

岩盤不連続面に対するひずみ軟化型弾塑性モデル

八嶋厚¹・鷺見武富²・岡二三生³・足立紀尚³

¹正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²日本地質コンサルタント株式会社 (〒501-3133 岐阜市芥見南山2-4-26)

³正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

ジョイントを含む岩盤のせん断試験を行った場合、しばしば応力-変位の関係にひずみ軟化現象が観察される。このため、不連続性岩盤の変形挙動を検討する上で、ジョイントのひずみ軟化挙動を記述できるモデルの確立は大変重要となる。本論文では、応力履歴の導入によって、ひずみ軟化型不連続面モデルを誘導した。さらに、ジョイントの一面せん断試験の数値解析を通してモデルパラメータの決定法について検討した。その結果、提案モデルが不連続面のせん断応力-せん断変位関係を良く表現することを明らかにした。

Key Words : *strain softening, constitutive model, rock interface, numerical simulation*
direct shear test

1. 序 論

大部分の岩盤は節理や層理などの不連続面によって分断されている。このため、岩盤の力学的挙動は岩盤実質部よりも、むしろ不連続面の性質に左右される場合が多く、岩盤の力学特性を検討する上で、不連続面をいかに解析に取り込むかが重要な問題となる。

(1) 不連続性岩盤のモデル化手法

一般に、不連続性岩盤のモデルには不連続体モデルと等価連続体モデルがあり、それぞれに対する解析手法が提案されている。

等価連続体モデルは、不連続性岩盤をそれと等価な連続体に置き換えて解析する方法で、無数の小規模な亀裂が卓越する岩盤を対象としている。等価連続体モデルの解析には、クラックテンソル¹⁾や損傷テンソル²⁾などを導入する方法があり、いくつかの新しい方法も提案されている^{3),4)}。

これに対して、不連続体モデルは岩盤の不連続面を直接考慮して解析する方法であり、大規模な節理系や断層破砕帯に支配された岩盤を想定している。不連続体モデルの解析手法は、さらに大変形動的解析と微小変形静的解析に大別される⁵⁾。

大変形動的解析は任意のブロックの動的な運動を解析する手法であり、剛体あるいは弾性体ブロックをバネで結合させた個別要素法⁶⁾や剛体ブロックモデル^{7),8)}、

不連続変形解析^{9),10)}などがある。斜面ブロックの運動や落石解析、大規模地下空洞の挙動解析などに適用されている。一方、微小変形静的解析には剛体ばねモデル^{11),12)}やジョイント要素などがあり、主として静的な解析における不連続面の滑りの安定解析に用いられている。

微小変形静的解析のうち、ジョイント要素は岩盤不連続面を直接的にモデル化する手法として、Ngo and Sordelis³⁾によりFEMのソリッド要素の節点間に垂直バネおよびせん断バネ(結合要素)が導入された。また、Goodman et al.¹⁴⁾は、これらのバネ反力をソリッド要素と同様の変位関数を用いた厚みを持たないジョイント要素で表現した。これらは、基本的にバネモデルであり、垂直バネおよびせん断バネの工学的な値を決定する必要がある。また、ジョイント要素の厚さを零としているため、“ひずみ”という概念がない。従ってひずみをパラメータとする構成則が導入できない。その後、これらの欠点を補うため、Ghaboussi et al.¹⁵⁾やAydan et al.¹⁶⁾などによって、Goodmanらの要素を拡張した種々のジョイント要素が提案されている。ジョイント要素は不連続面モデルの最も基本的なものであり、FEM解析の一要素として他の二次元要素もしくは三次元要素と組み合わせて利用され、空洞、斜面、基礎など多くの岩盤力学の問題において実績がある。

(2) 岩盤不連続面のモデル化手法

不連続体モデルを用いて岩盤の数値解析を行う場

合、不連続面そのものの力学挙動をモデル化し、近似的にその挙動を表現するために構成モデルが必要となる。構成モデルは変形から破壊に到るまでを統一的に記述するものであり、逆に、構成モデルを通して全体像を把握することで複雑な力学挙動の本質を調べることも出来る。

不連続面の応力-ひずみの関係を表現する構成モデルの一般的なものには、弾性体モデルや弾・完全塑性体モデル、ひずみ硬化型およびひずみ軟化型弾塑性体モデルがある。

このうち、弾性体モデルは応力-ひずみの関係を線形で仮定する構成モデルであり、合理的な第一次近似として習慣的に用いられてきた。

弾・完全塑性体モデルは、変形が小さいうちは弾性を示し、降伏に至った後は応力が一定のままひずみが急激に増大する構成モデルである。実際の不連続面の挙動はひずみ硬化やひずみ軟化を生じるため、弾・完全塑性は解析上の仮定にすぎない。しかし、この仮定は弾性と塑性を応力-ひずみ曲線上で二分するので、両者の性質が地盤の変形にどのように影響するかを独立に調べることができ、また地盤内の破壊状態を特定する場合に便利である。

ひずみ硬化型弾塑性体モデルは、せん断変形が進行すると降伏曲面が拡大してせん断抵抗が大きくなる構成モデルである。降伏曲面、破壊規準、ひずみ硬化則、流れ則の存在を仮定している。せん断バネをバイリニア弾塑性として取り扱うものや、垂直バネに不連続の初期開口幅と閉合の非線形な関係を用いた例がある。

ひずみ軟化型弾塑性体モデルは、せん断変形とともに最大強度に達した後、せん断変形の進行に伴って降伏曲面が縮小し、せん断抵抗が小さくなって残留応力状態に達する構成モデルである。ひずみ軟化現象を応力-ひずみ関係そのものと捉え、それを記述するための多くの構成モデルが提案されてきた。しかし、これら従来のひずみ軟化型弾塑性体モデルを用いて連続体の有限要素解析を行う場合、剛性マトリクスが負になるため境界値問題を一意的に定義できないことや、解析結果が要素のメッシュサイズに依存してしまうという欠点が指摘されてきた。これに対して、足立・岡¹⁷⁾は記憶効果を持つ弾塑性論をもとに、ひずみに関する応力履歴の概念を導入し、解の一意性を満足する軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成モデルを誘導した。

本論文では、足立・岡の軟岩のひずみ軟化型弾塑性モデルを不連続面に拡張し、新たにひずみ軟化型弾塑性不連続面モデルを提案する。さらに、この構成モデルをジョイント要素に適用し、ジョイントの一面せん断試験の数値解析を通してモデルパラメータの決定法を考察する。

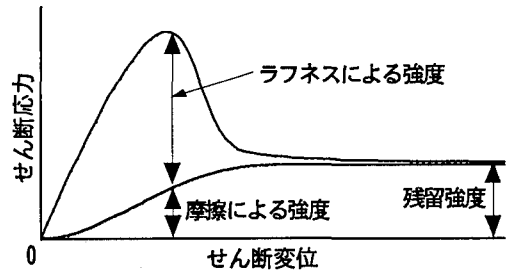


図-1 ひずみ軟化型応力-変位の関係

2. ひずみ軟化型不連続面モデル

提案モデルは、足立・岡が誘導した軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成モデルをジョイント要素に拡張したものであり、連続体モデル同様その極限としてひずみ硬化のみのモデルを含むことを特徴とする。ただし、導入したジョイント要素が厚みをもたないため、“ひずみ”の概念は存在せず、構成モデルは応力と“相対変位”の関係を記述するものとした。

モデルの誘導は次のような応力-変位曲線の物理的解釈に立脚している。まず、ジョイント要素の強度は、摩擦による成分とラフネスのせん断強さや充填物の粘着力による成分から成っていると考える。さらに、ラフネスによる強度の成分は変形とともに減少するが、摩擦による強度の発現は変位とともに増加してくると考える。やがて、ある応力状態でラフネスが全て破壊された時点でせん断力は摩擦による成分のみとなり、残留強度に落ち着く。図-1にひずみ軟化型の応力-変位関係を模式的に示す。提案モデルでは、この摩擦による応力成分を、変位に関する応力履歴として導入する。

(1) ジョイント要素の固有相対変位測定

ジョイントの全相対変位増分ベクトル $d\boldsymbol{\varepsilon}$ を弾性相対変位増分ベクトル $d\boldsymbol{\varepsilon}^e$ と塑性相対変位増分ベクトル $d\boldsymbol{\varepsilon}^p$ の和と仮定すると、ジョイントの応力増分ベクトル $d\boldsymbol{\sigma}$ はジョイント要素の剛性マトリクス D を用いて

$$d\boldsymbol{\sigma} = D \cdot d\boldsymbol{\varepsilon} = D(d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}^p) \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \tau \\ \sigma \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} k_s & 0 \\ 0 & k_n \end{pmatrix}, \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix}, \boldsymbol{\varepsilon}^p = \begin{pmatrix} u^p \\ v^p \end{pmatrix} \quad (2)$$

と表される。 τ はジョイントのせん断応力、 σ_n はジョイントの垂直応力、 u はジョイントの相対変位のせん断方向成分、 v はジョイントの相対変位の垂直方向成分、 u^p はジョイントの塑性相対変位のせん断方向成分、 v^p はジョイントの塑性相対変位の垂直方向成分、 k_s および k_n はジョイント要素の剛性パラメータである。

応力履歴ベクトル導入のために必要なジョイント要素の固有相対変位測定 z の増分 dz を次式で定義する。

$$dz = (du \cdot du + dv \cdot dv)^{1/2} \quad (3)$$

(2) 応力履歴ベクトル σ^* と核関数 K

ジョイントの応力ベクトルの全履歴ベクトル σ^* は現在の応力ベクトル σ と縮退応力ベクトル履歴 σ^* との和集合である。したがって、縮退応力ベクトル履歴は全応力ベクトル履歴から現在の応力を差し引いたものと定義づけ、連続体力学の表現法にならい次のように表す¹⁷⁾。

$$\sigma^*(x-z) = [\sigma(z), \sigma^*(x-z) \quad 0 < z' \leq z] \quad (4)$$

$$\sigma^*(x-z) = [\sigma(x-z) \quad 0 < z' \leq z] \quad (5)$$

また、応力履歴ベクトル σ^* (図-1の摩擦による強度成分に相当するもの) が固有相対変位測定 z に関する縮退応力ベクトル $\sigma^*(z)$ の線形汎関数で与えられるとすれば、一般に次式で表すことができる。

$$\sigma^* = \int_0^z K(x-z') \sigma(z') dz' \quad (6)$$

式(6)において、 $K(z)$ は連続有界な核関数であり、 $\partial K / \partial z < 0$ とする。ここでは、 $K(z)$ はスカラー量と仮定した。この仮定によって、応力履歴ベクトル σ^* は遠い過去の応力の影響が小さくなるいわゆる減退記憶の原理を満足する。また、ここでは簡単のため広義積分の定理より、積分区間を $0 \leq z' \leq z$ としている。

本研究で用いたひずみ軟化型ジョイントモデルでは、核関数 $K(z)$ として次の指数関数を採用した。この核関数中の β はジョイント要素の応力履歴パラメータである。

$$K(z) = \{\exp(-z/\beta)\} / \beta \quad (7)$$

したがって、応力履歴ベクトル σ^* は次式で与えられる。

$$\sigma^* = \frac{1}{\beta} \int_0^z \exp\{-z'/\beta\} \sigma(z') dz' \quad (8)$$

この場合も、応力履歴ベクトル σ^* は減退記憶の原理を満足する。なお、 β の値を小さくするほど、現在の応力ベクトル σ に対する応力履歴ベクトル σ^* の発現の遅れは減少して、 $\beta=0$ の場合には、 σ^* は σ に一致する。これはジョイントのせん断強度の発現が摩擦のみによる場合に対応する。

(3) 降伏関数とひずみ硬化パラメータ

降伏関数 f は、現在の応力ベクトル σ そのものには依存せず、応力履歴ベクトル σ^* とひずみ硬化パラメータ κ のみの関数であると仮定する。

$$f = \eta^* - \kappa = 0 \quad (9)$$

ここで、式(9)中の η^* は次式で与えられる応力比である。

$$\eta^* = \{(\tau^*/\sigma_n^*)(\tau/\sigma_n)\}^{1/2} \quad (10)$$

ただし、 τ^* は応力履歴ベクトルのせん断方向成分、 σ_n^* は応力履歴ベクトルの垂直方向成分を表す。

ひずみ硬化パラメータ κ の発展則は、ジョイントの塑

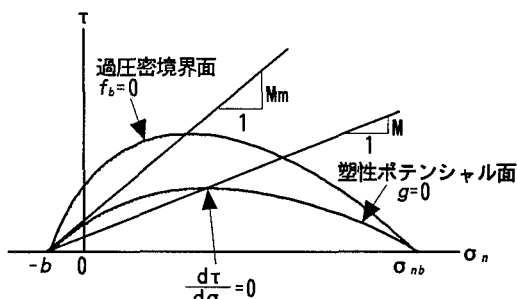


図-2 塑性ポテンシャル面と過圧密境界面

性相対せん断変位増分の蓄積 γ^*

$$d\gamma^* = (du^* \cdot du^*)^{1/2} \quad (11)$$

$$\gamma^* = \int d\gamma^* \quad (12)$$

を用いて、次の双曲線関数を適用した。

$$d\kappa = \{(M_r G') / (M_r^2 + G' \gamma^*)\} d\gamma^* \quad (13)$$

ここに、 M_r は残留せん断強度状態での η^* の値であり、 G' は双曲線型ひずみ硬化関数の初期接線勾配である。硬化関数の選択に関しては自由度があるが、ここでは足立・岡¹⁷⁾にならい、2つのパラメータを用いて表現されるモデルとして軟岩のひずみ軟化型モデルに用いられた双曲線関数を仮定した。

(4) 塑性ポテンシャル関数と過圧密境界面

ひずみ増分に関する流れ則を、ジョイントの塑性相対変位増分についても適用すると、

$$d\epsilon^* = \Lambda (\partial g / \partial \sigma) \quad (14)$$

ここで、 g は塑性ポテンシャルであり、図-2に示すパラメータ σ_{nb} と b を用いて次式のように仮定される。

$$g = \eta + M \ln \{(\sigma_n + b) / (\sigma_{nb} + b)\} = 0 \quad (15)$$

ここで、応力比 η は次式で与えられる。

$$\eta = \left[\frac{\tau}{\sigma_n + b} \cdot \frac{\tau}{\sigma_n + b} \right]^{1/2} \quad (16)$$

なお、式(15)中の M は後出の式(18)、(19)で与えられる。

次に、塑性ポテンシャル関数の変化しうる限界を規定する関数 f_b を導入する。この関数 f_b は、軟岩のひずみ軟化型モデルにおける過圧密境界関数に相当するもので、ジョイントに対しても便宜上、過圧密境界関数と呼ぶことにする。すなわち、過圧密境界面の内側 ($f_b < 0$) ではジョイントは過圧密的な挙動を示し、その外側 ($f_b \geq 0$) では正規圧密的な挙動を示す。ここでは、 f_b は次式で定義づけられると仮定する。

$$f_b = \eta + M_m \ln \{(\sigma_n + b) / (\sigma_{nb} + b)\} \quad (17)$$

ここに、 M_m はせん断過程において最大の垂直圧縮応力が発生するときの η の値である。このような過圧密境界関数の導入により、式(15)の M の値は、 $f_b < 0$ においては、

$$M = -\eta / \ln \{(\sigma_n + b) / (\sigma_{nb} + b)\} \quad (18)$$

表-1 モデルパラメータの特性の検討に用いた設定値

k_s	10GN/m ³
k_n	10GN/m ³
β	0.1
σ_{nb}	15MPa
b	4MPa
G'	100
M_f	1.0

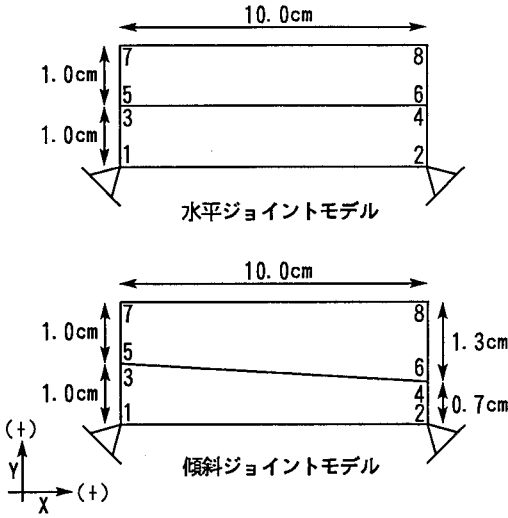


図-3 解析メッシュモデル

$f_b \geq 0$ では,

$$M = M_m \quad (19)$$

と与えられるものとする。なお、式(17)から明らかなように、過圧密領域における M の値は、現在の応力状態 σ_n と材料定数 b 、 σ_{nb} がわかれば、自動的に決定される。

3. モデルパラメータ特性とその決定法

提案したひずみ軟化型不連続面モデルには、 k_s および k_n (剛性パラメータ)、 β (応力履歴パラメータ)、 σ_{nb} および b (塑性ポテンシャルパラメータ)、 G' (ひずみ硬化パラメータ)、 M_f (破壊応力比)、 M_m (過圧密境界面パラメータ)の8個のモデルパラメータが含まれる。本論文で対象としたジョイントの垂直応力の大きさと σ_{nb} の関係より、 f_b が常に負の状態にあるので、 M_m の値はモデルの予測結果に影響を与えない。したがって本論文では $M_m = M_f$ と置いて、 M_m を除く7個のモデルパラメータについてそれらの特性と決定法を考察する。

(1)モデルパラメータ特性の解析

まず、各モデルパラメータを通常取り得る範囲内で変化させ、数値解析結果に及ぼす影響の度合について検討を行った。

解析モデルには、図-3に示す2種類のメッシュモデルを用いた。水平ジョイントモデルは、ジョイント要素と変位ベクトルが平行するモデルである。一方、傾斜ジョイントモデルは、ジョイント要素が変位ベクトルと斜交するモデルである。これらのモデルは8節点、3要素の2次元モデルであり、要素1-2-4-3と要素4-6-8-7はソリッド要

素、要素3-4-6-5はジョイント要素である。解析では節点5と7にX方向(水平方向)の変位を与えた。なお、数値解析結果を安定させるため、1ステップあたりの水平変位の増分は0.0001cmとした。

解析ではパラメータを仮に表-1の様に設定し、6つのパラメータを固定した状態で残りのパラメータを設定値の5倍と1/5倍に変化させた。その結果、数値解析結果は k_s 、 β 、 G' 及び M_f の変化に敏感に反応することが判明した。一方、 σ_{nb} と b の変化は、表-1の設定値のもとでは数値解析結果にあまり影響を与えていない。また、 k_n については、パラメータの性質上、ジョイント要素と変位ベクトルが平行する場合には解析結果に無関係であり、ジョイント要素と変位ベクトルが斜行する場合でも程度大きな値を与えれば解析結果にほとんど影響しないことが判明した。図-4は、垂直応力が1MPaの水平ジョイントモデルについて、モデルパラメータが数値解析結果に関わる様子を示したものである。ただし、数値解析結果に影響を与えない k_n に関しては、図を省略した。以下、各モデルパラメータについて詳しく見る。

k_s : このパラメータを増加させるとピーク強度は大きくなり、逆にピーク変位は小さくなる。その結果、せん断応力-水平変位曲線のピーク部分の曲率は k_s の増加とともに大きくなり、軟化の程度が大きくなる。

β : このパラメータを増加させるとピーク強度、ピーク変位ともに大きくなる。その結果、軟化の程度は β の増加とともに大きくなるが、せん断応力-水平変位曲線のピーク部分の曲率はあまり変化しない。一方、 β を減少させていくと、軟化の程度が小さくなって行き、 $\beta=0.01$ 付近で軟化が殆ど消滅する。

G' : このパラメータを増加させるとピーク強度、ピーク変位ともに大きくなる。その結果、軟化の程度は G' の増加とともに大きくなり、せん断応力-水平変位曲線はより脆性的となる。

M_f : このパラメータを増加させるとピーク強度、ピーク変位ともに大きくなり、せん断応力-水平変位曲線はより延性的となる。ただし、軟化の程度に大きな変化は認められない。

σ_{nb} : 設定値とその5倍値のせん断応力-水平変位曲線はほぼ一致する。これに対して、設定値の1/5倍値

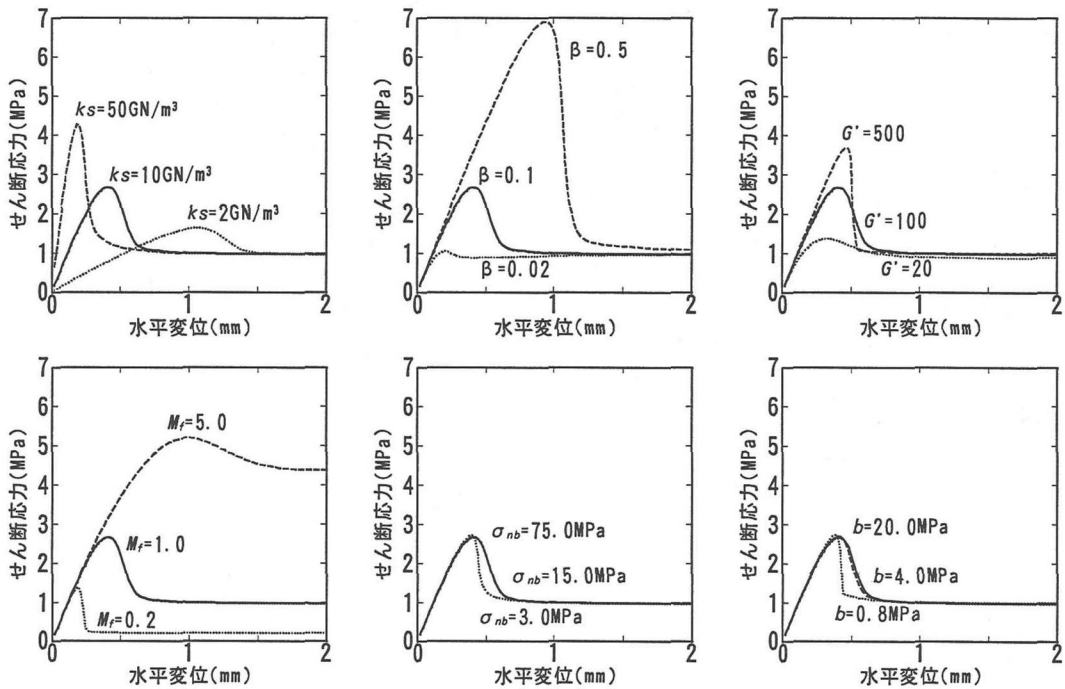


図-4 モデルパラメータの変化が数値解析結果に及ぼす影響

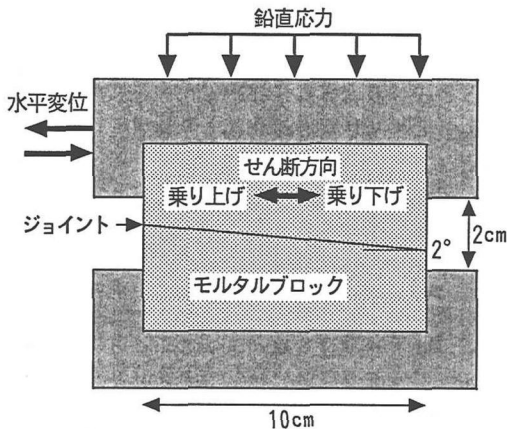


図-5 西川の一面せん断試験概略図

の解析結果はピーク強度が僅かに大きくなり、せん断応力-水平変位曲線はやや脆性的となる。

b: 設定値とその5倍値のせん断応力-水平変位曲線は一致する。これに対して、設定値の1/5倍値の解析結果はピーク強度が僅かに大きくなり、せん断応力-水平変位曲線はやや脆性的となる。

傾斜ジョイントモデルによる解析でも、同様な結果が得られた。

次に、解析結果に大きく影響する k_s 、 β 、 G' および M_r について、ジョイントの一面せん断試験の数値解析を通し

てパラメータ特性の検討を行った。

解析対象には、西川¹⁹⁾が実施したセメントモルタルジョイントの一面せん断試験結果を用いた。

西川は、同一ラフネスを持つジョイントの応力-変位関係を調べるため、花崗岩の割裂面から型どりしたセメントモルタル供試体を複数個作成している。供試体は直径100mm、高さ20mmの円盤型で、円盤の中位にジョイントが存在する。別途行われた一軸圧縮試験によるセメントモルタルの圧縮強度と剛性はそれぞれ36.7MPa、5.086GPaであった。

西川の作成したジョイントは0.6193~0.8698のラフネス指数(RSRI)¹⁹⁾を持ち、せん断方向に対して2度の傾きを持つ。一面せん断試験はこの傾きに対して乗り上げ方向と乗り下げ方向の2方向について実施されている(図-5)。

せん断試験は鉛直応力一定で行われ、初期鉛直応力 σ_v は0.5MPa、1.0MPa、2.0MPa、4.0MPaに設定された。せん断荷重の载荷はせん断変位速度制御方式で行われ、せん断変位速度は1mm/minであった。また、せん断変位量は最大11mm程度であった。同一鉛直応力条件下で、前述した2方向のせん断が行われ、1つの供試体につき3回の繰り返しせん断が行われた。試験結果は水平応力-水平変位曲線で表現されており、解析には、これをジョイントについてのせん断応力-せん断変

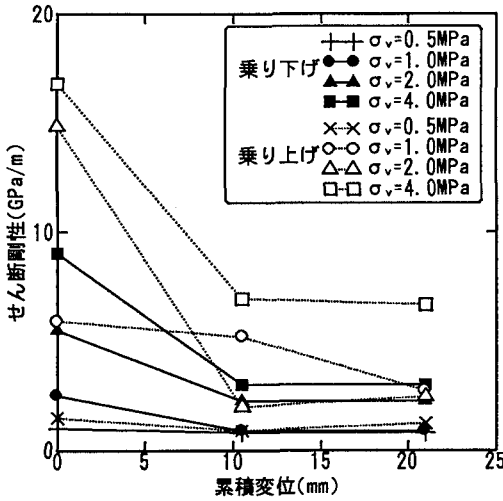


図-6 モルタルジョイントの垂直応力とせん断剛性の関係¹⁰⁾

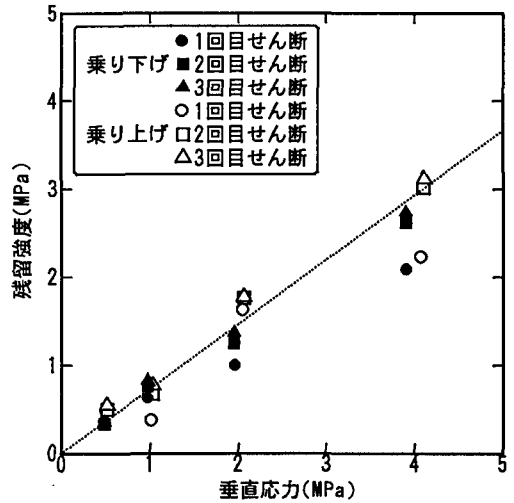


図-8 モルタルジョイントの垂直応力と残留強度の関係¹⁰⁾

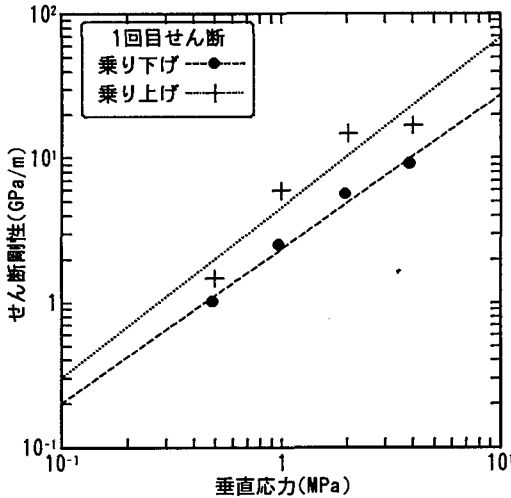


図-7 モルタルジョイントの累積変位せん断剛性の関係¹⁰⁾

位曲線に変換したものを用いた。

解析モデルには、実験供試体形状を考慮して図-3の傾斜ジョイントモデルを用いた。このモデルは要素3-4-6-5がジョイント要素であり、X軸に対して2度の傾きを持つ。乗り下げ方向せん断の解析では節点5と7に正のX方向変位を与え、逆に、乗り上げ方向せん断の解析では節点6と8に負のX方向変位を与えた。解析結果を安定させるために、1ステップあたりの水平変位の増分量は0.0001cmとした。

なお、 k_n と σ_{nb} および b は表-1の設定値近傍では解析結果に殆ど影響を及ぼさないことから、解析ではこれらのパラメータを次ぎのように設定した。

$$k_n = k_s \quad (20)$$

$$\sigma_{nb} = 15 \text{ MPa} \quad (21)$$

$$b = 4 \text{ MPa} \quad (22)$$

また、本研究の目的が不連続面モデルの検討であることから、ソリッド要素の過度の変形を抑えるため、インタクト部分の剛性に関しては一軸圧縮試験で得られた値の5倍程度の値($E=25.0 \text{ GPa}$, $\nu=0.25$)を与えた。

a) せん断剛性パラメータ k_n の検討

k_n はジョイントのせん断変形特性を表し、せん断応力-せん断変位曲線の勾配として求められる。Yoshinaka and Yamabe²⁰⁾は、最少二乗法で求めた岩石ジョイントのせん断剛性と垂直応力の関係が一般に両対数座標軸上ではほぼ直線になることを見出している。図-6に示したように、西川のジョイント一面せん断試験においても、乗り上げ、乗り下げ両方向の1回目せん断でその傾向が認められた。

図-7は累積変位とせん断剛性の関係を通常座標軸上にプロットしたものである。変位11mmが2回目のせん断初期に相当し、22mmが3回目のせん断初期に相当する。この図は、変位の進行とともにせん断剛性が小さくなることを示している。特に垂直応力が大きい場合には、1回目せん断と2回目せん断の間にせん断剛性の大幅な低下が認められ、その後の剛性に大きな変化は見られない。一方、垂直応力が小さい場合には、変位の進行に伴うせん断剛性の減少はわずかである。このような、せん断剛性の変化様式の違いは、ラフネスの破壊の程度によって説明できる。すなわち、垂直応力が大きい場合には、1回目せん断でほとんどのラフネスが破壊されてしまい、2回目以後のせん断時にラフネスの新たな破

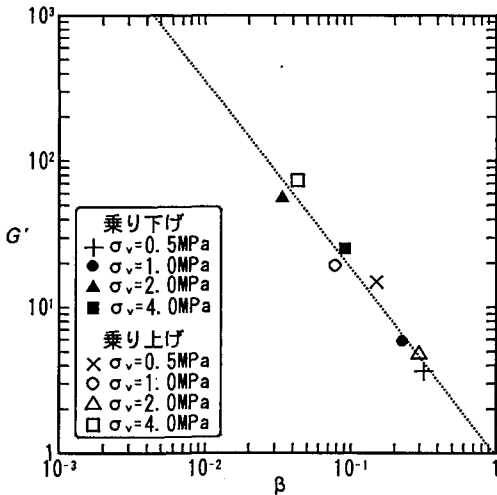


図-9 モルタルジョイントの最も再現性の良い β と G' の関係

壊は生じない。これに対して、垂直応力が小さい場合にはせん断時にラフネスがあまり破壊されず、乗り越えが起こっていたと考えられる。

b) 破壊応力比 M_f の検討

M_f は残留強度状態の応力比(残留せん断強度を垂直応力で除したもので表され、平滑なジョイントの摩擦係数に相当する。

図-8は残留せん断強度と垂直応力の関係を通常座標軸上に描いたものである。1回目せん断の残留強度がやや小さい値を示すが、2回目と3回目のせん断時のプロットは、乗り上げ方向と乗り下げ方向とも原点を通る1本の直線上に位置する。これは、ジョイントの残留せん断強度状態の応力比すなわち破壊応力比 M_f が、せん断方向と垂直応力に係わりなく一定の値であることを示している。西川の作成したモルタルジョイントの応力比 M_f は図-8の直線の勾配で表され、0.73となる。

なお、1回目せん断時の残留応力が相対的に小さい値を示したのは、破碎されたラフネスの粉末がジョイント内に残留し、滑材の役割を果たしたためと判断される。

c) 応力履歴パラメータ β およびひずみ硬化パラメータ G' の検討

β はジョイント面のラフネスの破壊の程度、つまり軟化の程度を表すパラメータである。 $\beta=0$ の場合には、応力ベクトル σ と応力履歴ベクトル σ^* は一致し、応力-変位関係はピークを持たない双曲線型となる。これは、ラフネスの噛み合わせによる強度が存在せず、摩擦による強度のみが発現している状態に相当する。また、 $\beta=\infty$ はラフネスの噛み合わせが強く、ラフネスの破壊が生じない場合に相当する。したがって、変位が進行しても挙

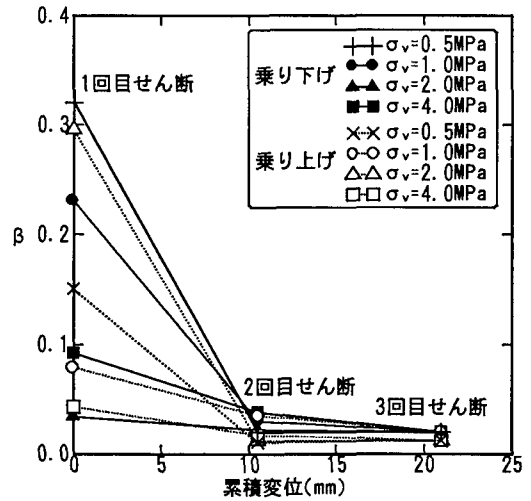


図-10 モルタルジョイントの累積変位と β の関係

動は弾性的である。

一方、 G' は双曲線型ひずみ硬化関数の初期接線勾配を表す。

図-9は、1回目せん断について、数値解析結果と実験結果が目測により最も合致していると判断された β と G' の関係を、両対数座標軸上にプロットしたものである。乗り上げ、乗り下げ両方向ともプロット点は概ね1本の直線上に載る。図が煩雑になるためここには描かなかったが、同様にして求めた2回目と3回目せん断試験の β と G' にも1回目とほぼ同等の傾向が認められた。このことは、モデルパラメータの決定に際して、 β あるいは G' のいずれか一方を決めれば、他方の値はごく限られた範囲に限定できることを表している。

図-10は、 β と累積変位の関係を通常座標軸上にプロットしたものである。変位11mmが2回目のせん断初期に相当し、22mmが3回目のせん断初期に相当する。同図をみると、 β は変位の進行、すなわちラフネスの破壊とともに減少することがわかる。特に、1回目せん断と2回目せん断の間に β の大幅な減少が認められ、その後の β に大きな変化はみられない。

(2) モデルパラメータ決定法

前節のモデルパラメータ特性の検討結果をもとに、ひずみ軟化型不連続面モデルを用いた数値解析を行う場合のモデルパラメータの決定法について考察する。

なお、ここではジョイントが充填物を持たない場合を想定している。

a) せん断剛性パラメータ k_s の決定法

初期の k_s はジョイントのせん断試験により求める。あるいは、一般に初期せん断剛性と垂直応力の関係が両

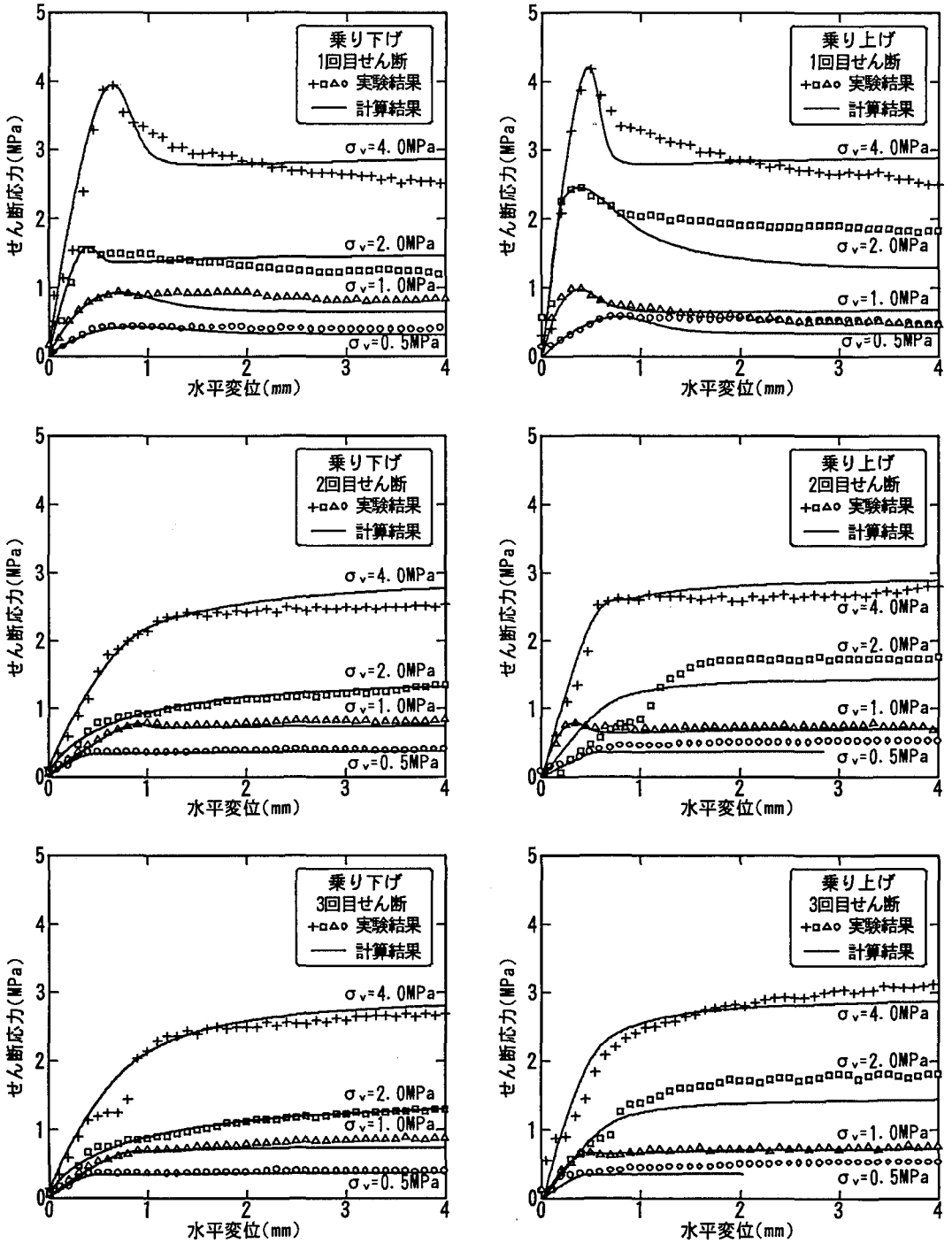


図-11 モルタルジョイントのせん断試験結果¹⁸⁾と数値解析結果の比較

対数座標軸上でほぼ直線になることを利用して、異なる垂直応力で行われたせん断結果から推定する。変位の進行すなわちラフネスの破壊とともに減少するパラメー

タである。

b) 垂直剛性パラメータ k_n の決定法

k_n の変化は解析結果に殆ど影響を与えない。従って、

ジョイント要素と変位ベクトルの幾何学的関係を問わず、提案モデルを用いた解析では $k_n = k_s$ として問題はない。

c)破壊応力比 M_f の決定法

ジョイントのせん断試験から、残留せん断強度と垂直応力の比として求める。このパラメータは、インタクト材料固有のパラメータであり、平滑なジョイントの基本摩擦角の正接に相当する。岩石の基本摩擦角は、岩石の種類ごとに比較的限られた範囲にあり、経験値から推定することもできる。

d)応力履歴パラメータ β およびひずみ硬化パラメータ G' の決定法

まず、ジョイントのせん断試験の数値シミュレーションにより、 β と G' の関係を求める。この場合、両者の関係は両対数座標軸上で直線になることが予想される。次に垂直応力と β (あるいは G')の関係などから初期の β (あるいは初期の G')を推定し、先に求めた β と G' の関係から G' の初期値(あるいは β の初期値)を推定する。これらのパラメータは、変位の進行すなわちラフネスの破壊とともに変化するパラメータである。西川の実験に関しては、 β は変位の進行とともに減少し、最終的には0.01付近に落ちつく傾向がみられた。

e)塑性ポテンシャルパラメータ σ_{nb} と b の決定法

表-1の設定値近傍では、 σ_{nb} と b の変化は数値解析結果にあまり影響を与えない。従って、ここでは設定値を用いた。

以上の方法により決定したモデルパラメータを表-2に示し、数値解析結果を図-11に示す。ただし、本来せん断とともに変化するパラメータ k_s と G' および β については、解析の都合上、各回のせん断過程で一定として解析した。せん断1回目の計算結果は、ひずみ軟化挙動を定量的に良く再現している。また、せん断2回目から3回目へと進むにつれて、ひずみ軟化が顕著でなくなり、ひずみ硬化のみが現れる様子が良く再現されている。岩盤すべりの場合、1回目せん断が処女すべりに相当し、2回目、3回目せん断が2次、3次すべりに相当する。

4. モデルパラメータ特性を考慮したジョイントせん断試験の数値解析

前章で考察したモデルパラメータ決定法の汎用性を検討するため、実際の岩石のジョイント一面せん断試験結果のシミュレーションを試みた。

解析には、(社)地盤工学会岩の力学委員会²¹⁾のジョイント一面せん断試験結果を用いた。この試験は、曲げ载荷して人工的に作成されたジョイントを持つ安山岩ブロックを対象としたものである。せん断面の寸法は15cm×45cmで、ラフネスの度合いを表すJRC値²²⁾は最も粗い20程度であった。試験は垂直応力を0.20MPa、0.79MPa、

表-2 数値解析に用いたモデルパラメータ

		σ_v	k_s	k_n	M_f	β	G'	σ_{nb}	b
乗り 下 げ 方 向 せ ん 断	1 回 目	0.5	1.00	1.00	0.73	0.320	3.6	4.0	15.0
		1.0	2.50	2.50		0.230	5.7		
		2.0	5.50	5.50		0.034	55		
		4.0	8.99	8.99		0.092	25		
	2 回 目	0.5	0.80	0.80	0.73	0.020	80	4.0	15.0
		1.0	0.90	0.90		0.030	150		
		2.0	2.55	2.55		0.022	12		
		4.0	3.00	3.00		0.038	20		
	3 回 目	0.5	0.80	0.80	0.73	0.020	80	4.0	15.0
		1.0	0.90	0.90		0.020	100		
		2.0	2.55	2.55		0.020	10		
		4.0	3.00	3.00		0.020	20		
乗り 上 げ 方 向 せ ん 断	1 回 目	0.5	1.48	1.48	0.73	0.150	14.7	4.0	15.0
		1.0	5.92	5.92		0.079	19		
		2.0	14.80	14.80		0.295	4.7		
		4.0	16.78	16.78		0.043	73		
	2 回 目	0.5	0.90	0.90	0.73	0.010	350	4.0	15.0
		1.0	5.18	5.18		0.035	40		
		2.0	1.98	1.98		0.012	75		
		4.0	6.92	6.92		0.017	90		
	3 回 目	0.5	1.22	1.22	0.73	0.012	200	4.0	15.0
		1.0	2.71	2.71		0.020	70		
		2.0	2.46	2.46		0.012	80		
		4.0	6.66	6.66		0.012	75		

σ_v :MPa k_s, k_n :GPa/m σ_{nb}, b :MPa

3.73MPa、7.27MPaの4段階に変化させて行われ、変位速度は4.5mm/minであった。今回の解析には垂直応力0.20MPaと0.79MPaおよび3.73MPaの試験結果を用いた。解析は次の手順で行った。

- ① 垂直応力0.20MPaと3.73MPaの場合のせん断試験結果から、両垂直応力におけるモデルパラメータを求める。
- ② モデルパラメータの決定法にない、垂直応力が0.20MPaと3.73MPaのパラメータから垂直応力0.97MPaのパラメータを推定する。
- ③ ②で推定したモデルパラメータを用い、垂直応力0.79MPaのときのせん断応力-せん断変位曲線を計算により求める。
- ④ 実験結果と③の計算結果を比較検討する。

なお、解析メッシュモデルには図-3の水平ジョイントモデルを用いた。

一般に初期せん断剛性と垂直応力の関係が両対数座標軸上でほぼ直線になることを用いて、垂直応力が0.20MPaと3.73MPaにおける初期せん断剛性から、垂直応力が0.79MPaのときの初期せん断剛性を求めると、 $k_s = 2.92$ GPa/mとなる。

また、垂直応力0.20MPaと3.73MPaにおける残留強度を通常座標軸上にプロットすると、原点を通る1本の直線上にほぼ載り、その直線の勾配は1.05である。従って、この安山岩は $M_f = 1.05$ と決定した。

垂直応力0.20MPaと3.73MPaの場合について、実験結果と数値解析結果が目測により最もよく合致する β と

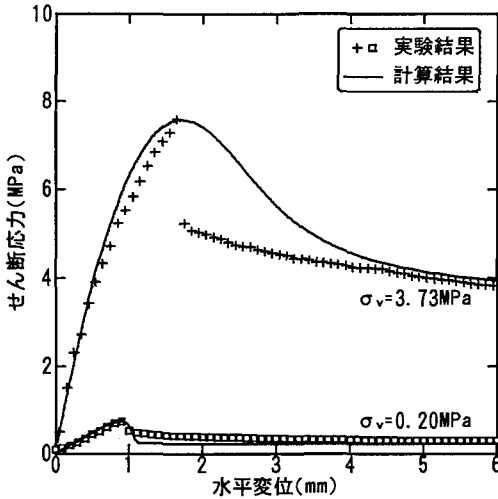


図-12 安山岩ジョイントの最も再現性の良い数値解析結果

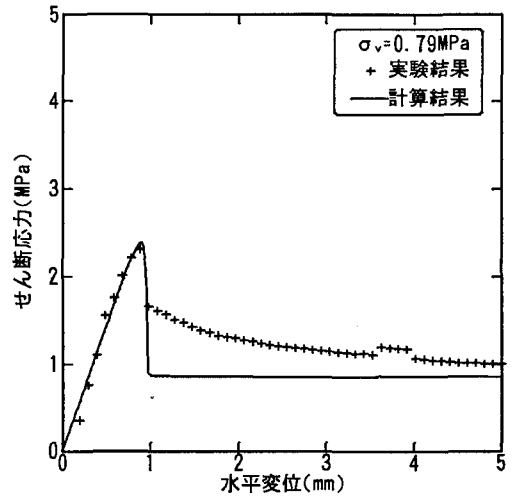


図-13 安山岩ジョイントのせん断試験結果と数値解析結果の比較

表-3 安山岩ジョイントのモデルパラメータ

σ_v	k_s	k_n	M_f	β	G'	σ_{nb}	b
0.20	1.00	1.00	1.05	0.190	225	4.0	15.0
0.79	2.92	2.92	1.05	0.120	845	4.0	15.0
3.73	10.04	10.04	1.05	0.770	4	4.0	15.0

σ_v :MPa k_s, k_n :GPa/m σ_{nb}, b :MPa

G' を求め、両パラメータの間に両対数座標軸上で直線となる次の関係を仮定した。最も再現性の良いシミュレーション結果を図-12に示す。

$$\log G' = 0.275 - 2.880 \log \beta \quad (23)$$

β に関しては、垂直応力との関係が明らかにされていない。このため、垂直応力0.79MPaの β は試行錯誤により0.12とした。さらに、式(23)の関係から、垂直応力0.79MPaの G' を845とした。

残りのモデルパラメータについては、前出式(20), (21), (22)のように設定した。表-3にモデルパラメータをまとめて示す。

これらのモデルパラメータを用いた、垂直応力0.79MPaの場合のひずみ軟化型不連続面モデルによるせん断応力-せん断変位曲線のシミュレーション結果を、図-13に示す。限られた情報量のもとで、ひずみ軟化過程における挙動に若干の差異は見られるものの、計算結果は実験結果をうまく再現しており、提案構成モデルとモデルパラメータの決定法が、実際の岩盤ジョイントにも適用できる可能性が確認された。

5. 結 論

本研究で得られた結果を以下に要約する。

- 1) ジョイントの摩擦による応力成分を変位に関する応力履歴として導入し、岩盤不連続面のひずみ軟化型弾塑性体モデルを提案した。このモデルは、その極限としてひずみ硬化のみのモデルを含み、岩盤の処女すべりから二次すべりまでを統一的に取り扱うのに適したモデルである。
- 2) 提案モデルのパラメータは次のように決定する。
 k_s : 初期値はジョイントせん断試験結果やせん断剛性と垂直応力の関係から推定する。変位の進行とともに減少するパラメータである。
 k_n : $k_n = k_s$ とおいても特に問題はない。
 M_f : ジョイントのせん断試験から、残留せん断強度と垂直応力の比として求める。
 β , G' : ジョイントせん断試験の数値シミュレーションにより β と G' の関係を求め、何らかの方法でどちらか一方を決定した後、他方を推定する。変位の進行とともに変化するパラメータである。
 σ_{nb} , b : 両パラメータの変化は数値解析結果にあまり影響を与えないため、それぞれの材料に対して一般的な値を用いることができる。
- 3) モルタルジョイントの繰り返しせん断試験の数値解析により、提案モデルがジョイントのひずみ軟化挙動を良く表現することが確認された。
- 4) 提案モデルとモデルパラメータ決定法を安山岩ブロックのジョイント一面せん断試験の数値解析に適用した。その結果、せん断応力-せん断変位曲線の形状を再現することができた。

参考文献

- 1) 小田匡寛, 鈴木健一郎: クラックテンソルによる不連続性岩盤のモデル化に関する研究, 第15回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.96-100, 1983.
- 2) 京谷孝史: 不連続性岩盤の力学的特性評価における損傷力学の適用に関する基礎的研究, 名古屋大学博士学位論文, 1989.
- 3) 永井哲夫, 桜井春輔: ロックボルトにより補強された不連続性岩盤の力学挙動に関する研究, 神戸大学大学院自然科学研究紀要10-B, 1992.
- 4) 吉田秀典, 堀井秀之: マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体理論と大規模空洞掘削の解析, 土木学会論文集, No.535/Ⅲ-34, pp.23-41, 1996.
- 5) 大西有三: 数値解析の最近の動向, 土と基礎, Vol.43, No.7, pp.453-456, 1995.
- 6) Cundall, P.A.: *A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock system*, Proc. Int. Symp. ISRM, Nancy, Vol.2, pp.129-136, 1971.
- 7) Dowding, C.H., Belytschoko, T.B. and Yen, H.J.: *Dynamic computational analysis of openings in jointed rock*, J. Geotechnical Engineering, ASCE, 109(12), pp.1551-1556, 1983.
- 8) Dowding, C.H., Belytschoko, T.B. and Yen, H.J.: *A coupled finite element-rigid block model for transient analysis of rock caverns*, Int. J. Num. Anal. Meth. in Geomech., Vol.7, pp.117-127, 1983.
- 9) Shi, G.H. and Goodman, R.E.: *Two dimensional discontinuous deformation analysis*, Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech., Vol.9, pp.541-556, 1985.
- 10) Shi, G.H.: *Forward and backward discontinuous deformation analysis of rock block system*, Rock Joints, Barton and Stephansson(eds), Balkema, pp.731-743, 1990.
- 11) Kawai, T. and Toi, Y.: *A new element in discrete analysis of plane strain problems*, J. of Seisin Kenkyu, Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Vol.29, No. 4, pp.204-207, 1997.
- 12) 竹内則雄, 川井忠彦: 新離散化モデルによる地盤基礎の極限解析(その1)-(その4), 生産研究, 32巻, pp.301-304, 372-375, 376-379, 460-463, 1980.
- 13) Ngo, D. and Sordelis, A.C.: *Finite element analysis of reinforced concrete beams*, J. of the American Concrete Institute, Vol.64, No.3, pp.335-354, 1967.
- 14) Goodman, R.E., Taylor, R. and Brekke, T.L.: *A model for mechanics of jointed rock*, J. Soil Mechs. and Found. Div., ASCE, 94(SM3), pp.637-659, 1968.
- 15) Ghaboussi, J., Wilson, E.L. and Isenberg, J.: *Finite elements for rock joint and interfaces*, J. Soil Mechs. and Found. Div., ASCE, 99(SM10), pp.833-848, 1973.
- 16) Aydan, O., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T.: *Numerical modelling of discontinuities and interface in rock mass*, 日本科学技術連盟, 第4回計算力学シンポジウム報文集, pp.254-261, 1990.
- 17) 足立紀尚, 岡二三生: 軟岩のひずみ軟化型弾塑性構成式, 土木学会論文集, No.445/Ⅲ-18, pp.9-16, 1992.
- 18) 西川直人: 岩盤不連続面の強度・変形に関する実験的研究, 京都大学工学部卒業論文, 1991.
- 19) 阿保寿郎: 岩石の一面せん断強度に関する割れ目形状の凹凸の表現法について, 京都大学工学部卒業論文, 1990.
- 20) Yoshinaka, R. and Yamabe, T.: *Joint stiffness and the deformation behavior of discontinuous rock*, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.23, No.1, pp.19-28, 1986.
- 21) 岩の力学委員会: 不連続性岩盤と構造物に関する研究報告書, 地盤工学会, pp.79, 1995.
- 22) 岩の力学連合会: ISRM 指針, Vol.3, 岩盤不連続面の定量的記載法, 1985.

(1997.5.22 受付)

A STRAIN SOFTENING CONSTITUTIVE MODEL FOR ROCK INTERFACE

Atsushi YASHIMA, Taketomi SUMI, Fusao OKA and Toshihisa ADACHI

Generally, discontinuous rock masses show both strain-hardening and strain-softening behaviors. Therefore, in numerical studies of rock mass deformation, it is very important to construct a strain-softening constitutive model.

This paper presents an elasto-plastic constitutive model for a rock interface. The constitutive model is based on stress history tensor which derives both strain-hardening and strain-softening characteristics. The procedure to determine values of material parameters in the constitutive model is discussed based on the experimental result on mortar interface.

The applicability of the constitutive model is numerically studied by means of the finite element analysis. The comparison between the numerical and experimental results on interfaces is carried out. It is found that the constitutive model simulates both strain-hardening and strain-softening behaviors of interfaces.