

垂直剛性一定条件下における岩盤不連続面の一面せん断挙動モデルに関する実験的研究

京都大学 学生員 ○谷屋秀一  
 京都大学 正会員 岸田 潔  
 京都大学 フェロー 足立紀尚

1.はじめに レーザー変位計により計測された不連続面の離散化ラフネスデータをを用い、垂直拘束圧一定条件下(CNL: Constant Normal Load)における一面せん断挙動を推定するモデルの構築が行われた<sup>1)</sup>。本研究では、垂直剛性一定条件下(CNS: Constant Normal Stiffness)での一面せん断挙動を推定するため、モデルを拡張し、実験結果と比較し、解析モデルの適用性を検証する。また、基礎摩擦角が解析結果に与える影響を考察する。

2.解析モデル<sup>1)</sup> 1)解析モデルの概要 解析ステップ間隔は、ラフネス計測間隔と等しく、本稿では0.5mmである。

ステップN せん断変位(0.5×N)mm、ダイレーション角を $q_N$ と仮定する。 $q_N$ 以上の傾斜角のアスペリティのみが接触して、応力が集中していると考え。まず、接触するアスペリティの数Aを図1のようにLを計算し、Lの総和から求め、接触するアスペリティに作用する垂直拘束圧を次式によりもとめる。

$$s_n' = s_n \times T / A \tag{1}$$

ここで、 $s_n'$ は、接触部に集中する垂直応力、Tは計測点の総数である。

また、不連続面におけるすべりの条件から次式が成り立つ。

$$Q = P \tan f_b \tag{2}$$

ここで、 $f_b$ は基礎摩擦角である。

次に、式(2)と図2における接触面の力のつり合いとから、接触部分にかかる応力P,Qを求め、垂直応力Pが材料の一軸圧縮強度 $s_c$ 以下になる(この理由は、摩擦の凝着説により説明される<sup>2)</sup>)まで繰り返し計算を行い、 $q_N$ を決定する。 $q_N$ が求まると、次式よりせん断応力tが求まる。

$$t = s_n \tan(f_b + q_N) \tag{3}$$

ステップN終了後の計測点の座標 ステップNで決定した $q_N$ で、上部供試体を0.5mmせん断方向に移動させる。ただし、上、下供試体が重なる場合は、図3のように、重複部分が削れると考え、重なる部分の midpoint で接触するとする。

2)解析モデルの拡張 解析モデルをCNSに対応するように拡張する。CNSでは、せん断に伴い垂直拘束圧は逐次変化し、増分 $\Delta s_n$ は次式により求める。

$$\Delta s_n = k_n \Delta v \tag{4}$$

ここで、 $\Delta v$ はせん断に伴い発生するダイレーション、 $k_n$ は垂直剛性である。

また、解析ステップ間隔が0.5mmより、 $\Delta v$ は次式により求まる。

$$\Delta v = 0.5 \tan q_N \tag{5}$$

解析モデルにおいて、ステップNにおける垂直拘束圧 $s_{nN}$ は次式となる。

$$s_{nN} = s_{nN-1} + 0.5 \tan q_N \tag{6}$$

3.CNSの実験結果と解析結果との比較 1)CNSの実験結果 本稿におけるCNSの実験条件を表1に示し、実験結果一例を図4、図5に示す。なお、図5におけるせん断強度線は、CNLにおいて各垂直拘束圧下での不連続面のせん断強度をプロットし、直線回帰したものである。図4において、垂直剛性 $k_n=10000\text{MPa/m}$ の場合は、ピークが明確に現れている。ピーク時のせん断応力は、 $t=2.85\text{MPa}$ であり、図5において、応力経路がせん断強度線から離れる際のせん断応力に

キーワード：垂直剛性一定、基礎摩擦角、ラフネス

連絡先：〒606-8501 京都市左京区吉田本町 京都大学大学院工学研究科 TEL 075-753-5106

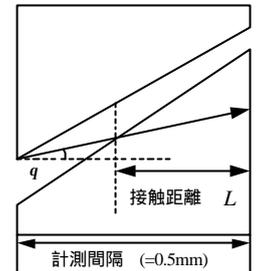


図1 ステップNにおけるA

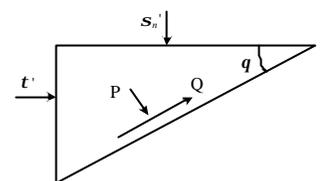


図2 接触するアスペリティにかかる応力

上部供試体と下部供試体の座標の midpoint で接触するとする

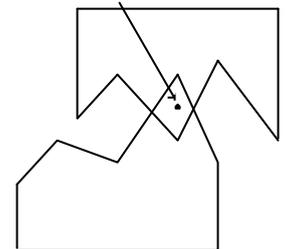


図3 ステップN終了後の座標

表1 実験条件

ラフネス	ラフネスA.F
初期垂直拘束圧 $s_n$ [MPa]	0.5
垂直剛性 $k_n$ [MPa/m]	500,1000
	5000,10000
材料強度 $s_c$ [MPa]	38.57
せん断変位 [cm]	4.0
基礎摩擦角 $f_b$ [°]	25.01
不連続面表面の面積 A [cm <sup>2</sup> ]	4.2×4.2

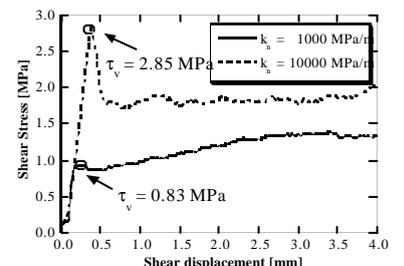


図4 せん断変位 - せん断応力関係 (ラフネスA, 材料強度 $s_c=38.57\text{MPa}$ )

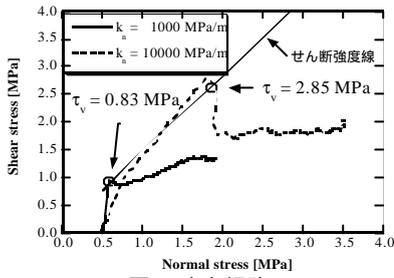


図5 応力経路  
(ラフネス A, 材料強度 $\sigma_c=38.57$ MPa)

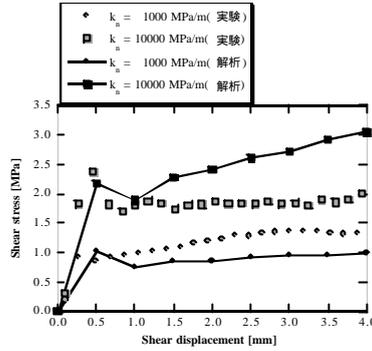


図6 せん断変位 - せん断応力関係  
(ラフネス A, 材料強度 $\sigma_c=38.57$ MPa)

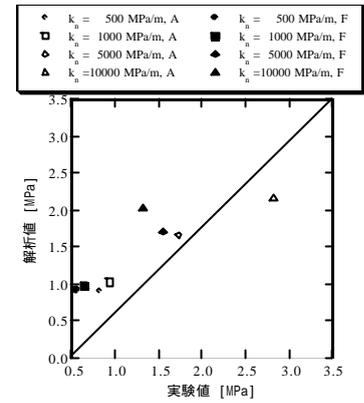


図7 実験結果と解析結果の比較  
(材料強度 $\sigma_c=38.57$ MPa)

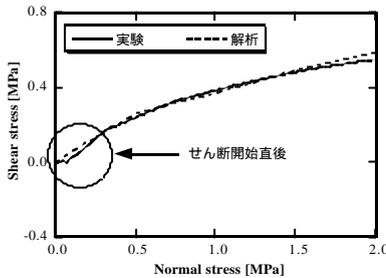


図8 せん断変位 - ダイレーション関係  
(ラフネス F, 垂直剛性 $k_n=1000$ MPa/m)

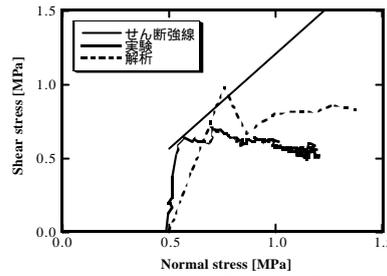


図9 実験と解析の応力経路  
(ラフネス F, 垂直剛性 $k_n=1000$ MPa/m)

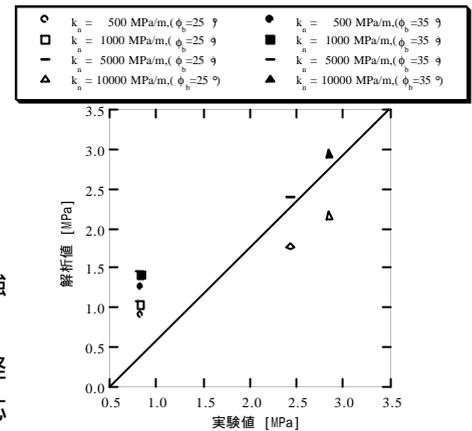


図10 基礎摩擦角の違いによる $\tau_v$ での比較

対応している．垂直剛性  $k_n=1000$ MPa/m において，応力経路がせん断強度線から離れる際のせん断応力は， $\tau_v=0.83$ MPa であり，図4 においては，勾配が大きく変化する点に対応する．以上から，CNS において，応力経路がせん断強度線から離れる際のせん断応力は，せん断変位 - せん断応力関係では，勾配が大きく変化する際のせん断応力に対応する．以下，このせん断応力を  $\tau_v$  と定義する．

2) 実験結果と解析結果の比較 実験結果と解析結果のせん断変位 - せん断応力関係を 図6，さらに， $\tau_v$  に着目して比較したものを 図7 に示す．図6 より，解析モデルはある程度のせん断挙動を表現できている．また，図7 より， $\tau_v$  は解析値の方が実験値より大きい傾向がわかる．この理由を以下のように考察する．

解析では，初期条件として上下不連続面は，完全にかみ合った状態からせん断を開始する．一方，実験では，完全にかみ合っていない．そのため，図8 に示すように，せん断開始直後のダイレーションは解析値のほうが実験値より大きい．式(4),(6)から，せん断初期において，実験の垂直拘束圧は解析値より大きくなる．このため，図9 のように，解析の応力経路は，実験の応力経路より，垂直拘束圧が大きいところでせん断強度線から離れる．これより， $\tau_v$  において，解析値は実験値より大きくなる．

4. 基礎摩擦角について 本研究で用いた供試体と過去に行われた実験<sup>1)</sup>の供試体とは同じ配合(セメント:砂:水 = 1:2.0:65)の材料であるが，供試体作成後に，前者は端面整形を行い，基礎摩擦角 $\phi_b$ は25°となり，後者は端面整形を行わず，基礎摩擦角 $\phi_b$ は35°であった．これより，基礎摩擦角は，端面整形の有無による供試体表面の粗さの違いにより大きく変わることがわかる．

各々の基礎摩擦角を用いた解析結果を $\tau_v$  について比較したものを 図10 に示す．図10 より，垂直剛性 $k_n=500, 1000$ MPa/m では， $\phi_b=25^\circ$  の方が， $k_n=5000, 10000$ MPa/m では， $\phi_b=35^\circ$  の方が精度がよい．また， $\phi_b$  が異なると $\tau_v$  は大きく異なる．そこで，基礎摩擦角を滑らかな不連続面の粗さまで考慮して求める必要がある．

5. まとめ 解析モデルを CNS に対応するように拡張し，ある程度せん断挙動を推定することができた．しかしながら，実験では，せん断初期において完全にかみ合っていないのに対し，解析では，完全にかみ合った状態からせん断を開始するため， $\tau_v$  において，解析値が実験値より大きくなった．そこで，解析においても，不連続面間の接触領域を考慮に入れてせん断を開始する必要がある．また，基礎摩擦角によりせん断挙動が大きく変化することから，基礎摩擦角を厳密に定義する必要がある．

(参考文献) 1) 岸田潔・津野究：摩擦とラフネスを考慮した岩盤不連続面の一面せん断挙動のモデル化，土木学会論文集，投稿中 2) 安原英明・岸田潔・足立紀尚：ラフネス計測結果を用いた不連続面せん断挙動の推定，第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.161-165, 2001.1