

三軸振動試験による単一き裂の動的特性について DYNAMIC PROPERTIES OF A SINGLE FRACTURE BY MEANS OF TRIAXIAL VIBRATION TESTS

鈴木 健一郎 ・ 並木 和人 ・ 桑原 徹
Kenichirou SUZUKI, Kazuto NAMIKI, Toru KUWAHARA

To study dynamic properties of a single joint, the granitic rock specimens with an inclined artificial joint were subjected to triaxial vibration tests. Assuming that the normal stiffness of joint is proportional to the shear stiffness, the proportional constant, α , is set to 1.0, 0.2, 0.1, the stiffness and dumping ratio of normal and shear directions to a joint were calculated from measured data. Both normal and shear stiffness were increased with the increase of normal stress on the joint and with that of axial displacement. And dumping ratio of normal direction of the joint is equal to that of the shear direction. They were ranged to 5 to 8% and a little increase with normal stress and axial displacement.

1. はじめに

岩盤の構造物の動的特性について検討する場合に、従来岩盤は地震基盤と考えられており線形弾性として処理されてきた。さらに岩盤内地下空洞では、岩盤と空洞が一体として挙動すること、堅硬な岩盤中では、空洞周辺に大きな損傷を与える規模の地震動は発生する可能性が極低いことなどが指摘されてきた。しかし、地震に対する空洞安定は考えられていない訳ではなく、サイトが限られ堅硬な十分広い領域に空洞が施工できない場合や掘削に伴う空洞周辺岩盤の損傷が生ずる点などを考慮して、修正震度法により空洞の安定が考えられる場合もある。これは岩盤内空洞にとって実際の動的挙動に対してどの程度安全側を考慮しているか明確ではない。従って、コスト効果に関しては、動的挙動を明確にして現状設計法がどの程度の位置付けにあるのか検討する意味は残されている。筆者らは、岩石に対して動的試験を実施し、土質材料と同様な非線形特性を示すことを調べてきた¹⁾。この研究では、不連続面の動的特性を調べるために実施した振動三軸試験の結果とそれを基にしたパラメータスタディについて報告する。き裂の変形特性の特徴として、低応力レベルで下に凸の非線形性が上げられる。ここで実施したのは、低応力レベルでの繰返し試験であり、き裂のせん断変形が十分小さな領域を考える。

2. 試料および実験方法

2.1 単一き裂の特性

* 正会員 (株)大林組 技術研究所 土木第一研究室

用いた試料は領家花崗岩で、60cm角ブロックで採取した岩塊を、くさびにより割ってできた面に対して任意の角度でコアリングすることで、単一き裂を含んだ直径50mm、高さ120mmの円柱供試体を作成した。円柱供試体に含まれるき裂の方向は、法線と円柱の軸の成す角度で15,30,45,60度の4種類である。人工的に作成した引張き裂の凹凸特性を調べるために1mm間隔で測定したせん断方向の凹凸特性をパワースペクトルの傾斜として表わすと表-1のようである。凹凸のパワースペクトルの傾きは-1.8~-2.0程度であり、その場合の凹凸の状態は図-1に示すようなものである。図-2にはパワースペクトルの一例を示した。

2.2 振動三軸試験

試験は図-3のように実施した。拘束圧はすべて0.5MPa一定とし、軸方向応力を0.5、1、2、4、8MPaまでの載荷時および除荷時に±0.5MPaの振幅で10波の繰返し載荷を0.1Hzで実施した。この時、き裂に作用する垂直応力 σ_n およびせん断応力 σ_s はそれぞれ次式のようにある。

$$\sigma_n = \frac{P}{A} \cos \theta \cos \theta + \sigma_3 \sin \theta \quad \cdots (1)$$

$$\sigma_s = \frac{P}{A} \cos \theta \sin \theta - \sigma_3 \cos \theta \quad \cdots (2)$$

ここで、Pは軸方向荷重、Aは供試体断面積、 θ はき裂の法線と円柱軸の成す角度である。また、軸方向のギャップセンサーによる測定から得られる変位 δ は、き裂の垂直方向変位 δ_n とせん断方向変位 δ_s により次のようである。

$$\delta_n = \delta_n \cos \theta + \delta_s \sin \theta \quad \cdots (3)$$

(3) 式のための計測からは垂直方向変位 δ_n とせん断方向変位 δ_s を分離することは不可能である。そのため、垂直剛性とせん断剛性の間に $K_n = \alpha K_s$ の関係が成立することを仮定して、 α を変化させた場合の剛性として

$$K_n = (\sigma_n \cos \theta + \alpha \sigma_s \sin \theta) / \delta_n \quad \cdots (4)$$

$$K_s = \left(\frac{\sigma_n \cos \theta}{\alpha} + \sigma_s \sin \theta \right) / \delta_s \quad \cdots (5)$$

求めた。ただし、 δ に関しては最大と最小の差、垂直応力およびせん断応力に関してはその場合の応力差として直線近似した。さらに、繰返しの履歴曲線から損失正接の1/2として減衰定数を図-4に示すような土質材料のそれと同様のものとして算出した。此のときは、垂直およびせん断応力の微小増分と軸方向変位の微小増分に対して、垂直変位およびせん断変位を次式により計算し、垂直応力～垂直変位、せん断応力～せん断変位履歴曲線のそれぞれの面積から計算した。

$$\delta_n = \frac{\sigma_n}{K_n} = \frac{\delta \sigma_n}{\sigma_n \cos \theta + \sigma_s \sin \theta / \alpha} \quad \cdots (6)$$

表-1 き裂の諸元

角度	P波 (m/s)	S波 (m/s)	傾き試験前			傾き試験後		
			表	裏	表-裏	表	裏	表-裏
15	2420	1703	-1.79033	-1.89717	-1.88486	-1.66097	-1.61924	-1.65273
30	2480	1541	-1.87344	-1.85269	-2.0667	-1.88706	-2.04393	-2.22433
45	2520	1756	-1.94049	-1.77189	-1.8386	-1.83107	-1.84457	-1.86809
60	2888	1877	-1.96763	-2.14081	-2.00903	-2.04681	-1.79331	-1.7899

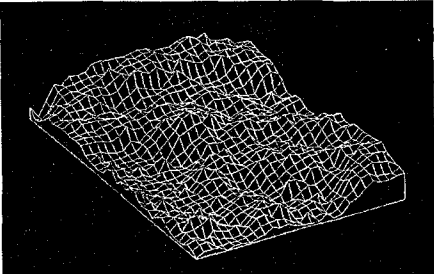


図-1 き裂の凹凸の鳥瞰図

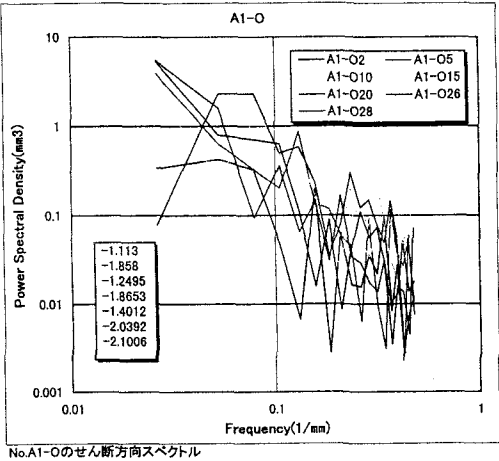


図-2 き裂の凹凸のパワースペクトル

$$\delta_{\epsilon} = \frac{\sigma_n}{K_n} = \frac{\delta\sigma_n}{\alpha\sigma_n \cos\theta + \sigma_t \sin\theta} \quad \dots (7)$$

3. 試験結果およびパラメータスタディ

3.1 応力～変位関係

図-5にそれぞれの傾斜を持った場合のき裂の、垂直応力～軸変位関係を示す。(a) (b) (c) (d) はそれぞれ15、30、45、60度のものである。各図において、軸方向変位はギャップセンサーによる計測値であり、垂直応力は(1)式により計算しものである。実測値から述べられることは、応力レベルの低い場合に下に凸の顕著な非線形性を示し、応力レベルが大きくなるに従ってループの傾きが増加し、面積も減少する点である。

以下、上述の仮定に従って、垂直、せん断剛性および垂直、せん断減衰定数に関するパラメータスタディを実施した点について述べる。

3.2 垂直剛性およびせん断剛性

図-6に垂直剛性とせん断剛性を垂直応力に対してプロットしたものを示す。図-6 (a), (c), (e), (g) がそれぞれき裂角度15、30、45、60度の場合の垂直剛性と垂直応力の関係、(b), (d), (f), (h) が同様にせん断剛性と垂直応力との関係を示し

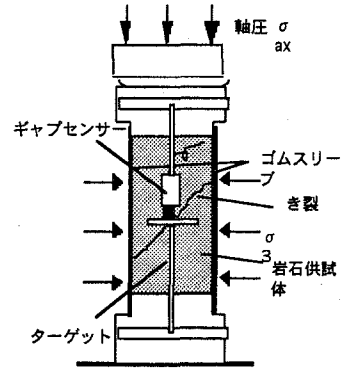


図-3 試験装置概略図

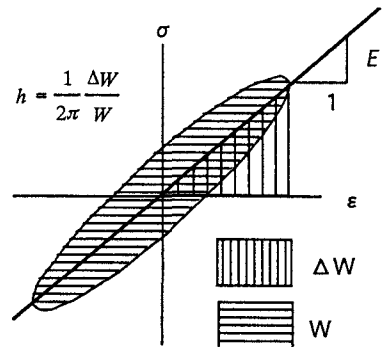


図-4 減衰定数の定義

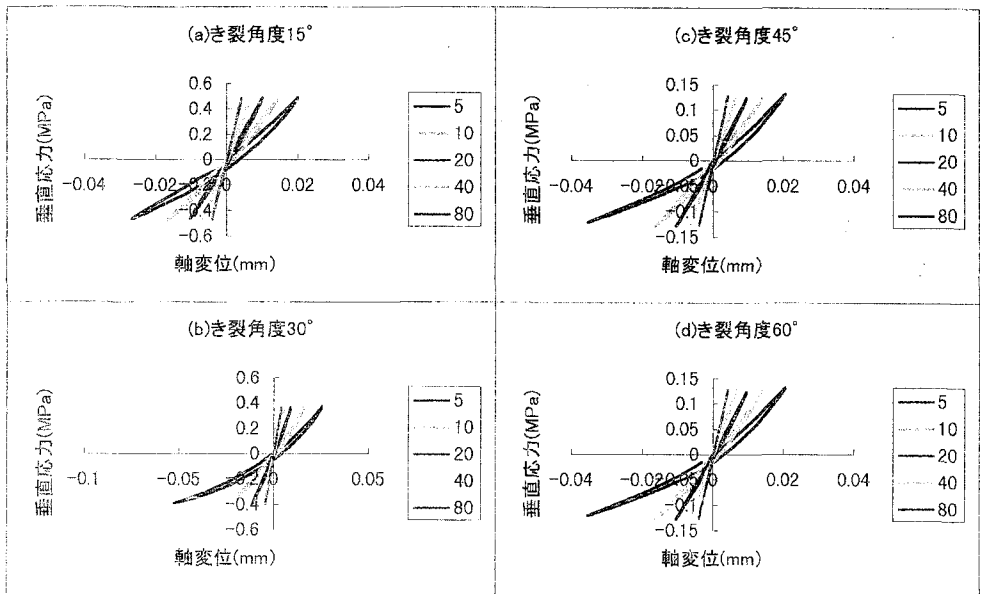


図-5 垂直応力～軸変位関係 (a) き裂角度15度 (b) 30度 (c) 45度 (d) 60度

たものである。図中の3つの関係は、 $\alpha=1, 0.2, 0.1$ の場合である。垂直剛性とせん断剛性のどちらも10MPa程度までの垂直応力に対しておよそ線形に増加していることが傾向が伺える。次に繰返し載荷時の中立点の軸方向変位に対してする垂直およびせん断剛性の依存性を調べる。図-7に垂直剛性とせん断剛性を軸方向変位に対してプロットしたものを示す。図-7 (a), (c), (e), (g) が垂直剛性、図-7 (b), (d), (f), (h) がせん断剛性の軸方向変位との関係を示したものである。垂直応力との関係同様、両剛性とも変位の増加に伴い増加する傾向にある。

表-1に示したようにき裂の凹凸特性は4者ではほぼ同様とみなせるので、これら剛性は角度には依存しないはずである。角度の違いはせん断面積の違いと置き換えることができるので、せん断面の面積の平方根を各剛性に乗じて、せん断長さに依存しない垂直バネとせん断バネのバネ定数で表わす。結果は図-8に示すように30度の場合を除いてほぼ同一の垂直応力依存性を示す。図に示したのは $\alpha=1.0$ の場合であり、他の場合は一致しない。このことは、今回用いたき裂に関しては α が1に近い、すなわち垂直剛性とせん断剛性はほぼ等しいと考えられる。

3.3 減衰定数について

き裂の垂直方向とせん断方向それぞれに対して減衰定数を垂直応力とせん断応力に対して、式(1)および式(2)から算出した垂直変位とせん断変位からそれぞれの応力～変位関係の履歴曲線に囲まれる面積から算出した。結果として、垂直剛性とせん断剛性が比例関係にあるという仮定では減衰定数は、垂直方向もせん断方向も全く同値の

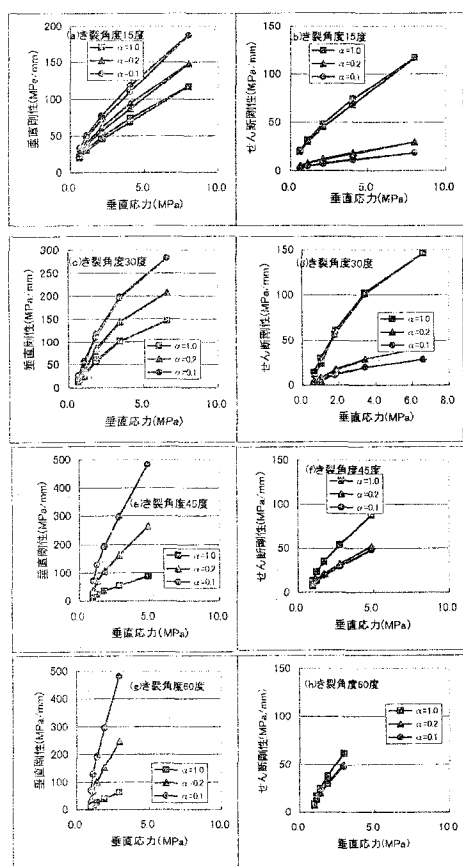


図-6 垂直剛性およびせん断剛性と垂直応力の関係

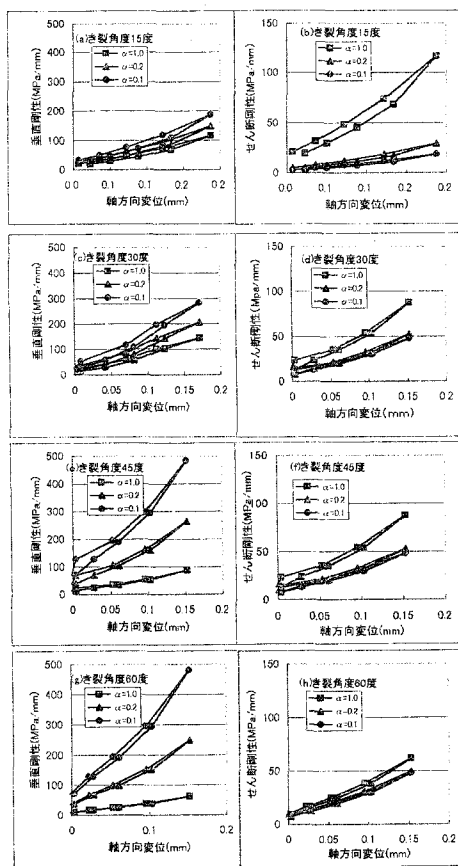


図-7 垂直剛性およびせん断剛性と軸変位の関係

減衰定数になった。

図-9には減衰定数の垂直応力との関係を、図-10には軸方向変位との関係を示した。減衰定数は垂直応力に対しても軸方向変位に対しても増加傾向にある。減衰定数の値の範囲は、5%から8%の間であり、これは新鮮な花崗岩の値より大きめである。き裂面での大きな変位が生じない状態では、垂直剛性とせん断剛性が比例関係にある場合には、同一の減衰定数となり、8%程度に収束する傾向がある。

4. おわりに

単一き裂を含んだ花崗岩の円柱供試体を用いて、三軸繰返し試験を実施した。計測値からはき裂の垂直、せん断剛性を直接決定することが困難であったため、剛性の比を

パラメータとして実験結果を整理した。

その結果、以下のような点が指摘された。

(1) 新鮮花崗岩中のパースペクトルの傾きで-1.8程度の粗さを持つ人工引張き裂の垂直剛性とせん断剛性は、垂直応力の増加に対して増加する傾向にある。

(2) き裂の角度の影響は、せん断面積の違いと考えられる。ほぼ同じラフネスを持つ今回用いたき裂ではせん断剛性と垂直剛性がほぼ等しい場合には、角度に影響しないバネ定数となる。

(3) 減衰定数は、せん断剛性と垂直剛性が比例関係にある場合、比例定数によらず同一の値となり、垂直応力の増加に伴い増加する。その範囲はき裂面での大きな変位が生じない状態では、8%程度に収束する傾向がある。

以上の今回得られた傾向は、き裂の垂直変位とせん断変位を計測し確認していく必要がある。

参考文献

1) 鈴木、並木、桑原、平間 岩盤の動的変形特性に関する実験的研究、第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 121-126

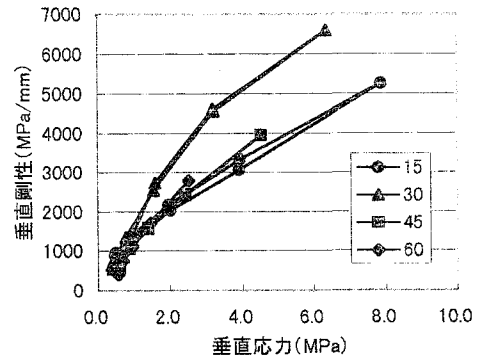


図-8 垂直バネ定数～垂直応力関係

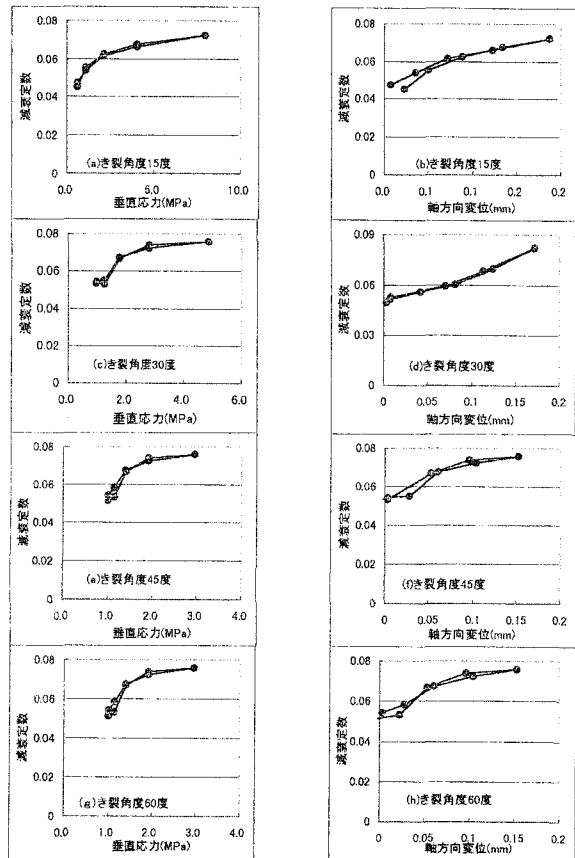


図-9 減衰定数と垂直応力との関係 図-10 減衰定数と軸変位との関係
(a) き裂角度15度 (b) 30度 (c) (a) き裂角度15度 (b) 30度 (c)
45度 (d) 60度 45度 (d) 60度