

## ジョイント要素を用いた不連続性岩盤の解析的検討

(株) 構造計画研究所 正会員 ○三橋 祐太 正会員 内山 不二男  
 東京大学 橋本 学 奥田 洋司

### 1. はじめに

不連続性岩盤の等価剛性評価に関して、MBC や MYM などの等価連続体モデルが複数提案されてきた<sup>1)</sup>など、本研究では不連続面をジョイント要素、母岩部をソリッド要素でモデル化した有限要素モデルにより不連続性岩盤の構造解析を行うことで不連続性岩盤の等価剛性を評価した。不連続面の分布を確定論的に取り扱うことは非現実的であるため、確率論的に生成した不連続面の空間分布を用いて複数のケースに対して解析を実施することで不連続性岩盤の等価な剛性を算出した。算出した剛性を MBC モデルより導かれる巨視的剛性と比較することで、FEM により算出した剛性の妥当性と有用性を検証した。

### 2. ジョイント要素とメッシュ作成

ジョイント要素は微小変形の仮定の下 2 物体の接触/滑動/剥離を表現する有限要素であり、有限要素法で岩盤や地盤の弱層をモデル化する際によく用いられる。本研究では岩盤の不連続面のモデル化に Goodman ジョイント要素を用いた。筆者らは複数の不連続面をジョイント要素でモデル化した有限要素メッシュを作成する手法を提案し、実際にその手法を用いたメッシュャーを作成することで提案手法の検証を大規模解析に対応した FEM コード FrontISTR を用いて行っている。本研究ではそのメッシュャーを用いることで岩盤内の不連続面をジョイント要素でモデル化した有限要素メッシュを作成した。

### 3. 不連続性岩盤の数値モデル

解析モデルは供試体を模擬した図 1 に示すような 1×1×2 の直方体であり、不連続面をジョイント要素によりモデル化している。不連続性岩盤を統計的に取り扱う際のパラメータとして、①不連続面の位置②不連続面の大きさ③不連続面の枚数(密度)④不連続面の角度分布⑤不連続面の形状、が挙げられる。本研究では位置はランダム分布、枚数は 4 枚、角度分布は卓越傾斜 60 度、 $\kappa=10$  のフィッシャー分布に固定した。不連続面の形状に関しては吉中ら<sup>2)</sup>に準じて円を仮定した。不連続面の大きさはパラメータとして半径 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.9 の 6 パターンを実施した。各半径のパターンに対して①および④の確率分布に従う不連続面の空間分布を 100 ケース作成し、構造解析モデルを作成した。作成した構造解析モデルの底面を固定し、上面に強制変位を与える解析を実施してモデル底面に発生する鉛直方向反力から解析モデルの等価剛性を算出する。強制変位の向きは上向き(引張)と下向き(圧縮)とした。使用した物性値を表 1 に示す。圧縮の際の接線方向のばね値は 0(kN/m/m<sup>2</sup>)と比較的固い値である 2.0E6(kN/m/m<sup>2</sup>)の 2 パターンを実施した。図 1 のモデルに鉛直下向きに強制変位を与えた際の変形図および鉛直コンター図を図 2 に示す。

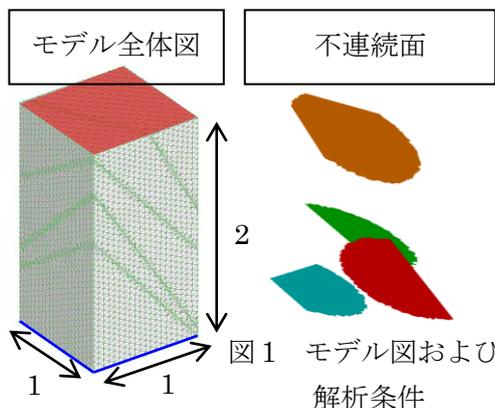


図 1 モデル図および解析条件

表 1 物性値一覧

母岩		
ヤング係数	kN/m <sup>2</sup>	2.0E+06
ポアソン比		0.3
不連続面		
引張	ks	0
	kN/m/m <sup>2</sup>	0
圧縮	ks	0.0/2.0E+06
	kN/m/m <sup>2</sup>	2.0E+08

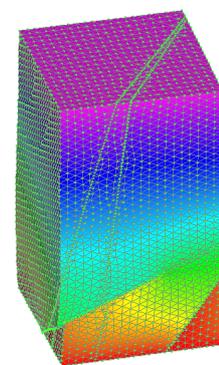


図 2 変形図

キーワード ジョイント要素, FrontISTR, 有限要素法, 不連続性岩盤

連絡先 〒164-0011 東京都中野区中央 4-5-3 (株) 構造計画研究所 防災・環境部 TEL 03-5342-1137

5. 等価剛性の評価

本検討では不連続面を解析空間にランダムに配置しているが、配置の位置によっては不連続面の一部が解析領域からはみ出るために、各解析モデルに含まれる不連続面の大きさが異なることとなる。そこで、不連続面の統計処理でよく用いられる P32<sup>3)</sup> などにより解析結果を整理する。ここで P32 とは解析領域の体積に対する解析領域に存在する不連続面の面積の比であり、P32 が大きいほど相対的に不連続面の量が多いことを意味する。

横軸を P32、縦軸を母岩のみの剛性で正規化した等価剛性として各パターンの結果をプロットした。圧縮(せん断ばねなし)、圧縮(せん断ばねあり)、引張それぞれの結果を図3に示す。また、等価連続体モデルのうちマイクロメカニクスに基づく連続体モデル(MBC)から導かれる巨視的剛性を黒線で合わせて示す。ただしMBCモデルの剛性は節理分布密度をパラメータとしているため、P32で整理する際に不連続面の分布に関して適当な仮定を置いている。引張のケースに関してはMBCモデルの結果が適用できないため、参考として圧縮(せん断ばねなし)の条件の値を破線で示した。FEMによる結果とMBCモデルの値はP32が小さい領域では比較的類似しているがP32の大きい部分でかい離が生じている。特にせん断ばねを考慮しない圧縮のケースではかなり大きな差異となっている。これは本検討では不連続面の枚数を4枚と比較的小さめに取っており、その状況でP32が大きな値になるということは1つの不連続面のサイズが大きくなるということである。不連続面のサイズが大きくなると供試体を貫通するような不連続面が増えることとなり、せん断ばねの小さなケースではそのようなモデルでは剛性がかなり小さく評価されると予想されることによる。換言すると不連続面の枚数が小さく連続体モデルのような統計的な性質を仮定しづらいモデルにおいては、P32で整理したMBCモデルによる結果とFEMの解析とは差異が生じるということである。統計的な仮定が置きづらいような場合においてはFEMを用いることにより、より正確な等価剛性の評価が期待できる。

6. ばらつきの評価

FEMによる検討では等価剛性のばらつきも合わせて評価することが可能である。解析結果から評価した等価剛性とそのばらつきの分布を図4に示す。ただしこのばらつきは不連続面の角度(本検討では $\kappa = 10$ のフィッシャー分布)や位置等の不確実性に影響を受けることを確認している。

7. まとめ

本研究では不連続面を含む岩盤の等価剛性を複数のFEM解析により算出した。FEMにより評価された等価剛性はMBCモデルの値と比較的類似しているものの、P32が大きい領域では差異がみられた。統計的な仮定を適用しにくい場合にはFEMにより等価剛性を算出する方法も有用であると考えられる。さらにFEMにおける複数の解析モデルによる等価剛性からそのばらつきが算出できることも合わせて示した。今後は不連続面の枚数を増やした検討など通してより詳細な分析を行っていくことを考えている。

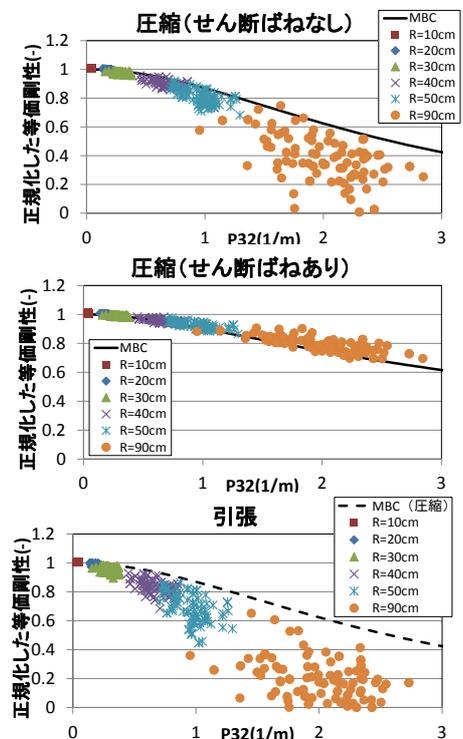


図3 FEMによる等価剛性

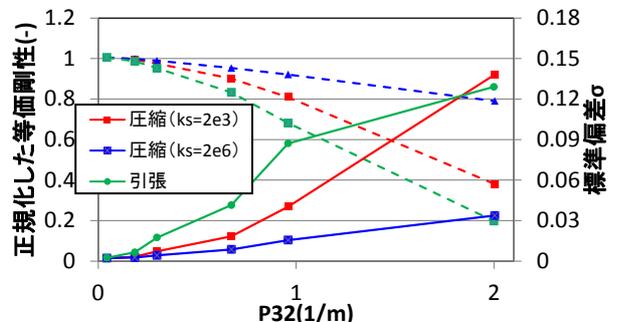


図4 等価剛性と標準偏差

(破線：等価剛性／実線：標準偏差)

■参考文献

- 1) 堀井ら：節理性岩盤を対象とした各種解析手法による要素解析結果の比較，土木学会論文集 No. 659/III-52, 229-240, 2000.9
- 2) 吉中ら：寸法効果を考慮した岩盤不連続面の設計用物性値の設定，土木学会論文集 C Vol. 62 No. 2, 457-470, 2006.5
- 3) 鈴木ら：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, 185-195, 2009.3