

不連続性岩盤の引張り強さに関する寸法効果の評価方法の提案とその試解析

電力中央研究所 正会員 岡田 哲実

電力中央研究所 正会員 小早川博亮

電力中央研究所 正会員 伊藤 洋

1. はじめに

東北地方太平洋沖地震を経験し、今後も耐震設計用の地震動は大きくなる可能性がある。評価体系についても従来のように基準値を満たすことを示すだけでなく、どの程度の余裕を持っているかを示すことが必要になっている。このような状況に対応するため、重要土木構造物を支える岩盤の力学物性についても、従来のように保守的に評価するだけでなく、より現実に近い岩盤の耐力を評価できる力学物性値の設定方法を再構築していかなければならない。本研究では、岩盤不連続面の調査結果を基にして、岩盤の引張り強さの寸法効果を解析的に評価する方法を提案し、試解析によりその実現可能性を確認した。

2. 寸法効果の評価方法の概要

概要は図1の通りである。岩盤の不連続面の調査データを基に、FEMのメッシュの寸法に相当する岩盤の構造を不連続体としてモデル化し、その不連続体の解析を行うことで、岩盤の力学物性を求める。不連続体の解析に必要な岩と不連続面の両方の力学物性は試験により求める。この解析結果の比較・検証と修正（キャリブレーション）には、通常実施している原位置岩盤試験を用いる。解析による力学物性評価が可能になれば、図2に示すようにモデルから任意の大きさを抽出し、解析を行うことで寸法効果を比較的容易に評価することが可能になる。

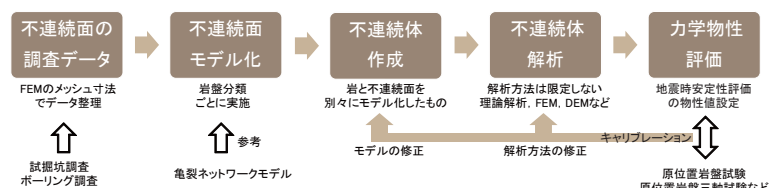


図1 力学物性評価の基本的な考え方

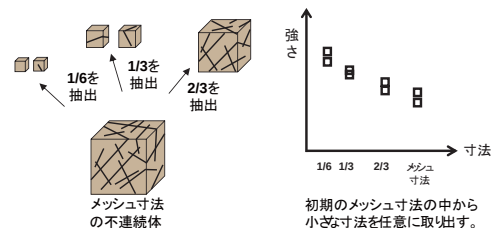


図2 寸法効果の検討方法

3. 不連続面の幾何学情報のモデル化

不連続性岩盤の力学物性に関係する岩と不連続面の調査情報を表1に示す。不連続性岩盤の力学物性を評価する場合、これらのうち物理情報および力学情報については、室内の岩石および不連続面の力学試験に結果として反映される情報と言える。室内試験に反映されない残り4つの幾何学情報（不連続面密度、分布、大きさ、方向）のモデル化が重要なポイントとなる。これらのモデル化については、放射性廃棄物処分の地下水流動解析の分野での研究が参考になる^{例えば1)}。今ここでは、ある領域の調査結果に基づいて図3に示す3次元の不連続体が得られたもの仮定する。この不連続体の2次元断面を図4に示す。以降では、この2次元断面を試解析に使用する。

表1 不連続性岩盤の調査情報

不連続面	複数(面相互間)の 情報	幾何学情報	不連続面密度		幾何学情報 としてモデル化
			分布		
	単体 (一枚) の情報	幾何学情報	大きさ		
			方向		
		物理情報	隙間厚さ(開口幅)		
			粗さ(ラフネス,凹凸)		
状態(風化度,充填物)					
岩	物理情報		密度		割れ目の 力学試験 結果に反映
			含水比		
	力学情報		剛性		
			強度		



図3 3次元不連続体

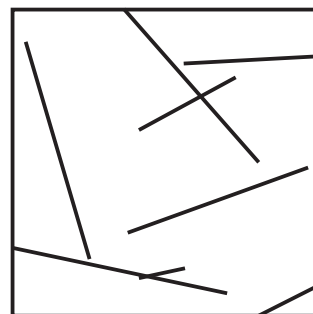


図4 2次元断面

キーワード 岩盤, 不連続面, 寸法効果, 引張強さ

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (一財)電力中央研究所 地球工学研究所

4. 不連続体の引張り強さの簡易解析方法

図5のように不連続面が(1本)存在する場合、岩盤の引張り強さは、岩と不連続面の引張り強さの和で表されると仮定する。図6のように不連続面が2本存在する場合、想定される破壊面としてパターン①～③が考えられる。パターン①②の場合は不連続面が1本の場合と同様である。一方、パターン③のように不連続面と不連続面の間で破壊が生じる場合については、想定破壊面 (M_{12} 面) を仮定し、図7に示す M_{12} 面上の力のつり合いを考える。 M_{12} 面に作用する上下方向の応力を σ_y 、左右方向の応力を σ_x 、 M_{12} 面上の垂直応力を σ_{fm} 、 M_{12} 面の長さを l_{12} 、 M_{12} 面と x 軸とのなす角を α_{12} とする。 σ_{fm} が岩の引張強度 q_{tm} に等しくなった時、引張り破壊が生じると考えると、力のつり合いより次式が成り立つ。

$$\sigma_y \cos \alpha_{12} \cdot l_{12} \cos \alpha_{12} + \sigma_x \sin \alpha_{12} \cdot l_{12} \sin \alpha_{12} = \sigma_{fm} l_{12} = -q_{tm} l_{12} \quad (1)$$

$$\therefore \sigma_y = -(\sigma_x \sin^2 \alpha_{12} + q_{tm}) / \cos^2 \alpha_{12} \quad (2)$$

M_{12} 面が負担する上下方向の引張荷重 ($-F_{12}$) は、(2) 式の σ_y に M_{12} 面の水平面への投影面積 $l_{12} \cos \alpha_{12}$ を乗じて、次式のとおり表される。

$$-F_{12} = -\sigma_y l_{12} \cos \alpha_{12} = (\sigma_x \sin^2 \alpha_{12} + q_{tm}) l_{12} / \cos \alpha_{12} \quad (3)$$

(3) 式より、 $-F_{12}$ が最小の時に破壊が生じると考えると、破壊面を表す l_{12} と α_{12} が確定する。なお一軸状態では $\sigma_x = 0$ となる。今回は、 $-F_{12}$ の最小値を求めるため、不連続面をそれぞれ 100 分割して、その全経路を計算した結果から最小のものを選択した。図4に示す全ての不連続面間でこの計算を実施し、断面を左右に横切る様々なパスに対して、図5に示したように強度の和を求め、得られる最小の強度を引張り強さとした。

5. 引張り強さの解析例

岩の引張り強さ $q_{tm} = 1000$ (kPa)、不連続面の引張り強さ $q_{td} = 0$ とした。拘束圧に相当する $\sigma_x = 0$ とした。フルスケール (図4) を 100% とすると、この 1% を最小スケールとして、1% の間隔で各 10 ケース (合計 1000 ケース) の領域をランダムな抽出し、引張り強さの計算を行った。計算された破壊面経路の一例を図8に示す。黒い太線が不連続面で、赤い太線が解析結果から選定された岩の部分の引張破壊面である。全ての計算結果を図9にまとめた。横軸にフルスケールで正規化したスケール Z_s 、縦軸に岩盤の引張り強さをとった。図にはデータ 50 個ごとの平均値も示している。スケールが小さくなると両極端の解析結果が多くなるが、平均的にはスケールが大きくなるに従って強度は低下し、その低下の割合は小さくなるという既往の研究^(例えば2)と類似の傾向が得られた。

6. おわりに

提案の解析的評価方法を用いることで従来は評価できなかった岩盤の引張り強さの寸法効果を評価できる可能性が示唆された。今後、せん断強さの寸法効果も検討する予定である。

参考文献

- 1) 鈴木俊一, 本島貴之, 井尻裕二, 青木広臣: 確率統計理論による亀裂特性データの相互関係の整理と数値解析モデルによる妥当性検証, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.185-195, 2009.
- 2) Yoshinaka, R., Endo, T., Nomura, N. and Yamagishi, K.: In-situ loading tests using the large-sized concrete block for weathered granite., Proc. Scale effects in Rock Masses, pp.191-198, 1993.

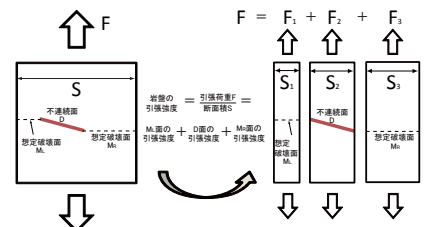


図5 引張り強さ算定の仮定

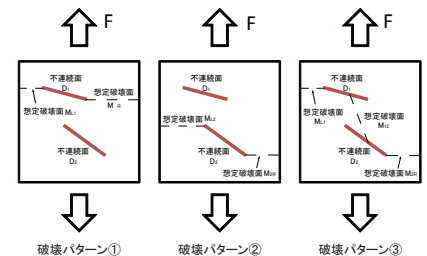


図6 引張りの破壊パターン

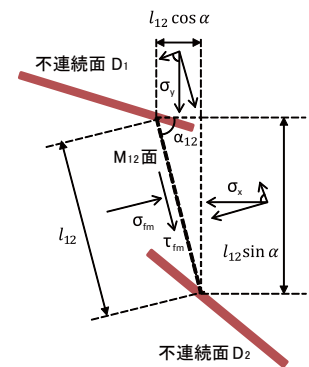


図7 不連続面間の力のつり合い

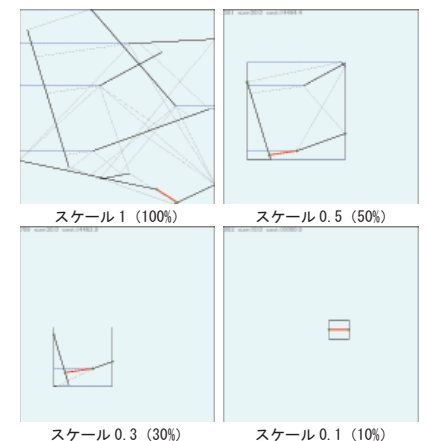


図8 解析結果の一例

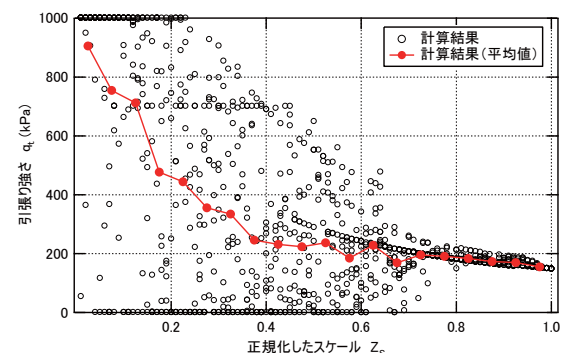


図9 スケールと引張り強さの関係