

京都大学	博士 ( 工 学 )	氏名	清水 浩之
論文題目	Distinct element modeling for fundamental rock fracturing and application to hydraulic fracturing (粒状体個別要素法による岩石破壊現象の基礎的検討および水圧破碎の破壊過程に関する研究)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>近年のコンピュータ技術の急激な進歩に伴い、種々の数値解析手法が開発されており、中でも粒状体個別要素法 (Distinct element method: DEM) の適用が進んでいる。DEM は岩石を円形粒子の集合体としてモデル化するため、空隙、潜在亀裂、鉱物結晶の境界面等によって岩石内部に生じる応力の不均一を比較的容易に、かつ適切に表現でき、実岩石における亀裂の発生過程を詳細に検討することが可能である。</p> <p>そこで、本論文では、岩石の破壊現象の再現に対応した新たな DEM コードの開発を行ない、一軸圧縮試験に代表される基礎的な岩石試験のシミュレーションを行った。これにより、開発した DEM コードの妥当性を検証するとともに、不明瞭な点が残されている岩石破壊現象に関する諸問題、特に微小亀裂の発生から最終破断面の形成までの岩石の破壊過程について詳細な検討を行なった。さらに、DEM に流体の浸透現象を取り扱うことができる Fluid Flow Algorithm を導入し、水圧破碎のシミュレーションを行なった。解析結果と既存の実験結果との比較検討により、岩石および未固結堆積層における水圧破碎の破壊メカニズムと亀裂の進展挙動について検討を行なった。</p> <p>本論文は、第 1 章を緒論、第 7 章を結論とした全 7 章からなり、各章の概要は以下の通りである。</p> <p>第 1 章では、本研究の位置づけを明確にするため、従来の研究内容や問題点等について検討を行い、本論文全体の流れをまとめている。</p> <p>第 2 章では独自に開発を行った二次元 DEM コードの妥当性を検証するとともに、粒子数や粒度分布といった岩石モデルの微小な内部構造に影響するパラメータが岩石モデルのマクロな物性に与える影響について詳細な検討を行った。その結果、岩石モデルを構成する粒子数の増加に伴って、結果のばらつきが小さくなり、岩石試験のシミュレーションとして安定した結果が得られた。このことは、DEM における結果のばらつきが粒子数に大きな影響を受けていることを示している。</p> <p>第 3 章では岩石の一軸圧縮試験を解析の対象とし、シミュレーションにおける亀裂の発生を実験で観測される AE の発生と対比させて、岩石破壊の解明に対する問題、特に微小亀裂の発生から最終破断面の形成までの岩石の破壊過程を検討した。その結果、従来の岩石破壊に対する理論では引張破壊が卓越することが予想されるにもかかわらず実験時の AE 測定結果ではせん断破壊を示す AE が多数観測されるという矛盾を、シミュレーションで示された引張亀裂とせん断亀裂の放出エネルギーの違いにより説明することができた。すなわち、岩石の引張強度が圧縮強度に比べて明らかに小さいため、引張亀裂とともに発生する AE のエネルギーもやはり小さいものとなり、その結果、AE 測定実験では引張型の AE が観測されにくく、せん断型 AE が卓越するよう見えることがわかった。</p> <p>第 4 章では側方ひずみ制御の一軸圧縮試験を対象とした DEM コードを新たに開発し、地下深部の開発時に激しい破壊をもたらす災害の原因となる岩石の Class II 挙動の再現を試みた。制御が困難な実験であるため、Class II の post-failure 領域での挙動に関する知見は依然として少なく、破壊のメカニズムやプロセスが十分に解明されているとは言えない。しかし、シミュレーション結果は実験により得られた応力ひずみ曲線とよく一致しており、このことから DEM シミュレーションにより、岩石の Class II 挙動を良好に再現できることが確認できた。さらに、軸ひずみ制御と側方ひずみ制御のシミュレーション結果を比較することにより Class II 挙動のメカニズムについて検討を行なった。</p>			

氏名	清水浩之
----	------

側方ひずみ制御の一軸圧縮試験ではモデルの破壊時に側方ひずみの増加を制御するために除荷が行なわれ、明瞭な Shear band が形成されず、岩石内のほとんどの領域が弾性を保持したまま破壊に至り、その結果激しい破壊を生じる Class II の挙動となることがわかった。

第5章では浸透現象を取り扱うことができる Fluid Flow Algorithm を導入した flow-coupled DEM によって、粘性の異なる二種類の流体を用いた岩石の水圧破碎の再現を行った。シミュレーションの結果は現実の水圧破碎実験から得られる亀裂の進展過程や進展速度の傾向とよく一致した。また水圧破碎は理論的には引張破壊で生じるとされているが、通常の水圧破碎ではせん断破壊を示す AE が卓越することが知られており矛盾が指摘されていたが、シミュレーションで亀裂の発生エネルギーに着目することによりこの矛盾を説明することができた。すなわち、粘性の大きい流体を用いた場合には比較的エネルギーの大きい引張亀裂が発生するが、水のように粘性が小さい流体による破碎の際には引張亀裂のエネルギーが小さい。このため、現実の AE 測定実験ではエネルギーの小さい AE はノイズ等に埋もれやすく観測されにくいことを考慮すると、エネルギーの大きなせん断型 AE が相対的に発生数の少ないにもかかわらず卓越しているように見えることがわかった。

第6章では岩石の水圧破碎に関する研究を発展させ、未固結堆積層に対応した新たな DEM コードを用いることによって、未固結層内での水圧破碎挙動のメカニズムを詳細に検討した。DEM により再現された水圧破碎挙動は実験結果とよく一致しており、実験で確認された多様な水圧破碎挙動を再現可能であることが分かった。また、破碎流体の粘性、圧入レート、モデルの浸透率の組み合わせを様々に変更したシミュレーションを繰り返し、これらの結果を比較することにより、モデルの浸透率と破碎流体の粘性の比が未固結堆積層の水圧破碎における破壊形態を支配していることがわかった。

第7章では本論文の各章における結論および今後の展望をとりまとめ、全体の総括を行なった。

(論文審査の結果の要旨)

本研究は、岩石の 1 軸圧縮破壊試験や水圧破碎試験を数値解析手法のひとつである DEM (粒状体個別要素法、Distinct Element Method) で解析して実験結果と比較することにより、従来未解明であった理論と実験的な観測結果の矛盾を解明するとともに、岩盤の激しい破壊の発生機構や未固結堆積層の水圧破壊の機構を検討したものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1) 岩石の 1 軸圧縮試験においては理論的には引張破壊の卓越が予測されるにもかかわらず、せん断破壊を示す AE(Acoustic Emission; 微小破壊に伴う弾性波動放射)が多く測定される矛盾が従来から指摘されていた。本研究では DEM により微小破壊の発生を精密に検討し、引張破壊に伴う AE はエネルギーが小さく実験では測定されにくいことを指摘した。

2) 地下深部の坑道などで災害をもたらす激しい破壊を引き起こす CLASS II 岩石の破壊挙動を DEM 解析により検討した結果、激しい破壊は荷重増大方向に直交する方向のピーク強度以降の変位の制御方法に強く依存することを明らかにした。

3) 水の浸透を取り扱えるようプログラムを拡張して、破碎流体の粘性や粒子径の違いによる岩石の破壊機構の違いを DEM で解析し、粘性の高い破碎流体の破碎では引張破壊が卓越するのに対し、粘性の低い場合にはせん断破壊が卓越することを明らかにした。この結果、実験結果の信頼性が確認されるとともに、この種の破壊問題に対する DEM の有用性が明らかにされた。

4) プログラムを改良し、メタンハイドレート採掘に有用な未固結堆積層の水圧破碎現象の解析を行ったところ、実験結果をうまく説明できる結果を得、現地の水圧破碎の予測に適用できる可能性を示した。

以上、本論文は、岩石の 1 軸圧縮破壊試験や水圧破碎試験を DEM で解析して実験結果と比較することにより、DEM による岩盤破壊機構解明の新たな可能性を明らかにしており、岩盤工学分野への発展に寄与するところが大きい。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 22 年 1 月 27 日、論文内容とそれに関連した口頭試問を行った結果、合格と認めた。