討するために、現実の大深度堆積軟岩サイトで発生したボアホール・ブレイクアウト現象の解析も同時に行っている。以上の検討結果を基に堆積軟岩におけるAE—応力変化—破壊現象の関連性の解明を行った。

2. 堆積軟岩の破壊過程における応力変化とAE挙動

本研究では、北海道幌延町の日本原子力研究開発機構幌延深地層研究センター周辺において掘削された深層ボーリング孔から採取された新第三紀堆積軟岩の供試体に

対して高剛性三軸圧縮試験を行い、载荷盤に設置したAEセンサーにより試験時に発生するAEを計測した。

(1) 供試体と試験の方法

今回の試験では、稚内層と呼ばれる泥質の新第三紀堆積軟岩を検討対象とした。深度約380~460mから得られたボーリングコアから、供試体を作製した。試験に供した6個の岩石の基本物性は、単位体積重量が18~19kN/m³、超音波伝播速度（P波）が2.1~2.2km/s程度であり、いずれの供試体についても、傾斜角約45°でほぼ均等に分布する葉理の存在が認められる。なお、事前に実施された岩石試験結果によれば、この深度における岩石の一軸圧縮強度は5~20MPaの範囲であり、静弾性係数（E₅₀）については概ね1,000~3,000MPa程度の範囲に分布している。

原位置におけるEDZの形成過程においては、岩盤の応力状態が大きく変化することから、様々な拘束圧条件により試験を行う必要がある。今回は、供試体が採取された地点の初期応力の最小主応力に相当する6.0MPa、その1/3の2.0MPa、一軸応力状態に近い0.5MPaの3ケースの拘束圧を設定した。

AEの計測条件については、軟岩における過去の計測例を参考に設定した。まず、AEセンサーは周波数特性が100kHz~1MHzの広帯域型のもの、フィルタは100kHz~1MHzのバンドパスと、いずれも結晶質岩の場合と同様のものを用いることとした。また、アンプによる増幅度は、堆積軟岩においては距離減衰が大きいことなどを考慮し、結晶質岩の場合よりも感度が高くなるよう、80dBに設定した。

(2) 試験結果と考察

図-1に代表的な試験結果を示す。本図の応力-ひずみ曲線上には代表的なAEパラメータ（AE発生数、m値¹⁾、および卓越AE周波数）の挙動もプロットしてある。

まず、AE発生数については、いずれの試験ケースにおいても、硬質岩に比べ非常に少ない。応力経路に従ってその挙動を見ると、まずピーク応力に達するまではAEの発生が極わずかであり、ピーク応力以降にAE発生数は顕著に増加し始め、残留応力付近で最大となり、その後は再びほとんど発生しなくなる。このような挙動は、硬質岩における挙動とは異なっており、応力集中の過程を正確に捉えることはやや困難であるが、残留状態の検知には有効である。

m値に関しては、硬質岩の場合と同様、降伏応力付近から低下し、残留応力付近で反転するという挙動が多くのケースにおいて確認されている。したがってある程度の有効性は認められるものの、一般的には数十個のAEから一つのm値を算出するため、発生数自体が少ない堆積軟岩においては、精度がやや低くなる可能性がある。

卓越AE周波数は、いずれの試験ケースにおいても、降伏応力からピーク応力に達するまで徐々に低下し始め、ピーク応力から残留応力に達するまでに顕著に低下し、残留応力に達すると一定のレベルに落ち着くという挙動を示す。これは、堆積軟岩のような軟質な岩石の内部では、微小亀裂の形成・進展の影響により特に高周波のAEが顕著に減衰し、センサーに到達しにくくなったためと考えられる。不均質な微細亀裂やへき開などを多数含んでいる硬質岩と比較すると、堆積軟岩は均質性が高いため、複雑な破壊現象が生じにくく、卓越AE周波数は、亀裂の増加に伴う高周波AEの減衰の影響をよく反映するものと考えられる。したがって、このパラメータは堆積軟岩において応力変化の評価に非常に有効であると推察される。

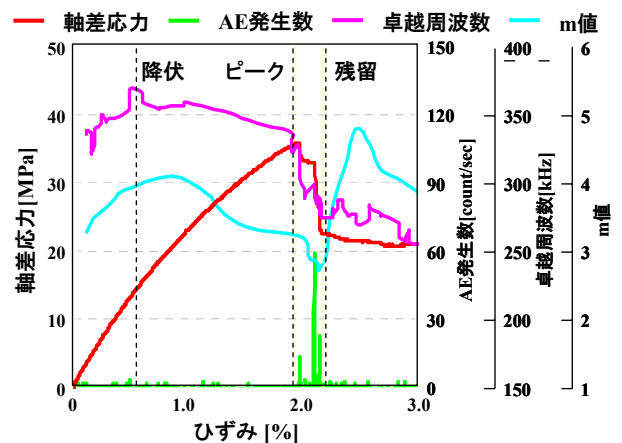
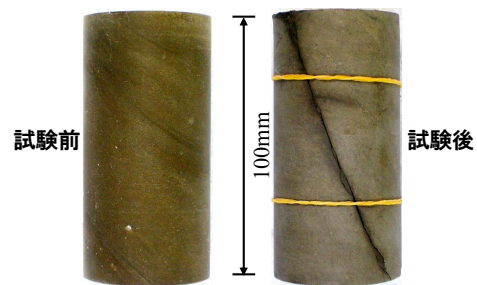


図-1 応力-ひずみ曲線と AE パラメータの挙動の例
(拘束圧 : 6.0MPa)

3. 粒状体個別要素法による堆積軟岩の破壊過程の検討

本研究では、粒状体個別要素法を用いて三軸圧縮試験のシミュレーションを行い、堆積軟岩の破壊過程における応力変化と破壊現象の関連性を検討した。さらに、原位置のデータを用いてシミュレーションを行うことで、構築した結合粒状体モデルの原位置岩盤への適用性を検討した。

(1) シミュレーションの方法

粒状体個別要素法とは、ボンドと呼ばれる結合力を持

つ粒子の集合体（結合粒状体）として岩盤をモデル化し、クラックの発生・進展をボンドの破壊によって直接的にシミュレートすることができる解析手法である³⁾。

ここで、高剛性三軸圧縮試験に用いた全ての供試体には、約45°の傾斜角をもつ葉理が存在していたが、試験終了時にはほとんどの供試体で葉理の傾斜方向に約60°の傾斜角をもつ巨視的な破壊面が形成された（図-1参照）。このことから葉理が供試体の破壊モードに強く影響を及ぼしたものと考えられ、シミュレーションにおいても葉理の影響を反映した結合粒状体モデルを構築した。

結合粒状体モデルを構築するにあたっては、まず、葉理を表現する微視的パラメータ（葉理の間隔、連続性、力学的物性）を設定し、この条件の下にインタクト部の微視的パラメータを変化させることで、応力-ひずみ曲線のカーブフィッティングを行った。なお、このシミュレーションにおいて、ひずみレベルが大きくなると巨視的破壊面が形成されるが、この破壊面の状況と実際に形成された巨視的破壊面の状況とを比較することで、今回用いた堆積軟岩供試体の巨視的挙動を最適に表現することができる微視的パラメータを同定した。

(2) シミュレーションの結果

図-2に代表的なシミュレーション結果を示す。同定した微視的パラメータを用いたシミュレーションによって供試体の破壊過程を観察したところ、まず降伏応力到達後に葉理部が局所的に破壊することによって小規模な破壊面がランダムな位置に形成され、ピーク応力直後にそれらが連結することによって巨視的な破壊面が形成され

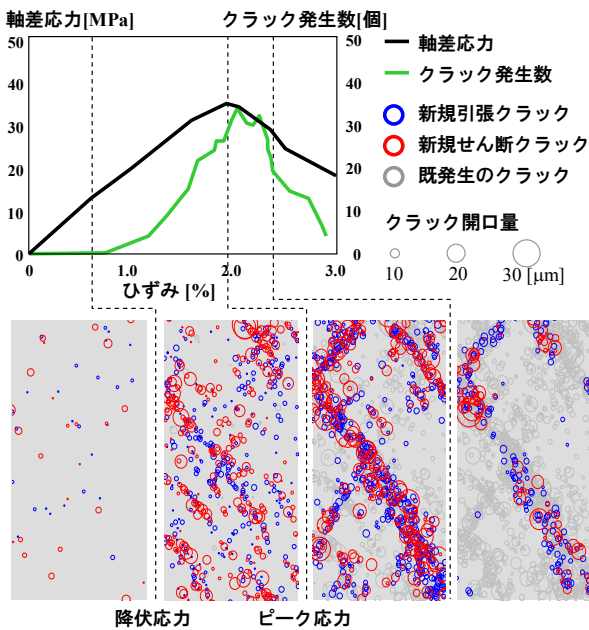


図-2 クラック発生過程の一例（シミュレーション）

ることがわかった。また、残留応力到達後はほぼ破壊面周辺のみで破壊が生じることがわかった。

(3) 結合粒状体モデルの適用性の検討

三軸圧縮試験のシミュレーションによって同定した粒子パラメータを用いて、深地層のボーリング孔に原位置応力を作用させるシミュレーションを実施した。このシミュレーションにおいては、3次元結合粒状体モデルに対して水圧破碎試験で得られている3次元原位置応力を作用させた（図-3）。この結果、最大主応力方向の応力変化が比較的小さいのに対し、最小主応力方向には極めて高い応力が集中した（図-4）。また、その応力集中領域には発生時の開口量つまり規模の大きなクラックが集中的に発生した（図-5）。さらに、この方向の壁面においては、クラックの集中によって周辺の粒子との結合力を完全に失って崩落する粒子がいくつか確認された。

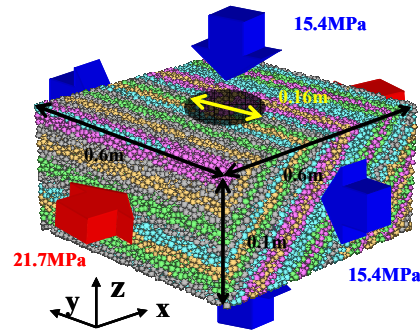


図-3 粒状体DEM解析モデル（色境界に葉理が存在）

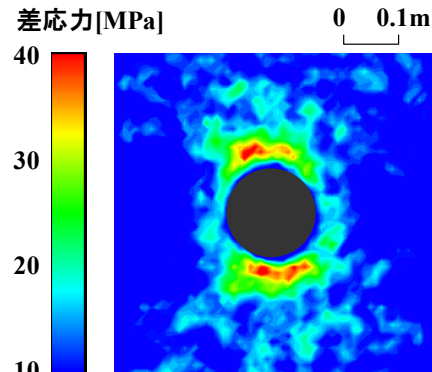


図-4 差応力分布（中央水平x-y断面）

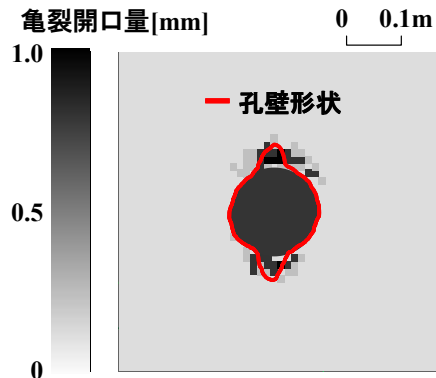


図-5 亀裂開口量分布と実測の孔壁形状（中央水平x-y断面）

このようなシミュレーションにおいて確認された現象と、実際に原位置で発生したボアホール・ブレイクアウトとを比較すると、クラック集中領域の方向性と寸法がよく一致している(図-5参照)。このことから、三軸圧縮試験のシミュレーションにより把握した応力変化と破壊現象の関連性が、実現象に即したものであることが裏付けられるとともに、本シミュレーション手法を応用することで、原位置の応力変化に伴う破壊現象ひいては掘削影響領域を予測・評価できる可能性が示された。

4. 堆積軟岩におけるAEと応力変化および破壊現象の関連性の検討

高剛性三軸圧縮試験において観測されたAEパラメータと、シミュレーションにおいて発生した微小亀裂との関係を総合的に検討することで、堆積軟岩におけるAEと応力変化および破壊現象の関連性を検討した。

2(2)で述べたように、代表的なAEパラメータのうち、その変化が堆積軟岩の破壊過程とよく対応するものは卓越AE周波数である。卓越AE周波数は、降伏応力付近から微小破壊が発生し始めると、AEの高周波成分が減衰するため、卓越周波数は低下し始めることになる。主要な破壊面が形成されるピーク応力から残留応力にかけては、急激に空隙率が上昇することから、高周波成分の減衰の度合いも大きくなり、卓越周波数も急激に低下する。残留応力以降は、それ以上大きな破壊は生じないため、卓越周波数は試験終了までである一定の低い値を保つ。すなわち、卓越AE周波数の低下が開始すると降伏応力に達していることがわかり、その低下が著しくなるとピーク応力に達したことがわかる。さらに低下が終了すると残留応力に達したことがわかる。

5. 結論

本研究では、堆積軟岩の破壊過程における応力変化とAE挙動の関連性を把握することを目的として、堆積軟岩の高剛性三軸圧縮試験時にAE計測を行い、AEパラメータと破壊過程における応力変化の関係を検討した。また、応力変化と破壊現象の関連性を把握することを目的として、粒状体個別要素法(DEM)によって三軸圧縮試験のシミュレーションを行い、応力変化と破壊過程の関係を検討した。

これらの検討の結果、卓越AE周波数の変化が堆積軟岩の破壊過程における応力変化とよく対応したことから、堆積軟岩の破壊過程の評価に対して有効なAEパラメータであることが明らかとなった。また、粒状体個別要素法によるシミュレーションによって応力変化と破壊過程の関連性が明らかになると同時に、実際に観測されたボアホール・ブレイクアウト現象をシミュレートできたことからDEM解析の原位置岩盤への適用性も示された。以上より、提案したAE計測と粒状体個別要素法による予測解析を組み合わせた評価システムは、堆積軟岩の掘削影響領域の高精度な評価に寄与するものと考えられる。

参考文献

- 1) Aoki, K. et al.: Evaluation of behavior of EDZ around rock cavern by AE measurements and DEM simulation using bonded particle model, *ARMS2004*, Kyoto, Japan, 2004.
- 2) Aoki, K. et al.: Evaluation of EDZ around highly stressed rock cavern by AE measurements, *EUROCK05*, 2005
- 3) Cundall, P. A., & Strack, O. D. L.: A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies, *Géotechnique* 29: 47-65, 1979

EVALUATION OF FRACTURING PROCESS OF SOFT ROCKS AT GREAT DEPTH BY AE MEASUREMENT AND DEM SIMULATION

Kenji AOKI, Yoshitada MITO, Susumu KUROKAWA,
Hiroya MATSUI, Sumio NIUNOYA and Masayuki MINAMI

The authors developed the stress-based evaluation system of EDZ by AE monitoring and DEM (Distinct Element Method) simulation. In order to apply this system to the soft rock site, the authors try to grasp the relationship between AE parameters, stress change and rock fracturing process by performing the high stiffness tri-axial compression tests including AE measurements on the soft rock samples, and its simulations by DEM using bonded particle model. As the result, It is found that change in predominant AE frequency is effective to evaluate fracturing process in sedimentary soft rocks, and the relationship between stress change and fracturing process is also clarified.