

東電設計(株) 正会員 蔡 明 宇野晴彦 田坂嘉章 福井史朗

1. はじめに

岩盤は内部に多数存在する不連続面によって特徴づけられる。このような不連続性岩盤に対する挙動表現の解析手法については、不連続構造が構造物の寸法より十分に小さくない場合には、不連続面を個別に表現できるジョイント要素法や個別要素法などが有効であり、不連続面の寸法が十分小さく、数が膨大な場合には、岩盤を連続体として取り扱う手法が有効であると考えられる。

統計的に均質な不連続性岩盤の挙動には、寸法効果が存在することが一般的に知られている。供試体の寸法が大きくなるのに伴い、強度、変形係数が一定値に収束する傾向があり、この収束値を与える供試体の寸法が岩盤の代表要素寸法RVE (Representative Volume Element)と考えることができる(図1)。連続体解析は、このような代表要素寸法概念に基づくものであり、同解析手法を用いて解析を行う場合には、(1) 解析にRVEをどのように取り込むか、(2) RVE寸法はどのぐらいがよいかの2点に留意する必要がある。

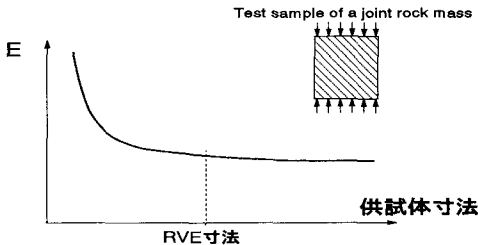


図1 節理性岩盤挙動の寸法効果と代表要素

本研究では、これらの基本的な問題を念頭において、不連続性岩盤挙動の寸法効果に影響を与える主なメカニズムを検討した上で、不連続性岩盤を連続体として取り扱うために必要となるRVE寸法について考察することとした。

2. RVEに基づく連続体解析手法^{[1],[2]}

統計的に均質で、不連続面を多数含んでいる代表要素について着目する。代表要素内の平均応力と平均ひずみは次のように表せる。

$$\bar{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV, \quad \bar{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \epsilon_{ij} dV \quad (1)$$

ここに、VはRVEの体積である。平均ひずみは、岩石部

および不連続面のひずみにより表せられ、それぞれを算出することにより、式(2)に示す等価連続体としての不連続性岩盤のコンプライス $\bar{C}_{ijkl}$ が得られる。

$$\bar{\epsilon}_{ij} = \bar{C}_{ijkl} \bar{\sigma}_{kl} \quad (2)$$

このようにして得られた等価弾性係数を実岩盤に与えれば、任意境界条件下においても、岩盤内のある"点"の物性値を与えることが可能になる。したがって、このように与えた物性には、寸法効果が存在してはいけ

ない。
節理の代表寸法、RVEの寸法および構造物の寸法をそれぞれMICRO寸法、MINI寸法およびMACRO寸法とした場合、MMM原理^[3]によると、不連続体を連続体として取り扱うには、次式を満足する必要がある。

$$MICRO \ll MINI \ll MACRO \quad (3)$$

FEM解析において、RVEのサイズがメッシュのサイズに等しいと仮定すれば、構造物のサイズと節理の寸法を考慮した上で、メッシュの大きさを決めなければならない。しかし、通常の連続体解析では、検討対象領域および構造物内部の応力集中の程度に応じてFEMメッシュを細分割することが一般的である(この時MINI<<MACRO)。RVEが節理の代表寸法より十分大きい(MICRO<<MINI)ことを念頭において解析メッシュのサイズを決めると、解析精度が問題となる。例えば、節理の間隔が20cmで、高さ5mのトンネルの掘削解析に対して、RVEを節理間隔の10倍とすると、FEMメッシュのサイズは少なくとも2m必要になる。また、節理間隔が5cmで、RVEサイズを節理間隔の10倍とし、直径60cmの平板載荷試験のシミュレーションを行う時にはメッシュの大きさは50cmとなる。このようなメッシュサイズでは、連続体としての解析解の信頼性はない。上記の点が不連続体に対する連続体解析の適用限界であると指摘されている。

3. 不連続性岩盤挙動の寸法効果

岩盤試験結果のデータで見られるように、岩盤の変形挙動にはバラツキが多く、これは、サンプル寸法の関数と考えられ、サンプルの寸法が岩盤の力学特性に与える影響を寸法効果と呼んでいる。文献[4]では、不連続性岩盤の変形特性の寸法効果に影響を与えるメカニズムについて解析的な検討を行い、節理密度が寸法

効果に影響を与える一つの要因であることを報告している。すなわち、節理分布が比較的均質な岩盤に対して、寸法が異なった供試体をサンプリングすると、供試体の体積密度が変化する。そして、供試体寸法が大きくなるのに伴い、岩盤の等価弾性係数は低下の傾向を示し、最終的には体積密度と同様に一定値に収束する結果が得られた(図2曲線B)。一般に、節理の存在、すなわち、節理の密度、方向、力学特性等が、岩盤挙動に大きく影響を与えることが知られており、この内、密度の影響はきわめて大きいものと考えられる。また、等価弾性係数の絶対誤差を10%~5%にするためには、サンプルのサイズは少なくとも節理間隔の10~20倍が必要となり、一方、節理の密度が一定であれば、寸法効果はほとんどない結果が得られている(図2曲線A)。

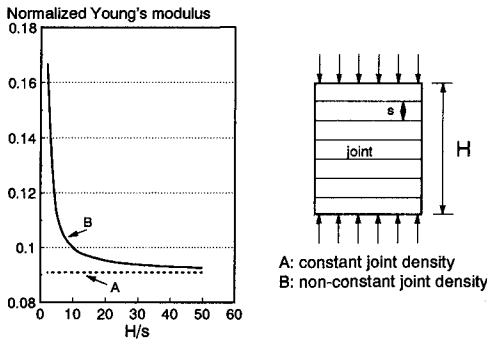


図2 等価弾性係数を供試体サイズの関係

4.不連続性岩盤を連続体として取り扱うためのRVE寸法

節理性岩盤挙動の寸法効果およびFEM解析の精度を念頭において、実岩盤での節理の空間的な分布に基づいた連続体解析を行う場合、式(3)を満足させると、その解析対象はかなり限られてくる。

しかし、不連続性岩盤の連続体解析は、局所の変形挙動よりもマクロ的な挙動の把握を目的としていること、および原位置での節理情報をすべて把握し、モデル化することが非現実的であることから、現状の節理性岩盤の連続体解析は、次のような解析手順に従って行われる。

- ・ 解析領域内の節理調査(統計的な節理の方向、密度の決定)
- ・ 有限数の室内、原位置の岩石・節理の力学的物性試験の実施
- ・ 連続体解析モデル、物性値を決定し、解析(FEM)を実施

このような解析では、物性値の均質化が先に行われ

ることになり、解析モデル(ゾーニングが可能)に与える節理密度は一定であることが前提となる。文献[4]で得られた結果によれば、RVEの節理密度が一定で、弾性変形が卓越しているかあるいは塑性変形が小さい場合には、寸法効果はあまり見られないとの結果が得られており、RVEのサイズを大きくしても、小さくしても、与えた節理密度が同じであれば、岩盤はほぼ同じ挙動を示す。この場合は、 $\text{MICRO} \ll \text{MINI}$ を満足しなくても良いことになる。したがって、RVEのサイズがメッシュのサイズと等しいと仮定すれば、メッシュのサイズを決める時には $\text{MINI} \ll \text{MACRO}$ のみを考慮すればよいことになる。これは、節理密度が相対的に低い時にはMMM原理を満たさないことになるが、前述の検討結果によると、解析上では問題にならない。なぜなら、FEMメッシュ(RVE)の節理密度が一定であれば、寸法効果の影響が小さく、RVE(メッシュ寸法)は最小限度に設定することができるためである。

節理分布が統計的に均質で、かつ節理の間隔が構造物の寸法より十分小さく、さらに、節理の塑性変形が十分小さければ、連続体として有効な解析が可能となる。ただし、解析で与えた節理の密度が代表的なものかどうか十分に検討すべきであり、これに対しては、節理密度を設定するための原位置の節理調査の範囲を節理間隔の10~20倍以上取れば良いものと思われる。

5. おわりに

統計的に均質で、節理を多数有する岩盤に対する連続体解析では、RVEに与える物性値(例えば、節理密度)は統計的なものであり、連続体解析上では岩盤挙動に寸法効果を生じさせないため、通常FEMメッシュをRVEとして取り扱うことができ、その寸法は実岩盤試験で得られたRVE寸法より小さくすることができるものと考えられる。ただし、解析で与えた物性値を代表的なものとして設定するためには、原位置の節理調査・試験は大きな範囲で行う必要があり、例えば、節理調査範囲の寸法は、少なくとも節理間隔の10倍以上とする必要がある。

参考文献

- [1] Oda, M., Suzuki, K., Maeshibu, T. (1984), Elastic compliance for rock-like materials with random cracks, *Soils and Foundations*, **24**, pp.27-40.
- [2] Cai, M. and Horii, H. (1992), A constitutive model of highly jointed rock masses, *Mech. Materials*, **13**, pp.217-246.
- [3] Hashin, Z. (1983), Analysis of composite materials, *J. Applied Mech.*, **50**, pp.481-505.
- [4] 蔡、宇野、田坂、福井、(1994)、不連続性岩盤挙動の寸法効果に関する一考察、第29回土質工学研究発表会、投稿中。