

大阪大学工学部 学生員 ○守屋 明日香
大阪大学大学院 学生員 中原 拓郎

大阪大学大学院 正会員 谷本 親伯

1. はじめに トンネルなどの土木構造物の設計・施工の対象となる岩盤内には節理や層理などの不連続面が存在する。そのため、岩盤の力学的挙動は岩石の材料特性だけではなく、岩盤内に存在する不連続面の性質に大きく依存する。実際、岩盤の破壊は岩盤基質部の破壊によることは少なく、主に不連続面に沿ったせん断破壊によって生じることが多い。したがって、岩盤の力学的挙動を把握するためには、岩盤不連続面のせん断特性を解明することが重要な課題であると考えられる。岩盤の変形を評価するパラメータとして、岩盤不連続面の垂直剛性とせん断剛性がある。これらの指標は岩盤不連続面の変形しにくさを表すパラメータであり、不連続面の変形量に着目した指標である。本研究では、自然界に存在する不連続面を有する模擬岩(石膏、モルタル)を用いて、垂直拘束圧一定条件及びダイレイタンス拘束量一定条件での一面せん断試験を行い、垂直剛性、せん断剛性を算出し、岩盤不連続面のせん断特性を解明することを試みた。

2. 試験概要 本研究では、不連続面を有するボーリングコアから採取されたラフネスをシリコン印章材(ジーシーデンタルプロダクツ製)を用いて同じ形状のレプリカを複製し、不連続面を有する石膏供試体($q_u=57.33\text{MPa}$ 、底面は1辺5.15cmの正方形、高さは6cmの直方体)とモルタル供試体($q_u=42.88\text{MPa}$ 、形状は石膏供試体と同じ)を作製した。
i) ラフネスの定量化 岩盤不連続面のせん断特性はラフネスの形状に大きく依存しているため、ラフネスの形状を定量化する必要がある。本研究では2種類のラフネスを用意し、定量化に M_s 値を用いた。 M_s 値が大きいほどラフネスが粗いことを示す。 M_s 値の測定結果はラフネス A: 0.00178、ラフネス C: 0.00366 であった。

ii) 一軸圧縮試験 垂直剛性 K_n とせん断剛性 K_s を算出するのに必要な弾性係数とポアソン比を求めるため、供試体の応力-ひずみ関係を調べた。このとき、一面せん断試験装置の載荷可能な垂直荷重が20kNであることから、垂直荷重が20kNまでの応力-ひずみ関係を測定した。求めた弾性係数、ポアソン比を供試体の材料特性とあわせて表1に示す。

iii) 剛性の算出方法 垂直剛性 K_n は式(2-1)より求めた。一面せん断試験を行うとき、供試体には垂直応力が加わるため、供試体基質部においてひずみが生じる。垂直剛性を求める際に必要な不連続面の垂直変位量 t は、測定された垂直変位量 v から、供試体基質部の垂直ひずみ量を差し引いたものである。供試体に作用する垂直応力 σ を、不連続面の垂直変位量 t で除したものが垂直剛性 K_n である。ここで L_1 は供試体の長さである。せん断剛性 K_s は式(2-2)より求めた。一面せん断試験を行うとき、供試体には垂直応力とせん断応力が加わるため、供試体基質部において垂直方向および水平方向にひずみが生じる。せん断剛性 K_s は供試体に作用するせん断応力 τ を、測定されたせん断変位量 u から供試体基質部のせん断変位量を除いた不連続面のせん断変位量 s で除したものである。ここで G は剛性率、 L_2 はせん断箱から出ている供試体の長さから、垂直方向のひずみ量を除いたものである(図1参照)。

$$t = v - \frac{\sigma}{E} L_1, \quad K_n = \frac{\sigma}{t} \quad \cdots (2-1) \quad s = u - \frac{\tau}{G} L_2, \quad K_s = \frac{\tau}{s} \quad \cdots (2-2)$$

表1 供試体の材料特性

	石膏	モルタル
圧縮強度(MPa)	57.33	42.88
弾性係数(MPa)	8.03×10^{-3}	1.92×10^{-4}
ポアソン比	0.346	0.207
S波速度(km/s)	1.998	2.135
P波速度(km/s)	3.996	4.061

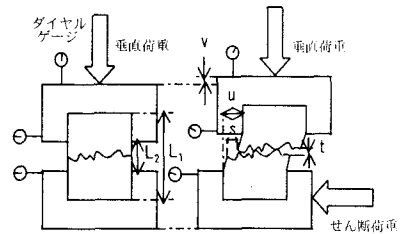


図1 一面せん断試験装置略図

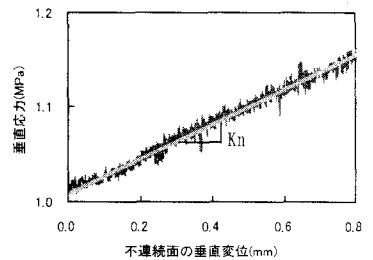


図2 不連続面の垂直変位と垂直応力の関係

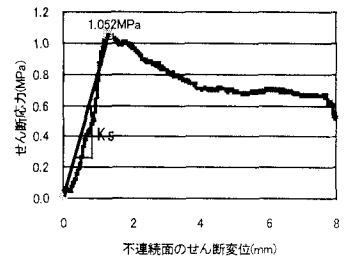


図3 不連続面のせん断変位とせん断応力の関係

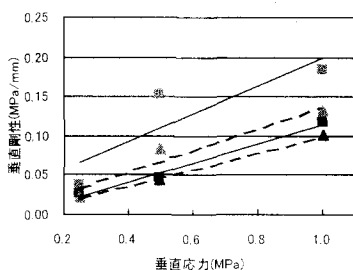


図4 垂直応力と垂直剛性の関係

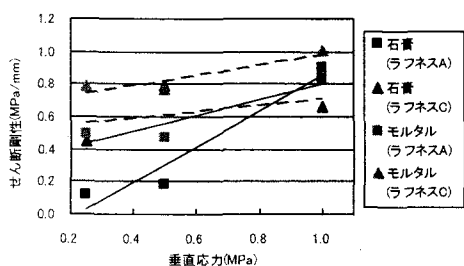


図5 垂直応力とせん断剛性の関係

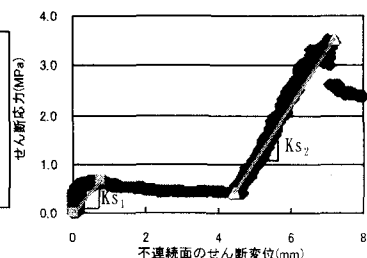


図6 不連続面のせん断変位とせん断応力の関係

iv) 一面せん断状態における剛性の算出(垂直拘束圧一定条件) 本試験では、供試体の不連続面に対して垂直方向に一定の拘束圧を与えた状態で一面せん断試験を行い、垂直応力、垂直変位およびせん断応力、せん断変位を測定した。測定は1秒毎に行い、水平変位の制御は毎分0.2mmとした。水平変位が8.0mmに達するまで測定を行い、載荷する垂直拘束圧は0.25MPa、0.5MPa、1.0MPaとした。使用した供試体の材質は石膏、モルタルで、ラフネスは2種類(ラフネスA、ラフネスC)を用いた。垂直拘束圧一定条件下での一面せん断試験の結果から垂直剛性とせん断剛性を求めた。図2は供試体不連続面に作用する垂直応力と、測定された垂直変位量から供試体基質部のひずみ量を差し引いた垂直変位量の関係を示した曲線である。垂直応力と垂直変位の関係はほぼ直線であるとみなせるため1次式で近似し、その傾きを垂直剛性とした。図3は供試体不連続面に作用するせん断応力と、測定されたせん断変位量から供試体基質部のひずみ量を差し引いた不連続面のせん断変位量との関係を示した曲線である。せん断剛性は、せん断応力-せん断変位曲線状の原点とピーク点を結び、その傾きをせん断剛性とした。垂直応力と垂直剛性の関係を図4に、垂直応力とせん断剛性の関係を図5に示す。

v) 一面せん断状態における剛性の算出(ダイレイタンスー拘束量一定条件) 本試験は、最初に一定の垂直拘束圧(0.25MPa)を載荷した状態でせん断を行う。せん断が進行するとともに生じるダイレイタンスーが事前に設定された値に達した時点より、垂直拘束圧を増加させることによってダイレイタンスーを一定に保つ。その状態で、せん断を行い、垂直応力、垂直変位とせん断応力、せん断変位を測定した。試験は、せん断変位が8.0mmに達するもしくは、垂直拘束圧が20kNに達するまで行った。使用した供試体の材質およびラフネスの形状は垂直拘束圧一定条件と同じである。垂直剛性は、ダイレイタンスーが拘束される前までの供試体不連続面の垂直応力と垂直変位の関係より、垂直拘束圧一定と同様にして算出した。図6は、ダイレイタンスー拘束条件一定の一面せん断試験におけるせん断応力-せん断変位の関係である。図6より、ダイレイタンスー拘束条件下では、せん断応力はダイレイタンスーが拘束されると、変化が小さくなり、その後再び増加し、せん断強度に達することがわかる。よって、ダイレイタンスーが拘束される前と、せん断応力が安定したのち、再び増加し、せん断強度に達するまでのせん断剛性を算出した前者をせん断剛性 K_{s1} 、後者をせん断剛性 K_{s2} とする。石膏供試体のダイレイタンスー拘束量とせん断剛性 K_{s1} 、せん断剛性 K_{s2} の関係を図7に、モルタル供試体のダイレイタンスー拘束量とせん断剛性 K_{s1} 、せん断剛性 K_{s2} の関係を図8に示す。

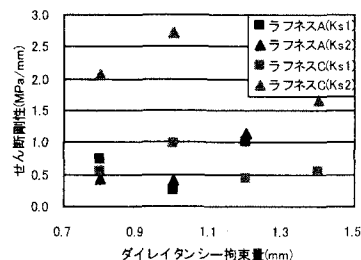


図7 ダイレイタンスー拘束量とせん断剛性の関係(石膏)

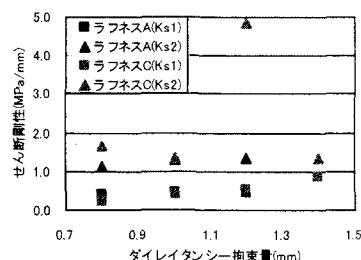


図8 ダイレイタンスー拘束量とせん断剛性の関係(モルタル)

3. まとめ 垂直拘束一定条件においては、①垂直応力が増加すると、垂直剛性、せん断剛性ともに増加した。②モルタル供試体の方が垂直剛性、せん断剛性ともに大きくなる傾向があった。③同じ材質では、表面形状の滑らかなラフネスAの方が垂直剛性が大きくなる傾向があり、表面形状の粗いラフネスCの方がせん断剛性が大きくなる傾向があった。ダイレイタンスー拘束量一定条件においては、④材質が同じ供試体では、せん断剛性 K_{s2} の方がせん断剛性 K_{s1} よりも大きな値を示した。

参考文献 1) 谷本親伯, 岸田潔, 梅澤孝行: 岩盤不連続面のせん断特性とラフネスに関する基礎的研究, 第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.206-210, 1992.