

(3) 試掘横坑内の岩盤に発達する割れ目の損傷テンソルを
ジャッキテストの結果から同定する手法に関する研究

応用地質株式会社 正会員 ○ 鶴原 敬久
名古屋大学工学部 正会員 京谷 孝史

An Application of the Method of Identifying Damage Tensor
due to the Result of Jack Test at Pilot Tunnel

Takahisa TSURUHARA, OYO corporation
Takashi KYOYA, Nagoya university

ABSTRACT

It is very important to obtain an appropriate discontinuity model of rock mass, when we predict the deformation of rock mass for the construction of tunnels, underground openings and dams. To make a model for the discontinuous rock mass as an equivalent continuum is useful at the numerical analysis. Damage mechanics proposed by Kyoya, is one of the techniques considering equivalent continuum. Kyoya proposed the method characterizing the damage tensor due to the field data of displacements.

In this paper, the method is applied for the actual results of jack test. By means of the actual results, it is found that damage mechanics is able to describe the deformation of the jack test.

1. はじめに

不連続面の卓越した岩盤に、トンネル、地下空洞あるいはダムといった構造物を施工する場合、不連続面をどのように計測し、評価するかが、地山の変形挙動を予測する時に重要となる。ダムのような大規模な構造物の場合、計測可能な不連続面を1つ1つモデル化するよりもむしろ、不連続面全てを対象領域全体に平均的に存在するものとして捉えた方が、全体の変形挙動を把握する上で効率的である。このような観点に立ち、不連続性岩盤を等価な連続体としてモデル化した場合の適用手法について述べる。

ここでは不連続性岩盤を等価な連続体として取り扱う手法として、京谷¹⁾の提案している損傷力学を用いた解析手法を考える。損傷力学では不連続性を表現するパラメータである損傷テンソルを実際の岩盤から決定する必要があるが、京谷は逆解析手法を用いて同定する方法を提案している。

本論文では、試掘横坑内で行われているジャッキテストの結果に逆解析手法を適用し損傷テンソルを同定する方法について検討を行った。

2. 損傷テンソルの同定手法

損傷力学では、不連続面の存在による力の伝達に関する有効断面積の減少を損傷テンソル Ω を用いて表現し、Chauchy応力 σ と実質応力 σ^* の関係を次式で与える。

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

(1)式の関係を用いると、損傷力学における離散化された荷重－変位関係は

$$KU = F + F^* \quad (2)$$

と表される¹⁾。ここで

$$K = \int_V B^T D B \, dv \quad (3), \quad F = \int_{st} N^T t \, ds \quad (4), \quad F^* = \int_V B^T \sigma^* \Omega \, dv \quad (5)$$

である。(2)式はさらに、損傷の無い場合の変位量 U_F 、損傷の存在によって発生する変位量 U_{F^*} を用いて

$$KU_F = F \quad (6), \quad KU_{F^*} = F^* \quad (7), \quad U = U_F + U_{F^*} \quad (8)$$

と書き直される。損傷力学における荷重－変位関係の算定では、まず、(6)式で損傷のない材料における変位およびChauchy応力を算定する。次にこのChauchy応力から(1)式を用いて実質応力を算定し、(5)式における F^* を求め、さらに(7)式から損傷が存在することによる変位を求める。(8)式および(7)式から求めた変位を重ね合わせ、(8)式から損傷が存在する材料の変位量を求める。

京谷は、さらに(2)式の関係から損傷テンソルを同定する以下のような方法を提案している。

- 1) (6)式を用いて損傷が存在しない場合の変位 U_F を求める。
- 2) 変位 U_F からChauchy応力を次式で計算する。

$$\sigma = D B U_F \quad (9)$$

- 3) (5)式の F^* は

$$F^* = \int_V B^T \sigma \, dv (I - \Omega)^{-1} \Omega \quad (10)$$

と書き直され、(10)式の右辺の未知量は損傷テンソルだけとなる。ここで、

$$G = \int_V B^T \sigma \, dv \quad (11)$$

$$\phi = (I - \Omega)^{-1} \Omega \quad (12)$$

とし、(7)式と(10)式に代入して変形すると

$$KU_{F^*} = G \phi \quad (13)$$

となる。(13)式中で K は岩石の物性値、 U_{F^*} は(6)式および計測変位から計算される変位置、 G はChauchy応力から計算される量である。したがって、未知量は、 ϕ だけとなるため、(13)式から ϕ を求めることができる。求められた ϕ の値から次式を用いて Ω を計算する。

$$\Omega = I - (\phi + I)^{-1} \quad (14)$$

ここで、(13)式から ϕ を求める方法として以下のような定式化を示している。

U_{F^*} を既知変位 U_{F1^*} と未知変位 U_{F2^*} に分解し、それに伴い、(13)式中の K 、 G も分解して(13)式を次式のように書き直す。

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{F1}^* \\ U_{F2}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \phi \quad (15)$$

(15)式で U_{F2}^* を消去して整理すると

$$(G_1 - K_{12}K_{22}^{-1}G_2)\phi = (K_{11} - K_{12}K_{22}^{-1}K_{21})U_{F1}^* \quad (16)$$

となる。これを解いて ϕ を求める。

この方法を用いて ϕ を計算する場合、変位量が未知の節点に関する剛性マトリックス K_{22} の逆マトリックスを求める必要がある。一般にFEM解析のメッシュ上において変位が計測されている節点の数は全節点数に比べて非常に少ないため K_{22} のマトリックスは、全節点数を n とするとほぼ $n \times n$ の大きさになる。この様なサイズの逆マトリックスの計算は非常に計算ステップが多くなるため実用的ではない。鶴原は(13)から ϕ を求める効率的な方法を示した。この方法を用いると、損傷力学を用いたFEMによる解析と同程度の計算ステップ数で損傷テンソルの同定が可能である。

3. ジャッキテストの結果

試験横坑内で行われたジャッキ試験の概要と結果を以下に示す。

原位置せん断試験装置の概要を図-1に示す。

図-1に示されるように原位置せん断試験では試験ブロックの鉛直方向とせん断方向（水平から15度）の2つの油圧ジャッキを有する。また、垂直方向、せん断方向および側方方向の3方向の変位の計測を行う。変形および応力が直線関係である領域における計測結果を表-1に示した。

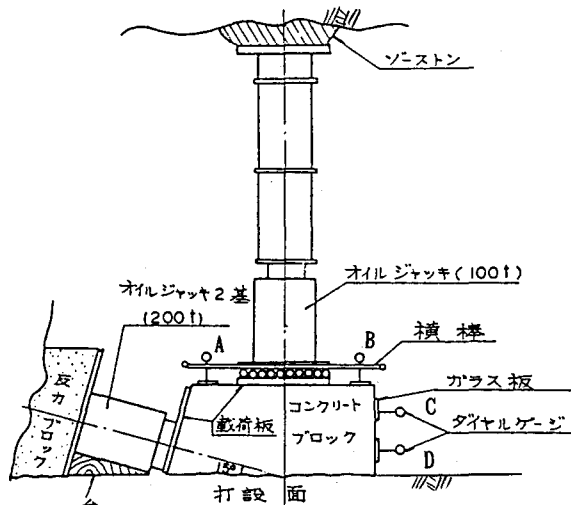


図-1(a) 原位置せん断試験装置の概要

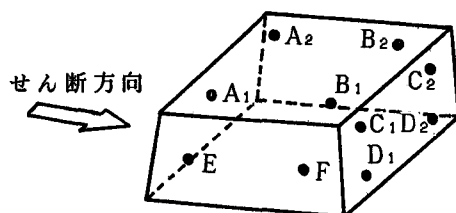


図-1(b) 変位測定位置図

表-1 ジャッキテストの結果

鉛直荷重(kgf/cm ²)		5.4
斜め荷重(kgf/cm ²)		20.0
鉛直変位	(A1+A2)/2.0 (cm)	0.1507
	(B1+B2)/2.0 (cm)	-0.0204
水平変位	(C1+C2)/2.0 (cm)	0.0505
	(D1+D2)/2.0 (cm)	0.0366

4. 損傷テンソルの同定

原位置せん断試験は3次元問題として考えるべきであるが、ここでは、2次元平面ひずみ問題として取り扱うこととする。したがって、計測変位は表-1中の4点における値を用いた。また、コンクリートおよび岩石部分の物性値を表-2に示した。

損傷テンソルの同定は、まず、先に示した逆解析手法を用いた。その結果、妥当な値の損傷テンソルを算定できなかった。これは、2次元の逆解析では最低3点以上の計測変位点が必要であるが、逆解析に用いた計測変位が4点と少ないことに主な原因があると思われる。4点の計測変位の内1つでも異常値、つまり、計測上の誤差の大きい計測変位や損傷テンソルでモデル化できない値が存在すれば逆解析が正常に行われない可能性があるため、逆解析を行って妥当な解を得るためには計測誤差が相殺されるように計測点数を多くする必要がある。

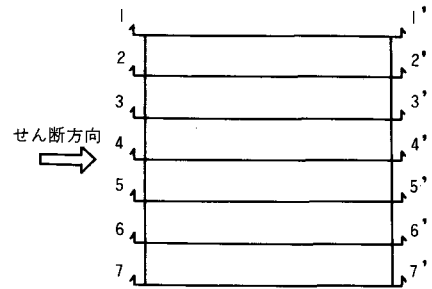
次に、原位置せん断試験後に行われた不連続面の観察結果から不連続面の卓越方向を求め、これを、損傷テンソルの卓越方向として仮定し、計測変位を最も良く表現するように損傷テンソルの絶対値を推定した。この様にして算定した損傷テンソルを用いて解析を行い、計測変位と解析変位の対比を行った。不連続面の観察結果を図-2に示した。不連続面の観察結果から、卓越する不連続面の法線方向は水平から約5度である。また、その方向の損傷テンソルの値を0.88と仮定した。その結果、損傷テンソルの値は以下のように推定された。

$$\Omega = \begin{pmatrix} 0.853 & 0.075 \\ 0.075 & 0.007 \end{pmatrix}$$

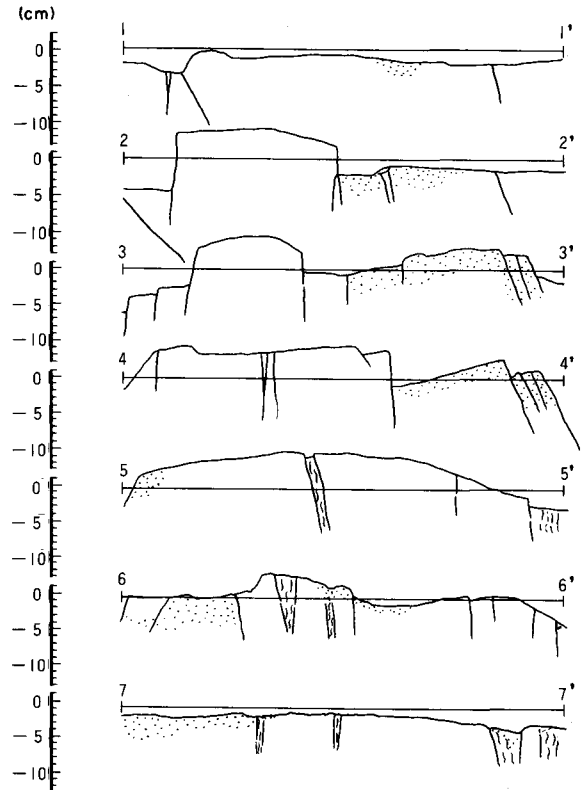
解析結果の変形図を図-3に示した。また、変位計測点の計測変位、解析変位を表-3に示した。その結果、計測変位と解析変位のX方向の値はよい一致を示しており、損傷力学を用いて原位置せん断試験における変形挙動が十分表現可能であると思われる。

表-2 物性値一覧表

	弾性係数 kgf/cm ²	ポアソン比
コンクリート	300,000	0.167
岩 石	100,000	0.200



(a) せん断ブロック平面図



(b) せん断ブロック断面図

図-2 不連続面の観察結果

5. あとがき

原位置せん断試験を行った地点において不連続面の観察を行ない、損傷テンソルを推定した。その結果得られた解析変位と計測変位はX方向の値についてはよい一致を示した。このことから、損傷テンソルを用いて原位置せん断試験における変形挙動は十分表現可能であると考えられる。

原位置せん断試験結果に逆解析手法を適用したところ妥当な解が得られなかった。これは、解析に用いた計測点数が少なすぎた事に起因するものと思われる。ここで用いた変位の計測点数は原位置せん断試験で一般的に用いられている計測点数である。原位置せん断試験結果を用いて損傷テンソルの同定を行なう場合には、計測点数を多くして行なう必要があろう。

今回用いた解析モデルは、2次元平面ひずみ問題として取り扱ったが、実用的には3次元モデル化が必要であろう。原位置せん断試験は、試験ブロックの寸法がかなり規格化されているため、3次元の解析モデルはほとんどの場合共通して使えるものと思われる。したがって、原位置せん断試験結果を用いた場合、3次元モデルにおける損傷テンソルの同定はかなり簡便なものになるであろう。

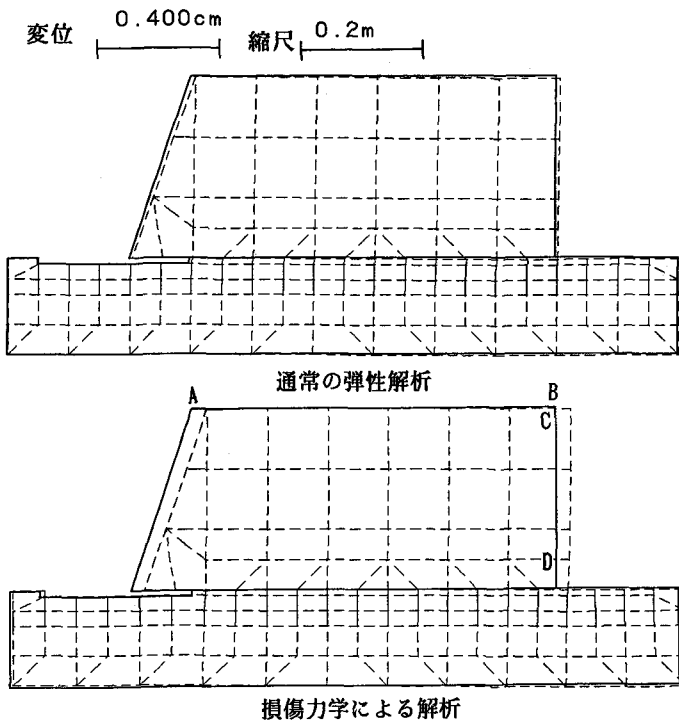


図-3 解析結果の変形図

表-3 計測変位と解析変位の比較 (単位cm)

		計測変位	通常弾性解析	損傷力学による解析
鉛直	A	0.1507	-0.0023	0.0030
	B	-0.0204	-0.0097	-0.0067
水平	C	0.0505	0.0137	0.0485
	D	0.0366	0.0094	0.0431

<参考文献>

- 1) 京谷孝史、市川康明、川本眺万：地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、pp27-35、1985
- 2) 鶴原敬久、京谷孝史：損傷力学を用いた不連続性岩盤の変形挙動の予測、第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要集、pp194-198、1988
- 3) 櫻井春輔、進士正人：マイクロコンピュータによる地下空洞掘削時の安定性の評価、土木学会論文集、No.358/Ⅲ-3、pp37-46、1985