微視構造の極限解析による不連続性岩盤の巨視的強度特性評価

東北大学大学院　学生会員　○鄭　　慈恵
東北大学大学院　正会員　　中村　正紀
東北大学大学院　正会員　　寺田賢二郎
東北大学大学院　正会員　　京谷　孝史

1. はじめに

岩盤は内部に微視構造を有する非均質材料であり，その力学特性は複雑に構造化された内部微視構造に支配される．岩盤の強度特性に及ぼす微視構造の影響を考慮するために，均質化法を用いた強度評価法 [1] が提案されているが，微視構造の一部が破壊したときの荷重を破壊基準としているため強度を過小評価する傾向がある．本研究では，微視構造に対し極限解析を行うことで微視構造全体が崩壊に至る荷重を考慮した岩盤の巨視的強度特性評価法を開発する．

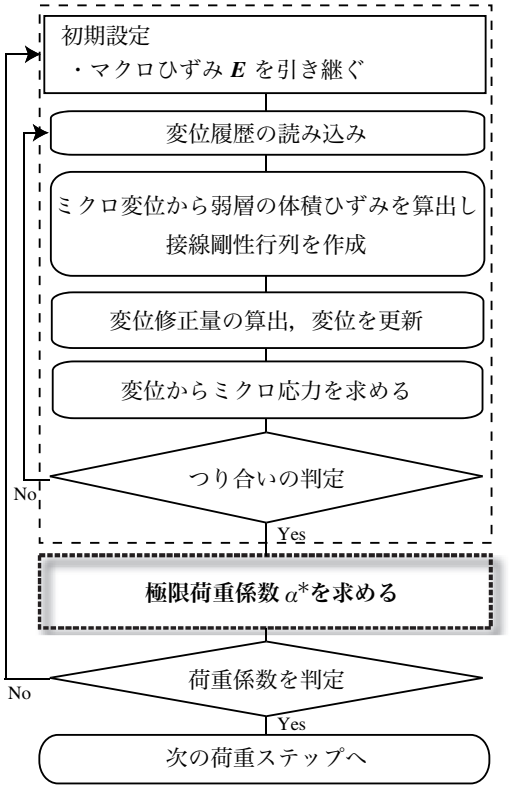
2. 開発手法の概要

構造体の崩壊の状態が荷重経路に依存しないことから直接崩壊荷重を直接求める方法として極限解析法がある．極限解析には静的可容応力場に基づき最適解を求める下界法と運動学的可容速度場に基づき最適解を求める上界法があるが，本研究ではこの上界法と下界法を同時に解き最適解を求める混合型剛塑性有限要素法 [2] を用い，材料内部微視構造の崩壊荷重（極限荷重）を求める方法を開発した．

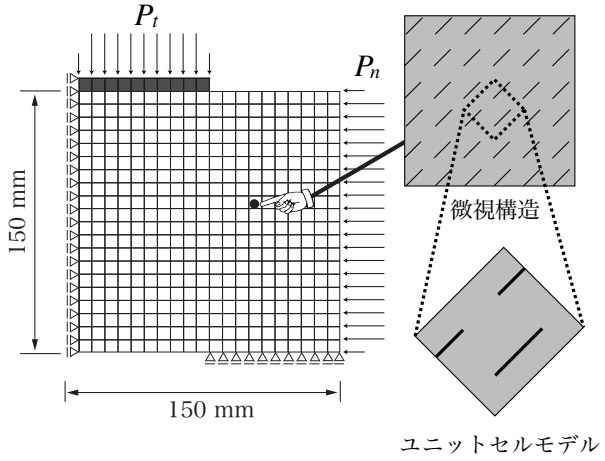
開発手法の重要なプロセスは，マクロひずみ E_{ij} を所与の条件として周期境界条件の下で微視構造の単位構造（ユニットセル）に対してミクロ解析を行い，得られるミクロ応力 σ_{ij} からユニットセルが崩壊に至る極限荷重係数 α^* を求めることにある．このプロセスを用いて 114 方向のマクロひずみから得られるそれぞれの極限荷重をマクロ応力 Σ の三次元空間にプロットし，二次曲面で近似することで巨視的破壊基準面を求め，マクロ構造の強度評価を行った．またユニットセルの不連続面には，小早川・京谷 [3] が提案した弱層が圧縮されることでその剛性が上昇する処理を行い亀裂のかみ合わせを考慮した連続体弱層モデルを用いた．以上の解析の流れを**図–1**に示す．

3. 不連続面を有する石膏供試体の強度特性評価

本手法の性能を検証するために分布開口亀裂を有する石膏供試体の一面せん断試験の数値シミュレーションを行い，実際に行われた実験値 [4] と比較した．**図–2**に解析に用いた供試体モデルとユニットセルモデルを示す．また，それぞれの実験に用いられた石膏モルタルの材料定数は，**表–1**に示すとおりである．**図–3**には解析により得られた巨視的破壊曲面を示す．巨視的破壊基準面は，原点（破線の交点）を含む等方圧縮方向に向けて広がる二葉双曲面となってい



図– 1 解析アルゴリズム

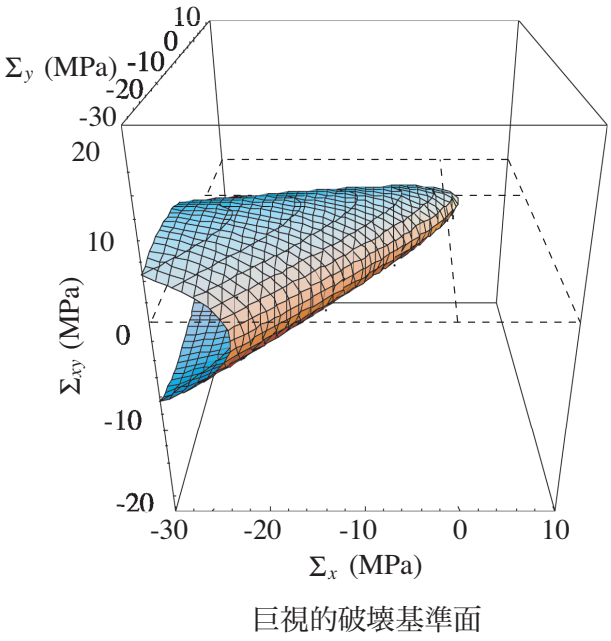


図– 2 供試体モデルと材料内の微視構造モデル

キーワード：極限解析，不連続性岩盤，強度特性評価，マルチスケール解析
〒 980–8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6–6–06，TEL: 022–795–7425，FAX: 022–795–7423，URL: http://www.nde.civil.tohoku.ac.jp/

表– 1 解析に用いた物性値

ヤング率	ポアソン比	粘着力	内部摩擦角
3040 MPa	0.12	2.05 MPa	56.3 °



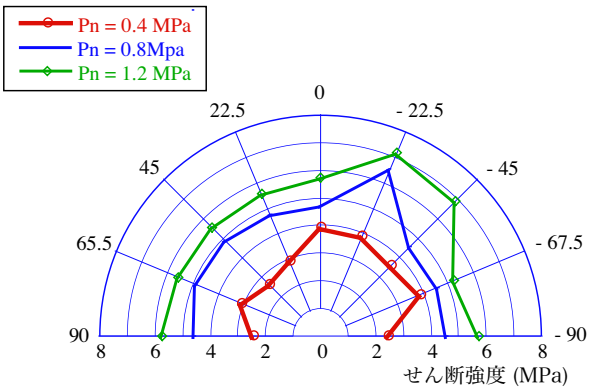
図– 3 巨視的破壊基準面

る．一般に石膏などの準脆性材料は等方圧縮方向では破壊しないため，その破壊基準は二葉双曲面が妥当であると考えられており，本解析手法を用いることで実際の構造物に近い破壊基準面を評価することができた．

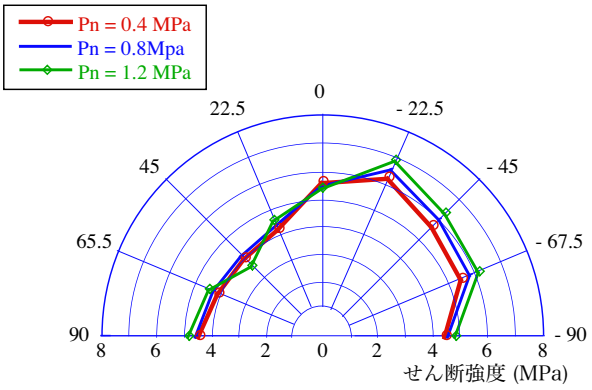
図–4に試験結果 [4]，**図–5**に得られた巨視的破壊曲面を降伏面として持つマクロ構造の極限荷重解析った結果を示す．

試験では拘束荷重 P_n の違いにより程度の差はあるが，不連続面がせん断荷重に対して差し目となる –45 °から –67.5 °付近において急激に強度が大きくなる様子が現れている．この結果は，規則的な不連続面という内部構造を持った物体が，一面せん断という特殊な境界条件の下でいかなる破壊強度を示すかを表しており，内部構造を有する物体が示す力学挙動の典型と言える．

解析から得られた結果は，不連続面がせん断荷重に対して差し目となる –45 °から –67.5 °付近において急激に強度が大きくなる様子は試験結果と合致し，不連続面の角度によるせん断強度の変化をよく評価できていると言える．しかし，拘束圧の違いによるせん断強度の変化なほとんど評価できていない．この問題は，不連続面に用いたかみ合わせを考慮した連続体弱層モデルの剛性上昇パラメータに依存すると考えられる．したがって，今後はせん断強度の拘束圧依存性を評価するために，弱層のパラメータを調整する必要がある．



図– 4 不連続面の角度によるせん断強度の変化（試験結果）



図– 5 不連続面の角度によるせん断強度の変化（解析結果）

4. おわりに

本手法が微視構造の破壊を考慮しながら岩盤の巨視的強度を評価する数値解析手法の有効性を示した．また，本手法により，微視構造の不連続面の角度による強度特性の変化を評価できる可能性を示すことができた．

参考文献

1) 京谷孝史，寺田賢二郎.: マルチスケール応力解析とその分布亀裂をふくむ材料の強度特性評価への適用, 土木学会論文集，Vol. III-55,No 680,pp.49-64,2001.
2) 小林俊一: 主双対内点法による混合型剛塑性有限要素法の開発, 応用力学論文集，Vol. 6,pp.95-106,2003.
3) 小早川博亮，京谷孝史: 亀裂に対する連続体弱層モデルを用いた均質化法による岩盤の強度特性評価，土木学会論文集C, Vol. 63, No 2,pp.428-440,2007.
4) 川本眺万，吉田英生: 節理体および積層体の巨視的なせん断破壊性状について，材料, 17(181), pp.42-49,1968.