

2系列不連続面群を有する縮尺模型岩盤のせん断試験に関する研究

Study on Scale Model Shear Test of Rock with Two Sets of Discontinuities

溝上 建*・江崎哲郎**・三谷泰浩***・椎野 修****

Tatsuru MIZOKAMI, Tetsuro ESAKI, Yasuhiro MITANI and Osamu SHIINO

Rock shear model tests were carried out aiming to reveal shear properties of discontinuous rock mass. The discontinuous rock mass models were dissected by two sets of discontinuities and the continuous rock mass model was also tested for comparison. The shear stress-displacement curves of the discontinuous rock models showed clear inflection points followed by ductile fracture. The shear strength of the discontinuous models were slightly less than that of the continuous model. Furthermore, the DEM analyses were also carried out and the results showed good agreement with the model test results in terms of the shear deformation and the shear strength.

KeyWords: discontinuous rock mass, rock shear test, model test, distinct element method,

1. はじめに

ダムや発電所などの大型土木構造物は、これまで比較的良好な岩盤に建設されてきたが、これからは立地上の制約、種々の環境問題などにより、亀裂に富んだ不連続性岩盤への立地を余儀なくされることも予想されることから、不連続性岩盤の工学的特性を的確に評価し、信頼性の高い設計技術の構築が望まれる。岩盤上に建設される構造物の安定性評価のために実施される原位置岩盤試験は、構造物基礎岩盤の強度、変形などの力学的特性を把握する重要な試験であり、このうち原位置岩盤せん断試験は、岩盤のせん断強度を求めるための重要な試験である。ある調査地点において2系列の層理及び節理を有する不連続性岩盤を対象に原位置岩盤せん断試験を行ったところ、せん断応力が明瞭なピークを示さず、かつ破壊時変位が大きい延性的な応力～変位関係を示すという、一般の試験結果と異なる特徴的な結果が得られている¹⁾。

不連続性岩盤のせん断特性に関する研究としては、小型供試体による基礎的な要素実験的研究^{2,3)}と原位置岩盤せん断試験を模擬した模型実験的研究⁴⁾に大別される。前者は、不連続面の分布異方性とせん断強度との関係を明らかにすることを目的とした基礎的な実験であり、要素としての両者の関係は捉えられるものの、不連続性岩盤としての挙動予測は難しい。一方、後者は、不連続性岩盤としての挙動を捉えることを目的としており、せん断強度の寸法効果はあるものの、縮尺模型実験から岩盤のせん断挙動およびそのメカニズムを解明することは有効であるとされている⁵⁾。しかしながら不連続性岩盤を対象とした模型実験の研究はそのせん断強度に着目したものがほとんどであり、その強度に影響を及ぼす変形挙動、破壊の状況など岩盤全体の挙動について議論したものはほとんど見受けられない。また不連続面が岩盤全体に存在するような場合や複数の系列からなる複雑な不連続面が分布する場合などせん断挙動特性についての検討はなされていない。

* 正会員 九州電力㈱総合研究所

** 正会員 工博 九州大学大学院工学研究院 教授

*** 正会員 工博 九州大学大学院工学研究院 助教授

**** 学生会員 九州大学大学院工学研究府

そこで筆者らは、層理とそれに直交する節理によりブロック化された岩石の集合体のような2系列の不連続面群を有する不連続性岩盤を対象に、原位置岩盤せん断試験における強度特性及びせん断変形特性を明らかにすることを目的に、室内模型実験及び数値解析シミュレーションによる研究に着手した。本論文では、原位置岩盤せん断試験に準じた室内模型実験の方法及びそれを用いた高角度の卓越不連続面とそれに直交する2系列不連続面群を有する不連続性模擬地盤の模型実験結果、そしてこれを再現する数値解析シミュレーション結果について報告する。

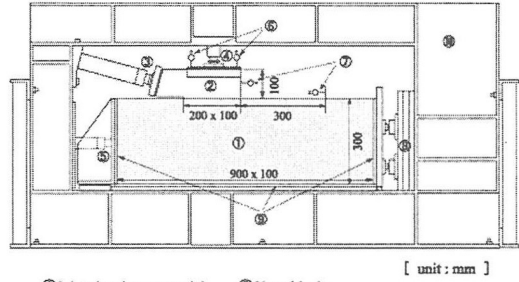
2. 模型実験

(1) 模型実験装置

模型実験は、模擬地盤の作製及び試験操作の容易性等を考慮し、せん断面の長さを20 cmとすることから、一般的な原位置岩盤せん断試験⁶⁾(60 cm×60 cmのせん断面)との幾何学的スケールは1/3となる。模擬地盤において再現可能な最小不連続面間隔は1 cm程度であることから、せん断面に最大20本程度の不連続面が存在する実験が可能である。図-1に模型実験装置を示す。模擬地盤は奥行き10 cmの2次元モデルで、鋼製枠で囲まれた中央位置に設置され、側方荷重を載荷し地盤の連続性を再現する。載荷装置はこの鋼製枠に固定され、せん断荷重用ジャッキ(容量50 kN)、垂直荷重用ジャッキ(同20 kN)のほか、模擬地盤に側方荷重を載荷して地盤の連続性を再現するための側方拘束荷重用ジャッキ(同50 kN)を模擬地盤の左側中央に配置する。せん断荷重の載荷方向は通常採用されている水平とのなす角度15°とし、せん断ブロックの変位は垂直方向4箇所、水平方向2箇所で計測する。なお、せん断ブロックの水平変位は、せん断ブロックの背後30 cmの模擬地盤上面における水平変位との相対変位とする。

(2) 模擬地盤

断面形状が2 cm×6 cm(奥行き10 cm)の板状材料を積層させ、2 cm間隔で連続性を有する卓越不連続面(以降set 1と称す)及びこれに直交する6 cm間隔の断続的な不連続面(以降set 2と称す)の2系列不連続面群を有する模擬地盤を表現する。模擬地盤材料は、岩石の模擬材料として一般的に用いられる石膏系材料(重量比で、石膏:石灰:標準砂:水=1:1:5:1.6)とし、専用の鋼製型枠に打設して板状材料に成型する(板状材料の表面はほぼフラットである)。この模擬地盤基質部の力学特性を表-1に、直接せん断試験で求めた不連続面となる板状材料同士のせん断変形、垂直変形特性を図-2に示す。この不連続面の物性は、粘着力0.0 MPa、内部摩擦角34.0°、ダイレイタンシー角0.0°である。



[unit : mm]
 ①Jointed rock mass model ②Shear block
 ③Shear load jack ④Normal load jack ⑤Lateral restraint jack
 ⑥Normal displacement meters ⑦Shear displacement meters
 ⑧Lateral load cell ⑨Teflon sheet ⑩Metal frame

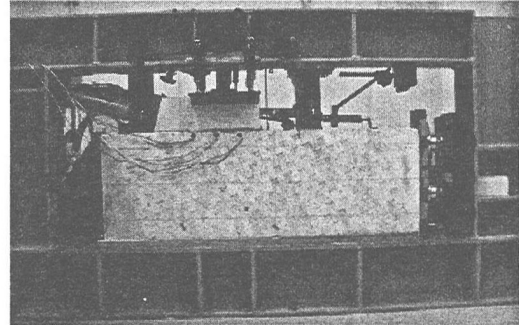


図-1 実験装置

表-1 模擬地盤基質部の物性値

密度 (g/cm ³)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
1.68	5.81	0.18	4.41	0.454

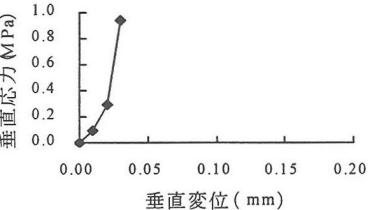
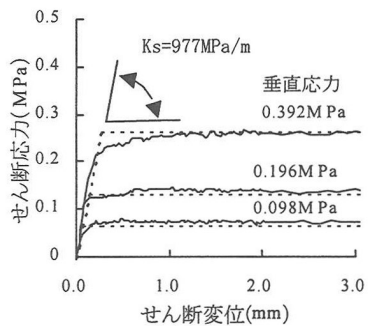


図-2 不連続面物性試験結果

(3) 模型実験方法

模擬地盤設置後、地盤側方拘束荷重の載荷、せん断ブロック（速硬性で高強度の石膏材料で製作）の接合、垂直荷重の載荷の後、原位置岩盤せん断試験方法⁶⁾に準じ、せん断荷重の増分は原則として 9.8kN、載荷速度は 0.49MPa/min の荷重制御とし、垂直荷重は破壊まで一定に制御する。各載荷ステップの荷重保持時間は最低 3 分間とし、せん断変位の増加が 1/100 mm 以下ならば次の載荷に移り、1/100 mm 以上ならば荷重保持 3 分間のせん断変位の増分が 1/100 mm 以下になるまで荷重保持を継続する。なお、模擬地盤の側方拘束ジャッキはせん断荷重載荷中には操作しない。各載荷ステップ終了後に模擬地盤内の亀裂をスケッチ及びデジタルカメラにより記録する。

(4) 実験ケース

模型実験ケースを表-2に示す。不連続面のない模擬地盤（シリーズ1）及び不連続面を有する模擬地盤（シリーズ2～4）により計 10 ケースの実験を行う。不連続性模擬地盤は、set 1 不連続面が水平から 70° の高角度で連続して配列する場合を対象とし、せん断荷重は set 1 不連続面に対して「流れ目方向」に載荷する。不連続性模擬地盤の実験では、せん断ブロックの初期垂直応力 σ_{n0} の影響（シリーズ2）、模擬地盤の側方拘束応力 σ_b の影響（シリーズ3）及び set 2 不連続面の幾何学分布状況の影響（シリーズ4）を検討する。

(5) 実験結果

① 不連続面の有無と垂直応力の影響

シリーズ1, 2のせん断試験結果を図-3に示す。シリーズ1では、せん断応力～せん断変位関係は高いせん断剛性で直線的に推移し、0.4 mm 以下の小さな変位で脆性的に破壊する。なお、破壊面は最大せん断応力時にせん断ブロック直下の模擬地盤内に一気に生じる。これに対してシリーズ2の不連続性模擬地盤では、せん断応力～せん断変位関係は延性的な挙動を示す。せん断応力とせん断変位の関係は図-4に示すように、せん断初期にはやや下に凸の形状を呈し、その後不連続面なしの場合の 1/10 程度のせん断剛性で変形し、せん断変位 1 mm 程度でせん断剛性が低下する変曲点が現れた後、1.4～2.0 mm の変位で破壊する。垂直変位は、せん断初期には収縮側に変位するが、その後変曲点付近から膨張側に転ずる。この変曲点が現れる以前は、垂直変位が圧縮側に推移する範囲でもあることから、せん断荷重の増加によりせん断ブロックの直下及び背後の set 1 不連続面が収縮閉合する段階と考えられる。そして変曲点以降

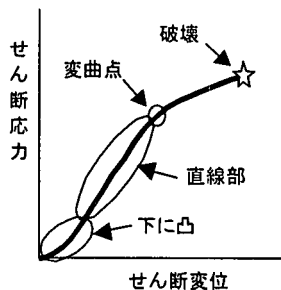


図-4 応力～変位曲線模式図

表-2 実験ケース

シリーズ	不連続面モデル図	σ_b (MPa)	σ_{n0} (MPa)	実験 番号
1		0.082	0.082 0.29 0.49	No.1-1 No.1-2 No.1-3
2		0.082	0.082 0.20 0.49	No.2-1 No.2-2 No.2-3
3		0.33	0.082	No.3-1
4		0.082	0.082	No.4-1
		0.082	0.082	No.4-2

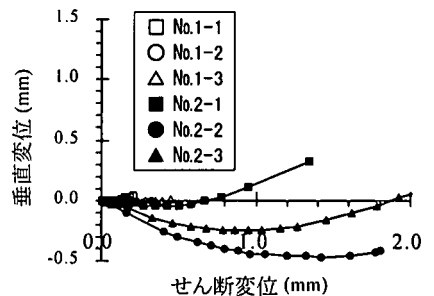
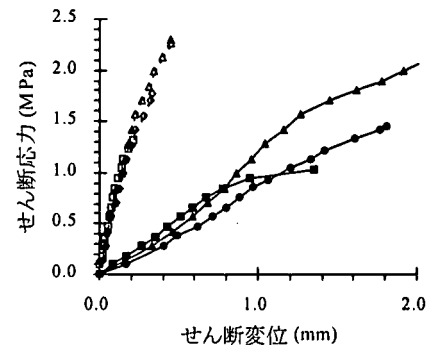


図-3 シリーズ 1, 2 の実験結果

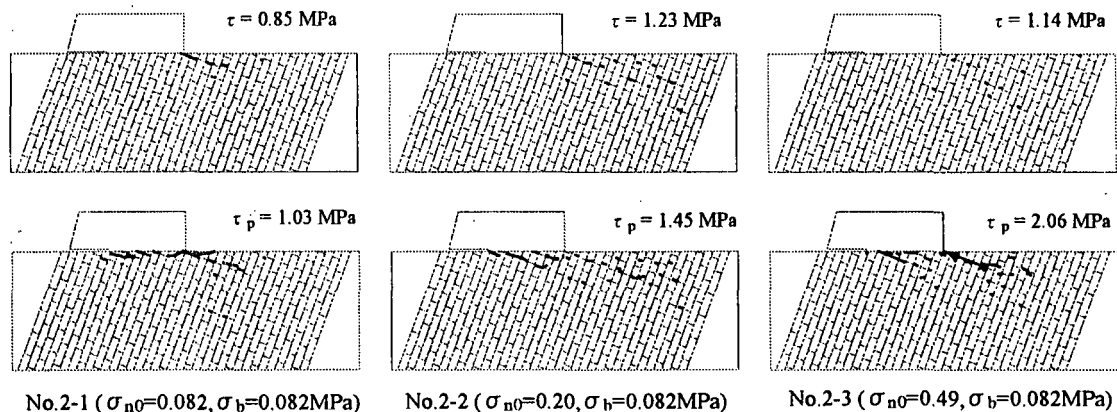


図-5 模擬地盤内の破壊進展状況（シリーズ2）

の荷重レベルでは、図-5の破壊進展図（上段は変曲点の荷重レベル、下段は破壊時）に示すように、せん断ブロック背面直下部の模擬地盤内に局部破壊が生じ、これが set 2 不連続面に沿う方向へ進展拡大する。このせん断ブロック背面部の破壊の進展拡大に伴いせん断ブロック直下部の地盤にひずみが蓄積され、せん断ブロック直下の基質部（板状材料）の破壊あるいは set 2 不連続面の開口が生じ、最終的にはせん断ブロック直下に破壊面が形成される。

せん断ブロック底面積で除して求めた破壊時の垂直応力～せん断応力関係を図-6に示す。なお、図中には基質部の一軸圧縮強度及び圧裂（引張）強度から求めた破壊包絡線（図中破線）も示す。不連続面なしのせん断強度と基質部強度はほぼ同じ強度を示しており、不連続面なしの模型実験は一樣なせん断応力が生じて進行性破壊もない状態でせん断試験が行われたものと推測される。次に、70° 流れ目を不連続面なしと比較すると、内部摩擦角はほぼ同じであるが、粘着力は3割程度小さな値となる。ただし、垂直応力が 0.5～1 MPa の応力レベルでせん断強度を比較すると、不連続面なし岩盤に対する 70° 流れ目岩盤のせん断強度の低下は1割程度に過ぎず、この応力レベルではせん断強度に対する不連続面の影響は小さい。

②模擬地盤の初期側方拘束力と set 2 の分布状況の影響

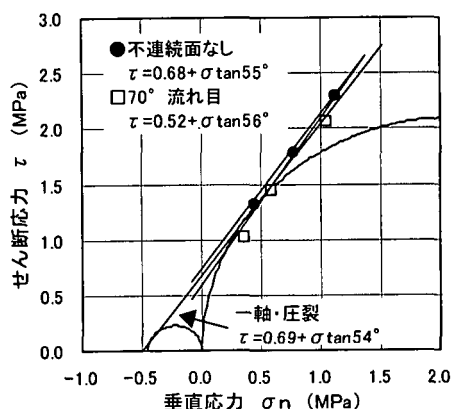


図-6 せん断強度の比較

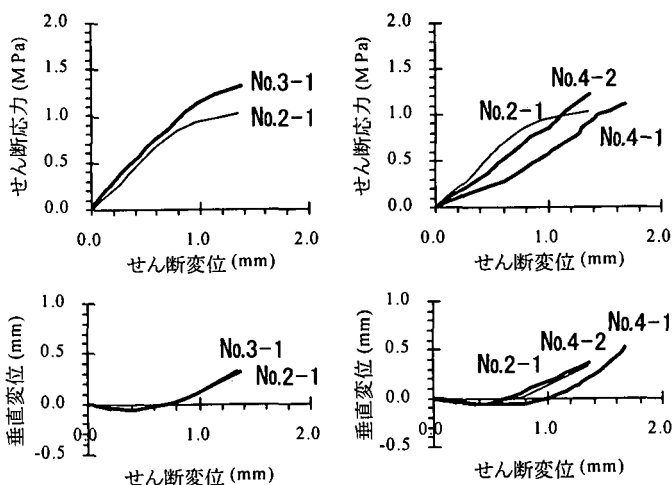


図-7 シリーズ3、4の実験結果

シリーズ3及び4のせん断試験結果を図-7に、破壊状況を図-8に示す。地盤の側方拘束応力の影響（ $\sigma_b=0.082\text{MPa}$ のNo.2-1と同 0.33MPa のNo.3-1）を比較すると、No.2-1で見られたせん断初期の下に凸の曲線部分がNo.3-1では現れない。これは、図-2に示したように、初期垂直応力が 0.3MPa 以上では不連続面は大きな垂直剛性を示し、垂直変形はほとんど生じないことから、 0.33MPa

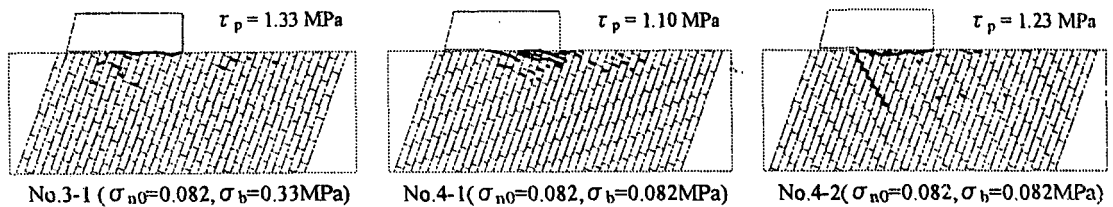


図-8 模擬地盤内の破壊状況 (シリーズ3, 4)

の側方拘束応力を作用させたNo.3-1では初期段階でset1不連続面が圧縮閉合されていたことによるものと考えられる。また、変曲点が現れるせん断応力はNo.2-1の0.9MPaに対してNo.3-1では1.1MPa、破壊時せん断応力も1.03MPaから1.32MPaと大きくなる。これも側方拘束応力により不連続面の垂直、せん断変形が抑制されて不連続面の影響が小さくなり、この結果としてせん断ブロック背面部の破壊が抑制されたこと(図-8)によるものと考えられる。

次に、set 2不連続面の分布を変えたシリーズ4の実験結果については、set 2不連続面を巨視的には低角度で流れ目状の配列としたNo.4-1は、No.2-1よりもやや延性的な荷重～変位関係を示すとともに、せん断ブロック直下の基質部に多くの亀裂が発生する。また、set 2不連続面を巨視的には高角度で差し目状の配列としたNo.4-2は、図-8に示したようにせん断ブロック前面端部から、set 2不連続面が右下方に連続して開口する現象が現れているとともに、荷重～変位曲線に明瞭な変曲点が現れず、破壊時せん断応力は1.23MPaとNo.2-1よりも約2割増加する。このように、set 2不連続面の分布状況は、せん断挙動特性に影響を与える可能性がある。

3.数値解析シミュレーション

今回は複数の岩石ブロックで構成される2系列の不連続面群を有する岩盤を対象とすることから、このような分離ブロックの集合体としてのモデル化が容易で、ブロック相互の分離、再接触等の挙動を忠実に表現できる個別要素法を採用する。これにより、岩石ブロック相互の接触により生じる岩石ブロックの内部応力、変形等を適切に表現でき、不連続面のみならず岩石基質部の応力状態も的確に評価できると考える。個別要素法解析には、汎用コード UDEC (Itasca Inc.) を用いる。

(1) 模擬地盤のモデル化

模型実験は奥行き 10 cm の模擬地盤及びせん断ブロックで行っているが、解析では単位奥行き長さの平面ひずみ条件とする。模擬地盤、せん断ブロックは模型実験を忠実に再現し、テフロンシートを設置した模擬地盤の側面及び底面部はテフロンシートの力学特性を与える。模擬地盤基質部の力学特性は表-1で示した一軸圧縮試験及び圧裂試験により得られた値を、不連続面となる板状材料周面部の力学特性は図-2で示した直接せん断試験により得られた値(せん断剛性 K_s は図中の破線表示とする)を用いる。模擬地盤基質部は弾性-完全塑性体(塑性状態の応力～ひずみ関係は流動則を用いる)としてモデル化し、以下のモール・クーロンの破壊基準を適用する。

$$\text{せん断破壊: } (1 - \sin \phi) \sigma_1 - (1 + \sin \phi) \sigma_3 - 2c \cos \phi = 0$$

$$\text{引張破壊: } \sigma_1 - \sigma_3 = 0$$

ここに、主応力 ($\sigma_1 < \sigma_3$) は引張りを正とし、 ϕ は内部摩擦角を、 c は粘着力を、 σ_1 は引張強度を示す。なお、内部摩擦角及び粘着力は、図-6に示した一軸圧縮試験と圧裂試験で得られたモールの応力円の共通接線として求める。また、不連続面はクーロン破壊基準を適用する。

(2) 解析手順

自重解析の後、模擬地盤に所定の側方拘束荷重を載荷した後に模擬地盤左側面は水平方向固定境界とする。そして所定の初期垂直荷重を載荷し、これを持続させた状態でせん断荷重を増加ステップ 0.98kN 毎に段階的に増加させる。破壊の判定は、模型実験時の破壊直前のせん断剛性 $\Delta\tau/\Delta S$ ($\Delta\tau$:せん断応力増分, ΔS :せん断変位増分)が 200~400MPa/m であったことから、計算結果で得られたせん断剛性が 200MPa/m 以下になった時点を実験上の破壊とする。なお、せん断ブロックの水平変位は、模型実験と同様にせん断ブロックとその背後 30cm の模擬地盤表面との相対変位とする。

(3)解析結果

シリーズ 2 ($\sigma_{no}=0.082, 0.49\text{MPa}$) 及びシリーズ 3 ($\sigma_b=0.33\text{MPa}$) の解析結果を図-9 に示す。模型実験で示された延性的で変曲点を有するという特徴的な荷重～変位関係は表現できているが、解析結果では変曲点が実験結果よりも小さな応力レベルで生じ、破壊時変位はやや大きな値が計算されている。なお、ダイレーション特性は実験結果とよく一致する。No.2-1 の破壊時主応力図及び塑性領域図を図-10 に示す。解析で示された塑性領域は、図-5 に示した模型実験の破壊状況とよく一致する。また、主応力図よりせん断ブロック直下部はせん断破壊が支配的である。その結果、不連続面ありの強度は、せん断破壊が生じていた不連続面なしとほぼ同等の強度を示したものと考える。全ケースの実験及び解析結果得られた破壊時のせん断強度及びせん断変位を表-3 に示す (表中の括弧内数値は、No.2-1 に対する比率を示す)。解析結果は模型実験よりもやや小さな強度を示すものの、No.2-1 を基準とした各実験ケースにおけるせん断強度の大小関係はよく表現できている。すなわち、個別要素法は岩石ブロックの集合体のような複雑な不連続面を有する不連続性岩盤のせん断挙動をシミュレートする有効な手法である。

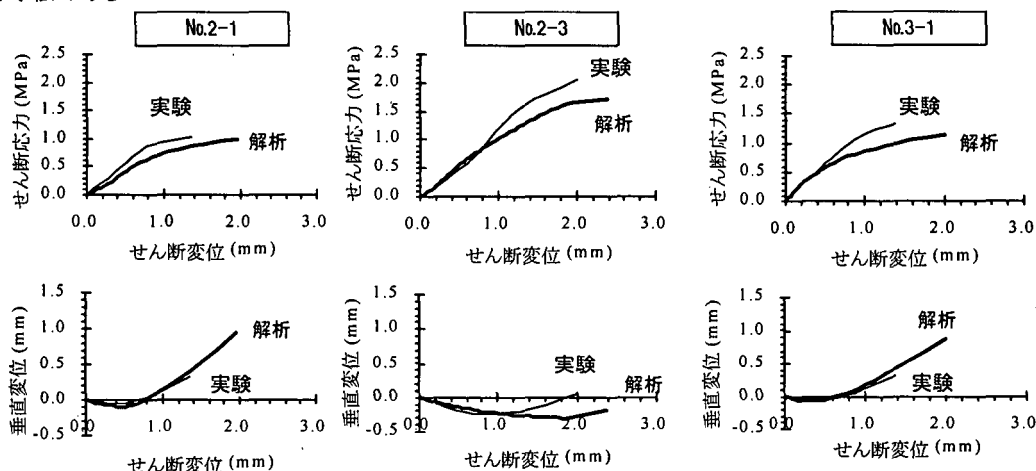


図-9 模型実験と解析結果の比較

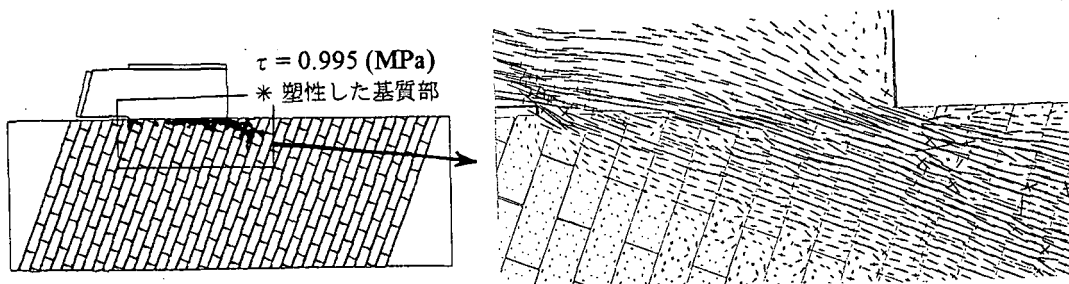


図-10 数値解析結果 (左: 塑性領域, 右: 主応力)

表-3 模型実験と数値解析の比較

実験番号	σ_{n0} (MPa)	破壊時せん断応力(MPa)		破壊時変位(mm)	
		模型実験	数値解析	模型実験	数値解析
No.2-1	0.082	1.03(1.00)	0.99(1.00)	1.35(1.00)	1.96(1.00)
No.2-2	0.20	1.45(1.41)	1.33(1.34)	1.81(1.34)	2.20(1.12)
No.2-3	0.49	2.06(2.00)	1.71(1.73)	2.01(1.49)	2.38(1.21)
No.3-1	0.082	1.32(1.28)	1.14(1.15)	1.38(1.02)	2.00(1.02)
No.4-1	0.082	1.11(1.08)	0.99(1.00)	1.68(1.24)	1.90(0.97)
No.4-2	0.082	1.23(1.19)	1.04(1.04)	1.36(1.00)	1.95(0.99)

4. まとめ

本論文では、2系列不連続面群を有する不連続性岩盤のせん断挙動特性を明らかにするために、模型実験装置及び実験方法の開発、そして卓越不連続面が高角度(70°)の不連続性模擬地盤の模型実験及び個別要素法解析を行った。卓越不連続面が70°の場合、せん断ブロック背面部地盤を含めた変形及び局部破壊現象により荷重～変位曲線は延性的で破壊前に明瞭な変曲点が現れるという特徴的なせん断変形挙動を示すものの、せん断強度の低下に与える影響は小さいことが明らかとなった。このほか、地盤の側方拘束力を大きくするとせん断強度が大きくなること、set 2の分布形態を変えると異なる荷重～変位関係が現れてせん断強度も異なることも判明した。更に、基質部を弾性－完全塑性体でモデル化した個別要素法は、模型実験で示されたせん断変形挙動、せん断強度及び地盤内破壊状況を精度良く再現でき、その破壊メカニズムを明らかにすることができた。このような、模型実験と数値解析を組み合わせ、相互比較を行ないながら実際の現場のモデル化を試みるアプローチは有効な手段と考えられる。

参考文献

- 1) 生貞幸治, 溝上建, 中川光雄, 蔣宇静, 江崎哲郎: 不連続体解析法を用いた数値シミュレーションによる原位置岩盤のせん断挙動特性の評価, 土木学会論文報告集 (投稿中)
- 2) Kawamoto, K.: Macroscopic shear failure of jointed and layered brittle media, *Proc. 2nd Cong. ISRM*, pp215-220, 1970.
- 3) 永山功, 則松秀晴, 片平博, 小沢裕二, 森田信吾: 岩盤のせん断強度に及ぼす節理の角度と節理のせん断強度の影響について, 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp391-396, 1994.
- 4) 永井哲夫, 高橋裕之, 池尻健: ロックせん断試験結果の評価方法に関する一考察, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp773-778, 1998.
- 5) 谷和夫: 人工の軟質泥岩を用いた室内岩盤せん断試験, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp767-772, 1998.
- 6) 土木学会: 原位置岩盤の変形およびせん断試験の指針・解説と設計への適用, pp17-30, 1983.