

岩盤の弱層せん断強度シミュレーションの開発

倉橋稔幸* 吉田直人** 佐々木靖人*** 矢島良紀**** 寶谷 周*****

1. はじめに

岩盤には、断層や節理のように力学的な不連続面が存在することがあり、図-1の①から③に示すように、壁面の凹凸や幅の形状、充填物の有無、それらの連続性等、さまざまな性状を示すことがある(図-1)。不連続面の一部は周囲の岩盤と比較し、強度が著しく低いことから総称として弱層と呼ばれる¹⁾。通常、基礎岩盤の強度を評価するにあたり、「岩石の硬さ」、「割れ目の間隔」、「割れ目の状態」の三要素を組み合わせることにより岩盤を相対的に区分し、各岩級の代表箇所でも位置せん断試験を実施することで、設計強度を設定することが多い。しかし、原位置せん断試験は大きな試験となるため時間やコストがかかる上、弱層に関しては試料採取や整形が困難な場合も多く、試験箇所の代表性が問題になることもあった。弱層のせん断強度は、せん断される部分に着目すると、「不連続部の岩盤強度」、「壁面のかみ合い(接触)による強度」、「充填物の強度」のうち、いずれかの組合せで表現できる¹⁾。例えば、図-1の②のうち、充填物を含まない連続する弱層部分では、図-2に示すように壁面のかみ合いによるせん断抵抗と摩擦抵抗が弱層のせん断強度を決定していると考えられる。これら抵抗力の生じる箇所を特定できれば、弱層のせん断強度を予測することが可能である。

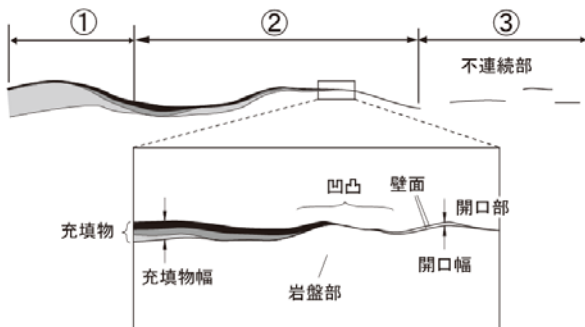


図-1 弱層の模式図

そこで本報告では、主に図-1の②のように連続して開口している弱層を対象とし、弱層壁面上下の凹凸面の形状からせん断強度をシミュレーションした結果について述べる。

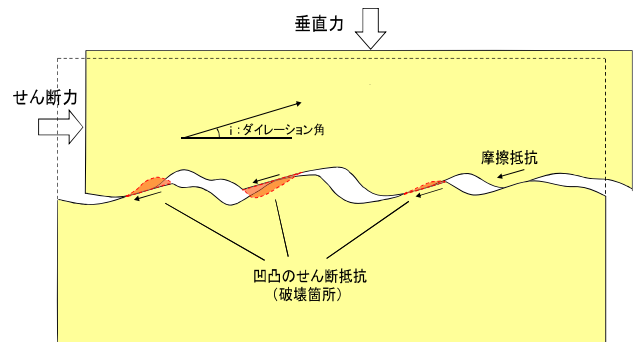


図-2 弱層壁面のせん断モデル

2. 弱層のせん断強度予測式の構築

弱層壁面のかみ合わせのせん断強度を評価する研究として、Ladanyi and Archambault(1970)²⁾、Barton(1973)³⁾、Saeb(1990)⁴⁾等が知られている。このうちBarton(1973)は不連続面の表面粗さと壁面の一軸圧縮強度等から予測できる強度式を考案した。ただし、この強度式では断面の凹凸形状を目視で観察しラフネス断面図と比較し決定するため、不連続面の粗さ係数の決定に際して観察者の主観的な要素が強く、形状が観察者によって変わる問題が指摘されていた。また、Ladanyi and Archambault(1970)は規則的な歯形状の不連続面を模式化し、不連続面壁面の凸部分が接触し乗り上げるによりせん断破壊すると仮定し、ダイレイタンスー特性を考慮したせん断強度の予測式を構築した。さらにSaeb(1990)はLadanyi and Archambault(1970)の強度予測式のせん断強度の項を単純化することにより、不連続面のかみ合わせのせん断破壊と摩擦破壊の面積比から強度を推定できることを示した。しかしながら、これらの強度式は完全にかみ合った不連続面を想定したものであり、せん断面全面に均等に力が働くことを仮定としている。しかし、実際の岩盤は弱層が完全にかみ合っていないことも多い。かみ合わせの

悪い場合には、せん断面の接触面積の減少に伴い垂直応力が増加することにより、それに伴いせん断破壊箇所が異なることが予想される(図-3)。そこで、本研究ではせん断面の接触面積の減少に伴う応力の補正をおこない、せん断破壊部と摩擦破壊部への垂直荷重の配分比をそれぞれNsと1-Nsとし、式(1)の強度予測式を構築した。このとき、 $\sigma_n=N/A$ で、堅岩部のせん断応力Srは式(2)のように表される。

$$\tau_p = \sigma_n \tan(\phi_u + i)(N - N_s)/N + (A_s/A) \cdot S_r \quad \text{式(1)}$$

$$S_r = \tau_0 + \sigma_n \cdot (N_s/N) \cdot \tan \phi_0 / (A_s/A) \quad \text{式(2)}$$

τ_p : 弱層のせん断強度、 σ_n : 垂直応力、 ϕ_u : 平滑面の摩擦角、 i : ダイレーション角、 N : 垂直荷重、 N_s : せん断破壊部への垂直荷重、 A : 全体面積、 A_s : 全せん断面に対する堅岩部のせん断面積、 S_r : 堅岩部のせん断応力、 τ_0 : 堅岩部のせん断強度、 ϕ_0 : 堅岩部の内部摩擦角

弱層壁面のせん断抵抗破壊では、壁面の凸部分が接触し壁面に乗り上げるによりせん断破壊

する。せん断抵抗破壊し壁面に乗り上げた角度をダイレーション角と称し、一般的にピークせん断応力時に最大値(ピークダイレーション角)を示すことが多い。本報告では、市販の表計算ソフトのマクロ機能を利用し、弱層壁面上下の凹凸形状のプロファイルを0.5mm間隔でせん断方向に順次変位させ、壁面接触面のかみ合わせをシミュレーションすることで、ピークダイレーション角とせん断破壊面積を推定しせん断強度を算出した(図-4)。図-5に示すように、せん断方向に変位させた際に壁面の重複部が一定の幅を超えるとせん断破壊を生じると仮定した。一方重複部が一定幅を下回る場合には壁面が変形し摩擦抵抗が生じると仮定した。そのほか弱層のせん断強度を算出するために、堅岩部の物性値として一軸圧縮強度・引張強度・内部摩擦角等の物性値を入力した。

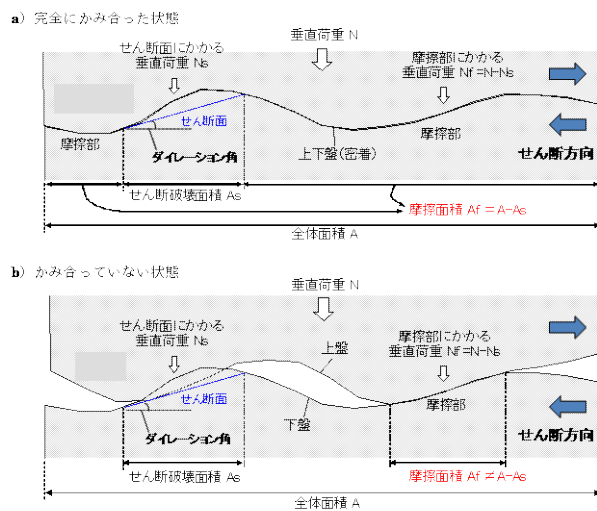


図-3 Saebモデル(上)と本報告のモデル(下)の弱層壁面のせん断破壊模式図

図-4 シミュレーションソフトウェアの入力画面

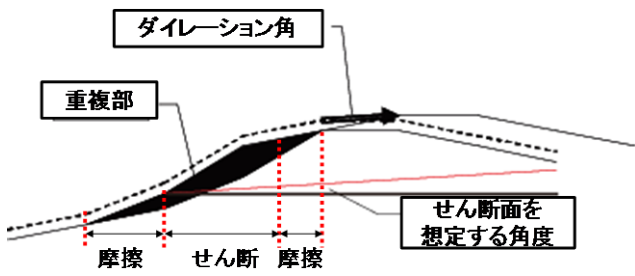


図-5 弱層壁面の乗り上げによるせん断破壊の概念図

3. シミュレーションの計算手順

3.1 初期状態の決定

あらかじめ0.5mm間隔で精密に計測した弱層壁面上下盤の凹凸の隙間が最小となる位置をかみ合わせの初期状態として設定した(図-6)。

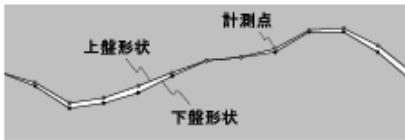


図-6 上盤と下盤とのかみ合わせの初期状態の復元

3.2 ダイレーション角とせん断応力の決定

まず、上盤をせん断方向へ1計測点分移動したとき、上下が重複する計測点から仰角 i 度方向への延長線を仮想せん断面と仮定した。次に重複箇所ごとに上下盤の仮想せん断区間の測定点数(区間長)のうち、過度にせん断区間長が大きくなるように少ない方を仮想せん断面とした。この仮想せん断区間の測定点数の合計を全計測点数で割りせん断面積比 A_s/A を算出した(図-7)。これを式(1)へ代入し i の角度を変化させ計算し、その最小値 τ_{min} をせん断応力、角度 i_c をダイレーション角とした(図-8)。

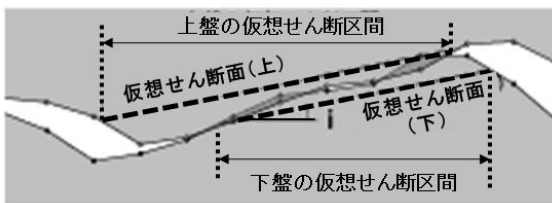


図-7 仮想せん断面の予測

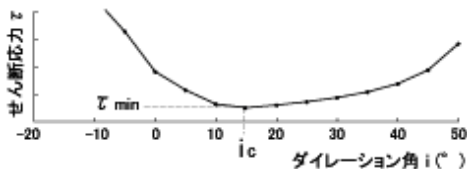


図-8 せん断応力とダイレーション角との関係

3.3 各せん断変位におけるせん断応力の算出

上下盤の形状を、前節で決定したダイレーション角 i_c の想定せん断面形状に改変し、さらにせん断変位を進めたときの各変位のせん断応力を、上記手順を繰り返して算出した(図-9)。

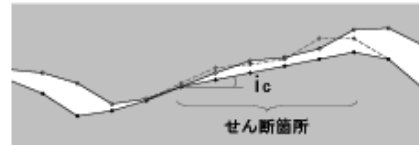


図-9 想定せん断面形状

4. シミュレーション結果

図-10に東北地方から採取した溶結凝灰岩の柱状節理の一面せん断試験の実測値を示す。垂直応力が0.40から4.0の間に、せん断強度は0.23から3.2MPaまで変化した。せん断応力は垂直応力に対して比例関係にある。これについてシミュレーションし強度予測した一例を図-11に示す。図-11の左列に各変位量におけるせん断方向の凹凸断面のプロファイルの形状変化を示す。せん断破壊は変位量1.0mmから始まり、3.5mmでそのピークを迎えた。図-11右列にはその時のせん断破壊箇所を示す。これらシミュレーションの計算値と実測値とを比較すると、計算値は実測値とほぼ同じ値を示し、多少かみ合わせが悪くても概ね満足する結果となった(図-12)。ただし、中には計算値が実測値の半分程度になるものもあり、自然岩盤の風化や変質、礫等の内容物によりせん断面の強度がばらつくことが示唆された。

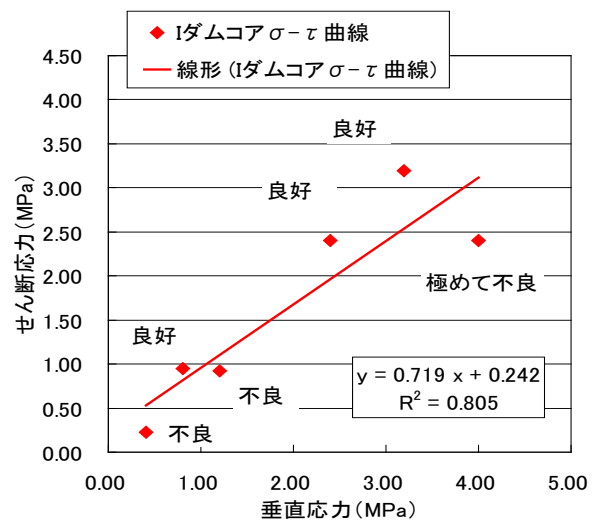


図-10 $\sigma - \tau$ 曲線 (一面せん断試験結果)

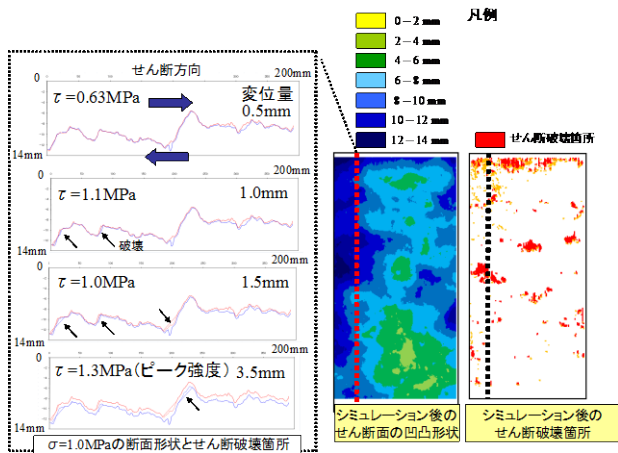


図-11 シミュレーション結果の例

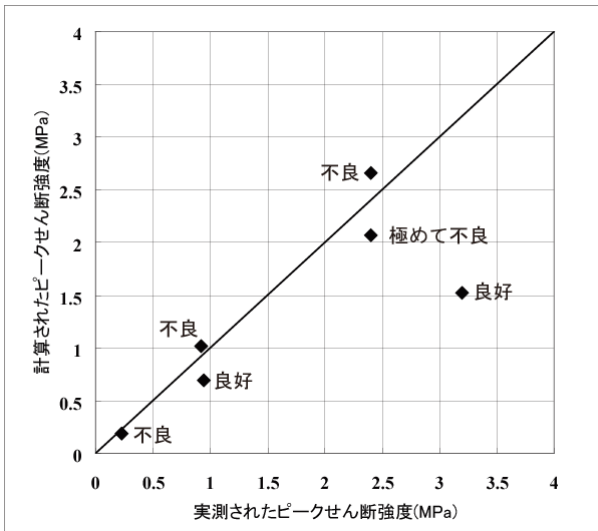


図-12 実測値と計算値の関係

5. まとめと今後の課題

弱層のせん断強度を予測するシミュレーションソフトウェアを開発し、算出したせん断強度を一面せん断試験のせん断強度と比較し適用性を検証した。その結果、算出されたせん断強度は一面せん断試験とほぼ同等の値を示し、かみ合わせが悪い自然岩盤にも適用可能であることを示した。ただし、粘土など充填物を含む場合にはさらに充填物のせん断強度も別途考慮する必要があるため、今後は様々な岩種や充填物、凹凸等の弱層へ強度予測式を適用し、検証することが必要である。

参考文献

- 1) 佐々木靖人、寶谷 周、矢島良紀：ダム基礎の弱層分類と強度評価手法—ダムの事例調査から—、ダム技術、No.256、pp.35~48、2008。
- 2) Ladanyi, B. and Archambault, G. , Simulation of shear behavior of a jointed rock mass, Proc. 11th symp. On Rock Mech. (AIEM), Berkeley, California, pp.105-125, 1970.
- 3) Barton, N. : Review of a new shear-Strength criterion for rock joints, Engineering Geology, Vol.7, pp.287-332, 1973.
- 4) Saeb, S. : A variance on the Ladanyi and Archambault's shear strength criterion, Rock Joints, Barton & Stephansson (eds), Balkema, pp.701-705,1990.

倉橋稔幸*



独立行政法人土木研究所寒地土木研究所寒地基礎技術研究グループ防災地質チーム 総括主任研究員(前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ地質チーム主任研究員)
Toshiyuki KURAHASHI

吉田直人**



国土交通省中部地方整備局木曾川下流河川事務所調査課(前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ地質チーム研究員)
Naoto YOSHIDA

佐々木靖人***



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所地質・地盤研究グループ地質チーム 上席研究員
Yasuhiro SASAKI

矢島良紀****



国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部沙流川ダム建設事業所調査設計班班長(元 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ地質チーム研究員)
Yoshinori YAJIMA

寶谷 周*****



株式会社クレアリア地質部(前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ地質チーム 交流研究員)
Shu HOTANI