硬質岩盤のせん断強度評価に関する研究

名古屋工業大学　　正会員　長谷部　宣男
名古屋工業大学　　村中　功　福嶋　大樹
学生員　　斎藤貴彦

1．はじめに

現在，硬質岩盤のせん断強度を知る方法の１つに，原位置一面せん断試験が行われるが，試験の方法上低い垂直応力におけるせん断破壊を発生させることが難しく，設計において重要な純せん断強度の信頼ある値を得ることが難しい．そこで，本研究では，従来の破壊基準を検討し，実用レベルでの新しい破壊基準について提案する．

2．原位置一面せん断試験

この試験は坑内に，試験体を作成し，垂直一定荷重N_0と傾斜（段階）荷重Ｔを載荷させ，試験体底面周辺の岩盤内でせん断破壊を起こさせる．理想的なせん断面が形成されたとすれば，せん断面に働く応力は傾斜角度θ試験体面積Ａとして以下のようにして表すことが出来る．

$$\tau = \frac{T\cos\theta}{A},\quad \sigma = \frac{N_0 + T\sin\theta}{A} = N + \tau\tan\theta \qquad (1)\,(2)$$

同じ岩層を示す 4 ヶ所の地点で試験は行われ，得られたせん断強度を，以下の Mohr-Coulomb 式で直線近似し，純せん断強度 τ_0，内部摩擦角(せん断抵抗角)・・をその岩盤の強度特性値として設計に用いる．

$$\tau = \tau_0 + \sigma\tan\phi \qquad (3) \qquad \text{(破壊基準 1)}$$

しかし，実際には試験結果のばらつきなど破壊点のσ-τ関係は直線にならない場合が多く，岩盤の種類によっては, 破壊基準を Mohr-Coulomb の式で表しにくい場合もあり，この式が岩盤のせん断強度として成り立つ根拠もはっきりしない.

3．変位挙動の解析

市川・伊藤・長谷部等[1,2]は川平・長谷部等[3]の導いた硬質岩盤の圧縮変形に対する理論と同様にして原位置一面せん断試験から得られるせん断応力τ、せん断方向変位ｘの関係式を導いた.

$$x = A\tau^n\left(N + \tau\tan\theta\right)^m + B\tau^{l+1} + C\tau \qquad (4)$$

異なる鉛直応力の N_1, N_2, N_3, N_4のせん断応力とせん断方向変位の各々のデータの値を用いて，式(4)の係数 A, B, C, n, lを最小二乗法でよく合うように決定することが出来る(解析方法 1)．式（４）の係数 mは，文献（３）の原位置平板載荷試験に対する理論式の mで，最も多くの岩盤が採る m の値として m = 1.02 を用いて解析を行った．しかしこれらの係数 A,B 等は当然同じ値ではない。したがって 4 つの試験値を満足するような同一の式(4)の係数を決めることは出来ない．そこで次のように４個の内２個の曲線に合うように式（４）の係数を決める。解析方法１で求めた４ケースから２ケースの式（４）の係数を選択する．その鉛直応力を N_1, N_2、せん断方向変位を x_1, x_2として変位差 x_1 - x_2を考えると，これは式(4)より以下のように A の項のみで表され，最小二乗法により係数 A, nを決定する.

$$x_1 - x_2 = A\tau^n\left\{\left(N_1 + \tau\tan\theta\right)^m - \left(N_2 + \tau\tan\theta\right)^m\right\} \qquad (5)$$

次に式(4)を以下のように変形し，x_1、N_1またはx_2、N_2の組のデータを用いて、係数 B, C, lを最小二乗法により決定する(解析方法 2).

$$x - A\tau^n\left(N + \tau\tan\theta\right)^m = B\tau^{l+1} + C\tau \qquad (6)$$

最小値N_1＝２．００、最大値N_2＝１６．００をN_1, N_2として求めた式（４）の係数を用いて得られた１例を図２に示す。この係数を用いてN=１２．００、６．００の場合の曲線も示す。任意のNに対する曲線も求めることが出来る。図２の細破線は、その結果を示す。式(4)に$\sigma = N + \tau\tan\theta = 0$ として得られる曲線を純せん断曲線と言い，次式はせん断面にせん断応力のみが働いている場合のせん断変位を表す.

$$x = B\tau^{l+1} + C\tau \qquad (7)$$

4．破壊基準２，３

硬質岩盤は不連続面が内在する不均質性物体であり，均質性物体であると考えられる Mohr-Coulomb の破壊基準(破壊基準 1)を用いることには明らかに無理がある．そこで破壊基準をσ－τ面での応力状態で考えるのではなく，試験結果より破壊基準として破壊変位を考え，図２に示すようにせん断応力とせん断破壊変位は直線的な関係で表されると考えた．破壊変位 x_pとせん断破壊応力τ_pの関係を次式でおく.

$$x_p = \alpha_1 + \alpha_2\tau_p \qquad (8) \qquad \text{(破壊基準 2)}$$

ここで係数α_1、α_2は試験結果より得た破壊点の値より誤差の最小二乗法により求められる.

破壊基準 2 は，式(8)と式(4)より変位 xを消去すると，τ-σの関係として次式で表される.

$$A{\sigma_p}^m{\tau_p}^n + B{\tau_p}^{l+1} + \left(C - \alpha_1\right)\tau_p - \alpha_2 = 0 \qquad (9)$$

式（９）でτ_pを与えσ_pを求めて、そのτ_p、σ_pを図示すると図３の破壊基準２の曲線を得る。このτ-σ面上の破壊曲線は下向き凸の曲線である．図３の Mohr-Coulomb の破壊基準１の直線を図２の面上に表すと破壊基準１の曲線を得る。これを見ても Mohr-Coulomb の破壊基準は不適当と思われる。

今まで得られている又残っている原位置一面せん断試験では，変位の測定を数値化しない場合も多く，また過

キーワード　岩盤　せん断強度　モール・クーロン 破壊基準　原位置一面せん断試験
連絡先　466-8555 名古屋市昭和区御器所町　名古屋工業大学社会工学専攻　Tel. 052-735-5482

去に行われた膨大な試験結果の蓄積においては，変位計測結果の多くは公表されていない．よって，せん断破壊時の変位を必要とする破壊基準 2 では利用価値が低くなってしまう．そこで破壊基準 2 の近似式として次式を考える。

$$\tau_p = \tau_0 + q\sigma_p^{\ k} \qquad (10) \qquad \text{(破壊基準 3)}$$

破壊基準 2 で与えられる τ-σ 曲線にフィッティングするように q，k を最小二乗法によって決める．k と q の値を図 4 に示す．k と q の間に一関係式が見られる。この関係を，累乗近似と指数近似曲線を用いて近似を行ったが，累乗近似曲線の方が精度よく表される．k と q の関係は次式で表される．

$$q(k) = 2.222k^{-5.719} \qquad (11) \qquad \text{(累乗近似)}$$

またこの関係が同じ地点の試験結果を用いても成り立つことを確認するためF地点の 4 ヶ所のデータの5組、M地点で3組の試験値を用いて得られたk、qの値を図5に示す。2 つのデータの選び方によって k，q の値は異なったものになるが，データの選び方に関係なく k，q の値は累乗近似曲線式 (11) 付近に現れ，k-q の関係は固有のものであると思われる．

5．破壊基準 4

式(11)を用いて破壊基準 3 は次式のようになる．

$$\tau_p = \tau_0 + q(k)\sigma_p^{\ k} \qquad (12) \qquad \text{(破壊基準 4)}$$

ここで τ_0，k は τ-σ 面のせん断破壊点（図３の４個のデータ）の値から最小二乗法によって決められる。これより実用的な破壊基準式が定義できる．図３の４個の破壊点の τ-σ の値を用いて式（１０）の τ_0，k、q を最小二乗法で求めると、多くは k＝１の直線になり有効な値が得られない。

従来の破壊基準 1 と破壊基準 4 の式（１２）で純せん断強度 τ_0 の比較を行うと，破壊基準 1 による純せん断強度 τ_0 は，小さな値として算定されてしまう。またマイナスの値になってしまう場合があったが，この破壊基準 4 を用いればそのようなことは生じない。これらのことり破壊基準 4 から求められた純せん断強度 τ_0 の方が，より硬質岩盤の τ_0 として適切であると思われる．

本研究では，k-q の関係は 54 個のデータを用いて累乗近似した。　k-q 関係式(11)の係数をより正確なものにするためにデータ数を増やして検討する必要性がある。

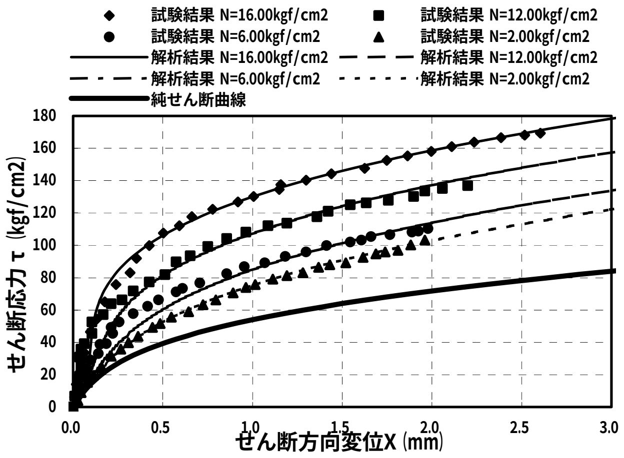

図１　せん断変位挙動の試験結果と解析結果 2

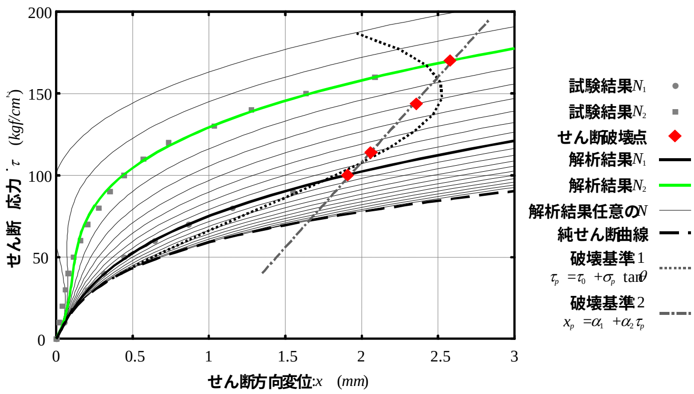

図２　せん断変位曲線と破壊基準１，２

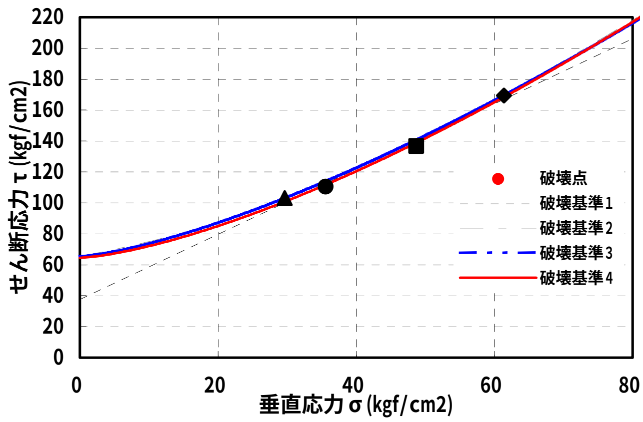

図３　破壊基準１，２，３，４の比較

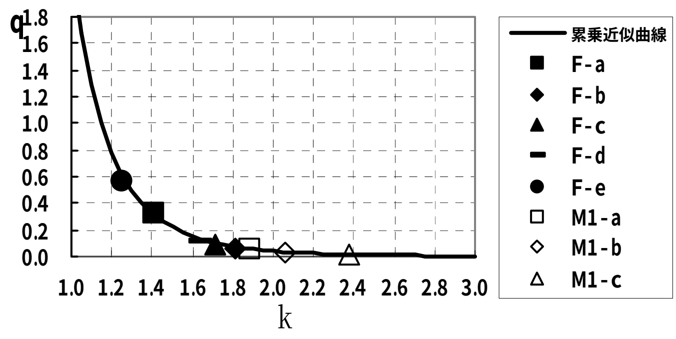

図５　累乗近似曲線と２地点の k，q の値

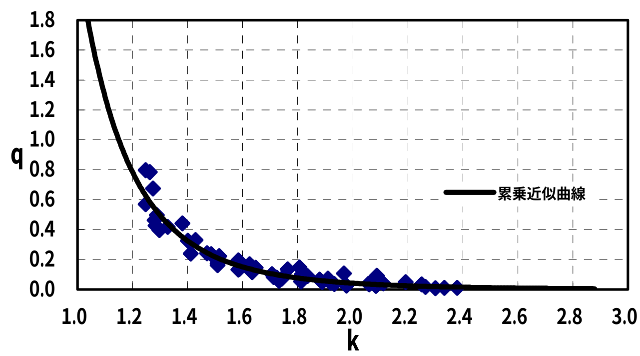

図４　k、q の関係と近似曲線