

京都大学大学院 学生員 ○ 安原 英明

京都大学大学院 正会員 足立 紀尚 岸田 潔

1. はじめに

本研究では、不連続面が水平に1本入った要素試験を基に不連続性岩盤の変形問題を連続弾性体で考察するのが目的である。まず、単一不連続面を含む一軸圧縮試験と、一面せん断試験から垂直剛性 k_n 、せん断剛性 k_s を求め、数値解析により求まる鉛直方向の弾性係数と水平方向の弾性係数 E_v, E_h と k_n, k_s の比較検討を行うことで要素レベルでの不連続体の連続体解析に関する考察を行う。

2. 室内試験による不連続面剛性の決定

不連続面の変形挙動を表す垂直剛性 k_n 、せん断剛性 k_s を室内試験より算定する。

一軸圧縮試験より垂直応力～不連続面の垂直変位関係の曲線を図1に表す。次に、不連続面かみ合わせの影響の最も少ないサイクルを取り出し図2に示す。この時、垂直剛性 k_n は接線勾配で表される。本研究では、特に図2に示すように初期接線勾配を垂直剛性 k_n とする。この垂直剛性の算定は、低垂直応力下であり供試体実質部分の変形がほとんど見られず不連続面のみの変形が現れる。そのため、供試体実質部分の変位量が算定されてなく、不連続面のみの変位量を求められない場合でも、供試体全体の変位量から算定される値を k_n として用いることが可能であると考えられる。

次に、一面せん断試験よりせん断剛性 k_s の算定方法を示す。試験よりせん断応力～せん断変位関係の曲線は、図3のように表される。この時せん断応力～せん断変位曲線においてせん断応力ゼロの点からせん断ピーク強度までの曲線を取り出し、その曲線を最小二乗法で直線近似し近似された直線の傾きをせん断剛性 k_s とする。図3に示す直線の傾きが k_s を示す。上述の算定方法により求まる k_n, k_s を用いて以下の解析を行う。

3. 有限要素法を用いた数値解析

上述の方法より求まる k_n, k_s を用いて水平に1本不連続面の入った供試体を考え、これを等価な異方性^[1]連続弾性体モデルに置き換える。連続体モデルの解析のパラメータとして鉛直、水平方向の弾性係数を設定し、ポアソン比は0.20の一定値とし、解析に用いた k_n, k_s を表1に示す。以下に解析手法を述べる。

4cm×4cmの正方形モデルを基礎の要素メッシュとし、まず等方性モデルとして鉛直、水平方向共に等しい弾性係数 E_v, E_h を設定する。設定された弾性係数に対して一軸圧縮試験における垂直応力～垂直変位の関係を図4に示す。この時、直線で現れるグラフの勾配として表される垂直剛性が一軸試験より求まる垂直剛性 k_n に等しくなるように繰り返し弾性係数を設定する。解析により算定された E_v, E_h の値を表2に示す。

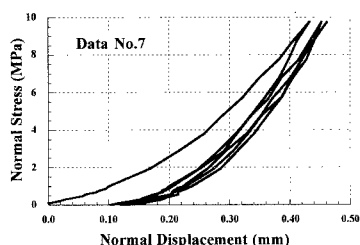
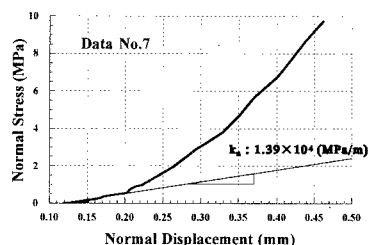
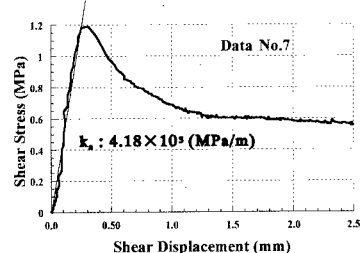


図1 試験結果の例

図2 垂直剛性 (k_n) の算出例図3 せん断剛性 (k_s) の算出例

鉛直方向の弾性係数 E_v を決定した後、水平方向の弾性係数 E_h の値を新たに設定することにより一面せん断試験のシミュレーションを行う。これにより得られたせん断応力～せん断変位の関係を図 5 に示す。この時、グラフの勾配で表されるせん断剛性が一面せん断試験より求まるせん断剛性 k_s に等しくなるように繰り返し弾性係数を設定する。その後、算定された E_v, E_h を用いて再び垂直応力～垂直変位曲線のシミュレーションを行う。解析上で算定された垂直剛性が試験からの垂直剛性 k_n と一致を見たとき計算は終了とし、一致が見られないとき再び鉛直方向の弾性係数 E_v を設定し直して一面せん断試験のシミュレーションから同様の作業を行う。解析により算定された E_v, E_h の値を表 3 に示す。

解析結果より、決定された鉛直、水平方向の弾性係数 E_v, E_h の値は垂直剛性 k_n 、せん断剛性 k_s と比例関係にあるといえる。よってこの考えに基づけば試験より垂直剛性 k_n 、せん断剛性 k_s が算定されれば等価な連続体モデルへの置き換えが可能となる。また、解析により決定された E_v と垂直剛性 k_n の比が約 4cm であるのは解析メッシュの大きさが 4cm×4cm の正方形モデルに起因していることは明らかである。

算出された水平方向の弾性係数 E_h は、鉛直方向の弾性係数 E_v の 1/10 以下もしくはそれに近い値を示しており、そのことを考慮すると E_v と垂直剛性 k_n の比は、等方性モデルにおける弾性係数 $E_v (=E_h)$ と垂直剛性 k_n の比と大きく異なった値を示すと考えられる。ところが、等方性モデルにおいて決定された弾性係数 $E_v (=E_h)$ と垂直剛性 k_n の比は約 $3.90 \times 10^{-2}(\text{m})$ であり、異方性モデルにおける鉛直方向の弾性係数と垂直剛性の比は約 $4.10 \times 10^{-2}(\text{m})$ とほとんど値の差はみられない。このことから、水平方向の弾性係数は鉛直方向の弾性係数の決定にそれほど影響を及ぼさないといえる。

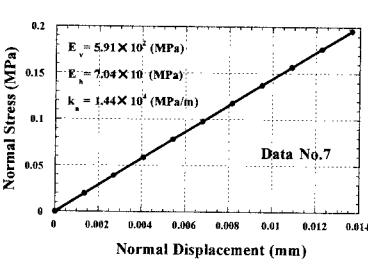


図 4 異方性モデルによる解析結果の例 (垂直応力～垂直変位関係)

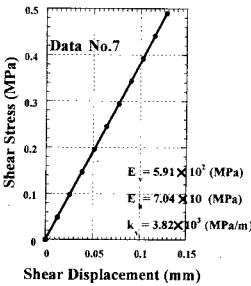


図 5 異方性モデルによる解析結果の例 (せん断応力～せん断変位関係)

表 1 供試体の不連続面剛性および物性値

供試体	乾燥単位体積重量 ρ (g/cm^3)	供試体実質部分の 弾性係数 $\times 10^2$ (MPa)	垂直剛性 k_n $\times 10^3$ (MPa/m)	せん断剛性 k_s $\times 10^3$ (MPa/m)
No.1	1.91	5.26	1.57	3.23
No.2	1.59	4.70	1.48	2.64
No.3	1.45	3.39	0.687	2.62
No.4	1.23	1.15	1.14	2.42
No.5	1.13	0.657	0.791	1.79
No.6	2.08	3.60	1.24	2.99
No.7	2.08	3.60	1.44	3.82

表 2 解析結果 (等方性モデル)

供試体	算定された弾性係数 $E_v (=E_h)$ $\times 10^2$ (MPa)	E_v / k_n $\times 10^2$ (m)
No.1	6.13	3.91
No.2	5.78	3.91
No.3	2.67	3.88
No.4	4.43	3.90
No.5	3.06	3.87
No.6	4.85	3.90
No.7	5.62	3.90

表 3 解析結果 (異方性モデル)

供試体	鉛直方向の弾性係数 E_v $\times 10^2$ (MPa)	水平方向の弾性係数 E_h $\times 10$ (MPa)	E_v / k_n $\times 10^2$ (m)	E_h / k_s $\times 10^3$ (m)
No.1	6.46	5.78	4.12	1.79
No.2	6.10	4.63	4.12	1.75
No.3	2.82	5.10	4.11	1.95
No.4	4.66	4.33	4.10	1.79
No.5	3.22	3.24	4.08	1.81
No.6	5.11	5.42	4.10	1.81
No.7	5.91	7.04	4.10	1.84

4. 結論および今後の課題

一軸圧縮試験、一面せん断試験より垂直剛性 k_n 、せん断剛性 k_s を算定し、等価な異方性連続弾性体モデルへの置き換えを試みた。また、今後の課題として以下のようなことが考えられる。

本研究ではポアソン比 0.20 と一定にして解析を行ったがポアソン比をパラメータとして設定した解析についての検討も必要であると考えられる。また、解析において連続体モデルの応力状態についての検討も行いたい。さらに、今回不連続面については水平 1 本の解析を行ったが、今後不連続面の傾きや不連続面数を考慮した解析を行い、異方性連続弾性体モデルへの置き換えを試みる。

参考文献 [1] R.E.グッドマン原著(赤井,川本,大西共訳): 不連続性岩盤の地質工学, pp.244-245