

人工岩盤材料の破壊進展挙動の数値解析

電力中央研究所 正会員 ○澤田 昌孝

電力中央研究所 正会員 石丸 真

1. はじめに

巨大地震等に対する岩盤の挙動や安定性を評価する場合に、岩盤の破壊進展や大変形まで扱う解析手法が求められるようになってきた。岩盤の大変形・破壊挙動を定量的に評価する場合に解析パラメータの設定にあいまいな点が残っていると考えられ、精度の高い要素試験や模型実験等のベンチマークとなる事例を蓄積し、これらと比較することで解析手法・パラメータ設定の検証を行うことが必要である。本研究では、上記のような考え方から人工岩盤材料の平面ひずみ圧縮試験¹⁾における破壊挙動に岩盤破壊解析コード RFPA (Rock Failure Process Analysis)²⁾を適用し、検討を行った。

2. 人工岩盤材料の平面ひずみ圧縮試験

不連続面を含む供試体(断面 54mm×80mm, 高さ 160mm の矩形)を用いた平面ひずみ圧縮試験を解析の対象とする。供試体はセメント, 珪砂, 鉄粉, 水, 木節粘土, 混和剤を配合した人工岩石で作成し, 密度は概ね 1.6g/cm³ である。初期不連続面なしの供試体(model-0)と図1に示す初期不連続面を配した供試体(model-1, model-2)を用意し, 鉛直方向に変位制御で載荷を行い, 亀裂進展を観察した。また, 側方圧 σ_x を 0, 30, 100kPa と変化させたケースを設定し, その影響を調べた。

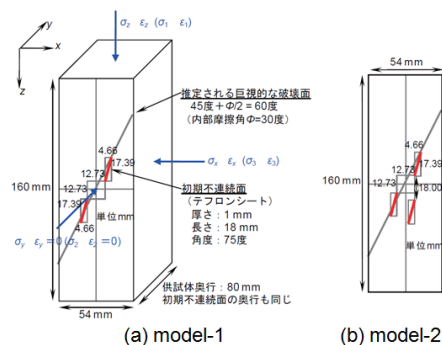


図1 供試体形状と不連続面の配置

3. 岩盤破壊解析

使用した解析コード RFPA は, ひずみ軟化型の構成式を用い, 岩盤物性の不均質性を与えることで岩盤の破壊現象, 亀裂進展の解析を行う有限要素法プログラムである。RFPA の構成式を図2に示す。圧縮領域では, 線形弾性体である領域 I から圧縮強さ σ_{c0} に到達するとひずみ軟化をして応力が σ_{cr} まで低下し残留状態となる(領域 II)。また, 引張領域でも同様の挙動となるが引張強さ σ_{t0} は一般に圧縮強さよりも小さい。入力パラメータとして応力残留率 α ($=\sigma_{cr}/\sigma_{c0}$)と圧縮強さ σ_{c0} と引張強さ σ_{t0} の比 CTR ($=\sigma_{c0}/\sigma_{t0}$)が設定される。破壊判定には Mohr-Coulomb の破壊規準を用い, 粘着力 c およびヤング率 E_0 を Monte-Carlo 法により各要素にランダムに分布させることで不均質性を表現する。確率分布としてワイブル分布を用いた。解析に用いた入力パラメータの値を表1に示す。人工岩のパラメータ値は初期不連続面なしの試験ケースから得られたせん断強さ(粘着力 c_d : 118.1kPa, 内部摩擦角 ϕ_d : 28.9deg.)を再現するように試行を重ねて設定した。各要素に与える粘着力 c の平均値は, 供試体の粘着力 c_d の5倍近く大きい必要があるが, 不均質性により平均値より小さい粘着力の要素が存在すること, 進行性破壊の過程で既に破壊した要素の周辺で応力集中することに起因すると考えられる。

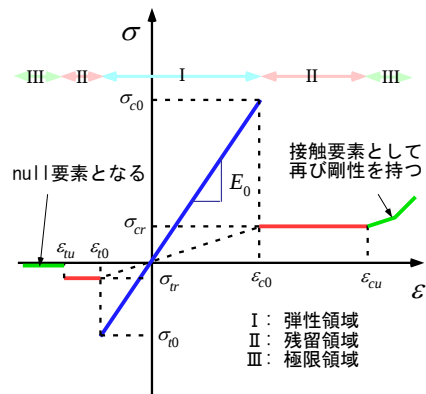


図2 応力ひずみ関係 (RFPA)

表1 解析パラメータの値

パラメータ名	単位	人工岩	不連続面
(平均)ヤング率 E_0	MPa	50	5
ポアソン比 ν	-	0.25	0.25
(平均)粘着力 c	MPa	0.54	0.001
内部摩擦角 ϕ	deg.	30	22
ワイブル係数 m	-	20	100
応力残留率 α	-	0.2 ($\sigma_x=0$ kPa) 0.6 ($\sigma_x=30, 100$ kPa)	1
圧縮/引張強さ CTR	-	3.0 (1ケースのみ5.0)	

$$\text{ワイブル分布: } f(t) = \frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{m-1} \exp \left\{ - \left(\frac{t}{\eta} \right)^m \right\}, \quad \mu = \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right)$$

$f(t)$: 変数 t の確率分布, m : ワイブル係数
 η : 尺度パラメータ, μ : 変数 t の平均値

4. 試験と解析の比較

図3に model-1, model-2 における試験後の供試体の破壊の様子を示す。図中のケース名は「供試体種類一側方圧(一同一条件識別番号)」としている(供試体種類 M1 は model-1 と対応)。基本的には, 想定した巨視的な破壊面に沿う2つの不連続面が干渉し, それらを連結する破壊が生じた(M1-100kPa-1を除く)。model-2(M2)で右下に配

キーワード 亀裂進展, 数値解析, 有限要素法, 平面ひずみ, 人工岩

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (財)電力中央研究所 TEL 04-7182-1181

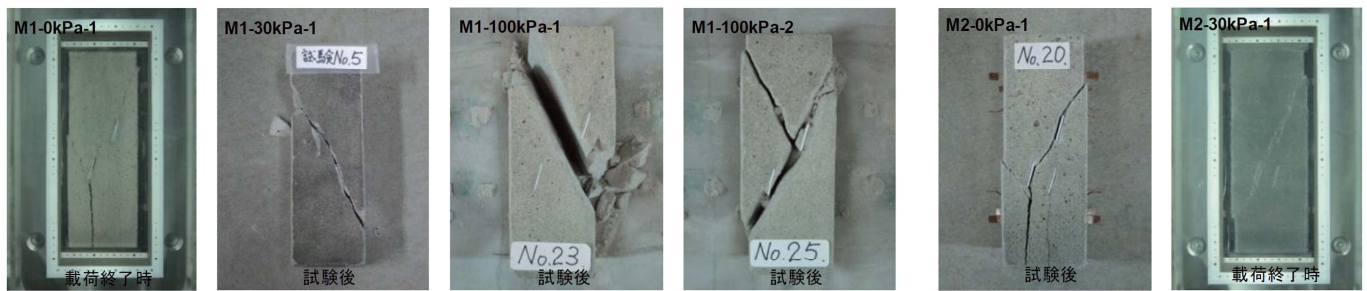


図3 平面ひずみ圧縮試験の試験終了後の破壊の様子 (M1: model-1, M2: model-2) ¹⁾

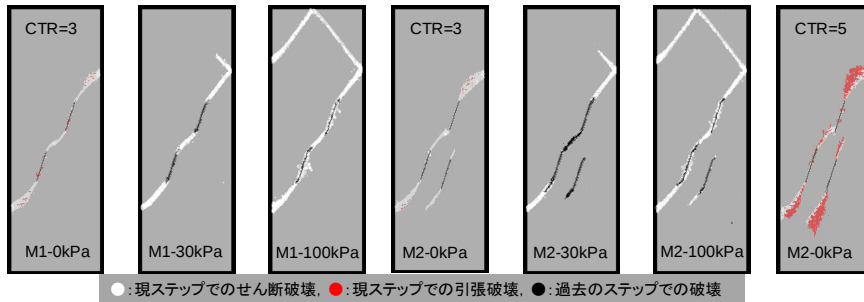


図4 応力降下が発生したステップでの破壊要素の分布 (解析)

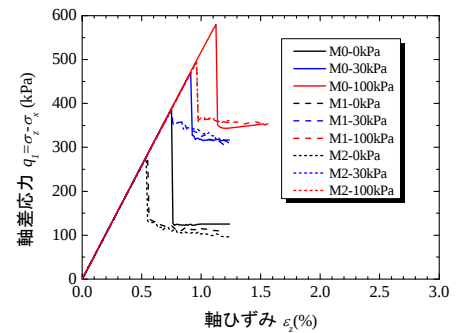


図5 応力ひずみ曲線 (解析, CTR=3)

置された不連続面は他の2つの不連続面とは干渉せず、巨視的な破壊には関与しない。側方圧が 0kPa のケースでは左下の不連続面から引張破壊が発生した。

解析から得られた破壊要素分布、応力ひずみ曲線をそれぞれ図4, 図5に示す。

図4の右上, 左下の2つの不連続面が連結し破壊すること, M2の右下の不連続面は全体の破壊に関与しないことは、実験結果を再現している。

側方圧 $\sigma_x = 0\text{kPa}$ の解析結果ではせん断破壊と引張破壊が混在しているが, CTR=3 ではせん断破壊が優勢で CTR=5 (図4右端) とすると引張破壊が優勢になる。解析での引張破壊の分布 (図4右端) は不連続面端から花卉状に広がっており, 試験での引張亀裂の軌跡と必ずしも一致しないが, 概ね捉えることができた。図5の応力ひずみ曲線を見ると, 不連続面なしのケース (M0) に比較して M1, M2 では不連続面の影響で破壊時の軸差応力が小さくなるが, M1 と M2 ではほとんど差がない。これは M2 で加えられた右下の不連続面が巨視的な破壊に関与しないためと考えられる。図6に示した実験での応力ひずみ曲線でも M1 と M2 の間にはほとんど差は見られない。一方, 実験では側方圧 100kPa のケースで延性的な挙動が見られた (図6左) が, 解析では 100kPa でも脆性的に応力降下が生じている (図5)。

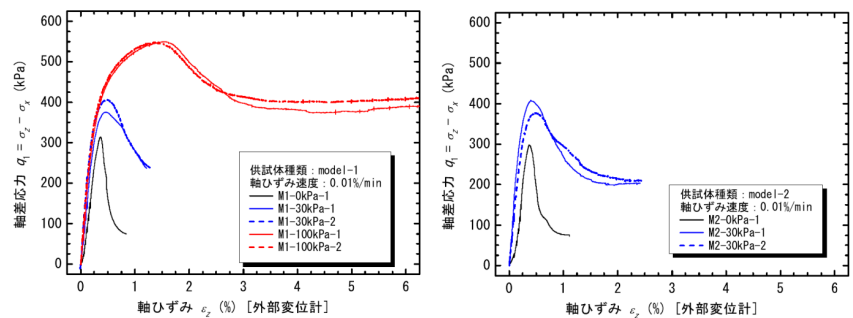


図6 応力ひずみ曲線 (実験, 左: model-1, 右: model-2) ¹⁾

5. おわりに

本研究の検討において, 解析コード RFPa は, 岩盤が脆性的な破壊挙動を示す条件では, その亀裂進展を良く再現することができた。今後, 本解析コードを岩盤斜面の崩壊挙動や断層の破壊挙動へ適用することを考えている。

参考文献

- 1) 石丸真, 澤田昌孝, 古関潤一, 宮下千花: 平面ひずみ圧縮試験における人工岩盤材料の破壊進展挙動, 土木学会論文集 A2 分冊 (応用力学) 特集号, 2011 (投稿中)。
- 2) Tang, C. A.: Numerical simulation of progressive rock failure and associated seismicity, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol.34, No.2, pp.249-261, 1997.