

# 岩盤不連続面の幾何形状によるせん断強度特性

防災設計工学研究室 廣崎 大史  
指導教官 大塚 悟

## 1. はじめに

岩盤内に存在する不連続面の力学的挙動は、岩盤構造物全体の安定性に大きな影響を及ぼす。また、不連続面のせん断強度は不連続面の幾何形状に大きく影響し、垂直応力に依存して非線形挙動を示すことが報告されている。これまでに不連続面のせん断強度モデルは多数提案されている。現在、不連続面のせん断強度を推定する際には Barton モデルが広く用いられる。

Barton(1972)<sup>[1]</sup>は実岩盤の不連続面を用いた数多くの実験結果より、不連続面の粗さを表現するラフネス係数 JRC を導入したせん断強度モデルを提案した。

$$\tau = \sigma \cdot \tan \left[ \text{JRC} \cdot \log_{10} \left( \frac{\text{JCS}}{\sigma} \right) + \phi_{\mu} \right] \quad (1.1)$$

ここで JCS は一軸圧縮強度、 $\phi_{\mu}$  は平滑な不連続面に作用するすべり摩擦角である。上式は不連続面のせん断抵抗角が垂直応力に応じて変化することを表現している。一方 JRC は目視で決定されることから客観性に乏しい問題がある。本研究は不連続面形状とせん断強度間の関係を明らかにし、不連続面の凹凸形状を客観的に評価する Rengers(1970)<sup>[2]</sup>の方法を導入したせん断強度モデルを提案した。

更に、岩盤構造物の設計において岩級分類による方法が良く用いられていることに着目して、岩種・岩級の異なる地盤における掘削面のラフネス形状の計測データを収集し、ラフネスと岩種・岩級間の関係について分析をおこなった。

## 2. 岩盤不連続面の強度特性の考察

### 2.1 岩盤不連続面のせん断破壊機構

極限解析の上界定理を用いて不連続面のせん断破壊機構について検討し、せん断強度を推定する際に必要な不連続面の幾何情報を明らかにする。上界計算は可容な破壊形態を仮定することでせん断強度を求める手法である。しかし、有意な解を得る為には、破壊形態を変化させて求められるせん断強度に対して最小化演算をおこなうことが重要である。図 1 に解析に用いた 2 次のアスペリティを有する規則的な不連続面形状と破壊形態を示す。仮定した破壊形態は、2 次アスペリティに沿うすべり破壊 (mode1)、2 次のアスペリティが完全にせん断破壊する形態 (mode2)、アスペリティが完全に

せん断破壊する形態 (mode3)、である。図中の  $\phi$  および  $\phi_{\mu}$  は、それぞれ岩石のせん断抵抗角およびすべり摩擦角である。ダイレイタンシー角により規定される可容変位速度  $\delta$  には関連流れ則を仮定する。図 2 に各破壊形態のせん断強度を示す。上界定理に基づく最小化をおこなうと不連続面のせん断強度として内包線が得られる。破壊形態が垂直応力の増加に応じて mode1 から 2,3 と不連続に変化するため、不連続面のせん断強度はトリ・リニアに遷移する。また、不連続面のせん断抵抗角は破壊形態の形状から決定されるダイレイタンシー角に一致することが分かる。アスペリティがせん断されるとき、そのせん断抵抗力として見かけの粘着力が生じる。図 2 から見かけの粘着力の大きさは、mode2 より

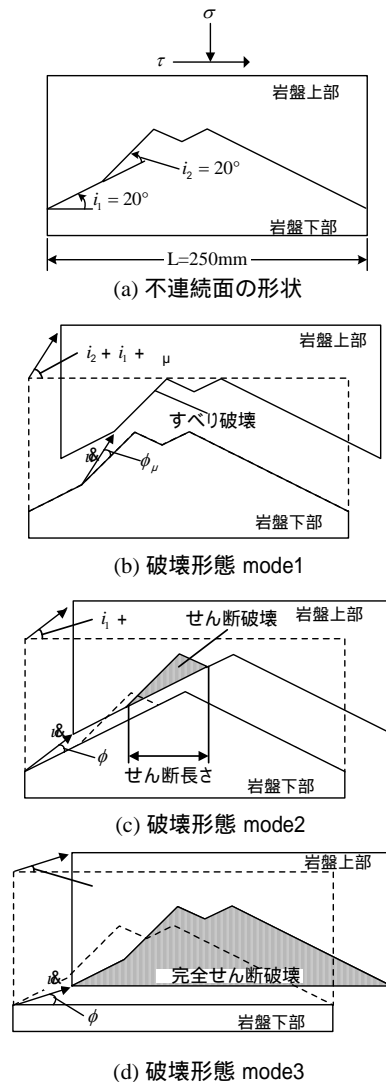


図 1 不連続面の形状と破壊形態

mode3 が大きいことから図 1(c)に示すアスペリティのせん断長さに関係することが分かる。よって、不連続面のせん断抵抗角および見かけの粘着力は破壊形態の幾何形状から予測することができる。以上から、不連続面のせん断強度を推定する際の幾何情報としてアスペリティがせん断されるときの傾斜角とせん断長さが必要である。また、不連続面のせん断強度はこれらの諸量を用いた区分線形近似から予測することが可能である。

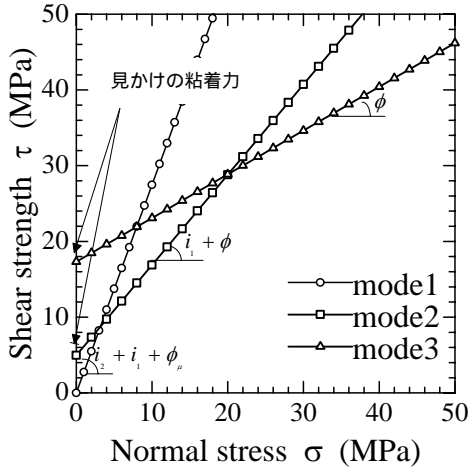


図2 各破壊形態のせん断強度

## 2.2 Rengers の形状評価法

前節で示した幾何形状を整理するために Rengers(1970)の形状評価法を用いる。図 3(a)は測線 1~9 に至る不連続面の模式図である。検査面全長  $L$  を最小単位長さ  $s$  で等間隔に  $n$  分割する。図では  $L$  を 8 等分している。Rengers の形状評価法はステップ長  $\Delta L$  に対する最大傾斜角を求める。図 3(b)の場合、 $\Delta L_1$  に対して測線 4-5 の区間で最大傾斜角  $\alpha_{\Delta L_1}$  が得られるので、 $(\Delta L_1, \alpha_{\Delta L_1})$  を図 4 に示すように整理する。同様に図 1(c)についても  $\Delta L_2 = s \times 2$  に対して測線 3-5 の区間で最大傾斜角  $\alpha_{\Delta L_2}$  が得られる。このように凹凸形状の角度を計測するためのステップ長  $\Delta L_i (s \times 1, s \times 2, \dots, s \times n)$  に対する最大傾斜角  $\alpha_{\Delta L_i}$  を決定し、図 2 のように整理したものを Rengers 曲線という。一般にステップ長が長くなると最大傾斜角は徐々に減少する。この場合、図 1(d)のように  $\Delta L_8 = s \times 8$  では検査面全長  $L$  に等しくなるため  $\alpha_{\Delta L_8} = 0^\circ$  となる。Rengers 曲線はアスペリティの乗り越しを伴うダイレイタンスを規定している。よって、Rengers 曲線の物理的意味について考察すると、最大傾斜角はアスペリティの乗り越しと、せん断に伴うダイレイタンス角に相当する。ステップ長  $\Delta L$  はせん断長さに関係し、

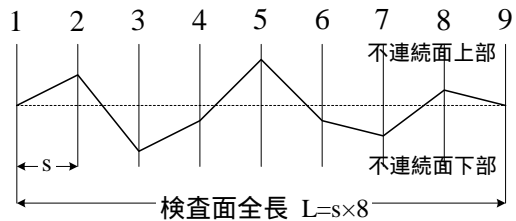
アスペリティがせん断される時の見かけの粘着力に関する Rengers の形状評価法は不連続面の凹凸形状を最大傾斜角と長さの 2 つのパラメータで表現でき、岩盤不連続面の客観的な評価が可能である。

## 2.3 岩盤不連続面のせん断強度推定モデル

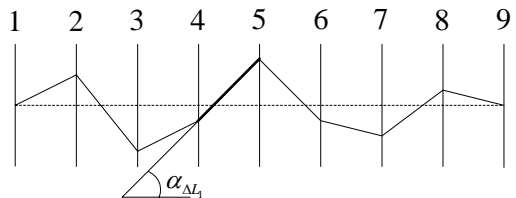
ここでは Rengers の形状評価手法を導入したせん断強度モデルを提案する。提案モデルでは不連続面のせん断抵抗角および見かけの粘着力をそれぞれ  $\phi_m$  および  $c_m$  と表す。不連続面のせん断強度は区分線形近似が可能であることから Coulomb の破壊基準  $\tau_m = c_m + \sigma \cdot \tan \phi_m$  を応用し、 $\phi_m, c_m$  は次式を仮定する。

$$\phi_m = \phi_m(\Delta L) = \tan(\alpha_{\Delta L} + \phi_\mu) \quad (2.1)$$

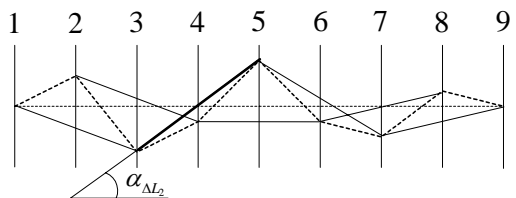
$$c_m = c_m(\Delta L) = c \left( 1 - \frac{\tan \alpha_{\Delta L}}{\tan \bar{\alpha}} \right) \frac{\Delta L}{L} \quad (2.2)$$



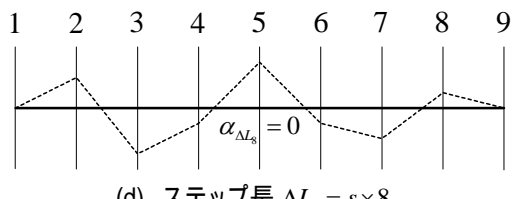
(a) 不連続面の形状と最小ステップ長さ  $s$



(b) ステップ長  $\Delta L_1 = s \times 1$



(c) ステップ長  $\Delta L_2 = s \times 2$



(d) ステップ長  $\Delta L_8 = s \times 8$

図3 Rengers の形状評価法の概念図

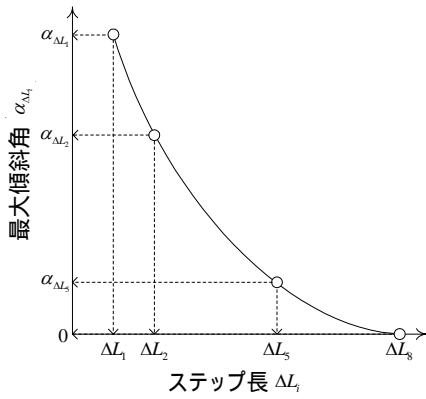


図4 Rengers 曲線

ここで、 $(\Delta L, \alpha_{\Delta L})$ は Rengers 曲線から得られる幾何情報、 $\phi_{\mu}$  はすべり摩擦角、 $\bar{\alpha}$  は最大傾斜角の最大値、 $c$  は岩石の粘着力であり、 $L$  は不連続面全長である。

図 1(a)に示すような不連続面に対して提案モデルを適用し、上界計算結果との比較によりその妥当性を検証する。解析定数は  $c=17.3\text{MPa}$ 、 $\phi=\phi_{\mu}=30^{\circ}$  とした。図 5 に図 1(a)に対する Rengers 曲線を示す。Rengers 曲線は凹凸形状の最大値である  $40^{\circ}$  から  $0^{\circ}$  まで徐々に減少しており、アスペリティの部分的なせん断破壊を意味している。ステップ長に対して最大傾斜角が一定値になる区間があるが、このときは 1 次および 2 次アスペリティ角度に等しい。上界計算結果と提案モデル(PM)より推定したせん断強度曲線を図 6 に示す。提案モデルのせん断強度は連続的に変化しており、不連続に変化する上界計算と合わない点があるが、両者は良く一致しておりせん断抵抗角の非線形挙動は表現できている。以上より提案モデルの妥当性が確認できた。

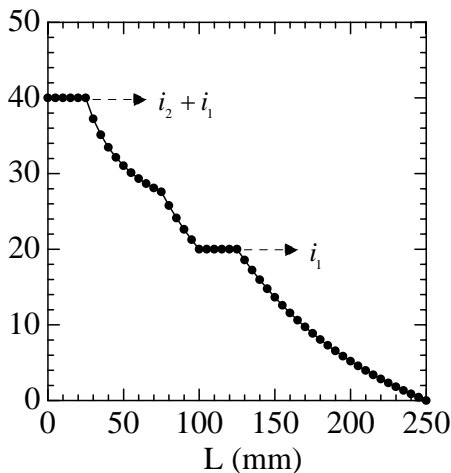


図5 図1(a)に対する Rengers 曲線

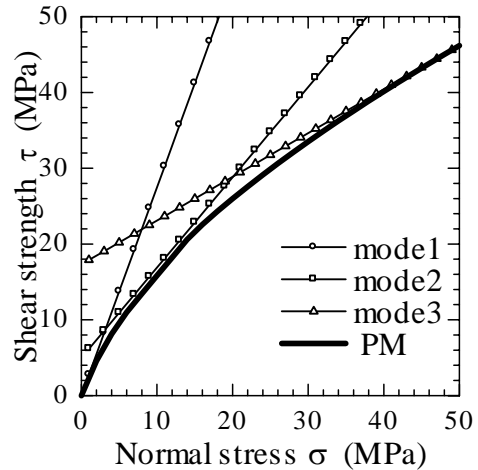


図6 上界計算と提案モデルの比較

#### 2.4 規則的な不連続面の強度異方性

Rengers 曲線は正の傾斜角(反時計回りの角度)について整理すると右方向せん断、負の傾斜角(時計回りの角度)について整理すると左方向せん断を表す。よって、Rengers 曲線はせん断方向による不連続面の形状特性を表現できる。図 1(a)に示す規則的な形状に対して右・左方向にせん断したときの Rengers 曲線を図 7 に示す。右・左方向で異なる Rengers 曲線が得られていることが分かる。図 8 に提案モデルのせん断強度曲線を示す。強度定数は  $c_r=17.3\text{MPa}$ 、 $\phi=30^{\circ}$  とした。せん断強度が岩石の強度に等しくなる高垂直応力域では両者の差はほとんどなく、その勾配は岩石のせん断抵抗角に等しくなる。一方、低垂直応力域では両者の間に差が見られる。規則的な形状の場合、同じ定数・形状でもせん断する方向に依存してせん断強度は異なることが分かる。

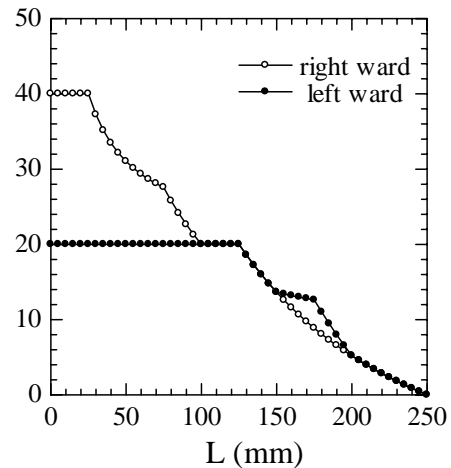


図7 図1(a)に対する Rengers 曲線(右・左方向)

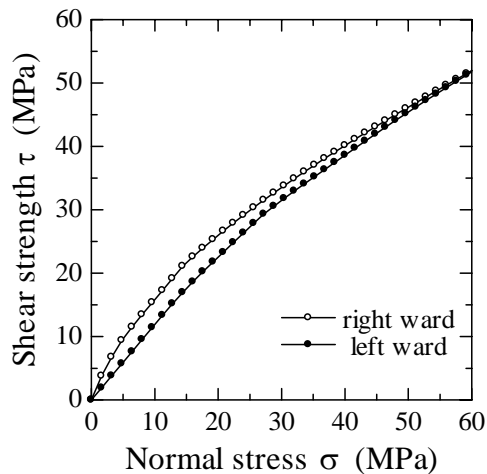


図8 提案モデルによるせん断強度曲線

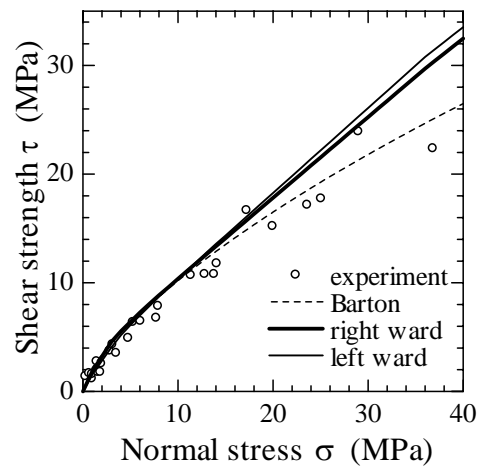


図11 提案モデルによるせん断強度曲線

### 2.5 不規則な不連続面の強度異方性

図9に不規則な不連続面の形状を、図10に図9に対する右・左せん断方向のRengers曲線を示す。図11には提案モデルとBartonによるせん断強度曲線を実験値とともに示す。強度定数は2.4節と同様である。Bartonのモデルは不連続面の凹凸形状をラフネス係数(JRC)に変換するため、せん断方向による強度の差を表現することはできない。図10,11から右・左方向のRengers曲線にあまり差が見られないことからせん断強度に明確な差が現れず、不規則な不連続面の場合には強度異方性が発現しないことが分かる。

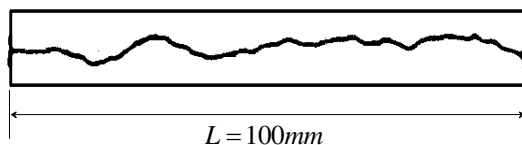


図9 不規則な不連続面の凹凸形状(JRC=20)

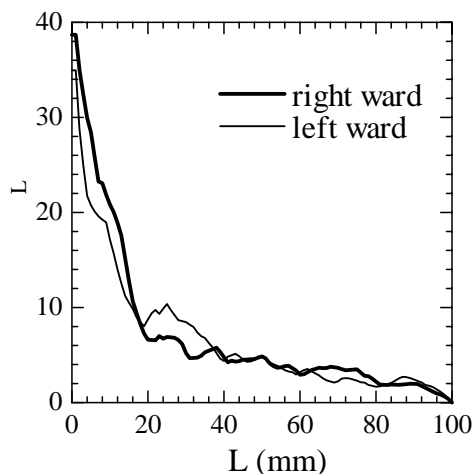


図10 図9の形状に対するRengers曲線

### 3. 実岩盤掘削面の幾何形状分析

岩盤に構造物を構築する際に岩盤と構造物間の接触面の力学特性がしばしば問題になる。本研究は岩種・岩級の異なる岩盤にて同様の掘削方式にて開削した岩盤壁面のラフネスを測定した。開削面のラフネスは岩盤と構造物間の摩擦特性など、幾何形状に依存して力学特性に大きな影響を及ぼす。本研究はラフネスの整理にRengersの形状評価法を適用する。開削面のラフネスは岩種・岩級によって異なる性状を呈する。これは岩石強さや風化度によってラフネス特性が異なることを指すが、岩盤のせん断抵抗角を用いると基準化できることを報告する。

#### 3.1 実岩盤掘削面の測定方法

岩盤は深礎基礎設置を目的に円筒形に掘削されている。掘削に当たっては整形せずに自然なままに壁面のラフネスを残している。図12はその概要を示す。地表面から2.0~4.5mの位置に測定区間(0.5m または 1.0m)を深度方向に設けて掘削面のラフネスを測定した。ラフネスは円筒形の掘削中央からの距離を  $s$ (1cm または 2cm)間隔で測定している。平面図に示すように円周方向に38,39地点を設定してラフネスを測定した。地形・地質的な要因に起因する測定位置による差が見られることを期待して、各種の統計処理を試みたが方向による有意な差は見出せなかった。

#### 3.2 実岩盤掘削面の岩盤情報

掘削面の測定は9ケース実施した。各ケースの概要を表1に示す。基本的に岩種および岩級を変化させているが、C~D級の岩盤が多い。測定地の岩盤物性値の試験は行われていないので、表1の岩盤定数は表2の岩盤分類による標準的な物性値に基づいて設定した。

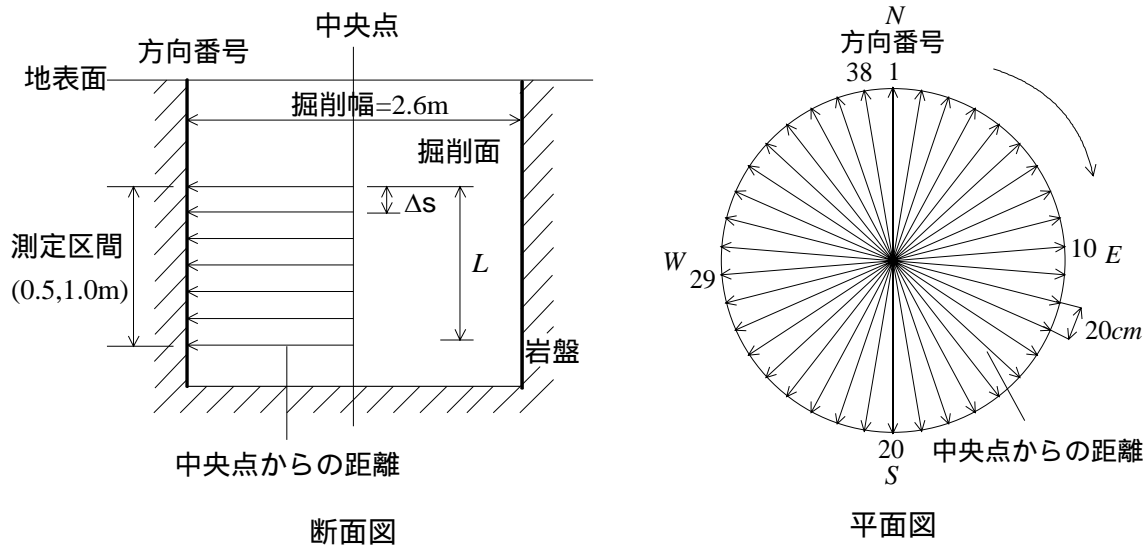


図 12 実岩盤掘削面の測定方法の概念図

表 1 各 CASE の岩盤情報

CASE	岩種	岩級	$w(^{\circ})$	方向数
1	砂岩・頁岩互層	$C_L$	15 ~ 38	39
2	砂岩	$C_M \sim C_H$	35 ~ 50	38
3	強風化花崗岩	$D_H \sim C_L$	15 ~ 38	38
4	強風化花崗岩	$D_L$	15 ~ 38	39
5	頁岩	$D_H$	15 ~ 38	39
6	チャート	$C_L \sim C_M$	22.5 ~ 41.5	38
7	片麻岩	$C_M$	30 ~ 45	38
8	シルト岩	$C_L$	15 ~ 38	38
9	細粒砂岩	$C_L$	15 ~ 38	38

表 2 岩級による強度定数<sup>[3]</sup>

岩盤等級	岩盤の内部摩擦角 $w(^{\circ})$
A ~ B	55 ~ 65
$C_H$	40 ~ 55
$C_M$	30 ~ 45
$C_L$	15 ~ 38
D	

### 3.3 全ケースの Rengers 曲線

測定データの Rengers 曲線を図 13 に示す。Rengers 曲線の作成に当たっては各ケースの 38, 39 地点におけるラフネスデータに対して Rengers 曲線を求めた。ここでは、対象とする岩盤の各 Rengers 曲線の平均値を代表値とする。また、ラフネスは測定間隔によって精度が異なるこ

とから、図では測定間隔によって分けて整理した。測定間隔が短いほど細かな凹凸まで把握できることからラフネスについても試験長に対する最大傾斜角は大きくなると考えられる。図から測定間隔が等しいと、岩級が低くなるにつれて Rengers 曲線は下に位置することが分かる。これはどの試験長さにおいても同一の結果となった。よって岩盤掘削面の幾何特性は風化による影響が大きいと考えられる。

### 3.4 $w$ による Rengers 曲線の正規化

図 13 に示すように岩盤掘削面の幾何特性は風化による影響が大きい。ここでは各ケースの Rengers 曲線を岩級による強度定数  $w$  で正規化して比較する。正規化に用いた強度定数は表 1 の平均値を用いた。図 14 は図 13 を岩級による  $w$  で正規化したものである。CASE4 の Rengers 曲線だけが他ケースから大きく離れていることが分かるが、CASE4 の岩級は  $D_L$  級であり、すでに岩盤不連続面としての幾何形状が消失しており、岩盤がマサ土化、もしくは砂質土化していると推定される。よってここでは CASE4 を検討から除外する。図 14 より、岩級の  $w$  による正規化によって Rengers 曲線に収束傾向があることを発見した。これは岩級のせん断抵抗角を用いて正規化すると基準化できることを表しており、岩級によるラフネスの予測可能性を示唆する結果と言える。本来は各サイトの岩盤定数を用いて正規化を行う必要がある。しかし、定性的には正規化の可能性が示された。

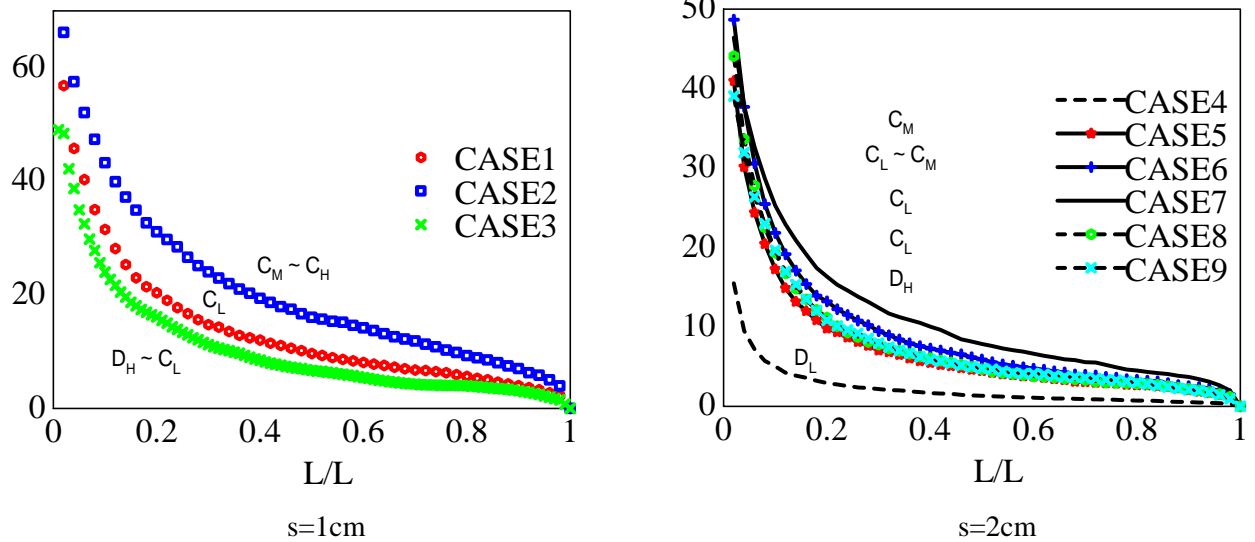


図 13 全 CASE の Rengers 曲線

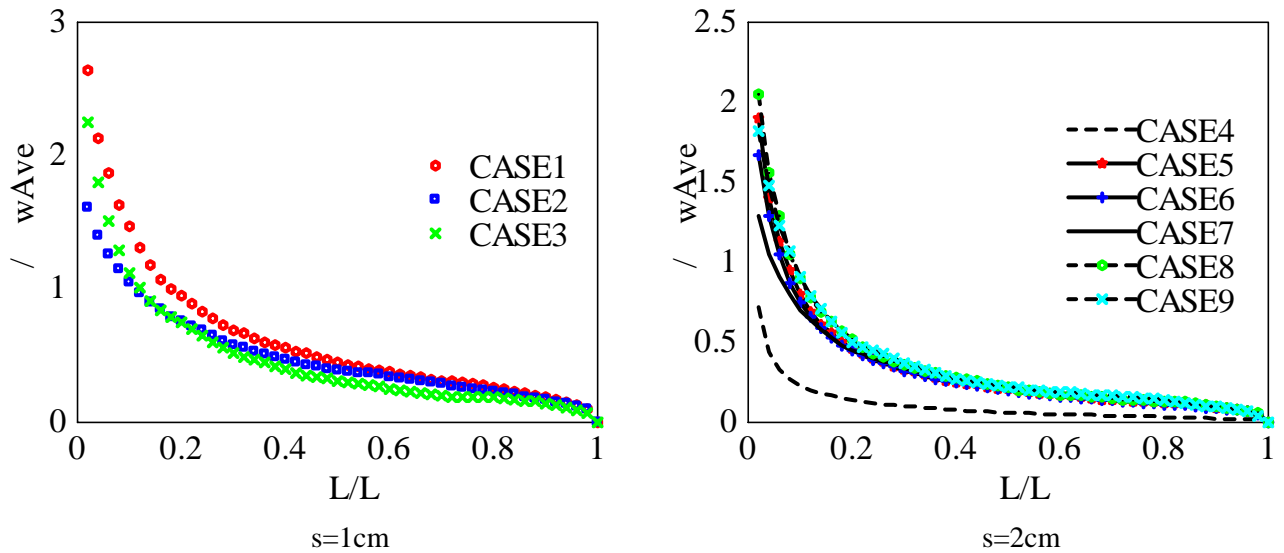


図 14  $w_{Ave}$  で正規化した Rengers 曲線

## 結論

岩石が摩擦性材料の場合のせん断破壊機構を上界計算により明らかにし、提案モデルの妥当性を確認した。

幾何形状とせん断方向に起因するせん断強度の異方性について示したが、不規則な不連続面の形状の場合は強度異方性が発現しないことを明らかにした。

実岩盤掘削面データの形状分析から、岩級のせん断抵抗角を用いて Rengers 曲線を正規化すると基準化できることを明らかにした。これにより、岩級によるラフネスの予測可能性が示された。

## 参考文献

- [1] Barton, N.R.: Review of a new shear-strength criterion for rock joints, Eng. Geol. Vol.7, pp.287-332, 1973.
- [2] Rengers, N.: The influence of surface roughness on friction properties of rock planes, Proc. 2nd Cong. ISRM, Belgrade, Vol.1, pp.1-31, 1970
- [3] 吉中龍之進・桜井春輔・菊池宏吉編著: 岩盤分類とその適用, 土木工学社, 1989
- [4] 尾澤知憲, 大塚悟, 土居正信, 廣崎大史: 岩盤亀裂のせん断機構とせん断強度モデルの検討, 第33回岩盤力学シンポジウム, 2004