

### Ⅲ-A329 屈折クラックを有する岩石の応力変位挙動に関する研究

名古屋工業大学 学 川平 照穂・長谷川 秀也  
正 長谷部 宣男  
中部電力 正 上田 稔・佐藤 正俊

#### 1 まえがき

硬質岩盤を構成している岩石の応力・変位曲線は一般に線形挙動を示す。しかし、平板載荷試験による岩盤の応力・変位曲線は、図1のように非線形である。本研究ではこの原因を、①岩盤内における初期クラックの存在、②その初期クラックから発生する屈折クラックの進展、③クラック接触面に働く法線方向応力と接線方向応力のあり方の3点によるものと考え、ここでは、図2に示すような屈折クラックを有するモデル岩盤の実験結果の応力・変位曲線をもとにおもに③及び平板載荷試験の荷重変位曲線への適用について考察する。

#### 2 法線方向応力と接線方向応力の導入

本研究は、図3に示す無限板中に存在する屈折クラックについて、クラックの接触面に働く法線方向応力と接線方向応力、及び一様応力  $p$ 、 $q$  を考える。図3に示すように、クラック長さ  $2a$  とし、法線方向応力  $fn$ 、接線方向応力  $ft$  とすると、 $fn$ 、 $ft$  について以下のように表わされる。[1, 2]

##### 1) 法線方向応力

法線方向応力  $fn$  を次式で与える。

$$fn = c_1 p^m \cos^2 \theta \quad (1)$$

ここで  $c_1$ 、 $m$  は岩盤内のクラック接触面の状態、岩種によって決まる値である。 $\cos^2 \theta$  は、クラックの傾きを考慮したものである。

##### 2) 接線方向応力

岩石の摩擦試験に関する実験結果から低い垂直圧 ( $\sigma < 200 \text{ Mpa}$ ) では

$$\tau = 0.85 \sigma \quad (2)$$

の直線で示されることが知られている。(バイアリーの法則) [3]

よって、摩擦係数を0.85として接線方向応力  $ft$  を次式のように表す。

$$ft = 0.85 fn \sin^2 \theta \quad (3)$$

$\sin^2 \theta$  はクラックの傾きを考慮したものである。

以上の応力  $fn$ 、 $ft$  を図3に示すように接触面に簡単のため集中力  $2afn$ 、 $2aft$  として与え解析を行う。

#### 3 屈折クラックを有するモデル岩盤に解析

図2のモデル岩盤供試体に圧縮荷重  $p$  を加えた時の実験結果及び解析結果を図4に示す。

##### 1) 載荷時における解析モデル[1,2]

$$fn = cp^m \cos^2 \theta \quad \text{及び} \quad ft = 0.85 fn \sin^2 \theta \quad (4)$$

##### 2) 除荷時における解析モデル

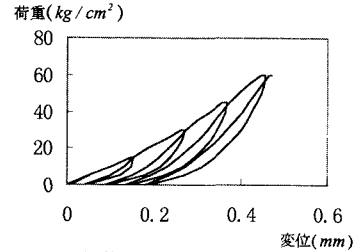


図1 平板載荷試験における荷重変位曲線

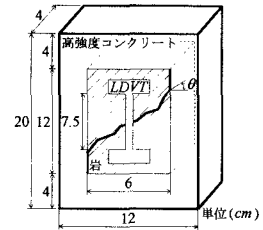


図2 屈折クラックを有するモデル岩盤供試体

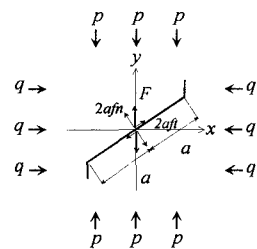


図3 一様荷重を受ける無限板のクラック

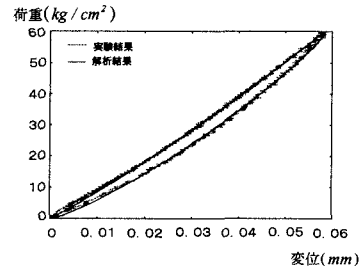


図4 モデル岩盤における実験結果と解析結果の比較

キーワード：原位置平板載荷試験、屈折クラック

連絡先：〒466-0061 名古屋市昭和区御器所町 tel 052-735-5482 fax 052-735-5482

除荷の際、荷重が減少するにつれてクラック接触面の法線方向応力も減少する。図4にあるように載荷と除荷は、それぞれ異なった曲線を描いている。これは、載荷と除荷のクラック接触面における法線方向応力の発生のメカニズムが異なったものであることを意味している。ここでは、変形に対する抵抗力の減少として考え、減少分を $rfn$ として $fn$ を次式のように与える

$$fn = (c_1 p^m - rfn) \cos^2 \theta \quad (5)$$

[式の係数の意味]

$$rfn = c_2 (p_{max} - p)^n (p + c_3)^{m-n} \quad (6)$$

①  $c_2$  … 除荷曲線全体の膨らみに関与

$fn$  の式は式(5)を用いて式(4)の第2式で表わされる。1)、2) の  $fn$ 、 $ft$  を用いて変位 $v$ は、図3の解析より載荷、除荷の場合

$$v = \frac{\kappa + 1}{2G} [2a \{ (fn + ft) \phi_1 + p \phi_2 \}] \quad (7)$$

②  $(p_{max} - p)$  … 最大荷重  $p_{max}$  からの荷重の減少量を表し、

$p_{max} = p$  である時 (除荷の始点) に  $rfn = 0$  を満たす項

③  $m, n$  … 乗数項  $m, n$  の割合は部分的な膨らみに関与

④  $c_3$  … 残留変形量に関係、 $c_3 = 0$  の時、(残留変形量) = 0

の形で表される。ここで  $G$  はせん断弾性係数、 $\phi_1$ 、 $\phi_2$  は解析の形状 (屈折クラック) によって決まる値であり、 $\kappa = (3 - \nu) / (1 + \nu)$  (平面応力状態、 $\nu$  : ポアソン比)、 $\kappa = 3 - 4\nu$  (平面歪状態) である。

### 3) 解析結果

1)、2) の解析モデルを考えて式(7)に含まれる  $c_1$ 、 $m$  は図4の破線の載荷曲線より、除荷時の  $c_2$ 、 $n$  は除荷曲線にフィットするように決められ得られた載荷除荷曲線の解析結果は、図4のように実験結果とほぼ一致する。ここで実験結果は残留変形零の場合なので  $c_3 = 0$  としている。載荷除荷曲線の応力変位挙動はクラック接触面の状態また法線方向応力の増加、減少に影響され、そのため、図4の実験結果にあるように載荷と除荷に違いを生じる。これにより、載荷の場合の法線方向応力には式(1)を、除荷の場合には式(5)を用いる。

## 4 平板載荷試験への応用

式(7)より載荷時、除荷時の応力変位の式が以下のように表される。

i) 載荷時

$$V = AP^m + BP \quad (8)$$

ii) 除荷時

$$V = AP^m + BP - C(P_{max} - P)^n (P + D)^{m-n} \quad (9)$$

応力・歪の関係式は、式(7)を代表寸法  $a$  で除した式で表され式(8)、(9)の  $V$  の代わりに歪  $\epsilon$ 、係数  $A$  等に対応して  $A'$  等と書き表される。 $D$  は式(6)の  $c_3$  に相当し残留変形量より決められる。

図5に原位置平板載荷試験と解析結果を示す。図5の破線の曲線は図1の平板載荷試験の載荷重  $P = 45 \text{ kg/cm}^2$  の場合の除荷、載荷の曲線を示す。

この曲線にフィットするように式(8)、(9)の係数  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $m$ 、 $n$  を決めて図5の実線の曲線を得る。両者はよく一致していることがわかる。つまり、平板載荷試験の載荷除荷曲線は式(8)、(9)で表される。

## 5 結論

載荷、除荷曲線は論理的に式(7)のように与えられ、この応力・変位曲線の非線形性は式(1)、(5)から生じ、式(3)のクーロン摩擦は摩擦係数  $\mu = 0.85$  として成り立つと考えられる。図2に示すように圧縮を受ける単一のクラックを有する材料を均質な材料としてみた場合その応力変位関係 (応力・歪関係) は式(8)、(9)で表される。この関係は、平板載荷試験から得られる岩盤の荷重変位関係の載荷除荷曲線を表すことができる。今後  $A$ 、 $B$ 、 $C$  等の材料定数及び多くの平板載荷試験の結果について考察したい。

### 参考文献

- [1] 長谷部・佐藤等 第52回土木学会年次学術講演会第Ⅲ部門、pp.554-555
- [2] 長谷川・長谷部等 第53回土木学会年次学術講演会第Ⅲ部門、pp.732-733
- [3] 日本材料学会「岩の力学 基礎から応用まで」丸善、1993

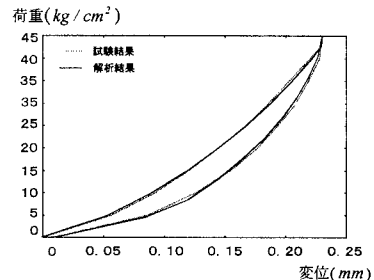


図5 平板載荷試験による荷重変位曲線と解析結果