

弱層のせん断強度 シミュレーションソフトウェアの開発

倉橋 稔幸^{1*}・吉田 直人²・佐々木 靖人¹・矢島 良紀³・寶谷 周⁴

¹独立行政法人土木研究所 材料地盤研究グループ地質チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²国土交通省中部地方整備局木曾川下流河川事務所 (〒511-0002 三重県桑名市大字福島465)

³独立行政法人土木研究所 水環境研究グループ河川生態チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁴株式会社クレアリア 地質部 (〒114-0003 東京都北区豊島8-4-1)

*E-mail: kurahasi@pwri.go.jp

本報告では、岩盤中の断層や節理のように力学的な不連続面となる弱層のせん断強度を推定することを目的として、弱層壁面の凹凸形状や壁面強度を用いて間接的にせん断強度を推定する強度予測式を構築し、拘束圧ごとのせん断箇所と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た。本強度予測式は、壁面の凹凸形状のかみ合わせにおける壁面同士の接触面積に応じた垂直応力配分をせん断破壊箇所に反映させた点に特徴がある。算出されたせん断強度は一面せん断試験のせん断強度とほぼ同等の値を示し、実際の自然岩盤にも適用可能で、かみ合わせが悪い亀裂にも適用可能であることを示した。

Key Words : weak layer, rock joint, irregular rock surface, shear strength, simulation software,

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る。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⁾(図-1)。通常、岩盤分類の観点では、「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行ったせん断試験を実施することで、設計強度を設定してきた²⁾。しかし、原位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こと、またそのために試験数量が限られてきた。また、試験数量が少ないゆえに、試験箇所の代表性が問題になることもあった。

弱層の強度は、せん断される部分に着目すると、「不連続部(岩盤)の強度」、「壁面のかみ合い(接触)による強度」、「充填物の強度」のいずれかの強度の組合せからなると考えられる¹⁾。これらの要素を確実に取得できれば、不連続面のせん断強度を予測することも可能である。さらに弱層は試料採取や整形が困難な場合も多く、必ずしも原位で試験を実施できる訳ではない。そこで、原位せん断試験を補完し、強度評価の信頼性を向上させるために、弱層の凹凸形状や壁面(岩盤)強度

のように取得が比較的容易な物性値を用いて間接的にせん断強度を推定する方法の開発が望まれている。

そこで本研究では、弱層壁面のかみ合わせ強度に着目し、弱層壁面の凹凸形状や壁面強度を用いて間接的に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た。上下の凹凸面を順次変位させた際に凹凸形状が重なるとせん断破壊を生じると仮定し、あらかじめ計測した不連続面の壁面の凹凸をシミュレーションすることにより、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。さらに算出したせん断強度と一面せん断試験のせん断強度とを比較し、その適用性を検証した。

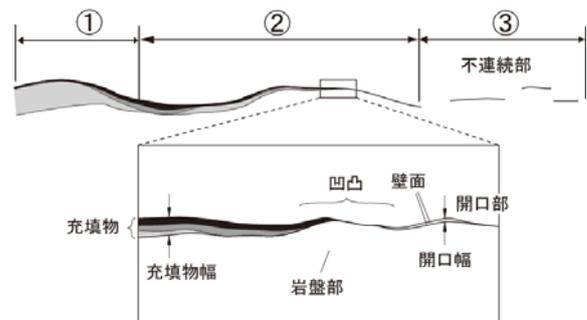


図-1 弱層の模式図

2. 不連続面のせん断強度予測式の構築

不連続面のかみ合わせのせん断強度を評価する研究として、Patton(1966)³⁾、Ladanyi and Archambault(1970)⁴⁾、Barton(1973)⁵⁾等が知られている。Patton(1966)は石膏に砂や粘土を混入させた人工試料を用いた不連続面の模型実験から、そのせん断抵抗角がアスペリティー傾斜角 i にすべり摩擦抵抗角 ϕ_u を加えた $i + \phi_u$ になることを示した。

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(楠見ほか, 1999)⁶⁾。

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ことを仮定し、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)⁷⁾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(式(1))。

$$\tau_p = \sigma_n \tan(\phi_u + i)(1 - A_s) + A_s \cdot S_r \quad (1)$$

τ_p : ピークせん断強度, σ_n : 垂直応力, ϕ_u : 平滑面の摩擦角, i : ピークダイレイション角, A_s : 全せん断面に対する堅岩部のせん断面積の比, S_r : 堅岩部のせん断強度

しかしながら、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。(1)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。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、それに伴いせん断強度破壊箇所が異なることが予想される(図-3)⁸⁾。

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 A_s にかかる垂直荷重の配分比を N_s とした。それにより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 N_s と $1 - N_s$ とし、強度予測式を構築した(2式)。

$$\tau_p = \sigma_n \tan(\phi_u + i)(1 - N_s) + A_s \cdot S_r \quad (2)$$

τ_p : ピークせん断強度, σ_n : 垂直応力, ϕ_u : 平滑面の摩擦角, i : ピークダイレイション角, N_s : せん断破壊部への垂直荷重の配分比, A_s : 全せん断面に対する堅岩部のせん断面積の比, S_r : 堅岩部のせん断強度

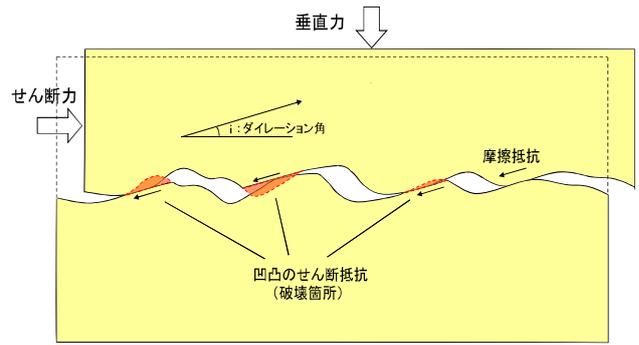


図-2 不連続面のせん断モデル

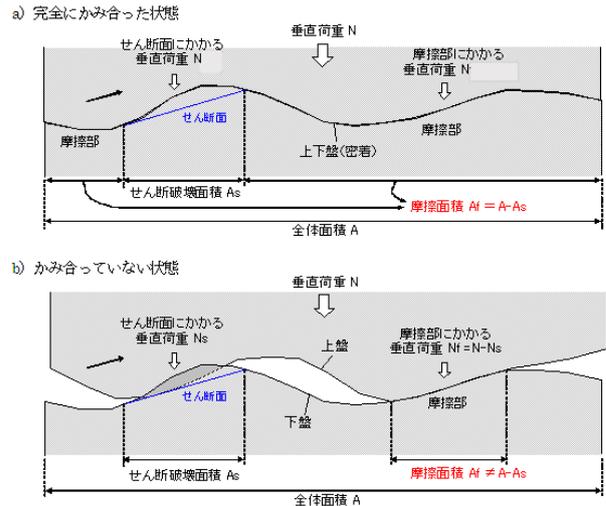


図-3 Saeb モデル (上) と本研究のモデル (下) の不連続面のせん断破壊模式図

3. 計算方法

(1) シミュレーションによるせん断強度の予測

あらかじめ不連続面の壁面の凹凸を 0.5mm 間隔で精密に計測することにより、凹凸形状のプロファイルを作成した。その壁面の接触面同士が乗り上げる際に摩擦破壊が働くと考え、さらにその重なりが一定の幅を超えるとせん断破壊を生じると仮定した。断面形状を 0.5mm 間隔で順次変位させ壁面の接触面のかみ合わせをシミュレーションすることにより、ピークダイレイ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)。なお、堅岩部のせん断強度については一軸圧縮強度、引張強度の物性値から推定した(Fairhurst, 1964)¹⁰⁾。計算には市販の表計算ソフトのマクロ機能を利用した(図-5)。計算手順を次節で述べる。

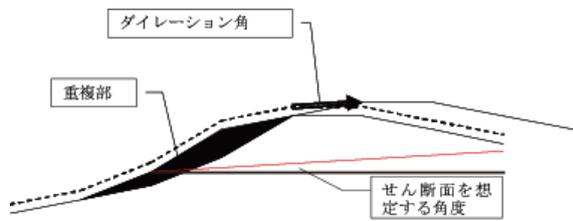


図-4 シミュレーションソフトウェアの入力画面

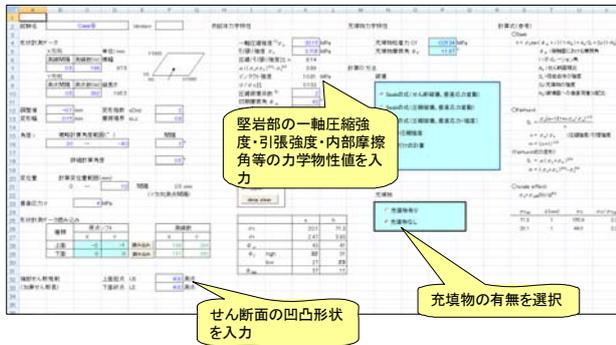


図-5 シミュレーションソフトウェアの入力画面

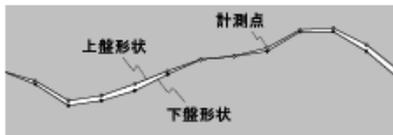


図-6 上盤と下盤とのかみ合わせの初期状態の復元

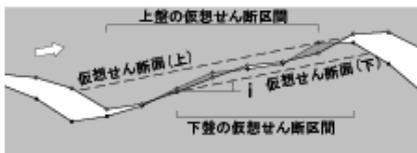


図-7 仮想せん断面の予測

(2) 計算手順

シミュレーションを以下の手順で実施した。

①初期状態の決定

垂直荷重状態での上下盤の相対位置を復元した(図-6)。

②ダイレクション角を仮定したせん断応力の計算

まず、上盤を仰角 i でせん断方向へ1計測点分移動したとき、上限が重複する計測点から i° 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の仮想せん断区間の測定点数(区間長)を比較し、少ない方を想定せん断面とした。これは過度にせん断区間長が大きくなるようにするためである。さらにこの想定せん断測点数の合計を全計測点数で割り、せん断面でせん断破壊される箇所の割合としてせん断面積比 A_s を算出した。

これらの角度 i (ダイレクション角) とせん断面積比 A_s を式(2)へ代入してせん断応力を計算した(図-7)。

③ダイレクション角とせん断応力の決定

i の角度を変えてせん断応力を計算し、最小値をこの

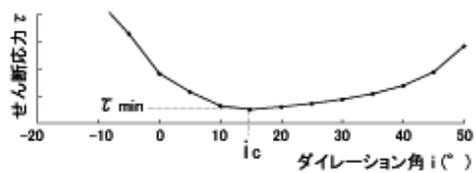


図-8 せん断応力とダイレクション角との関係

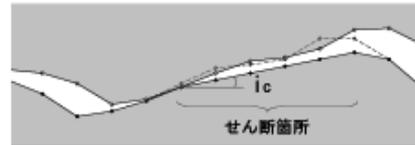


図-9 想定せん断面形状

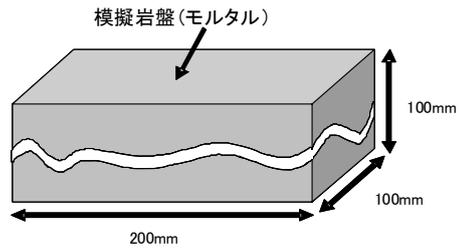


図-10 供試体の形状

せん断変位におけるせん断応力として決定した。そのときの角度 i_c をダイレクション角とした(図-8)。

④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、③で決定したダイレクション角 i_c で想定せん断面形状に改変した。次にせん断変位をさらに進めたときの各変位におけるせん断応力を、上記手順を繰り返して順次算出した(図-9)。

(3) 供試体の製作と壁面凹凸形状の計測

(a) 供試体の製作

壁面形状(粗さ)および材料強度の違いがせん断強度に与える影響を調べるため、粗さの異なる3種類(A・B・C)の稲田花崗岩の節理面から型どり、モルタルを用いて岩盤を模した供試体を製作した(図-10)。硬軟2種類のモルタルを用いて打設した。使用したモルタルの配合を表-2に示す。打設後に28日間の水中養生を行い、実験室内で常温保管した。試験実施時における平均一軸圧縮強度は、硬質供試体で71.8MPa、軟質供試体では20.9MPaであった。形状・モルタル強度の有無の組み合わせから、合計6種類の供試体を製作し、一面せん断試験を実施した(表-1)。

その他、実際の岩盤を用いての弱層のせん断試験を実施した。試料を東北地方のダムサイト周辺の新第三紀の溶結凝灰岩の柱状節理を含む岩盤およびボーリングコアから採取した。試料を石膏に埋め込み供試体を製作した。コアの採取状況及び供試体の写真を図-11に、物理特性を表-3に示す。

表-1 供試体の形状一覧

形状		表面の粗さ		モルタル強度	充填物の有無
		JRC			
A	凹凸面	14.9		硬	無
				硬	
B	凹凸面	8.0		硬	無
				軟	
C	凹凸面	5.4		硬	無
				軟	

表-2 供試体材料の配合および強度

種類	使用セメント	配合 (重量比)				強度 (MPa)	
		水	セメント	CaCO ₃	大井砂	一軸圧縮	引張
軟	普通ポルトランド	1	1	0.43	43	20.9	2.4
硬	無収縮グラウト剤	1	プレミックスグラウト		64	71.8	5.4



図-11 供試体の採取状況および供試体

(b) 壁面凹凸形状の計測

せん断による供試体の形状変化を調査するため、供試体表面の形状を試験の前後に XY 方向とも 0.5mm 間隔でレーザー変位計で計測した。レーザー変位計にはキーエンス製 LB-300 を用いた。計測結果を図-12 に示す。表面粗さを示す JRC は A:14.9, B:8.0, C:5.4 であった。

(4) 一面せん断試験方法

シミュレーション結果のピークせん断強度と、一面せん断試験のせん断強度とを比較することを目的として、同供試体を用いて一面せん断試験を実施した。使用したせん断試験機は、垂直荷重 200kN、せん断荷重 2000kN の载荷能力を有し、せん断時に垂直荷重を一定に保持する機構を内蔵している。測定値 (垂直荷重, せん断荷重, 垂直変位, せん断変位) は、コンピュータリアルタイムに保存される。試験条件として、垂直応力を 0.5, 1, 2, 4MPa 等まで段階的に上げ、せん断変位 10mm まで達した時点まで行う試験とピークせん断強度発現時点で終了する試験の 2 種類を設定した。試験は予備载荷後に、所定の垂直荷重を载荷し、これを一定に保持しながら、変位制御によってせん断を行った。ピーク強度発現までは 0.1mm/min, それ以降は 0.2mm/min の速度で载荷した。

表-3 コアの物性

	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	摩擦角 (°)
最大値	14.4	0.73	29.3
最小値	5.83	0.65	22.9
平均	10.2	0.70	27.5

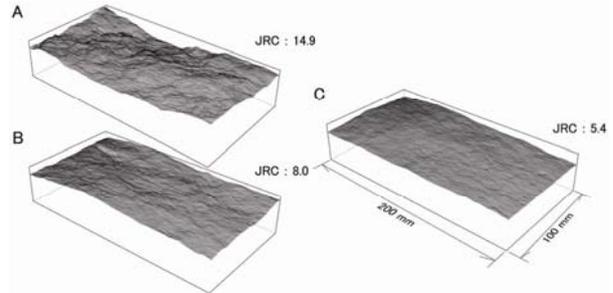


図-12 供試体の形状

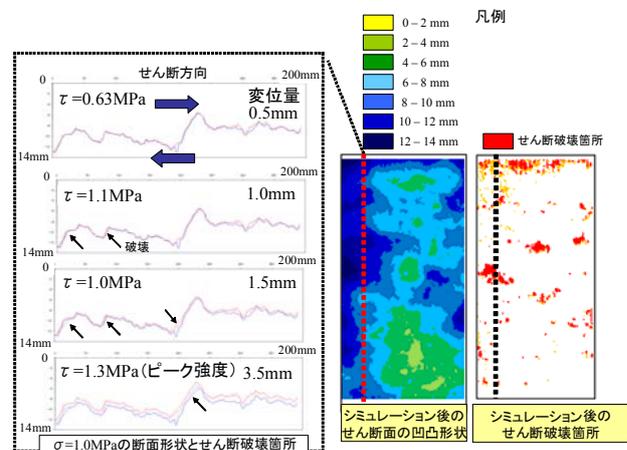


図-13 シミュレーション結果の例

4. 計算結果と考察

(1) シミュレーション結果

形状 A のシミュレーション結果の例を図-13 に示す。図-13 の左列には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。変位量 0.5mm では $\tau=0.63\text{MPa}$, 1.0mm では $\tau=1.1\text{MPa}$ などを示し、3.5mm 変位した際にピーク強度として $\tau=1.3\text{MPa}$ を示した。その時の破壊箇所を図-13 の右列に示す。

(2) 実測値と Saeb の強度式計算値との比較

強度予測式のせん断強度と一面せん断試験のせん断強度とを比較した。その結果を図-14 に示す。計算値と実測値は概ねよく一致した。ただし、実測値は全般的に硬質供試体の計算値よりもやや低いせん断強度を示す一方、

軟質供試体はやや高いせん断強度を示した。これは、かみ合わせの悪い供試体を用いた本試験において、軟質供試体はせん断時の変形によりかみ合わせが改善し、高い強度となったのに対し、硬質供試体は変形が小さく、かみ合わせがあまり改善されずに低い強度となったためと考えられる。

(3) 実際の岩盤を用いた弱層のせん断試験結果と解析

図-15に東北地方のダムサイト周辺から採取した自然岩盤の一面せん断試験結果の $\sigma - \tau$ 曲線を示す。垂直応力が0.40から4.0の間に、せん断強度は0.23~3.2MPaまで変化する。せん断応力は垂直応力に対して比例関係にある。最小二乗法で計算した近似式から、 $\tau_0=0.24\text{MPa}$ 、 $\phi=36^\circ$ となった。なお、このうち、試料のかみ合わせについては、不連続面が密着するものを「良好」、一部密着するものを「不良」、密着しないものを「極めて不良」と区分したが、かみ合わせの良い試料のせん断強度は相対的に大きく、逆にかみ合わせの悪いものはせん断応力が小さい傾向にあった。

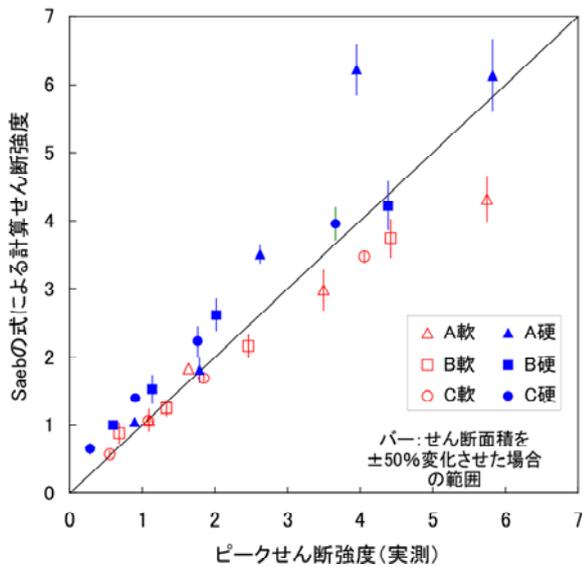


図-14 実測値と計算値の関係

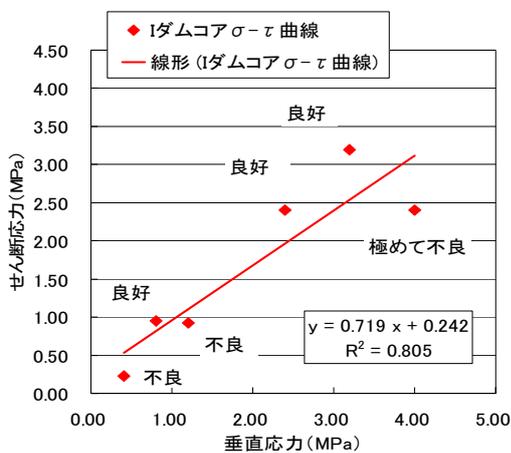


図-15 $\sigma - \tau$ 曲線 (一面せん断試験結果)

さらにこれらの実測値を強度予測式の計算値と比較した。その結果を図-16に示す。実測したピークせん断強度と計算せん断強度は、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。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った。自然の岩盤には風化や変質、礫等の内容物により、せん断面の強度にばらつきがあることなどが原因と考えられる。また、弱層に粘土など充填物を含む場合にはせん断強度が低くなるのが指摘されている(吉田ほか,2010)¹¹⁾。今後、適用事例を増やしさらなる改良強度式の検証が必要である。

5. まとめと今後課題

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。その結果は、以下のようにまとめられる。

- 不連続面の壁面を0.5mm間隔で精密に計測した凹凸形状の断面プロファイルから壁面の接触面のかみ合わせをシミュレーションし、ピークダイレーション角とせん断強度を算出できた。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す。実際の自然岩盤にも適用可能で、かみ合わせが悪い亀裂にも適用可能である。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。
- 今後、様々な岩種や充填物、凹凸等の様々なケースにおける強度予測式を適用し、適用事例を増やすことにより適用性を検証することが必要である。

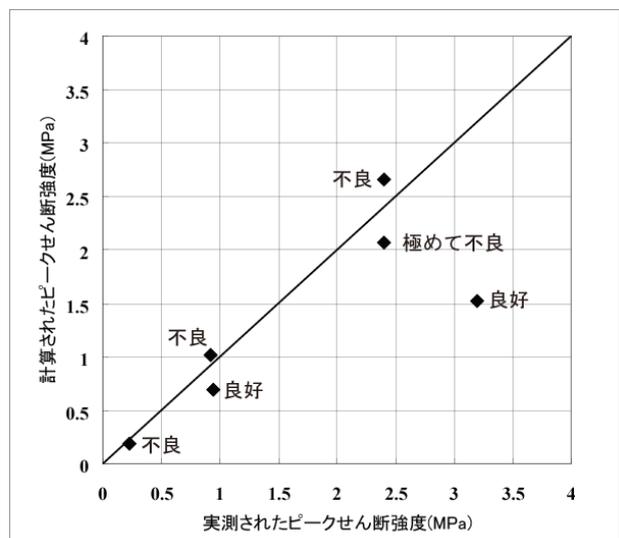


図-16 実測値と計算値の関係

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) 森 良樹, 脇坂安彦, 佐々木靖人, 阿南修司: 原位置岩盤せん断試験によるダム基礎の岩盤分類の定量的な評価の試み, ダム工学, vol.17, no.3, pp.202-215, 2007.
- 3) Patton, F. D., Multiple modes of shear failure in rock, Proc. 1st Cong. ISRM, Lisbon, Vol.1, pp.509-513, 1966, .
- 4) 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.
- 5) Barton, N.: Review of a new shear-strength criterion for rock joints, Engineering Geology, Vol.7, pp.287-332, 1973.
- 6) 楠見晴重, 酒井 崇, 中村均史: 岩盤不連続面の噛み合わせの定量的評価とそのせん断強度式への適用性, 第 29 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.131-135, 1999.
- 7) Saeb, S.: A variance on the Ladanyi and Archambault's shear strength criterion, Rock Joints, Barton & Stephansson (eds), Balkema, pp.701-705, 1990.
- 8) 寶谷 周, 矢島良紀, 佐々木靖人: 岩盤不連続面模型を用いた一面せん断試験(1), 平成 19 年度研究発表会講演論文集, 日本応用地質学会, pp.225-226, 2007.
- 9) 矢島良紀, 寶谷 周, 佐々木靖人: 岩盤不連続面模型を用いた一面せん断試験(2), 日本応用地質学会平成 19 年度研究発表会講演論文集, pp.227-228, 2007.
- 10) Fairhurst, C., On the validity of Brazilian test for brittle materials, International journals of rock mechanics and mining sciences, vol.1, pp.535-546, 1964.
- 11) 吉田直人, 倉橋稔幸, 佐々木靖人: 充填物を含む岩盤不連続面の模型を用いた一面せん断試験, 第 45 回地盤工学研究発表会平成 22 年度発表講演集, CD-ROM, pp.453-454, 2010.

DEVELOPMENT OF SIMULATION SOFTWARE FOR ESTIMATING SHEAR STRENGTH OF IRREGULAR ROCK JOINT SURFACES

Toshiyuki KURAHASHI, Naoto YOSHIDA, Yasuhito SASAKI, Yoshinori YAJIMA and Shu HOUTANI

This paper describes the development of simulation software for estimating the shear strength behavior of irregular rock joint surfaces. We propose a new shear strength simulation model that is based on interlocking of the surfaces. The model is characterized by normal stress correction according to the surface interlocking area. In the results obtained from the model, the estimated shear strength values were as large as the values obtained from a box shear test. It can be concluded that the proposed strength simulation model accurately reflects the relative contribution of various parameters to the overall shearing strength of irregular rock joint surfaces.