

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

大深度、大断面地下構造物を設計・施工する際、岩盤中に潜在的・顕在的に存在するクラックや節理等の不連続面の評価がより重要になる。本研究では、垂直拘束圧一定一面せん断試験(CNL: Constant Normal Load)および垂直剛性一定一面せん断試験(CNS: Constant Normal Stiffness)を行い、岩盤不連続面のせん断特性を正確に把握するため、実験結果を基に単一不連続面のせん断挙動について詳細な考察を行った。

2. 実験

1) 供試体

供試体材料には、モルタルとモルタルにカオリンを混入したものを用いる。供試体の不連続面は2種類の供試体材料に対してそれぞれラフネスA($JRC^{(1),2}=9.62$)とラフネスF($JRC^{(1),2}=11.81$)の2種類とした。

供試体の配合および材料試験により得られた一軸圧縮強度、弾性係数を表1に示す。

2) 実験結果

本実験で得られた結果から、垂直剛性 k_n がせん断挙動に及ぼす影響を検討するため、初期垂直拘束圧・ラフネスを同一にし、垂直剛性をパラメータとして考察を行う。図1は初期垂直拘束圧 $\sigma_n=0.5\text{MPa}$ 、カオリン無、ラフネスFの供試体の実験結果である。なお、図1(c)におけるせん断強度線および残留強度線は、図2に示すCNLの実験結果における各垂直拘束圧下での不連続面のせん断強度および最終せん断変位時(4mm)におけるせん断応力をプロットし、直線回帰したものである。

図1(a), (b)より、垂直剛性が大きくなるに従い、せん断応力は増加し、ダイレーションは減少する傾向を示す。また、図1(c)より、応力経路において、垂直剛性 $k_n=5000, 10000\text{MPa/m}$ の場合、応力経路はせん断強度線に沿って上昇しているのが確認できる。一方、垂直剛性 $k_n=500, 1000\text{MPa/m}$ の場合はせん断強度線に到達後、せん断強度線に沿って上昇することなく、すぐにせん断強度線から離れてしまうのが確認できる。

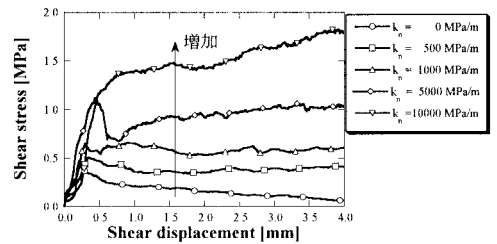
また、垂直剛性 $k_n=10000\text{MPa/m}$ において、垂直拘束圧の増加にかかわらずせん断応力が増加していない部分がある。これは、せん断によって生じた削れ粉が上部供試体と下部供試体の間で、ベアリングの効果を発揮するためと考える。

3. せん断挙動メカニズム

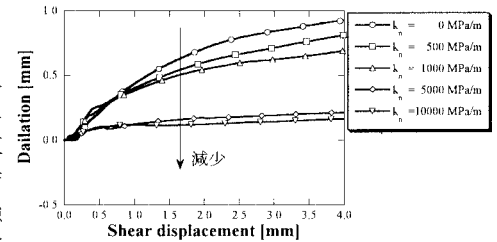
図3はCNSの実験結果の一例である。この図に示すように、不連続面のせん断挙動4つのStageに分割し、各々のStageにおけるせん断メカニズムについて考察を行う。

表1 供試体の配合と諸定数

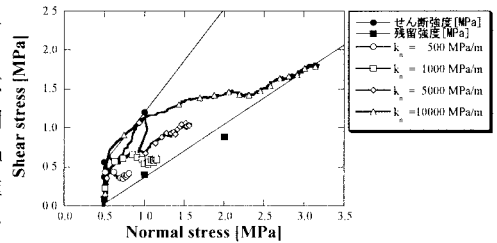
		カオリン無	カオリン有
配合重量比	セメント	1	1
	砂	2	2
	水	0.650	1.184
	カオリン	0	1
一軸圧縮強度 [MPa]		38.57	20.73
弾性係数 [MPa]		14170	8583



(a) せん断変位-せん断応力関係



(b) せん断変位-ダイレーション関係



(c) 応力経路

図1 CNS実験結果(カオリン無、ラフネスF)

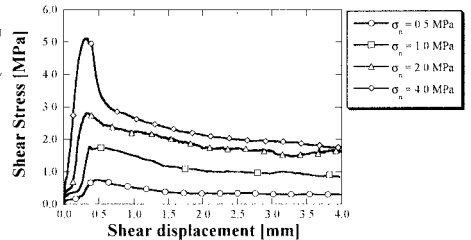


図2 CNL実験結果せん断変位-せん断応力関係
(カオリン無、ラフネスF)

せん断開始からダイレーションの負の値(ダイレーションは圧縮を負とする)が最大となる部分までを Stage1, せん断変位 - せん断応力関係において一定の勾配でせん断応力が増加する領域を Stage2, 勾配が変化した部分からせん断変位-せん断応力の勾配が大きく変わる点までの領域を Stage3, Stage3 から残留に至る領域を Stage4 とそれぞれ定義する。ここで, Stage2,3 の境界は, 図 3(c) の応力経路がせん断強度線に到達する際の応力状態に対応し, Stage3,4 の境界は, 図 3(c) の応力経路がせん断強度線から離れる際の応力状態に対応する。また, せん断挙動の各 Stage における模式図を図 4 に示す。

a) Stage1

せん断開始前において, 不連続面のラフネスは完全にかみ合った状態になっていない。そのため, 図 4 にあるように, 上部供試体は下部供試体上を滑り下がると思われる。これにより, その際に必要な水平方向の力は, Stage2 において必要な水平方向の力より小さいため, Stage1 におけるせん断変位-せん断応力の勾配は, Stage2 より小さい。

b) Stage2~Stage3

図 4 に示すように, 上部供試体のすべり上がりとアスペリティの削れの挙動がある。Stage2 では, すべりの挙動が卓越しているが, せん断が進むにつれてアスペリティの削れが次第に増えていき, Stage3 においては, 削れの挙動が卓越する。そのため, せん断変位 - せん断応力関係の勾配は Stage3 においては徐々に小さくなる。そして, せん断応力が徐々に大きくなり, ダイレーション角以上の角度を持つアスペリティが垂直拘束圧とせん断応力による力を支えきれなくなると一気に破壊する。

ここで, 応力経路がせん断強度線に沿って上昇する挙動を以下のように考察する。アスペリティの破壊が生じる時, 応力経路はせん断強度線から離れる。また, 垂直拘束圧が大きいほど, 上部供試体がすべり上がる際に必要なせん断応力も大きくなる。つまり, 応力経路がせん断強度線に沿って上昇している時は, 局所部分でのアスペリティの削れが生じていて, 垂直拘束圧の増加に伴い, 上部供試体がすべり上がるのに必要なせん断応力が増加している状態である。また, 垂直剛性によっては, 応力経路がせん断強度線に沿う挙動がない場合があるが, これは, 垂直剛性が小さいため, 垂直拘束圧の増加は小さくなり, せん断応力の増加も小さい状態で, アスペリティの破壊が起こり, せん断強度線から離れると考える。

c) Stage4

せん断変位 - せん断応力関係において, Stage4 でも, ダイレーションが増加していることより, アスペリティの破壊だけでなく, すべり上がり挙動も起こっている。このため, せん断応力は徐々に増加する。

4. まとめ

垂直剛性の違いにより, 応力経路において, せん断強度線上を沿って上昇する挙動があることが確認された。また, せん断挙動を Stage に分け, Stage ごとに卓越している力学的挙動を考え, せん断挙動メカニズムを考察した。

(参考文献) 1) Tse, R. and Cruden, D. M. : Estimating joint roughness coefficients, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 16, pp.303-307, 1979 2) Xianbin Yu and Vayssade, B. : Joint profiles and their roughness parameters, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 28, pp333-336, 1991

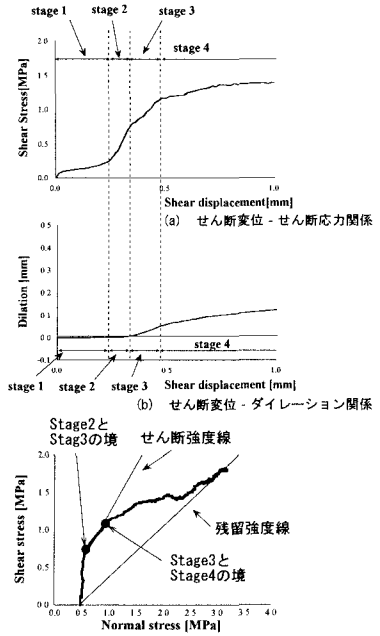


図 3 Stage 分類図

(カオリン無, ラフネス F, $\sigma_n=0.5\text{MPa}$, $k=10000\text{MPa/m}$)

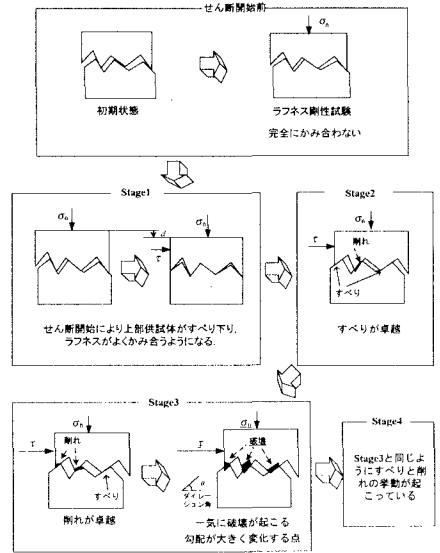


図 4 せん断挙動の各 Stage における模式図