

節理および亀裂を有する岩盤の離散化極限解析

Discrete Limit Analysis of the Rock Mass with Joints and Cracks

川 井 忠 彦*

Tadahiko KAWAI

は し が き

著者は約 10 年前に、固体力学非線形問題解析の壁を破るべく、剛体-バネモデル (Rigid Bodies-Spring Model, RBSM と略称) を提案し、その妥当性の実証とその工学的応用について一連の研究を行ってきた。

その中でも地盤力学への応用はすでに実用化の域に入ったと考えるが、これは竹内が開発した亀裂の発生と亀裂面再接触の可能性判定サブルーチンを付けた非弾性増分解析法-テンション クラック法 (Tension Crack Method) の成果によるものである¹⁾。しかしながら本手法は地表面に近い地盤の諸問題、すなわち土質力学 (soil mechanics) への応用が中心となっており、いわゆる岩盤力学 (rock mechanics) への応用は今後の研究課題となっていた。

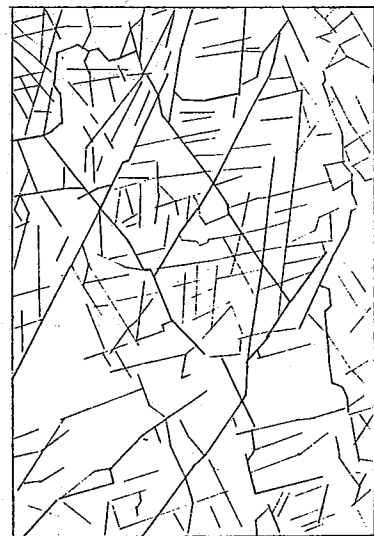
最近埼玉大学建設基礎工学科濱島良吉助教授の協力を得てこの分野への開拓に乗り出しているが、破壊現象の本質にかかわると思われる二、三の興味ある結果が得られたのでいまだ中間報告の段階であるが、その結果を報告し専門家諸賢のご批判を仰ぎたい。

1. 不連続性を有する岩盤解析へのアプローチ

図-1(a), (b) は砂岩の写真およびそのスケッチである。このスケッチが示すように岩盤には多数の節理および亀裂が含まれ、このような不連続性を有する岩盤の解析に対しては、当然亀裂の発生成長や閉合の影響を考慮に入れた研究が必要となる。これらの点を考慮し竹内の方法を発展させた新しい手法を提案し、岩盤解析を試みた。図-2 は解析の概要であり、まず岩盤面のスケッチを基にしたメッシュ分割を考える (ただし便宜上二次元の場合を考える)。ほとんどの岩盤の節理、亀裂は方向性を有しており、スケッチによりこうした異方向性をメッシュ分割に反映させる必要がある。分割された要素の中には、さらに細かい亀裂が含まれているが、これらは力学的に等価な形で要素境界面の構成則に換算させることが望ましい。これらの構成則は Mohr-Coulomb の構成則を基



(a)



(b)

図-1 不連続性岩盤とそのスケッチ(a), (b)

* 東京大学生産技術研究所 第2部

とするが、節理のラフネスの影響、ダイラタンシー、コンラクタンシー等を考慮しうる非関連流れ則 (non-associated flow rule) を用いる。こうして要素境界面の構成則が得られれば、節理面、亀裂面での開口、閉合を考慮した弾塑性解析をおこなう。以上が不連続性岩盤解析の概要であり、以下に解析と実験結果の比較を紹介する。

2. 不連続性岩盤モデルの応力伝達特性^{2),3)}

図-3は柱状節理を有する岩盤モデルの光弾性実験結果および解析結果である。節理面が水平面となす角度 θ の大きさが増すにつれて地盤底部の反力のピークは右方へ移動してゆき $\theta=45^\circ$ においてピーク位置が右から左へ飛び移っている。これは節理面でのすべりに帰因するものであり、一種の力学的不安定現象である。しかし実

Analysis of Rock Mass with Discontinuity

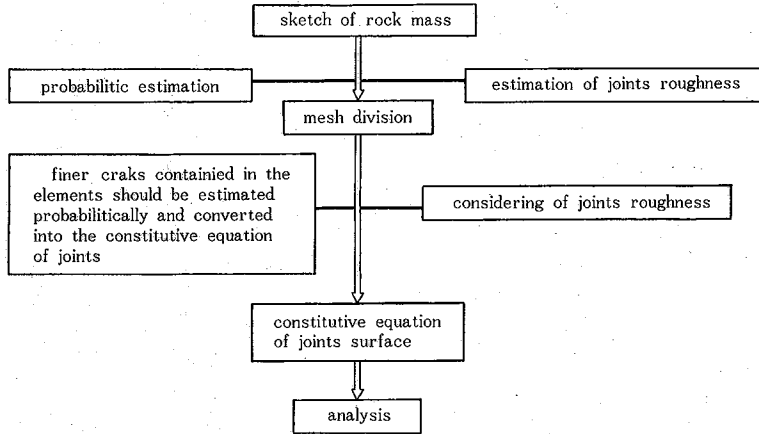


図-2 不連続性を有する岩盤の解析

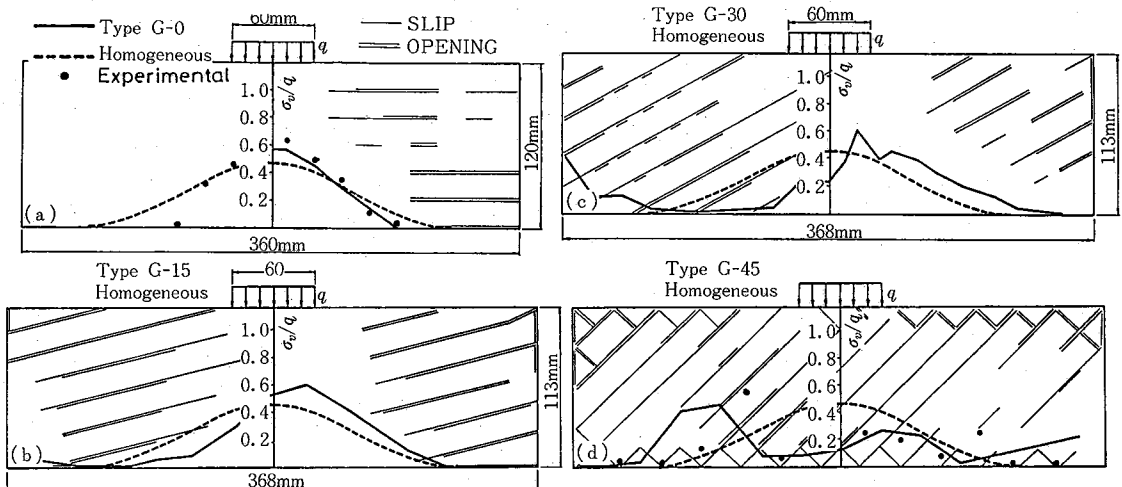
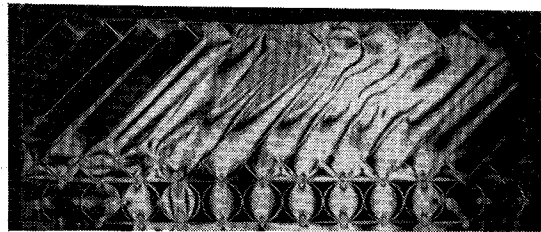


図-3 不連続性岩盤モデルの応力伝達特性

験との対比から、本解析法はこうした不連続性岩盤の応力伝達特性をよく表現しようといえる。

3. 急速に亀裂が伝播する不安定破壊⁴⁾

図-4は石膏円板の圧裂試験および解析結果である。図-4(a), (b)は載荷角度 $\psi = 12^\circ$, および 4° の場合における鉛直断面上の水平応力および破断性状を示している。

いずれも一瞬のうちに縦割れを生じているが、初期亀裂は、 $\psi = 12^\circ$ の場合は断面中央部、そして $\psi = 4^\circ$ の場合は上、下端部から生ずる。これは高速度写真によって明らかにされている結果と一致する。図-4(c)は中央部に亀裂を有する円板の平板載荷による圧裂試験であるが、実験結果は $\psi = 12^\circ$ の場合と比較的よく一致する。

実験後、平板と石膏円板との接触部はおおよそ $\psi = 12^\circ$ となっている。ただし解析においては、図-5(b)に示さ

れるような境界2節点要素を用いる(図-3の解析においては境界1節点モデルを使用)。また石膏材料については実験との対応から、平面応力状態に対して、Drucker-Pragerの構成則をRBSM用に修正した図-6(a)の楕円状の構成則を用いている。図-6(b)は鋼材に対する構成則である。また石膏材料に対しては引張領域について tension-cut を用いる。さらに亀裂部には紙が挿入されており、構成則は図-6(a)に示されるような Mohr-Coulomb の直線式を用いている。

4. 多亀裂岩石材料の強度変形特性⁴⁾

図-7は多亀裂を有する石膏モデルにおける一軸圧縮強度変形特性である。相当粗いメッシュ分割であるが、亀裂伝播性状は実験結果とよい対応を示し、FEM 解析ではポアソン比効果しか表現できない横方向への変形についても、本解析は十分にその特性を表現しているといえよう。

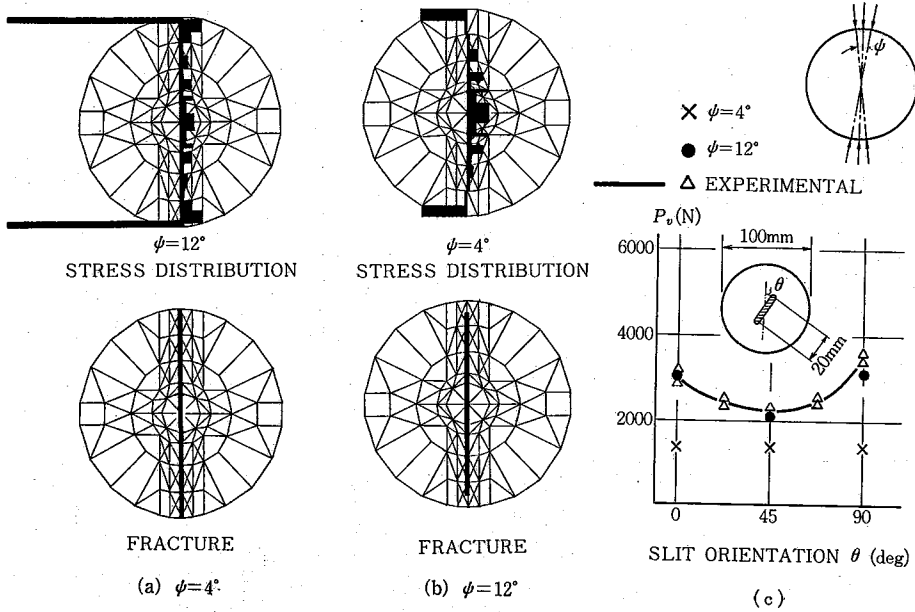


図-4 圧裂試験における応力分布および破断性状

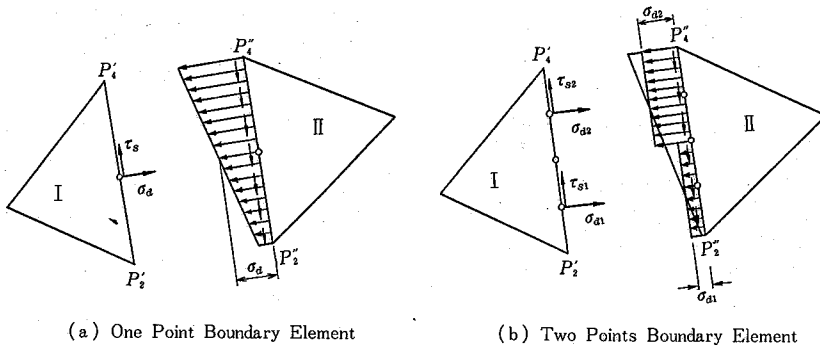


図-5 剛体バネモデル要素

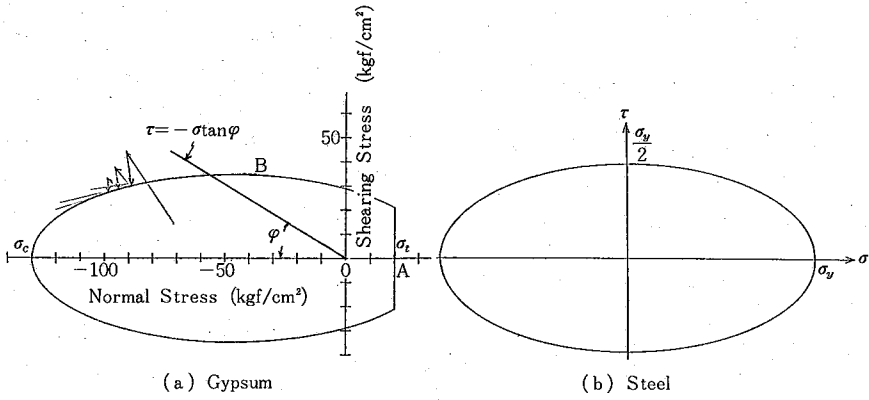


図-6 降伏曲面

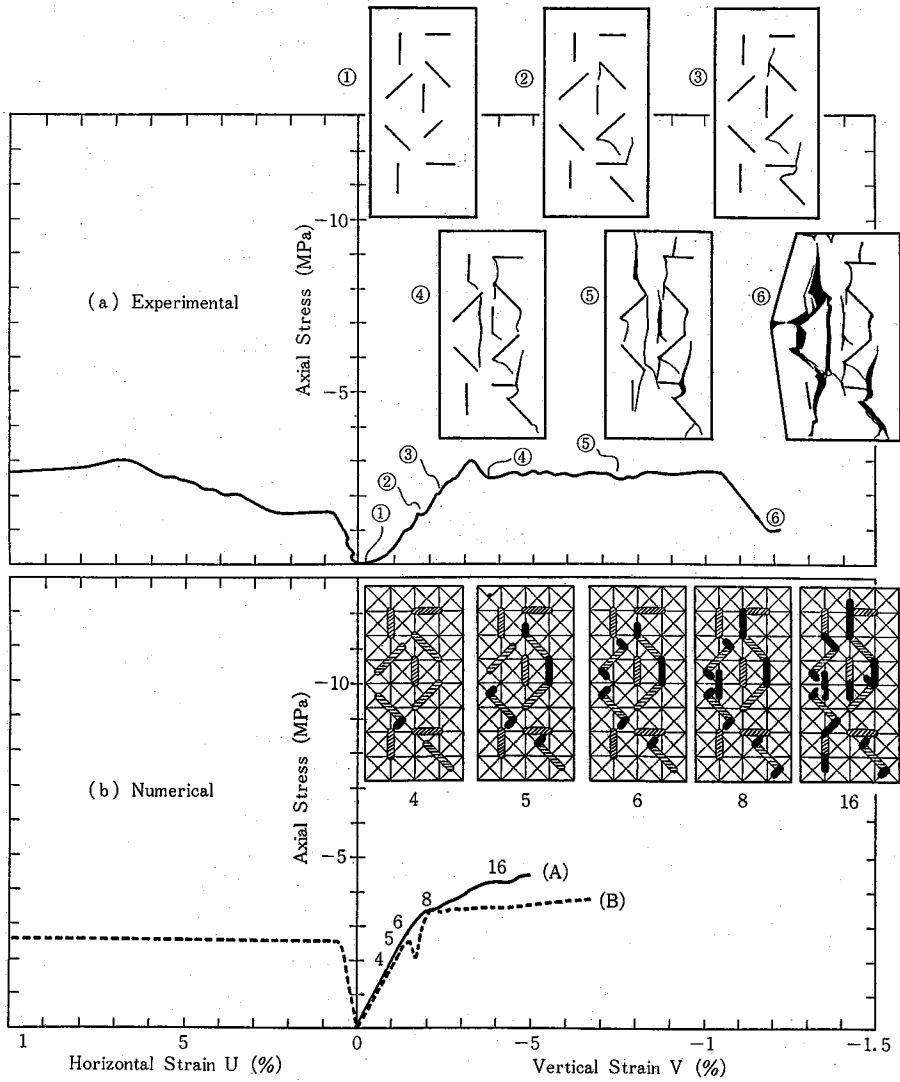


図-7 多亀裂性岩質材料の一軸圧縮強度

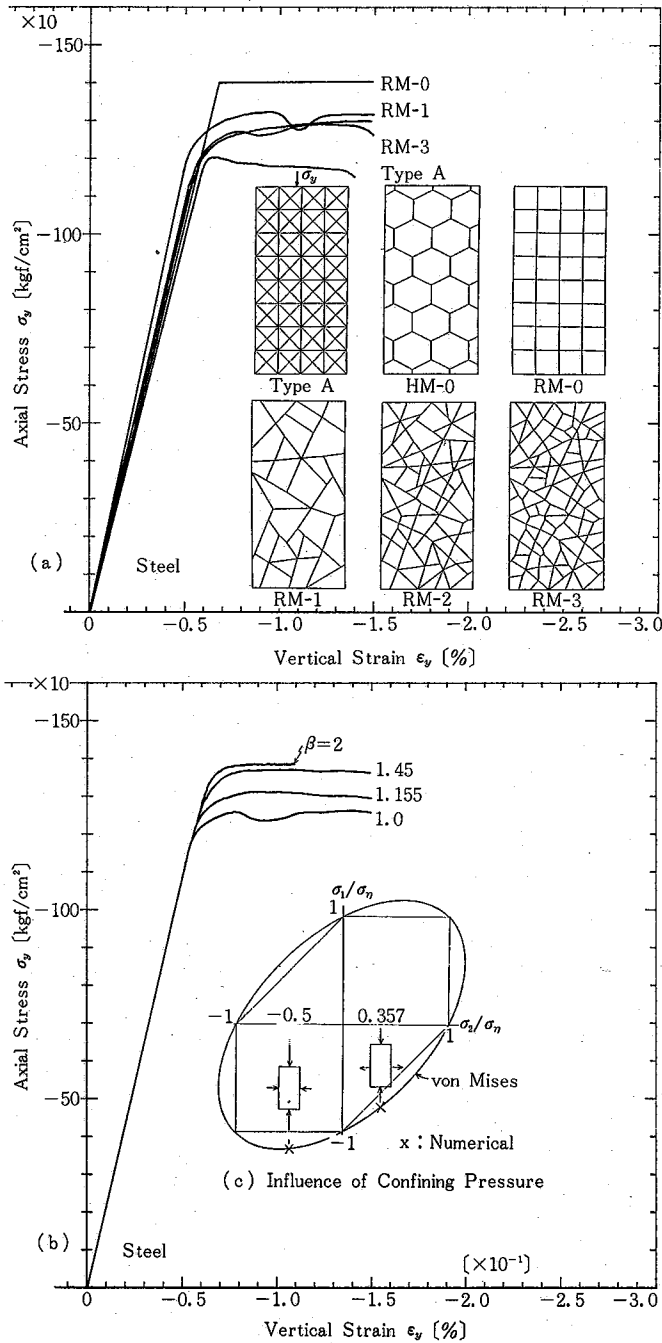


図-8 メッシュ分割が強度変形特性におよぼす影響

5. メッシュ分割が強度変形特性におよぼす影響⁵⁾

図-8(a)は方向性を有するメッシュ分割 Type A, HM-0, RM-0 と方向性を有しない RM-1, RM-2, MR-3 に対する鋼材の一軸圧縮強度変形特性である。この場合には RM-0 が正解を表し、Type-A のピーク強度は正解

より約 15%ほど小さい。これに対しランダムメッシュ分割 RM-3 では正解より 8%ほど小さい。これについて構成則の面から考察してみよう。図-6(b)の構成則において、純せん断応力状態において $\tau_n = \sigma_n/2$ (τ_n = 降伏せん断応力, σ_n = 一軸降伏応力) となっており、これは Tresca の条件に対応する。これに対し修正係数 $\beta = 2/\sqrt{3}$ を

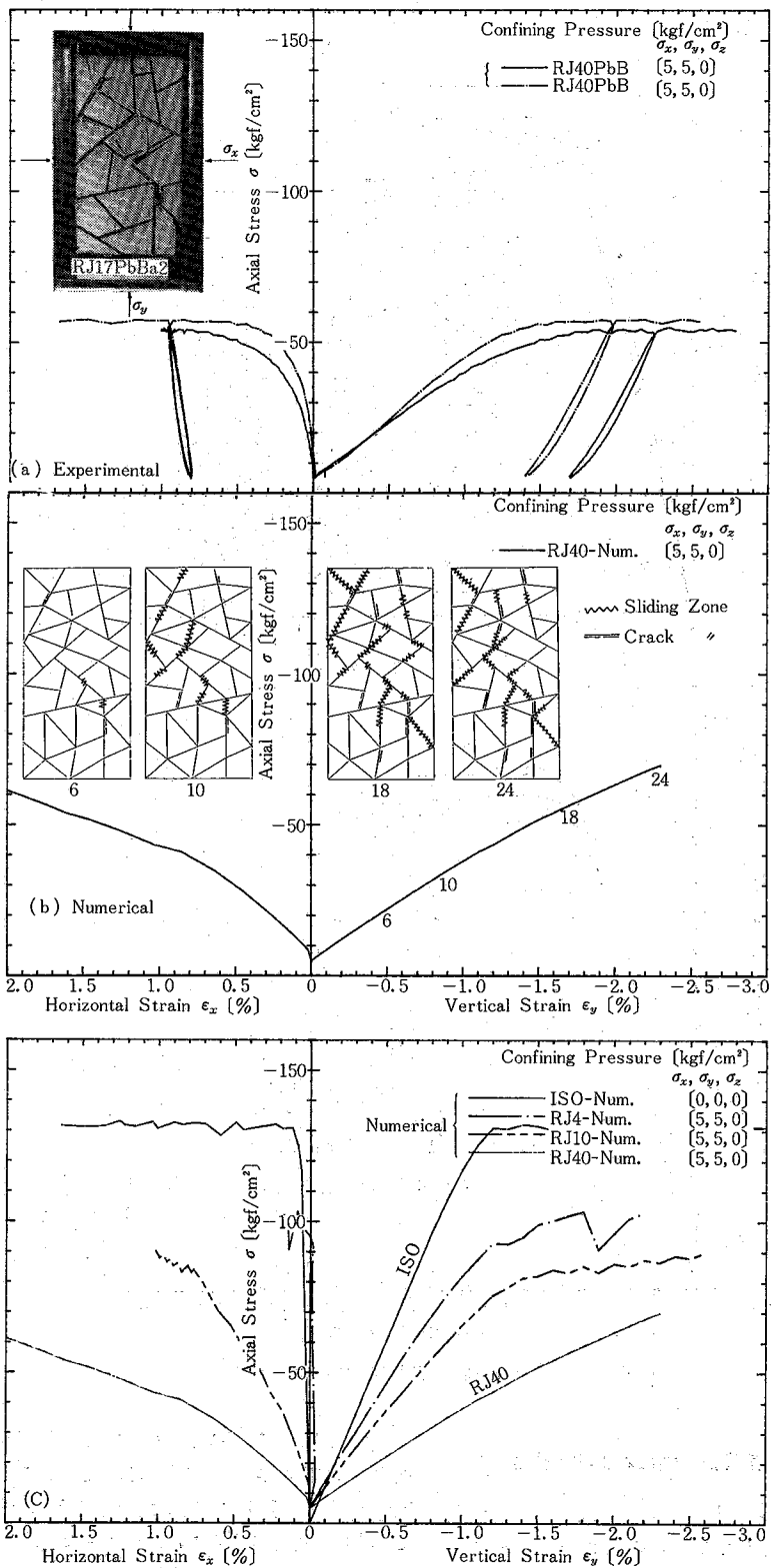


図9 多数の節理を有する岩質材料の二軸圧縮強度変形特性

乗ることにより von Mises の降伏条件 $\tau_n = \sigma_n / \sqrt{3}$ となるように修正した場合、結果は図-8(b) のようになり von Mises の降伏条件に対する理論解に対し約 6% の誤差となる。 $\beta=2$ においてほぼ von Mises 理論解と一致するが、この値を用いて図-8(c) に示すように二軸応力状態を計算すると von Mises の降伏関数上にとり、これよりランダムメッシュ分割をすることにより等方性の性質を表現できることがわかる。

6. 多数の節理を有する岩質材料の二軸圧縮強度⁶⁾

図-9(a) は節理により 40 要素に分割された石膏供試体の二軸圧縮試験結果および破壊性状である (ただし破

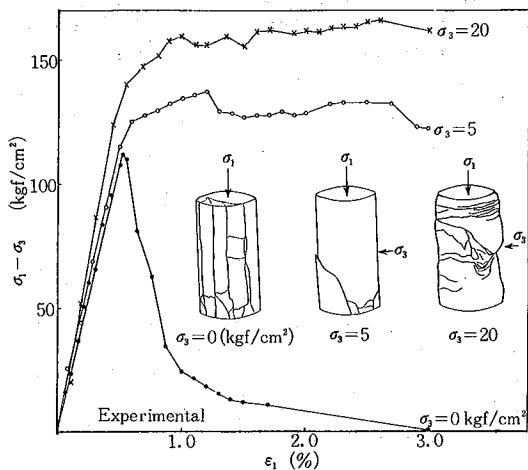


図-10 三軸試験における応力-ひずみ曲線

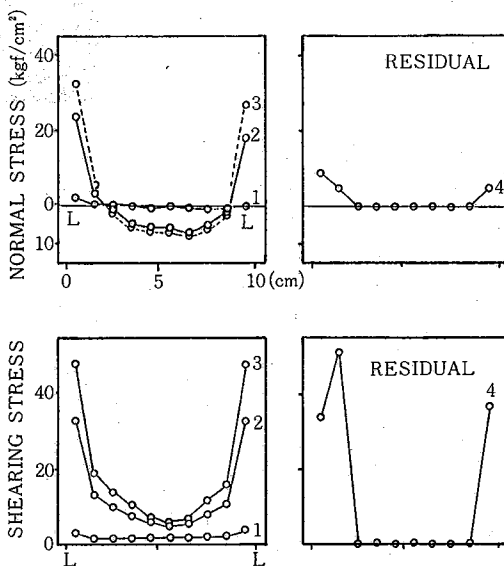
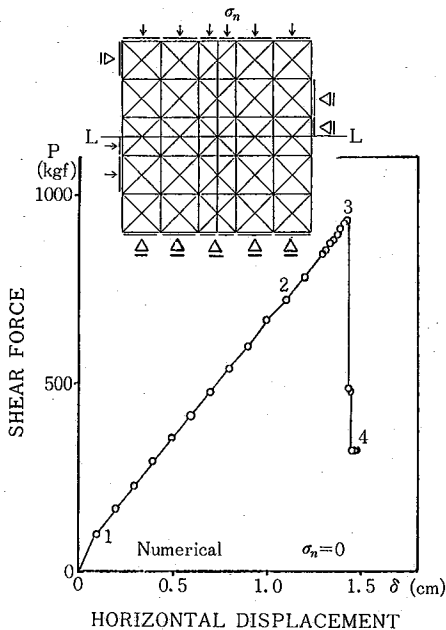


図-11 一面せん断時におけるひずみ軟化挙動

壊時の写真は 17 要素供試体が示されている。図-9(b) は解析結果であり、破壊性状は実験結果とよく対応している。変形特性は横方向の変形を除いてよく対応しているが、実験においては横方向の拘束圧荷に対してプレッシャーバッグを用いており、その剛性のために実験結果が小さめになっている。図-9(c) は節理のない場合 (ISO), 4 要素 (RJ 4), 10 要素 (RJ 10), 40 要素 (RJ 40) の比較図であり、強度変形特性の変化をよく表現しているといえる。

7. ひずみ軟化特性に関する考察⁷⁾

図-10 は三軸試験結果に対する応力-ひずみ曲線および供試体の破壊性状を示す。拘束圧の σ_3 の大きさにより応力-ひずみ曲線はひずみ軟化からひずみ硬化特性へと変化してゆくことがわかる。ただし、破壊性状は拘束圧の変化により縦割れから、せん断破壊、さらに圧壊へと変化している。これにより、この応力-ひずみ関係はその中に構造特性を含んでおり、供試体の寸法比が変化すればその特性はおのずから変化する。このことから材料特性としてこれを一つの構成式で表現することは問題であろう。図-11 は一面せん断試験において鉛直拘束圧がない場合の解析結果である。せん断面上の鉛直応力をみると供試体中央部で引張が生じ、ステップ 3 において許容引張応力に達することにより引張破壊を生じ、それに伴い急速なせん断強度低下が生じていることがわかる。これにより一面せん断試験にみられる低拘束圧時のひずみ軟化現象は構造特性によるものであることがわかる。

8. ま と め

本報告は不連続性を有する岩盤の解析の概要および、これまでの研究大要を述べたが、本解析手法はこうした構造不連続性を有する材料の力学挙動説明に相当、有効な手法となりうると思われる。(1984年4月18日受理)

謝 辞

本報告の執筆に当たり埼玉大学建設工学科浜島良吉助教授には数多くの貴重な資料の提供を受けた。また本研究の遂行に当たり同学科小牧昭元教授から暖かいご理解とご支援を賜ったを記し、両先生に厚い感謝を捧げる次第である。

参 考 文 献

1) 川井忠彦, 竹内則雄 “不連続体力学のすすめ (その6)

—地盤力学諸問題への応用—”, 生産研究 35 卷 10 号 (1983, 10)

- 2) Hamajima, R. and Kawai, T.: On the Discrete Analysis of the Jointed Rock Media, Jour. of the Japan Society of Eng. Geology 22-2, 1981, pp. 218—224.
- 3) Hamajima, R. and Kawai, T.: Stress Transfer Mechanism of the Jointed Rock Media with Strong Anisotropy, Jour. of the Japan Society of Eng. Geology 22-3, 1981, pp. 261-268.
- 4) 浜島良吉, 草深守人: 亀裂性岩質材料の亀裂伝播特性について, 第 15 回岩盤力学シンポジウム, 1983.
- 5) 浜島良吉, 山下清明, 草深守人: 不連続性を有する岩盤の解析, 第 16 回岩盤力学シンポジウム, 1984.
- 6) 浜島良吉, 山下清明, 草深守人: 不連続性岩盤の解析, 第 19 回土質工学研究発表会, 1984.
- 7) 浜島良吉, 草深守人: 岩盤材料のひずみ軟化特性に関する考察, 第 15 回岩盤力学シンポジウム, 1983.

