

愛知県 (正) 高木 淳
名古屋大学工学部(学) 京谷 孝史
名古屋大学工学部(正) 市川 康明
名古屋大学工学部(正) 川本 颯万

1 概要 岩盤に存在する節理群のような分布不連続面に対しては損傷力学の方法が適用できる。本研究では、あらたに岩盤における実質応力を提案し、その適用性を検討するために、石こうモデルによる一軸圧縮試験と一面せん断試験のシミュレーションを行った。

2 岩盤における実質応力 村上らはCauchy応力を σ 、損傷テンソルを Ω として、実質応力 σ^* を

$$\sigma^* = \sigma (I - \Omega)^{-1} \quad (1)$$

で与えた。この実質応力は、もともと引張応力下における金属のクリープ現象を解析するために導入されたもので、完全に開いた空けきを対象としており、空けき部は一切の力を伝えないとしている。しかし不連続性岩盤を対象とした工学問題では、主として重力に起因する圧縮応力下での安定性が問題となり、不連続面の閉合および面上でのすべり抵抗等を考慮する必要があるだろう。そこで式(1)をもとに、岩盤における実質応力として

$$\sigma^* = A^T \{ \sigma_i (I - C_i \Omega')^{-1} + H \langle \sigma_n \rangle \sigma_n^* (I - \Omega')^{-1} + H \langle -\sigma_n \rangle \sigma_n^* (I - C_n \Omega')^{-1} \} A \quad (2)$$

を考える。ここに、 A は Ω の固有ベクトルを各行に持つマトリックス、 A^T は A の転置マトリックス、 $\Omega' = A \Omega A^T$ 、 $\sigma' = A \sigma A^T$ 、 $\sigma_n = (1/3) \text{tr}(\sigma')$ 、 $H \langle x \rangle = x > 0$ の時に1、 $x \leq 0$ の時に0、 σ_n^* は σ' の対角成分から成るマトリックス、 $\sigma_i = \sigma' - \sigma_n^*$ 、 C_i と C_n は損傷効果係数($0 \leq C_i \leq 1$ 、 $0 \leq C_n \leq 1$)である。 Ω を対角化することは、 Ω で表されたき裂面群を等価な損傷効果を持つ互いに直交する3つの不連続面群に置き換えることを意味する。式(2)では、この等価なき裂面群について、き裂面に垂直な応力と面に沿うせん断応力に分けて損傷の効果を考えている。

3 有限要素法による離散化 Cauchy応力 σ に関して、仮想仕事の原理は

$$\int_V \sigma \cdot \delta \varepsilon dV = \int_{S_t} t \cdot \delta u dS_t + \int_V f \cdot \delta u dV \quad (3)$$

となる。ここに、 $\delta \varepsilon$ は仮想ひずみ、 δu は仮想変位、 t は境界面 S_t に作用する表面力、 f は物体力である。実質応力 σ^* に対しては、式(2)を用いて、

$$\int_V \sigma^* \cdot \delta \varepsilon dV = \int_{S_t} t \cdot \delta u dS_t + \int_V f \cdot \delta u dV + \int_V \psi \cdot \delta \varepsilon dV \quad (4)$$

$$\psi = A^T \{ \sigma_i \{ (I - C_i \Omega')^{-1} - I \} + \sigma_n^* \{ H \langle \sigma_n \rangle (I - \Omega')^{-1} + H \langle -\sigma_n \rangle (I - C_n \Omega')^{-1} - I \} \} A \quad (5)$$

となる。形状関数 N 、変位 u ひずみマトリックス B 、節点変位 U を用いて離散化し、構成則 $\sigma^* = D \varepsilon$ を仮定して、式(4)に代入すると、

$$K U = F + F^* \quad (6)$$

$$K = \int_V B^T D B dV, F = \int_{S_t} N^T t dS_t + \int_V N^T f dV, F^* = \int_V B^T \psi dV \quad (7)$$

が得られる。剛性マトリックス K はき裂を含まない材料の構成則のみに依存しており、損傷の効果とは関係がない。従って塑性論など従来の複雑な構成則がそのまま適用できる。また、損傷の効果は、き裂の存在による見かけ上の外力 F^* で表現されており、材料特性とき裂の配置による構造特性がそれぞれ独立して取り

込まれている。

4 一軸圧縮試験とその数値解析 重量比で石こう：標準砂：水＝1：1：0.75の試料を用いて、Fig.1に示すようなき裂面群を有する直方体供試体を作成した。き裂面は試料が柔らかいうちに薄い鋼板を差し込み、完全に凝固する前に引き抜くことによって形成した。1週間の自然乾燥の後一軸圧縮試験を実施した。この一軸圧縮試験に対し、弾性損傷力学モデルによって、2次元平面応力解析を行った。損傷効果係数に関しては、 C_0 は1とし、 C_1 は0と1の2種類とした。弾性係数および一軸圧縮強度をき裂のない供試体が表示それぞれの値で正規化したものをFig.2、Fig.3に示す。図中●は実験値、曲線は解析値である。弾性係数については、実験結果と解析結果がよい一致を見せているのに比べて、一軸圧縮強度については、解析値がはるかに大きい。このように実験結果と解析結果で一軸圧縮強度が大きくくい違う原因としては、1)本研究における損傷力学モデルがき裂面の相互干渉を考慮していないこと、2)新たなき裂の発展を誘発する応力集中を考慮していないこと、などが考えられる。本研究における実質応力は、き裂面の有効断面の減少だけを考慮したもので、き裂を含んだ材料内に働くと考えられる平均的な応力であるにすぎない。これに対し、破壊は材料内におけるき裂の相互干渉やき裂先端部への応力集中などの局所的な応力状態に支配される現象であり、平均的な実質応力を考えるだけでは十分に予測できない現象である。

5 一面せん断試験の数値解析 川本らが行った一面せん断試験(Fig.4)に対して、数値解析を行い、Fig.5の結果を得た。この結果は川本らの実験結果(Fig.6)と定性的によく似た傾向を示している。

参考文献 1)京谷孝史：”岩質材料および岩盤に対する弾塑性損傷モデルに関する基礎的研究”，第18回土質工学研究発表会(1983)，pp777-78 2)村上澄男：”損傷力学－(材料の損傷と破壊への連続体力学的アプローチ)－”，材料31巻340号(1982)，pp1-13 3)川本勝万，吉田英生：”節理体および積層体の巨視的なせん断破壊形状について”，材料17巻181号(1968)，pp42-49

Tab.1

Young's Modulus (MPa)	3570
Poisson's ratio	0.064
Internal friction angle (degree)	30.0
Cohesion (MPa)	3.70

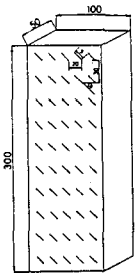


Fig.1

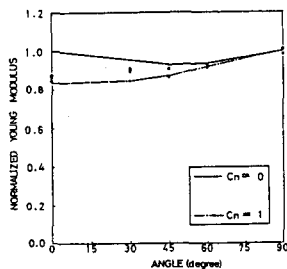


Fig.2

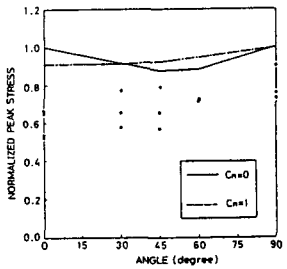


Fig.3

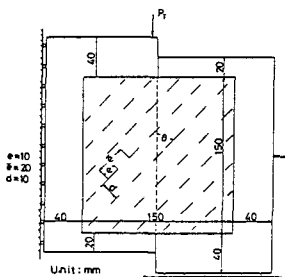


Fig.4

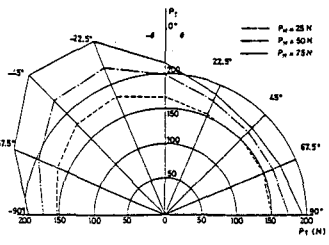


Fig.5

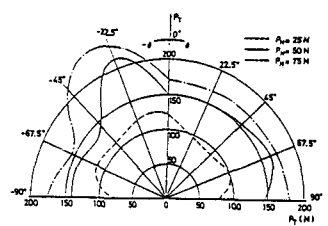


Fig.6