

Ⅲ - A277

屈折クラックを有する岩石の応力変形特性

名古屋工業大学 正員 長谷部 宣男
中部電力 正員 上田 稔

清水建設 正員 佐藤 研史
中部電力 正員 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・歪曲線は、一般的に線形弾性挙動を示す。しかし、孔内載荷試験による岩盤の荷重変位曲線は図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摩擦力、の3点によるものと考え、これを調べる。

ここでは、この内③の関係が圧縮荷重下でどのような挙動を示すかを実験・解析の両面から調べる。

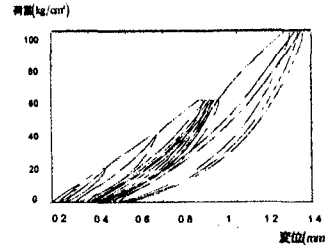


図1 平板載荷試験結果の荷重変位曲線

2 解析方法

図2に示す無限板中の屈折クラックを有する解析モデルを考え、有理写像関数と外力境界条件式を用いて垂直方向荷重Pと変位との解析を行う[1]。qは側圧で本報告ではq=0である。クラック面に働く垂直応力をfn、接線方向応力をftとする。

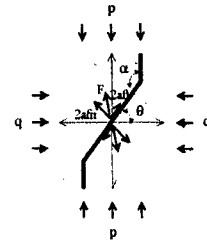


図2 一様荷重を受ける無限板のクラック

2-1 法線方向応力と摩擦力の導入

クラック面の境界条件として、クラック接触面に働く法線方向応力と摩擦力を外力として導入する。本解析においては、法線方向応力fnを以下に述べる理由により決める。

1) 法線方向応力

図3に示すように、不連続面を含んだ岩石の供試体に垂直方向から荷重Pを加えた時、その供試体の垂直方向変位と荷重との関係を表す荷重変位曲線が実験的に得られている[2]。

ここで図3の実験結果をふまえて、法線方向応力fnを次式のように与える。

$$f_n = c_1 P^m \cos^2 \theta \quad \dots (1)$$

ここで c_1, m は岩盤内のクラック接触面の状態によって決まる値とする。 $\cos^2 \theta$ は、クラック面の傾きを考慮したものである(図2参照)。

図4は、図3の「不連続面を含む供試体」をモデル化し、無限板中のクラックに垂直方向の圧縮荷重Pと、またクラック面の法線方向応力に上式で示したfnを与えて解析したものである(c_1, m のパラメーターを含む)。この時の垂直方向変位と、荷重Pとの関係は放物線形状の曲線になっており、これは図3に示した実験結果と一致する。

よって、法線方向応力fnは式(1)の形が妥当であると考え、本解析においては、このfnを用いるものとする。

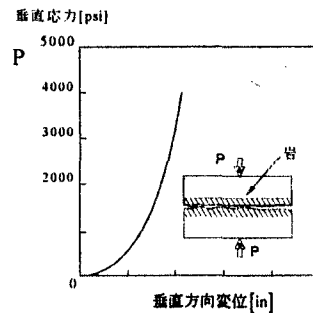


図3 不連続面の圧縮変形

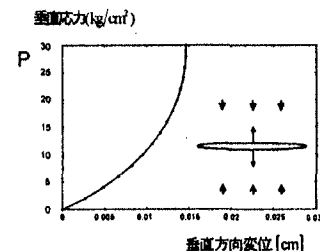


図4 モデル化した供試体の荷重変位曲線

キーワード： 硬岩、クラック、摩擦、荷重変位曲線、除荷

〒466 愛知県名古屋市中区昭和区御器所町 TEL 052-735-5482 FAX 052-735-5482

2) 摩擦係数

図5は種々の岩石の摩擦試験に関する実験結果をまとめたものである。これは、低い垂直圧（ $\sigma < 200\text{MPa}$ ）においては

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

高い垂直圧（ $2000\text{MPa} > \sigma > 200\text{MPa}$ ）においては

$$\tau = 0.5 + 0.6\sigma \quad \dots (3)$$

の2直線表示ができることを示している（バイアリーの法則）[2]。

以上の実験結果より、本解析の垂直圧は低いレベルであるのでクーロンの摩擦則に従うと考え、摩擦係数 μ を0.85とする。よって摩擦力 f_t は次式で表される。

$$f_t = 0.85f_n \sin^2 \theta \quad \dots (4)$$

ここで、 $\sin^2 \theta$ はクラック面の傾きを考慮したものである。

以上より求めた f_n, f_t が作用しているものとしての解析を行う。

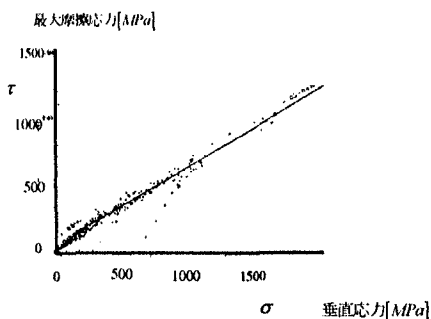


図5 さまざまな岩石の2000MPaまでの垂直応力下での最大摩擦応力

3 屈折クラックを有するモデル岩盤の解析

図6のモデル岩盤供試体に圧縮荷重を加えた時の実験を行った。供試体はボーリングコアより切り出した天然のクラック部分を供試体中央に配置し、その周囲を高強度モルタルで整形したものである。このとき荷重変位曲線を、図7の点線の曲線で示す。次に図7の実線で示された曲線は、以下の解析モデルによって求められた荷重変位曲線である。

1) 荷重載荷時における解析モデル

$$f_n = c_1 P^m \cos^2 \theta \quad \text{及び式(4)}$$

2) 荷重除荷時における解析モデル

図7に示す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、載荷と除荷のメカニズムがそれぞれ異なったものであることを意味しており、以下のモデルを与える。

$$f_n = (c_1 P^m - rfn) \cos^2 \theta \quad \dots (5)$$

及び式(4) ここに $rfn = c_2 (P_{\max} - P)^n (P + c_3)^{m-n}$ 、 $P_{\max}$ は荷重変位ループの最大荷重を表している。

上式中の係数の意味は次のようである。

- ① c_2 ・・・除荷曲線全体のふくらみに関与している。
- ② $(P_{\max} - P)^n$ ・・・最大荷重 $P_{\max}$ からの荷重の減少量を表し、 $P = P_{\max}$ である時（除荷の始点）に $rfn = 0$ を満たす項である。
- ③ c_3 ・・・残留変形量を表し、 $c_3 = 0$ の時、残留変形量がないことを意味する。
- ④ m, n ・・・乗数項 m, n の割合は部分的な膨らみを表している。

まとめ

これらのモデルを考えて、得られた荷重の載荷除荷曲線の解析結果は、図7の実験に示すように実験結果とよく一致が見られる。これより、最初の仮定で示したように、荷重変位曲線の載荷・除荷部（ループの部分）の非線形性はクラック接触面の状態によって決定され、クラック面の垂直応力は式(1)、接線方向応力は式(4)のクーロンの摩擦則が成立する。また除荷の場合、垂直力は残留応力を考慮して、式(5)で与えられる（ c_2, c_3, n のパラメーターを含む）。

参考文献

- [1] Norio hasebe and Sigeru Inohara : Engineering Fracture Mechanics Vol.14, No.13, pp.607- 16, 1981
- [2] 日本材料学会 「岩の力学 基礎から応用まで」 丸善株式会社 1993

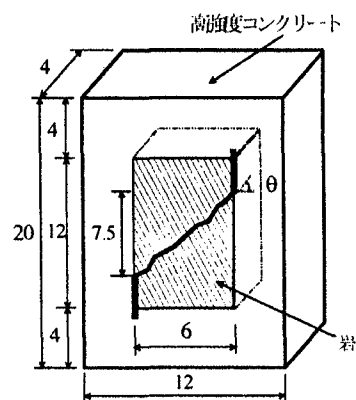


図6 屈折クラックを有するモデル岩盤供試体

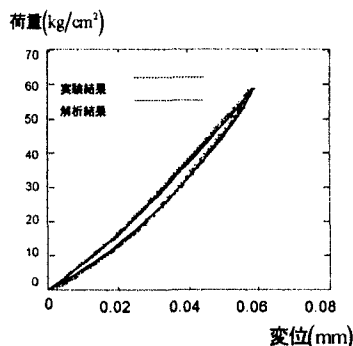


図7 モデル岩盤における実験結果と解析結果の比較（ $\theta = 5^\circ$ ）