

III-167 逆解析による不連続性岩盤の力学特性の同定に関する研究

佐藤工業 (株) (正) ○原園 誠
 名古屋大学工学部 (正) 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 眺万

1. まえがき

節理群のような分布不連続面を含む岩盤の力学特性を評論するのに、損傷力学モデルが適用できる。¹⁾ 損傷力学モデルでは、分布不連続面の幾何学的、力学的効果を損傷テンソル(二階のテンソル)で表現している。本研究では、損傷力学モデルに逆解析を適用し、原位置試験の結果から損傷テンソルを同定する方法を提案する。

2. 損傷テンソルの同定手法

損傷力学モデルの逆解析を、『変位の一部が観測されたとき、つりあい式、構成則、境界条件を満たすような損傷テンソルを同定する。』と定義する。

$$\text{つりあい式} \quad \nabla \cdot \underline{\underline{g}} = \underline{\underline{Q}} \quad \text{in } V \quad (1)$$

$$\text{構成則} \quad \underline{\underline{g}}^* = \underline{\underline{D}} \underline{\underline{\epsilon}} \quad \text{in } V \quad (2)$$

$$\text{順境界条件} \quad \underline{\underline{u}} = \underline{\underline{\hat{u}}} \quad \text{on } S_u \quad \text{変位境界} \quad (3)$$

$$\underline{\underline{t}} = \underline{\underline{g}} \underline{\underline{n}} = \underline{\underline{\hat{t}}} \quad \text{on } S_t \quad \text{荷重境界} \quad (3)$$

$$\text{観測境界条件} \quad \underline{\underline{u}} = \underline{\underline{U}} \quad \text{on } S_t \quad (4)$$

ここで $\underline{\underline{g}}$ は実質応力でコーシー応力 $\underline{\underline{\sigma}}$ と損傷テンソル $\underline{\underline{\Omega}}$ を用いて次の関係を満たすものとする。

$$\text{実質応力} \quad \underline{\underline{g}}^* = \underline{\underline{g}} (\underline{\underline{I}} - \underline{\underline{\Omega}})^{-1} \quad (5)$$

式(1)、式(3)、式(4)、式(5)を用いると、損傷場を導入した仮想仕事式は

$$\int_V \underline{\underline{g}}^* \cdot \delta \underline{\underline{\epsilon}} \, dv = \int_{S_t} \underline{\underline{\hat{t}}} \cdot \delta \underline{\underline{u}} \, dS + \int_V \underline{\underline{\psi}} \cdot \delta \underline{\underline{\epsilon}} \, dv \quad (6)$$

となる。ここで $\underline{\underline{\psi}} = \underline{\underline{g}} (\underline{\underline{I}} - \underline{\underline{\Omega}})^{-1} \underline{\underline{\Omega}}$ である。式(6)に構成則式(2)と有限要素近似を導入して、次式を得る。

$$KU = F + F^*$$

上式は変位 $\underline{\underline{U}}$ を損傷を含まない変位 $\underline{\underline{U}}_F$ と損傷を含む変位 $\underline{\underline{U}}_F^*$ に分け、次のように書ける。

$$KU_F = F \quad (7.1)$$

$$KU_F^* = F^* \quad (7.2)$$

ここで

$$\underline{\underline{K}} = \int_V \underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{D}} \underline{\underline{B}} \, dv \quad \underline{\underline{F}} = \int_{S_t} \underline{\underline{N}}^T \underline{\underline{\hat{t}}} \, dS \quad \underline{\underline{F}}^* = \int_V \underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{\psi}}(\underline{\underline{\sigma}}, \underline{\underline{\Omega}}) \, dv$$

ただし $\underline{\underline{N}}$ 、 $\underline{\underline{B}}$ はそれぞれ、形状関数および変位-ひずみマトリックスである。

次に損傷テンソルの同定手法の手順を述べる。

(1) 式(7.1)から $\underline{\underline{U}}_F$ を求め、さらにコーシー応力 $\underline{\underline{g}} (= \underline{\underline{D}} \underline{\underline{B}} \underline{\underline{U}}_F)$ を得る。

(2) コーシー応力 $\underline{\underline{\sigma}}$ を式(7.2)の $\underline{\underline{F}}$ に代入して次式を得る。

$$KU_F^* = \underline{\underline{G}} \underline{\underline{\Phi}} \quad (8)$$

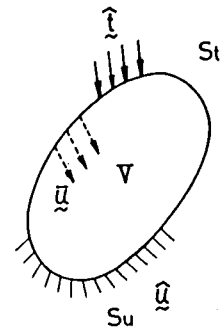
ここで分布不連続面は領域内に一様に分布しているものとして

$$\int_V \underline{\underline{B}}^T \underline{\underline{g}} \, dv = \underline{\underline{G}} \quad (\underline{\underline{I}} - \underline{\underline{\Omega}})^{-1} \underline{\underline{\Omega}} = \underline{\underline{\Phi}}$$

と置いた。式(8)では $\underline{\underline{\Phi}}$ が線形な形で入っており、 $\underline{\underline{\Phi}}$ を求めるパラメータとみなせば、逆定式化が可能となる。²⁾

(3) 式(8)の変位 $\underline{\underline{U}}_F^*$ を既知変位 $\underline{\underline{U}}_{F1}^*$ と未知変位 $\underline{\underline{U}}_{F2}^*$ に分け、それに伴い $\underline{\underline{K}}$ 、 $\underline{\underline{G}}$ も分解して

$$\begin{bmatrix} \underline{\underline{K}}_{11} & \underline{\underline{K}}_{12} \\ \underline{\underline{K}}_{21} & \underline{\underline{K}}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{\underline{U}}_{F1}^* \\ \underline{\underline{U}}_{F2}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\underline{G}}_1 \\ \underline{\underline{G}}_2 \end{bmatrix} \underline{\underline{\Phi}} \quad (9)$$



$\hat{t}$: load given
 $\hat{u}$: displacement given
 $\tilde{u}$: displacement observed

Fig.1 System for back analysis

(4) . 未知変位 U_{r1}^* を消去して

$$E \Phi = \Delta \quad (10)$$

ここで $G_1 - K_{12}K_{22}^{-1}G_2 = E$ ($K_{11} - K_{12}K_{22}^{-1}K_{21}$) $U_{r1}^* = \Delta$

(5) . 式(10)に最小二乗法を適用して

$$E^t E \Phi = E^t \Delta \quad (11)$$

(6) . 式(11)から Φ を求め、 $\Phi = (I - \Omega)^{-1} \Omega$ の関係を用いて損傷テンソル Ω を求める。

3. 解析結果

提案した手法の妥当性を検討するために、順解析によって求めた変位を観測変位とみなして逆解析を行った。ただし節理群は2つ存在し、それぞれの方向余弦、面密度を材料定数とともにTable 1に示す。順解析は二次元の平面ひずみ解析であり、逆解析では、節理群の方向余弦はあらかじめわかっているものとして節理群の面密度を求めた。解析で用いた有限要素分割図および逆解析の結果をFig. 2、Fig. 3に示す。

Table 1 Material properties, density of cracks and direction of unit vector for cracks

E (Mpa)	1 0 0
ν	0 . 2 5
Ω_1	0 . 3
n_1	$(\frac{1}{\sqrt{2}}, \frac{1}{\sqrt{2}}, 0)$
Ω_2	0 . 4
n_2	$(\frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}, 0)$

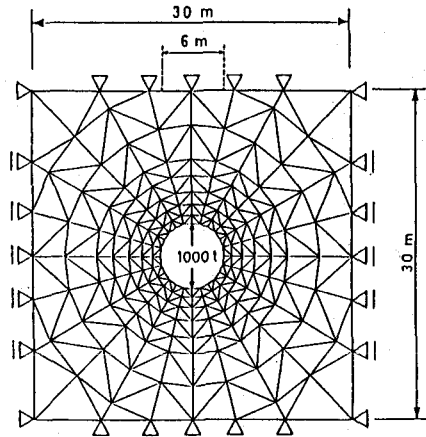


Fig.2 FE mesh used in numerical analysis

Measured Point							
Density of Crack	Ω_1	0.997	0.301	0.299	0.300	0.301	0.301
	Ω_2	-2.301	0.399	0.401	0.400	0.399	0.399

Fig.3 Comparisons of results of back analysis for various numbers of measurement points

4. あとがき

本研究では逆解析によって損傷テンソルを同定する手法を提案した。この手法を用いれば損傷テンソルを原位置試験の結果から算定することが可能となり、損傷力学モデルを通じて不連続性岩盤の力学挙動を精度よく予測しうるのである。

5. 参考文献

- (1) 京谷孝史、市川康明、川本眺万：岩盤の力学特性評価における損傷テンソルの適用について、土木学会論文集、No.358/III-3、pp.27-35、1985
- (2) Cividini, A., Julina, L. and Gioda, G.: Some Aspects of 'Characterization' Problem in Geomechanics, Int. J. Rock Mechanics and Mining Sciences, vol 18, pp.487-489, 1981