

数値計算による寸法効果の検討

大久保誠介¹⁾・福井 勝則¹⁾・趙 顕²⁾

1. はじめに

放射性廃棄物等の地層処分などを目的として、大規模な地下開発が今後進むと思われる。その際、考えなければいけない事の一つに寸法効果(size effect)がある。寸法効果とは、対象とする物質の大きさ(寸法)により、強度を初めとする種々の物性が変化することで、ほとんどの物質においてみられる現象である。通常の室内試験で求める物性は、比較的小さな試験片に関するものである。したがって、大きな岩盤内構造物の設計の際は、寸法による物性の変化を考慮し室内試験で求めた物性値を勘案・調整する必要がある。この点は重要で多くの研究者が寸法効果の解明に取り組んだが、未だ不明な点が多い。その第一の原因は実規模の実験を行うことが極めて困難なためである。

本稿では、まず簡単に岩石の寸法効果について概観する。ついで、圧縮応力を受ける岩石の寸法効果を、時間依存性挙動を考慮した計算機シミュレーションによって検討した結果について紹介する(大久保・趙, 1994)。今回の研究で念頭においた寸法は数cmからせいぜい数10m程度までである。どの位の寸法まで同様な議論が成り立つかは今のところ判然としにくい。計算機シミュレーションは、粘性歪速度が応力に比例しない(非線形な関係にある)とする非線形粘弾性理論に基づいて開発した構成方程式を、有限要素法プログラムに組み入れて行った。

2. 岩石の寸法効果

寸法の増大により変化する物性の内、最も重要なものが強度である。第1図に圧縮強度の測定例を示

す。この結果から伺えるように、室内実験で使われる小さな試験片の強度と、一辺数mの柱では強度が一桁程度異なることがある。

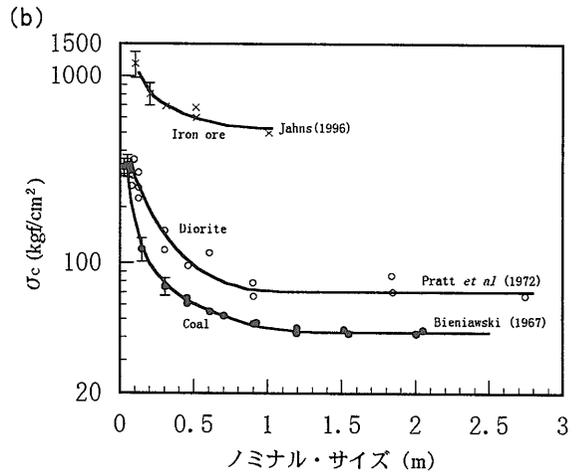
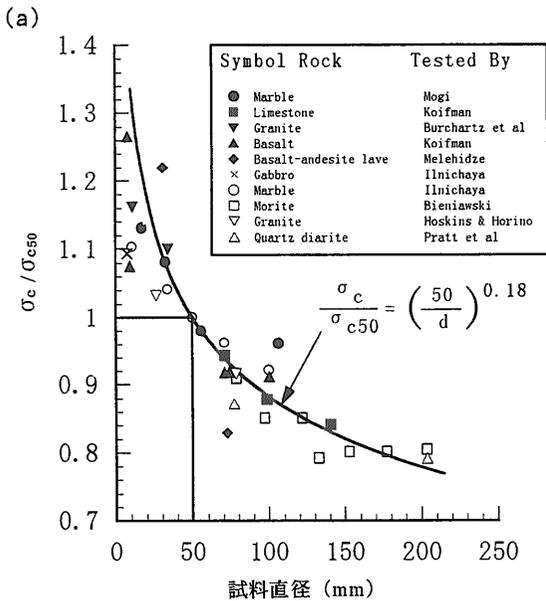
強度の寸法効果は、次のように説明されることが多い。簡単な例として第2図に示されるn個のリンクをもった鎖を考えてみよう。この鎖を引っ張った時の強度は、n個のリンクの内、最も弱いリンクの強度と一致することは明らかである。リンクの数の多い程、より弱い強度を持つリンクが含まれる可能性が高くなり、全体(鎖)の強度は低下する。岩石には多くのクラック(亀裂)が含まれるが、寸法が大きくなるにしたがって長くて弱いクラックが含まれることになり、この場合も寸法が大きくなるにしたがって全体の強度が下がる(山口・西松, 1991)。

一軸破壊実験から推定して、上に述べた最弱リンク説では、寸法の増加にともなう強度の減少の程度は一定であり、寸法が大きくなると強度は際限なく低下する。他方、Bieniawskiら(1975)の実験結果によれば、寸法が比較的小さい間の強度低下は著しいが、ある程度寸法が大きくなると強度低下の程度は小さくなる。寸法が大きくなると寸法効果はあまり顕著でなくなり、事実上強度はある一定値に収束すると考えてよいかどうか最大の論点といえる。そう考えてよければ、これまで経験したことのないような大規模岩盤内構造物の設計もずっと楽になる。逆に寸法の増大にしたがって、強度が一定の割合で低下し続けるとしたら、大規模な岩盤内構造物の建設には困難が伴うと考えられる。

大規模な実験は極めて困難であるので、最近発展の著しい計算機実験により寸法効果を検討するのが有力と考えられる。しかしながら、このような視点から行われた計算機実験は少ない(趙・大久保・

1) 東京大学工学系研究科
〒113 文京区本郷7-3-1
2) 双竜建設(株)土木技術部

キーワード: 岩石, 寸法効果, 有限要素法, 時間依存性



第1図 一軸圧縮強度 σ_c の測定例。(a) 直径20cmまでの場合 (Hoek and Brown, 1980). σ_{c50} は直径50mmのときの強度。(b) 大きな試験片で原位置試験を含む場合 (Bienawski, 1975).

福井, 1995; 趙・福井・大久保, 1995) し, それを支える室内実験, 特に真三軸実験は少ない. 計算が困難な原因として, 破壊現象は本質的に不安定な現象であり, これを扱う計算は未だ発展途上であるからと思われる. 異方性の問題はここでは取り扱わない. 次章では破壊現象を再現する数値実験に欠くことのできない構成方程式について考えてみる.

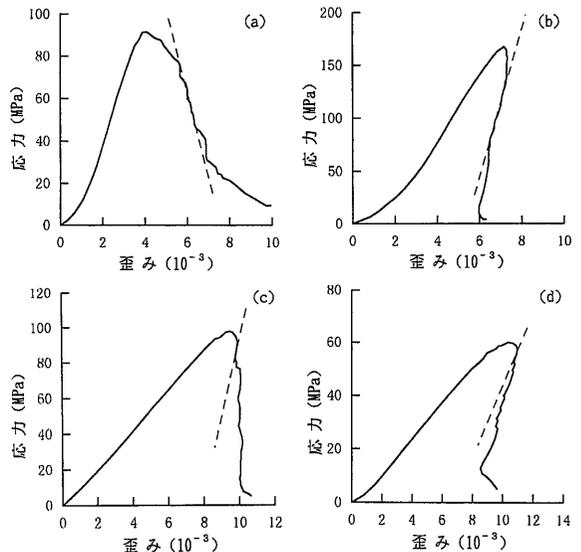
3. 破壊を表現できる構成方程式

岩石の応力-歪曲線の実験例を第3図に示す. この例からわかるように, 歪の増加に伴って応力が增大してゆくが, やがてピーク強度に達した後, 応力は次第に低下する. この例では, ピーク強度を過ぎた後, 岩石が完全に破壊するまでの様子が描かれているので, 第3図に示した曲線を完全応力-歪曲線 (complete stress-strain curve) という. 次に, 歪を増加する速度を変えて実験をした例を第4図に示す. これよりわかるように, 速やかに載荷するほど強度が増加する. これは, ほとんどの岩石で見受けられることである.

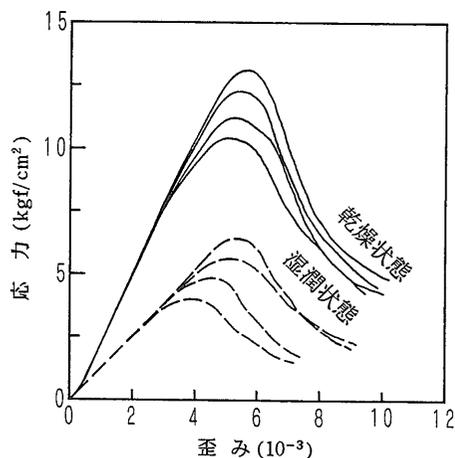
以上でみたような岩石の破壊現象をあらわすため, 著者は非線形粘弾性論に基づく構成方程式 (歪と応力の関係をあらわす微分方程式) を提案した. 詳細は, 既報 (大久保, 1992; 大久保・趙, 1994) にゆず



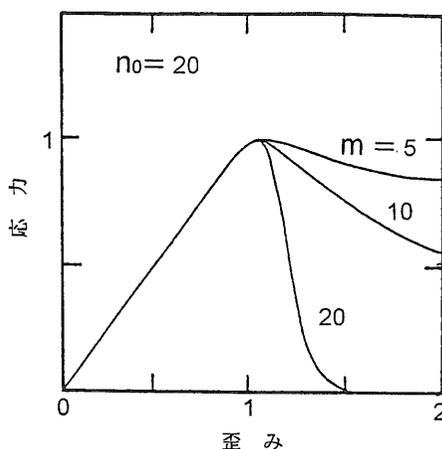
第2図 最弱リンク説の説明図



第3図 完全応力-歪曲線の実験例. 一軸圧縮応力下での実験結果。(a) 秋吉大理石, (b) 稲田花崗岩, (c) 三城目安山岩, (d) 荻野凝灰岩.



第4図 歪速度(載荷速度)を変えて実験した時の応力-歪曲線。歪速度は上から1000, 100, 10, 1 μ /s。岩石は大谷凝灰岩で気乾と湿潤状態での結果を表示。



第5図 計算によって求めた応力-歪曲線。縦軸、横軸はピーク強度のときのそれぞれの値で規格化。n₀とmは構成方程式中のパラメータ。

りここではその特徴についてのみ簡単に説明しておくことにする。

◎破壊を表現できる。第5図に計算によって求めた応力-歪曲線の例を示す。なお、これよりわかるように、構成方程式中のパラメータを変えることによって、ピーク強度以降急激に破壊する場合も、また緩やかに破壊する場合も表現できる。

◎載荷速度による強度の変化を再現できる。ほとんどの岩石において粘弾性現象(時間依存性挙動)がみられ、この現象をできるだけ正確に再現できる構成方程式が是非必要である。ピーク強度を過ぎて、歪(変形)が大きくなるにしたがって、応力(力)の下がる部分を正確に議論するには、粘性を考慮しなければならない。

4. 試験片モデルと計算方法

平面応力状態と仮定し、有限要素法プログラムを用いて、定歪速度一軸圧縮試験の計算機シミュレーションを行った結果を紹介する(大久保・趙, 1994)。試験片モデルは四角形で、要素数4から3920までの12通りの場合を検討した。

計算手順としては、まず必要な事項を入力し、各要素に初期値を与える。一般的には、各要素の強度、弾性係数の間には相関があるが、今回は簡単のため要素ごとに強度のみ変わるとした。すなわち、

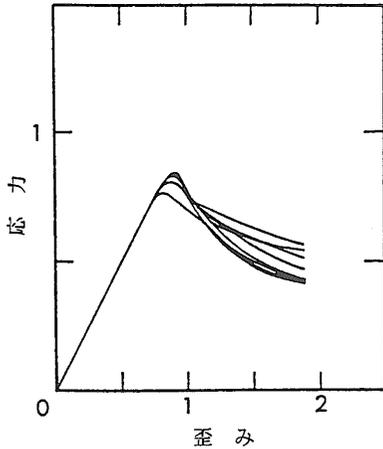
平均値が1で変動係数(標準偏差割る平均値)がCvの正規乱数を要素数と同じ数だけ用意し、各要素の強度(正規化した強度)として順に割り当てた。

以上の準備を終えた後、有限要素法により各要素の応力と歪を計算する。計算結果にもとづいて、時間刻み Δt の間に生ずる各要素における損傷の程度を求め、その程度に応じて弾性係数を更新する。しかる後、試験片モデルに加える変位を一定値だけ増加する。以上の手順を完全応力-歪曲線が得られるまで続けた。

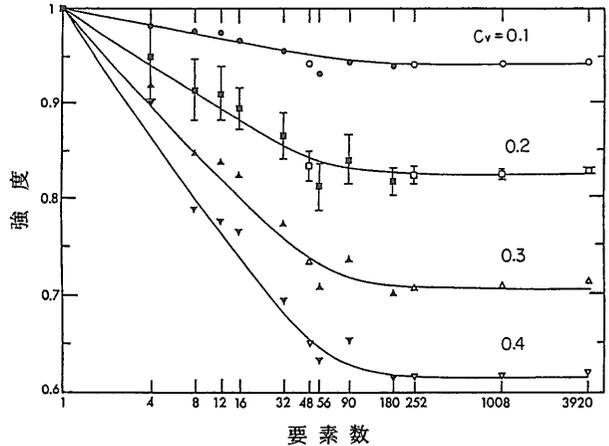
5. 強度の寸法効果

前述のように同一分割数、同一条件下で、要素ごとの強度の割り当て具合を変えて10回の計算を行った。得られた応力-歪曲線の例を第6図に示す。これより、変動係数が同じでも、強度を割り当てるための乱数系列が異なると、計算結果はある程度異なることがわかる。縦軸と横軸は規格化してあり、均質な試験片モデルでは強度が1となるはずである。図に示したのは変動係数0.2の場合であり、強度は0.75から0.85の間に分布している。

変動係数0で均質な場合は、試験片モデルの強度は1であるが、変動係数が大きくなると強度の平均値は1より小さくなる。その様子を第7図に示すが、これからわかるように、要素数の増大にもなって平均



第6図 各要素の強度分布を変えて計算して得た応力-歪曲線



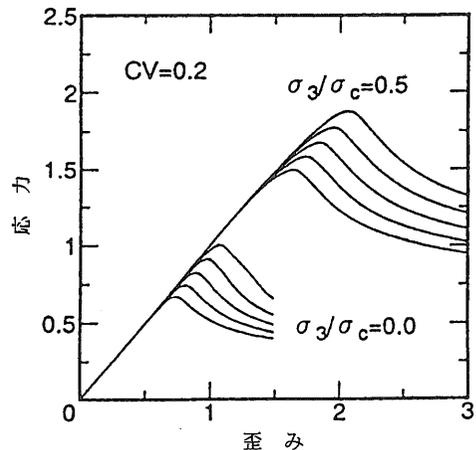
第7図 一軸圧縮強度と要素数の関係。縦軸は要素数1の時の強度で割って規格化してある。

強度が低下し、その割合は変動係数の大きいほど顕著である。変動係数0.4の場合、要素数100付近では、均質な試験片モデルの60%程度の強度となる。ただし、興味深いことにこれ以上要素数を増やしても強度の低下はあまりみられない。この傾向は原位置での従来の知見と一致している。

6. 時間依存性挙動の寸法効果

これまで見てきたように、要素数(寸法)が大きくなると強度が次第に小さくなる。これは、実験的にもよく知られており、大きな岩盤内構造物を設計する場合には重要な問題である。寸法が大きくなると、強度以外の他の物性も変化するはずであるが、現在までのところ強度以外の物性の寸法効果について検討された例は極めて少ない(趙・福井・大久保, 1995)。以下では、強度に関する寸法効果のある程度説明できた計算手法を応用して、試験片の強度の荷重速度依存性が寸法によりどのように変化するかを調べてみる。

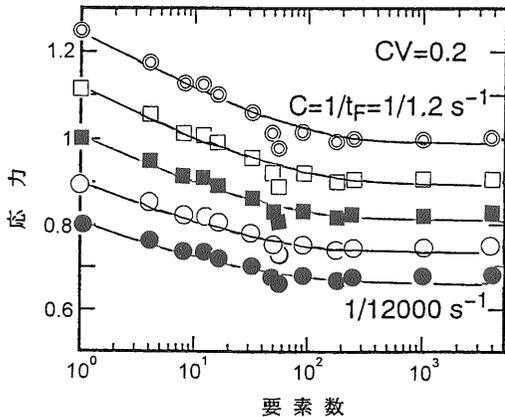
第8図は、一軸圧縮強度 σ_c で規格化した周圧 σ_3/σ_c が0.0と0.5のときの5つの荷重速度Cにおける応力-歪曲線である。図より周圧にかかわらず、荷重速度が大きくなると強度が増加すること、応力-歪曲線の形状は荷重速度によりさして変わらないことがわかる。また、周圧の増加とともに強度は増加し、ピーク強度以降での傾きが緩やかとなる。この2つの事項は、従来の実験結果と一致している。



第8図 5つの歪速度で計算して得た応力-歪曲線。歪速度は上から毎秒1/1.2, 1/12, 1/120, 1/1200, 1/12000である。 σ_3/σ_c は周圧と強度の比。

一軸圧縮応力下における、試験片モデルの強度と要素数の関係を第9図に示す。これは、変動係数 $Cv=0.2$ の場合について、要素数を13通り、荷重速度を5通りに変えて計算した結果である。ここで、縦軸の強度は10回の計算結果の単純平均値である。図よりわかるように、荷重速度によらず、強度は寸法の増大につれて低下し、要素数が100を越えると強度の低下がさほどみられない。荷重速度を10倍にしたときの強度の増分は、すべての要素数の場合に対して10~11%である。

この他、クリープの計算機シミュレーション(趙・福



第9図 歪速度を毎秒1/1.2から1/12000まで、10倍ずつ5段階に変えた時の強度と要素数の関係。

井・大久保, 1995) や引っ張り応力下での計算機シミュレーション(趙・大久保・福井, 1995) も行い、時間依存性に関する寸法効果を検討した。その結果、仮定した条件下では、要素数が大きくなると時間依存性が若干小さくなることがわかった。また、要素ごとの強度のばらつきが大きくなると、時間依存性の寸法効果が顕著になることがわかった。さらに、時間依存性の寸法効果は、周圧の小さいとき大きく、周圧が大きくなると小さくなることもわかった。

7. まとめ

寸法効果は永遠のテーマの一つといわれている。重要でありながら実規模での実験が極めて困難なため、現象の解明がなかなかはかどらない。本稿では、計算機シミュレーションを通じて、圧縮および引張応力下での寸法効果について検討した結果を紹介した。しかしながら、数値シミュレーションによる検討はごく最近始まったばかりである。これまで、数値ないし計算機シミュレーションによる寸法効果の検討が

行われてこなかった最大の原因は、破壊現象を正確に再現できる扱いやすい構成方程式がなかったためと考える。

ここで紹介した数値シミュレーションによる研究成果の内、最も注目すべき点は、寸法(要素数)がある程度大きくなると強度の低下がみられなくなることである。しかしながら、ここで示したのは2次元有限要素法によるものであるため、寸法効果に対して定性的な説明を与えたのみであり、計算結果を定量的に原位置計測結果や室内試験結果と比較・検討するには至っていない。

今回紹介した構成方程式は容易に3次元まで拡張できる。3次元計算機シミュレーションを行い、実際の現象と比べながら議論することが今後の必要である。その際の重要な課題は、実際の岩石や岩盤における不均一性を定量的に把握する手法の開発である。

引用文献

- Bieniawski, Z. T. and Van Heerden, W. L. (1975) : The significance of in-situ tests on large rock specimens, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 12, p101-114.
- 趙 顕・福井勝則・大久保誠介(1995) : 岩石の寸法効果と時間依存性挙動の計算機シミュレーションによる検討, *資源と素材*, 111, p595-600.
- 趙 顕・大久保誠介・福井勝則(1995) : 強度のばらつきを考慮した一軸引張試験の計算機シミュレーション, *資源と素材*, 111, p907-912.
- Hoek, E. and Brown, E. T. (1980) : *Underground excavations in rock*, p.156, *Inst. Mining and Metallurgy*.
- 大久保誠介(1992) : コンプライアンス可変型構成方程式の解析的検討, *資源と素材*, 108, p601-606.
- 大久保誠介・趙 顕(1994) : 計算機シミュレーションによる岩石の寸法効果の検討, *資源と素材*, 110, p109-114.
- 山口梅太郎, 西松裕一(1991) : *岩石力学入門(第3版)*, p111-115, 東京大学出版会.

OKUBO Seisuke, FUKUI Katsunori and CHO Hyun (1996) : Computer simulation of time-dependent behaviour of rock especially focussed on size effect.

<受付: 1996年8月1日>