

## 非均質性が岩盤構造物の挙動に及ぼす影響と設計に関する研究

Study on effect of material heterogeneity on behaviors of rock structure and its design

吉田秀典\*・高森大資\*\*・和田光真\*\*\*

Hidenori YOSHIDA, Daisuke TAKAMORI and Mitsumasa WADA

\*正会員 博士(工学) 香川大学助教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

\*\* (株) ユー・エス・ジェイ 総務・人事本部人事課 (〒554-0031 大阪市此花区桜島 2丁目 1-33)

\*\*\*香川大学 大学院工学研究科 安全システム建設工学専攻 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

It is necessary to construct the analytical method that can reproduce real phenomena accurately so as to discuss the safety of rock structures with heterogeneity, and to design them economically and rationally. Thus, in this study, the design flow of rock structures with heterogeneity is proposed and the effects of heterogeneity on the behaviors of rock structures are discussed. In the design flow, at first, the constitutive equation of the rock is determined by the comparison between a analysis and a laboratory experiment with rock core sample. Next, the numerical examination with the determined constitutive equation is carried to investigate the safety and durability of rock structures. Through the comparison to experiments, the small region of heterogeneity has little influence on the macroscopic behaviors of rock structures.

**Key Words :** rock mass, heterogeneity, design flow, constitutive law, fracture

## 1. はじめに

岩盤構造物に限らず、土木構造物の多くは、豊かな社会の実現、利便性の向上、安全などを目的として、それに要求される機能、安全性を有し、その利便に見合う建設コストであることが主要な設計要素である<sup>1)</sup>。こうした要求項目に加え、構造物に適切な設計あるいは維持管理を施し、長寿命化を図るべきであるという社会的要請が高まりつつある。具体的には、既に建設された構造物に対しては構造物の耐久性などを的確に照査し、必要に応じて補修を行うことが求められ、また、新規構造物に対しては設計の段階で十分に安全性、耐久性を検討しておくことが求められる。

岩盤構造物の調査・設計・施工フローでは、一般的に、計画段階→設計段階→施工段階→維持管理段階というような段階を踏み、その安定性を検討している。ここで設計段階に着目すると、例えば岩盤斜面の場合、以下のような事項が検討される<sup>1)</sup>。

1. 詳細調査：現地調査・試験、室内試験、評価
  2. 安定解析：崩壊形態の推定、解析法の選定、安定解析、安定性評価
  3. 詳細設計：斜面勾配、管理基準値
  4. 施工計画：掘削法、抑止工法/保護工法、計測計画
- 特に、安定解析に注目すると、以下のような手法が主流である。
1. 経験的手法：岩盤分類、斜面評点法、周辺斜面類似地質の参照など
  2. 限界平衡解析法：平面すべり解析、くさびすべり解析、円弧すべり解析など

3. 数値解析法：連続体解析 (FDM, FEM, BEM), 不連続体解析 (RBMSM, DEM, DDA)

現状では、依然として限界平衡解析法の占める割合が多い。この手法では、すべり面が完全に成長した状態を想定して最大耐力を計算しているが、現実のすべり面の形成現象は進行的なものであることが近年の研究により明らかになってきており、限界平衡解析法と実際の挙動には乖離がある。例えば、図-1は、Hallbauerら<sup>2)</sup>による岩石の三軸圧縮試験における軸ひずみと軸応力の関係、および任意の載荷段階における破壊概況図を示したものである。図より、ピーク応力 ( $\sigma_{max}$ ) に達する直前に破壊が顕在化し、やがてピーク付近で変形が局所化しているのが分かる。変形が1本のすべり面に局所化した後、1本に局所化したすべり面が供試体端部まで伸びることで供試体は二分化してひずみ軟化挙動を示す。つまり、すべり面は初期の段階では短く、これが徐々に延びて最終的な段階を迎えるが、最大強度を発揮するのはすべり面が発達途中の段階においてであり、現行の安定性照査で用いられている仮定とは異なる<sup>3),4)</sup>。

近年、数値解析法による検討も多くなってきているが、連続体解析では破壊時・破壊後の挙動への適用が難しく、一方、不連続体解析手法では解析パラメータを客観的に決定することが難しいなどの短所が含まれており、実設計においては、「参考」という位置付けにあることが多い。また、自然界における岩盤は極めて非均質な材料であるため、その変形/破壊挙動は極めて複雑になるが、限界平衡解析法あるいは数値解析法を用いた岩盤の設計では、こうした複雑さを排除す

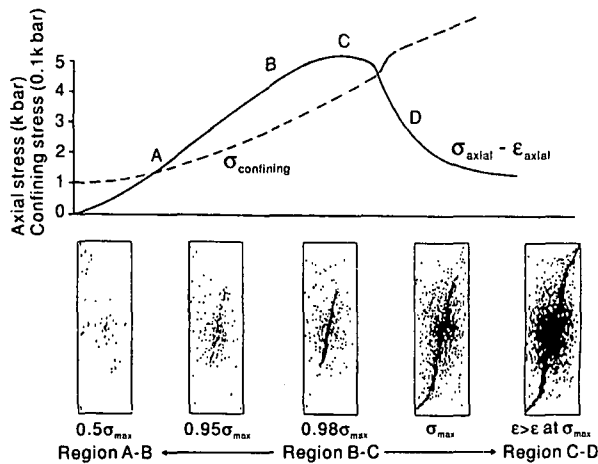


図-1 三軸圧縮試験における岩石の挙動<sup>2)</sup>

る目的で岩盤を均質な材料と仮定することが多い。しかしながら、岩盤を均質と仮定できる条件などについてはあまり議論がなされていない。さらに、数値解析法においては複雑なモデルや手法が導入されることも少なくないが、複雑なモデル/手法は現場技術者の視点に立てば必ずしも相応しい手法とは言えない。

経験的手法については、現地調査における目視観察が中心であるので、迅速・簡便で、かつ、ある程度の妥協性を見出すことができるが、客観性に乏しく、かつ安全率との直接的な対比ができない。したがって、この手法が単独で用いられるのは、地形・地質概査を実施して危険度調査評価を行った際に、「より詳細な検討が不要」と判断される場合のみである。つまり、岩盤構造物の長寿命化を図るには経験的手法だけでは不十分であり、より客観的な手法が必要となる。

岩盤構造物が有する真の安全性を議論したり、設計/施工を経済的かつ合理的にするためには、岩盤の挙動を精度良くを再現できるだけでなく、入力パラメータなどを客観的に決定でき、そして可能な限り複雑な面を排除して現場技術者にとっても理解が容易な数値解析手法が必要であると考え。そこで本研究では、可能な限り複雑な面を排除した形の解析フローを提案すると同時に、岩盤構造物を均質と仮定できる条件などを議論するための情報提供を念頭に置いて、非均質性が岩盤構造物に及ぼす影響について考察を行う。

## 2. 検討方法

前述の通り、岩盤構造物の調査・設計・施工フローでは、計画段階→設計段階→施工段階→維持管理段階と言った段階を踏むことが多い。本研究では、一例として岩盤斜面の問題を取り上げ、その安定解析の段階において、以下のような検討を行うこととする。

1. まず、第一ステップとして、詳細調査時に実施さ

表-1 人工軟岩材料配合比

材料名	重量比 (%)
豊浦標準砂	69.6
石膏	11.6
水	18.8

れる室内試験より変形特性、強度特性などを決定し、その際に、材料非均質性がどの程度、何に影響を及ぼすか、そして安定解析において、どこまで考慮する必要があるかについて考察する。

2. 次に、第二ステップとして、得られた情報(変形特性、強度特性および材料非均質性の影響度)を考慮に入れて、実構造物の予測/安定解析を行う。

なお、本研究の解析対象としては、第一ステップに関しては、佐々木<sup>5)</sup>の行った人工軟岩の要素試験(平面ひずみ圧縮試験)を、また、第二ステップに関しては、佐々木の実験を基に同じ材料配合で岩盤斜面のモデル実験を行った星谷<sup>6)</sup>の実験を取り上げ、実験との比較を通し、上記で述べた考察を行う。

## 3. 第1ステップ ー構成モデルの検討ー

本章では、詳細調査時に実施される室内試験、例えば地質ボーリングなどから得られたコアサンプルを用いて行う圧縮試験などより変形特性(弾性係数やポアソン比)、強度定数(粘着力や内部摩擦角)を抽出し、その後の予測/安定解析における解析パラメータの決定に加え、材料非均質性を予測/安定解析においてどのように考慮すべきかについて考える。

### 3.1 検討概要

第一ステップにおいて参考としたのは、佐々木<sup>5)</sup>の行った人工軟岩の要素試験(平面ひずみ圧縮試験)である。文献<sup>5)</sup>によれば、人工軟岩を作成するにあたり使用した試料は、豊浦標準砂、石膏、水で、配合比については、過去の研究<sup>7),8)</sup>を参照し、表-1のようにしている。供試体の寸法は、図-2に示すように、幅50mm、奥行き50mm、高さ150mmとし、平面ひずみ状態で試験を行うため面外方向に変形しない十分な剛性のある型枠を用いている。このような供試体に対して、0.196MPa、0.294MPa、そして0.392MPaという3ケースの拘束圧の下で、変位制御による平面ひずみ圧縮試験を行っている。その実験結果を図-3に、また、これより定まる材料特性(変形特性および強度特性)を表-2に示す。さらに、拘束圧0.392MPaの実験において、そのピーク直前およびピーク到達時の最大

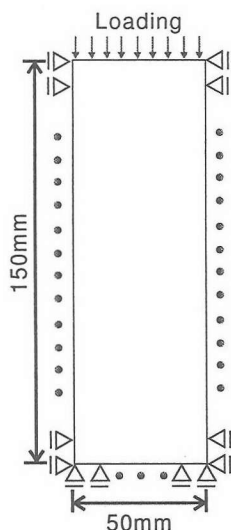


図-2 供試体の寸法と境界条件

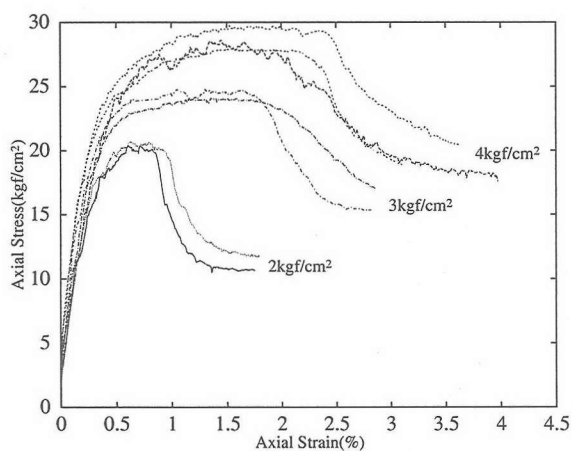


図-3 実験における軸応力-軸ひずみ曲線 (注: 佐々木氏より許可を得て掲載) <sup>5)</sup>

せん断ひずみ分布 (マッチング法より算出. マッチング法については文献 <sup>5)</sup> を参照されたい) を図-4 に示す. なお, この実験においては, ひずみを計算するメッシュがやや粗く (幅 50mm に 8 要素), かつ, ひずみ分布の閾値を, 局所化後のレベルを基準に設定していたため, ほとんどひずみが発生していないように映るが, この段階でも数%のひずみが確認されており, 局所的にはあるが大きなひずみが生じていることが分かる.

### 3.2 構成モデルの決定

次に, 実験結果より解析に入力すべきパラメータの決定を行う. 本研究では, 圧縮側には Drucker-Prager 型の降伏条件を, また, 引張側には tension softening 型の破壊条件を採用し, こうした破壊条件に基づいて構成モデルの決定を行った. なお, 本解析では, 巨視的なレベルにおいて荷重がピークに達した時点で解析を停止させており, 図-1 における領域 D, つまり巨視

表-2 材料特性

変形特性	弾性係数	745MPa
	ポアソン比	0.154
強度特性	粘着力	0.108MPa
	内部摩擦角	40°

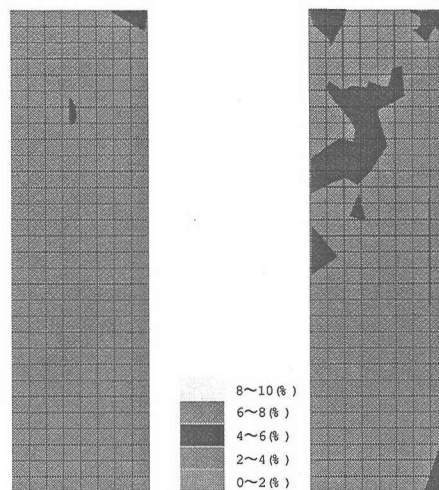


図-4 最大せん断ひずみ分布 (実験. 左: ピーク前, 右: ピーク時. 注: 佐々木氏より許可を得て加筆して掲載)

的に材料が二分する形になり, それらが剛体に近い状態で滑動している状態に追従できるものではない. こうした領域における挙動にも対処できればさらに良いのであるが,

1. 一般に多くの岩盤構造物は, 自然に曝されることで風化/劣化によって構造的に不安定になり, さらに降雨, 地震, 重力などの誘因により変形, さらに破壊に至る. こうした状況は, 室内試験において供試体をひずみ制御 (変位制御) で得られる挙動とは異なることが予想される.
2. 図-1 から伺えるが, 最終的に卓越する, つまり局所化するすべり面は, ピーク直前からその概形を示しつつあり, ピーク後は, すべり面が供試体端部に達することで軟化挙動を呈していることが分かる. 岩盤構造物に対して, 適切な支保を施そうという場合, こうした「概形」が判明すれば対処が可能であると思われる.
3. 数値解析において供試体全体に関するマクロ的な軟化挙動を表現するには, 複雑な手法/モデルの導入が必要となり, 現場技術者の理解を難しくさせる.

と言った理由を背景に, 本研究では, 供試体全体に関するマクロ的な軟化挙動には対応せず, 簡易なモデルで対処できるピークまでを検討領域とする.

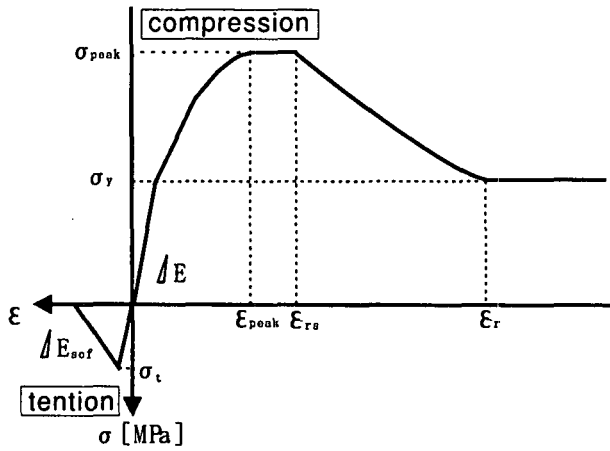


図-5 構成モデル

実験から材料特性が求まった場合、次のステップは応力-ひずみ関係（構成モデル）の決定であるが、本研究では、図-5に示すような構成モデルを前提とした。圧縮側においては、初期降伏応力（ $\sigma_y$ 、本解析では実験結果より定める）までは弾性係数（ $E$ ）を有し、その後は、ひずみ硬化しながらピークに達するものとした。また、ピーク後は初期降伏応力までひずみ軟化し、それ以降は残留状態に至ると仮定した。一方、引張側は、圧縮側と同じ勾配（ $E$ ）を有しながら引張強度（ $\sigma_t$ ）まで上昇し、引張強度に達した後は、クラックなどの発生に伴う tension-softening の挙動を再現できるようモデルを設定している。各要素において最大引張応力を求め、その応力が引張強度に達した場合、最大主応力方向に対して垂直方向な方向にクラックが入るものとしている。この場合、クラックの入った方向に対して直角となる方向にのみ軟化が生じ、他の2方向については軟化はさせず、上記の弾性係数を保つものとしている。これにより、ひび割れ発生・進展に伴う材料異方性を表現している。軟化勾配およびひび割れ発生後のせん断伝達を支配するせん断保持率に関してはデータが無いため、本解析では全ての解析に対して、それぞれ 20,000 MPa、0.1 と設定した。また、引張強度（ $\sigma_t$ ）についても情報が得られないため、 $\sigma_t = \frac{1}{5}\sigma_y$  と仮定して解析に用いた。このような解析モデルを用いることで、材料は圧縮側は等方的に挙動するが、引張側では異方的な挙動を呈する（図-5の引張側の挙動は発生したクラックに対して垂直方向成分の挙動を表している）。なお、採用している構成則は、要素内に複数のひび割れが含まれることを前提とした平均化構成則であるため、要素分割によって材料が消費する破壊エネルギーは異なり、材料非均質部の導入などではなく、解析モデルそのものが局所化を考慮できるような解析の場合、十分小さな要素分割を必要とする。しかしながら、ここで示している解析モデルは局所化を考慮でき

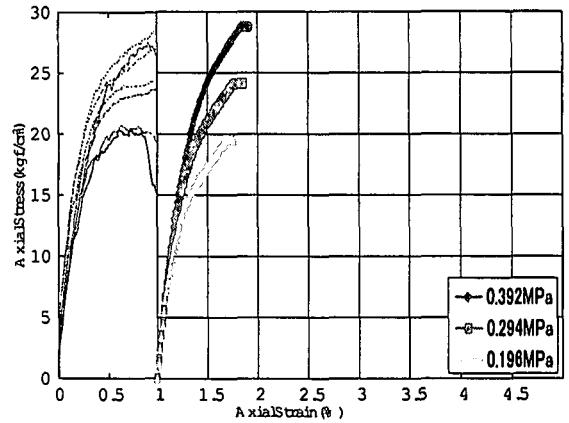


図-6 解析と実験の比較

るようなものではなく、また、ある程度要素を細かくすることで解の収束が見られたことから、本研究においては、上述したような構成モデルを解析に採用した。

解析における各種条件は実験と同様になるように設定し、供試体側面に拘束圧を加え、底面に位置する全ての節点の  $y$  軸方向の変位を固定し、このうち中心点については  $x$  軸方向の変位も固定した。載荷は供試体上面の全ての節点に対して変位制御で行い、実験と同様、平面ひずみの条件下で解析を行った。要素タイプは四節点の固体要素を用い、要素数は 1,200 要素とした。なお、要素数を倍にしたケースでも解析を実施したが、巨視的な荷重-変位曲線や破壊状況に関して大きな差が見られなかったことから、解がほぼ収束したものと見なし、全ての解析ケースについて、要素数 1,200 のメッシュを用いた。

まず、ピーク強度（ $\sigma_{peak}$ ）とひずみ（ $\epsilon_{peak}$ ）、ひずみ軟化を開始する直前のひずみ（ $\epsilon_{sr}$ ）、および残留状態に至る時のひずみ（ $\epsilon_r$ ）を  $\sigma_{peak} = 2.2\sigma_y$ 、 $\epsilon_{peak} = 1.4\%$ 、 $\epsilon_{sr} = 3\%$ 、 $\epsilon_r = 6\%$  と定めることで、3種類の拘束圧の下で、実験をほぼ再現できることが判明した。その解析結果を、ひずみのレベルを 1% だけずらして図-3に重ね（解析結果におけるひずみは、1% 差し引いて読む）、図-6に示す。供試体に関するマクロ的な挙動に関しては、ピークまでではあるが、上記のような設定をすることで、よく再現ができていることが分かる。ただし、今回の検討では、ピーク強度（ $\sigma_{peak}$ ）とひずみ（ $\epsilon_{peak}$ ）が支配的なパラメータとなり、構成則レベルで軟化直前のひずみ（ $\epsilon_{sr}$ ）および残留状態に至る時のひずみ（ $\epsilon_r$ ）を変動させても、ほとんど図-6に変化は見られなかった。

### 3.3 非均質性の影響

#### (1) 初期欠陥の配置箇所

前節では、供試体の巨視的な軸応力-軸ひずみ関係について、実験結果と解析結果を比較することで構成

表-3 解析ケース（初期欠陥の配置箇所）

	位置	強度
case1	上部外側	30%低下
case2	上部中央	30%低下
case3	中部外側	30%低下
case4	中部中央	30%低下
case5	case1 と case4 の中間	30%低下

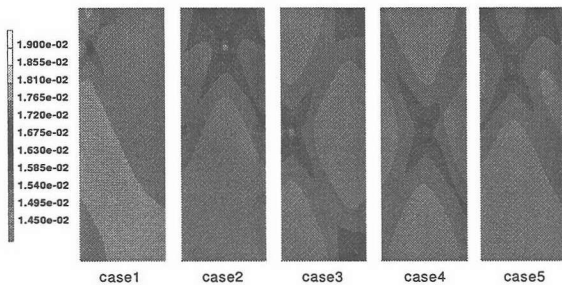


図-7 相当塑性ひずみ (case1~case5)

モデルを決定しているが、これはあくまでも巨視的な挙動をカーブフィティングさせたに過ぎず、また、供試体を均質な材料と仮定して構成モデルを導いている。したがって、実構造物の挙動予測をする目的でこのような構成モデルを用いて解析しても、複雑な地質構造を有する岩盤構造物の挙動を捉えることができないとは限らない。また、当然のことではあるが、供試体全体を均質な材料と仮定して解析を行えば、そのひずみ分布はどの箇所においても同じ値を示し、shear bandに相当するようなひずみの集中（局所化）は見られない。したがって、実構造物の予測/安定解析において、導かれた構成則を用いてどこまで言及でき、また、何が不足しているかなどを検討しておく必要があるものと思われる。

そこで本節では、局所化を擬似的に表現する目的で材料非均質部を導入し、こうした材料非均質性が巨視あるいは局所的な材料挙動にどの程度影響を及ぼし、また、実験などから定まる構成モデルだけでどこまで材料挙動を表現できるかについて考察を加える。本研究では、こうした材料非均質を簡易的に表現するために、周辺領域よりも粘着力が小さい領域を設けることで対応した。なお、本研究ではこの強度の低下した領域を初期欠陥と呼び、その大きさは有限要素メッシュ1個(2.5mm × 2.5mm)とした。

まず、この初期欠陥の存在箇所が供試体の挙動および破壊形態に及ぼす影響について検討を行った。表-3に示すような5ケースを用意し、前章で定めた構成モ

デルを用いて解析を行った。これらのケースにおいては、初期欠陥の配置箇所のみを変化させ、強度については、周辺領域よりも粘着力を30%低下させて解析を行った。各ケースにおけるピーク時の相当塑性ひずみ分布を図-7にまとめて示す。図より、初期欠陥を配置した周辺にひずみの値の大きな領域が出現し、配置箇所を中心にX字を描くように塑性変形を生じた場所が認められる。X字を描く方向は強度定数の影響を受けて傾きを変化させるが、基本的には、初期欠陥の配置箇所に対して左右、ほぼ対称的な分布を示す。各ケースにおけるひずみの値は、最大で1.7%程度で、解析ケースごとに差はほとんど見られなかった。これより、初期欠陥の強度および領域が同じであれば、塑性領域には違いがみられるものの、その値については、初期欠陥の配置はそれほど影響を及ぼさないことが予想される。ここで着目したいのは、初期欠陥が1箇所が存在する場合、上述したようなモードで塑性領域が拡張しており、ピーク時に、1つのすべり面に局所化していくようなモードにはなっていない点である。こうした点を実際の現象と異なるものと思われる。なお、供試体の巨視的挙動を表現している軸ひずみ-軸応力関係は、いずれのケースにおいても図-6とほとんど差がみられなかったため、掲載は割愛した。

## (2) 初期欠陥の強度

次に、この初期欠陥の強度（粘着力）が供試体の挙動および破壊形態に及ぼす影響について検討を行った。case5の解析を基に、粘着力を周辺領域よりも1%~50%低下させて解析を実施したが、相当塑性ひずみ分布については、初期欠陥周辺のひずみの値こそ異なるものの、概況は図-7に示すcase5の結果とほぼ同じであった。粘着力が低下するにしたがって、初期欠陥周辺の相当塑性ひずみの値が大きくなる傾向は見られたが、粘着力の低下が30%までは初期欠陥を有しない均質材料とほぼ同じ分布で、30%以上低下させるとややひずみの値が大きくなったが、特筆すべき点は認められなかった。なお、強度低下に関する一連の解析においても、供試体の巨視的挙動を表現している軸ひずみ-軸応力関係は図-6とほとんど差がみられなかった。初期欠陥の領域が1個程度では、強度の差による変形モードおよびマクロ的な変形挙動には大きな変化が認められず、これより、初期欠陥の配置箇所が同じであれば、狭い領域における強度の変動は供試体全体の挙動に対して、大きな影響を及ぼさないことが予想される。

## (3) 初期欠陥の個数

さらに、この初期欠陥の個数およびその強度が供試体の挙動および破壊形態に及ぼす影響について検討を行った。ここでは表-4に示すような3ケースを考えた。初期欠陥の個数は2個とし、その箇所は、前出のcase1とcase5で検討を行った箇所に1個ずつ配置した。強度については、両初期欠陥ともに周辺領域よりも粘着

表-4 解析ケース (初期欠陥 2 個)

	位置	強度
case6	case1&case5	case1&case5:30%低下
case7	case1&case5	case1:30%, case5:60%低下
case8	case1&case5	case1:60%, case5:30%低下

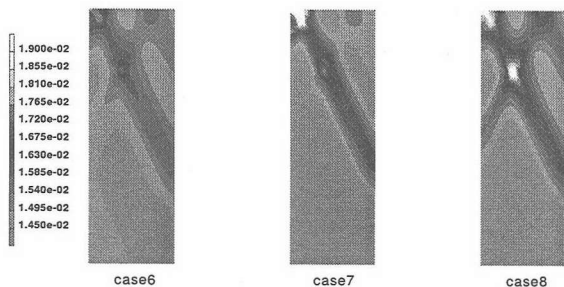


図-8 相当塑性ひずみ (case6~case8)

力を 30% 低下させたケース, どちらか一方を 60% 低下させたケースを設定した. 各解析におけるピーク時の相当塑性ひずみ分布を図-8 にまとめて示す. これらの場合においても, 主として初期欠陥を配置した周辺でひずみの値の大きな領域が出現するが, その塑性変形領域は, case1 から case5 のように配置箇所を中心に X 字を描くことはなく, 2 箇所の初期欠陥を結ぶような拡がりを呈し, 最終的には一本の卓越した塑性領域が出現する. また, 2 箇所に配置された初期欠陥のうち, 粘着力が小さい箇所の周辺でひずみのレベルが大きく, それを供試体の内部に配置した場合, 塑性領域は 2 箇所の初期欠陥を結ぶようなモードの他に, 内部側の初期欠陥より, それとは鉛直方向に対して対称となる方向にも塑性領域の拡大が見られる. 複数の初期欠陥の存在は, ピーク近傍での変形の顕在化, そしてその後の局所化などに多大な影響を及ぼすものと思われる. ただし, こうした現象は佐々木らの平面ひずみ圧縮試験においても確認されているが, 必ずしも初期欠陥の存在のみが支配的であるかどうかは不明なため, 今後, 検討の余地がある. なお, この 3 ケースについても, 軸ひずみ-軸応力関係は図-6 とほとんど差がみられなかった. これより, 初期欠陥の個数が少ない範囲では, 初期欠陥の個数とその幾何学的配置も供試体の破壊形態に大きな影響を与えるが, その巨視的挙動にはほとんど影響を及ぼさないことが予想される.

以上のように, 初期欠陥の配置や個数などによって, 供試体の破壊形態は変化し, これらが材料の破壊挙動を支配しているパラメータの 1 つと言える. しかしな

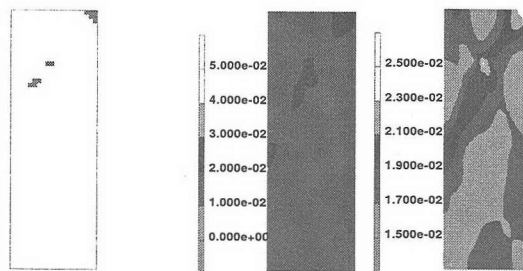


図-9 初期欠陥の配置 図-10 相当塑性ひずみ (解析)

がら, 初期欠陥そのもののトータル領域が小さい範囲では, その巨視的挙動にはほとんど影響を及ぼさないことから, 構造物の巨視的挙動を捉えるだけであれば, 初期欠陥など, 材料非均質性にナーバスになる必要がないかもしれない. ただし, 構造物の安定性の向上と長寿命化を考えれば支保の導入が不可欠となり, さらに経済的かつ合理的な支保の導入を考えるのであれば, 破壊形態を的確に把握する必要がある. したがって, 構造物の非均質の程度 (地質や地層構造など) を評価し, それを解析に反映すべきか否かについては, こうした解析をベースに検討する必要があると思われる.

#### (4) 実験との比較

ここまでの検討により, 初期欠陥のトータル領域が小さい範囲においては, 初期欠陥の配置箇所および配置個数は供試体の破壊形態に影響を及ぼすものの, その巨視的挙動に対しては影響度が小さいことが判明した. 本来であれば, こうした知見を基に実際の構造物のシミュレーションへと移行して行くのであるが, 本研究では, 佐々木の実験における破壊形態の再現が可能か否かについても検討を行ったので, その解析結果を示す.

比較を行ったのは側圧が 0.392MPa の実験で, その破壊形態は前出 (図-4) の通りである. 初期欠陥 (粘着力は 30% 低減) を図-9 のように配置した結果, ピーク時に図-10 のような相当塑性ひずみ分布が得られた. 図における左側は, 佐々木の実験結果と同様の分布になるように閾値を調節したもので, 右側は, 卓越した領域を提示する目的で閾値を調節した結果である. 図-4 と対比させると, 図-10 の左図においては図-4 との類似性が確認できるが, ひずみのレベルが異なる. この原因として, 実験ではマッチング法<sup>6),7),8)</sup>を用いて供試体の変位場を求め, それに対して平均的ひずみ場を求めているため誤差を含んでいることや, 今回は検討の対象としていない空隙の存在などが考えられる.

## 4. 第 2 ステップ - 構造物への適用 -

### 4.1 解析概要

本章では, 佐々木が作成した供試体と同じ配合で作成された人工的な斜面の破壊試験<sup>6)</sup>の解析を通して,

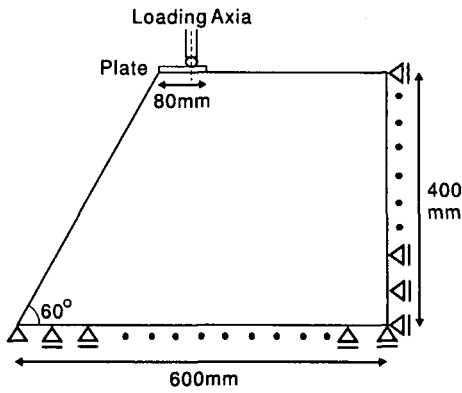


図-11 供試体の寸法および境界条件

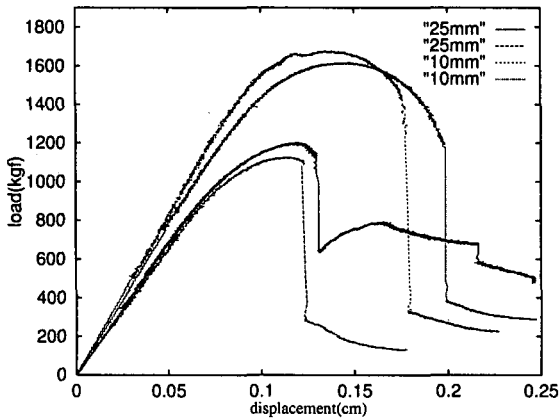


図-12 荷重-変位曲線 (注: 星谷氏より許可を得て掲載)

前章と同様の検討を実施する。本研究では、前章の実験が供試体コアを用いた室内試験に相当し、本章における実験が得られた材料特性/解析モデルを用いた実構造物の挙動予測/安定解析に相当すると位置付けている。実験供試体の形状、サイズおよび境界条件は図-11 に示す通りで、実験は平面ひずみ状態（奥行きは100mm）で行っている。なお、載荷板は幅が80mmで、十分な剛性を有することから、解析では、弾性係数を200,000MPa、ポアソン比を0.3と仮定し、弾性体として要素を追加している。載荷は速度3mm/hの変位制御で行い、載荷位置を載荷剛板の中心から10mmおよび25mm偏心させて実験しており、本解析でもこの2例を実施した。ただし、解析では有限要素メッシュの都合上、上述した箇所とやや異なり、載荷板の中心から13mmおよび27mm偏心させた位置に変位制御による載荷を実施した。平面ひずみ圧縮試験と斜面の破壊試験の材料配合が同じであることから、本解析においても前章で示した構成則および材料特性を用いた。

## 4.2 解析結果

### (1) 荷重-変位関係

前章で行った考察によれば、材料中における初期欠陥の領域が小さい範囲では、材料の巨視的挙動に対し

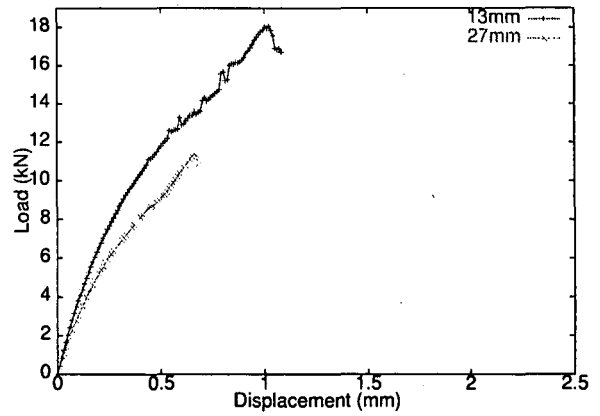


図-13 荷重-変位曲線 (初期欠陥無)

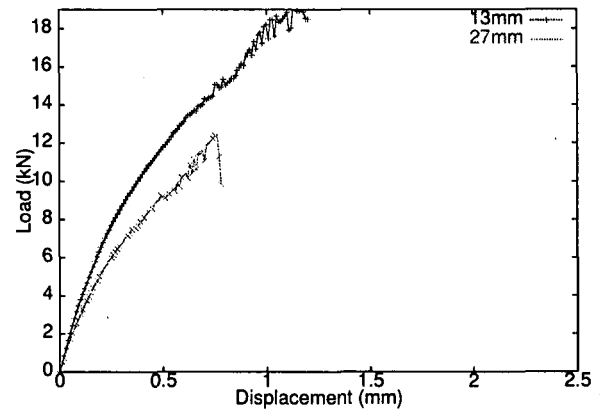


図-14 荷重-変位曲線 (Case A)

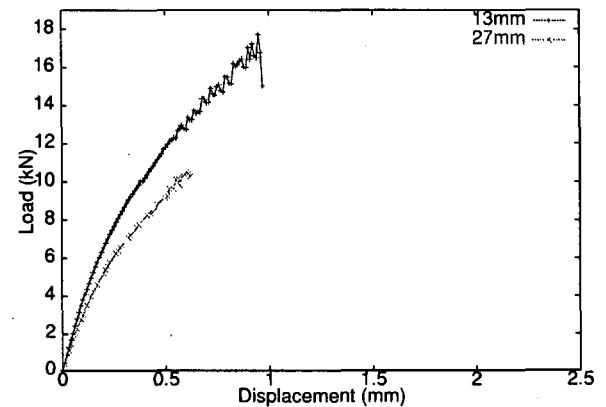


図-15 荷重-変位曲線 (Case B)

て、初期欠陥の存在はあまり影響を及ぼさず、最終的な破壊形態に対しては、その配置位置や個数などが影響を及ぼすことが判明した。実際の岩盤の非均質性は必ずしも全てが把握できるものでないことから、影響度の大きい因子のみについて検討を行うことが良いと考えられるので、本解析では、初期欠陥に関する検討は配置箇所だけに絞り、初期欠陥を有しない解析、斜面から50mmで距離で供試体上部より約100mm (Case A) および200mm (Case B) の位置に、有限要素メッ

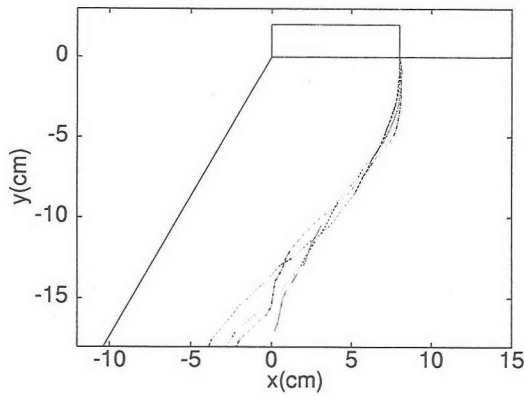


図-16 すべり面のパス (偏心 10mm, 注: 星谷氏より許可を得て掲載)

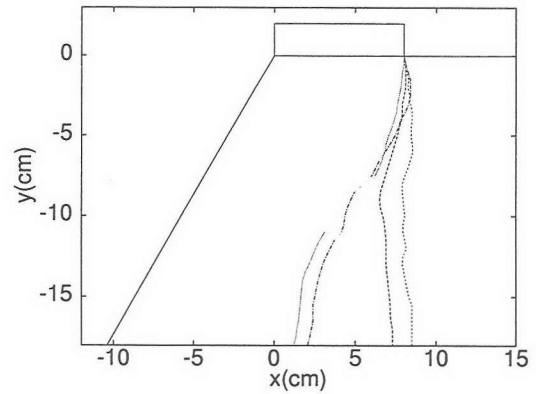


図-19 すべり面のパス (偏心 25mm, 注: 星谷氏より許可を得て掲載)

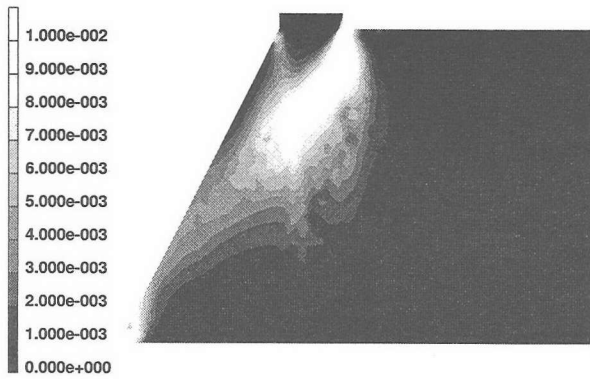


図-17 相当塑性ひずみ (偏心 13mm)

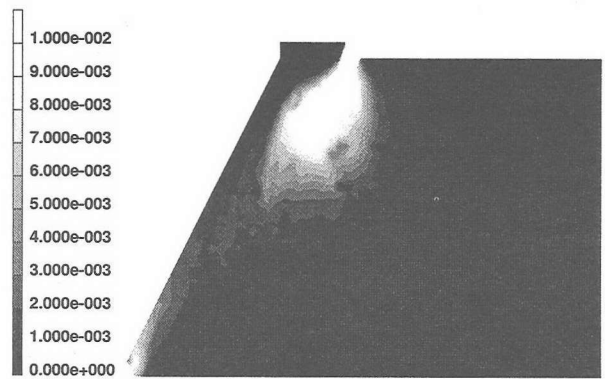


図-20 相当塑性ひずみ (偏心 27mm)

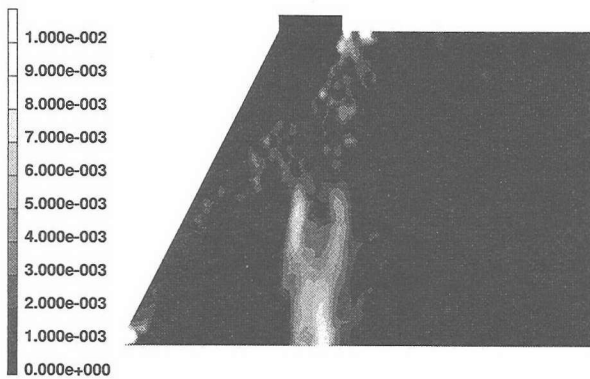


図-18 クラックひずみ (偏心 13mm)



図-21 クラックひずみ (偏心 27mm)

シュ 1 個だけ初期欠陥 (粘着力のみを約 30%低減) を配置した解析を実施した. 初期欠陥は複数置くことで破壊形態は変化するが, 本章では, 理解が複雑なることを避けるために, 敢えて初期欠陥の配置箇所のみを検討項目とした.

まず, 荷重-変位関係について考察を行う. 図-12 には実験における荷重-変位関係を示しているが, これより, 偏心 10mm の場合は変位量 0.7mm を, また, 偏心 25mm の場合は変位量 0.6mm を過ぎると徐々に勾

配が緩くなり, ピーク時の変位量は, 偏心 10mm の場合で 1.2 ~ 1.3mm, 偏心 25mm で 1.1 ~ 1.2mm である. 図-13~図-15 に, 初期欠陥の無いケース, Case A および Case B の解析結果を示す. なお, 図中には, 偏心 13mm と 25mm のケースを併せてプロットしている. 図より, 偏心 25mm のケースにおいてピーク時の変位が実験より若干小さいものの, 均質および非均質の解析ともピーク荷重はほぼ実験と同値で, 曲線の概形は実験に近い. 偏心 10mm のケースにおいては,



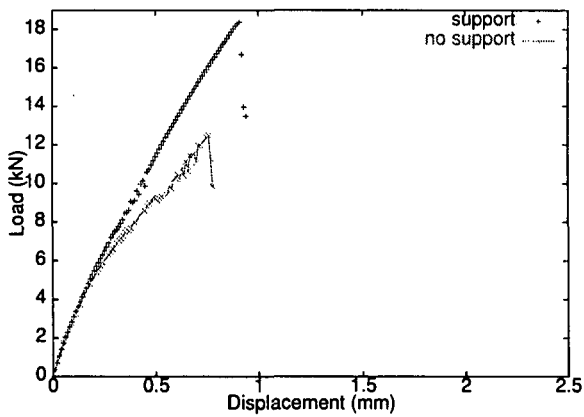


図-22 荷重-変位曲線 (補強材打設)

ピーク時の荷重および変位はほぼ同値で、曲線の概形は実験に近いことから、解析は精度よく実験におけるマクロ的挙動を再現出来ていると言えよう。これより、斜面の破壊実験においても、材料非均質(初期欠陥)が構造物全体の挙動に大きな影響を及ぼしていると言いはない。

## (2) 破壊形態

次に、破壊形態について考察を加える。まず、図-16および図-19に、それぞれ偏心10mmおよび偏心25mmにおけるすべり面の進展状況(実験)を示す。図-16より、偏心10mmの場合、すべり面は載荷板右端より発生し、鉛直下方向に進展しながら、徐々に左方に円弧を描くようになり、深度50mm付近ですべり面の進行方向は左斜め下45度方向になる、ところが、すべり面が深度150mm付近まで進展すると、その付近で開口亀裂が発生し、最終的にはその亀裂がほぼ真下方向に供試体を貫通する。一方、偏心25mmの場合、すべり面は載荷板右端より発生するのは偏心10mmと同じであるが、偏心25mmの場合は鉛直下方向やや右斜めに進展しながら、徐々に左方に円弧を描くようになる。その後、すべり面が深度80mm付近まで進展すると、偏心10mmと同様、この付近で開口亀裂が発生し、亀裂はそのまま鉛直下方向に供試体を貫通するように進展する。文献<sup>6)</sup>には両供試体の破壊性状の写真も掲載されているが、それらからは、載荷板端部より発生したすべり面が斜面方向に進展する様子と、上述した付近より発生した亀裂が鉛直下方向に供試体を貫通するように進展している様子が明確に伺える。このように、実験では異なる2つの破壊モードが存在しており、本研究では、せん断すべりによる破壊をすべり面、引張破壊による破壊を亀裂と表現している。

解析では、周辺部よりも粘着力を30%低減させているが、その領域が極めて小さい領域(検討したのは有限要素1個から9個で、全体領域のおよそ0.1%~1.0%)

であることから、初期欠陥の導入によって破壊形態が大きく変化することはなかった。本来であれば上述した全ての解析ケースについて破壊形態を示した上で非均質性の影響について議論を行うべきであるが、破壊形態の差がなく、また、紙面の制約もあることから、初期欠陥を導入していない結果のみを示す。相当塑性ひずみおよびクラックひずみ分布を、偏心10mmについては図-17および図-18に、偏心25mmについては図-20および図-21にそれぞれ示す。なお、クラックひずみは、図-5に示す引張破壊後のクラック(亀裂)に垂直な方向のひずみ成分である。図より、偏心10mmおよび偏心25mmとも載荷板端部から発生したすべり面が円弧を描くような形で分布し、また、その先端近傍から鉛直下方向に亀裂が進展する形となっており、実現象に近い破壊形態を示している。

以上より、岩盤斜面においては、材料非均質領域が小さい範囲では、材料非均質性は材料のマクロ的挙動に大きな影響を与えないばかりでなく、平面ひずみ圧縮試験とは異なり、破壊形態にもあまり影響を及ぼさないことが判明した。これは、岩盤斜面のような問題の場合、その破壊形態は、小さな非均質領域以上に幾何学的構造および境界条件に影響を受けるためと思われる。岩盤斜面に関して、その設計/施工をより合理かつ経済的にするためには、地層構造などを可能な限り把握することも重要であるが、同時に、適切な境界条件の設定などが求められよう。

## (3) 補強材の効果

本小節では、上述の結果を踏まえて、岩盤斜面に施す補強材の効果について、試行的に検討することとした。補強材としては、ケーブルボルトのような材質のものを導入することを想定し、その直径を30mm、長さを200mm、弾性係数を210,000MPaと仮定し、斜面中部の1箇所にはトラス要素(弾性体)として追加した(図-23あるいは図-24の白い線が補強材)。補強材の追加は、偏心25mm(均質)の解析ケースに対して行い、想定すべり面/亀裂に対して垂直になるような配置とした。図-22に荷重-変位曲線を、図-23および図-24に相当塑性ひずみおよびクラックひずみ分布をプロットした。図-22には、併せて補強材無の結果もプロットしているが、補強材の導入によって、耐荷重が大きく増大しているのが分かる。また図-24より、クラックはほとんど発生しておらず、さらに図-23より、せん断すべりの分布は分散傾向にあることが分かる。これより、補強材の導入によってクラックの発生の抑制とせん断すべりの分散化が図られ、結果としてピーク荷重が増大するものと思われる。なお、せん断すべりに対してきちんと抵抗できる要素、例えばソリッド要素などを追加することでせん断すべりに対する抵抗性も増大するものと思われる。言うまでもないが、地質状況や地層構造を解析に反映させることがで

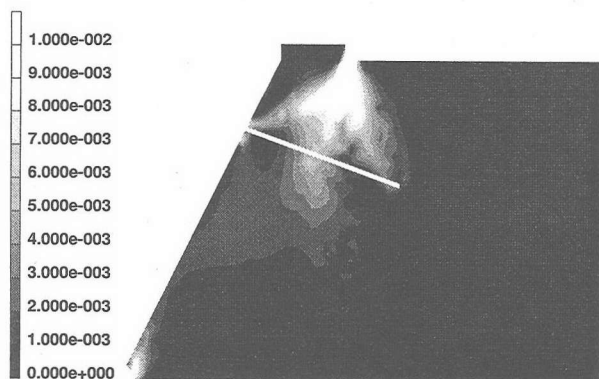


図-23 相当塑性ひずみ (補強材打設)



図-24 クラックひずみ (補強材打設)

できれば補強材/支保が最も効果を発揮する導入方法が明確になり、より合理的かつ経済的な支保設計につながるものと思われる。

## 5. まとめ

本研究では、岩盤構造物が有する真の安全性を議論したり、設計/施工を経済的かつ合理的にするために、岩盤の挙動を精度良く現象を再現できるだけでなく、入力パラメータなどを客観的に決定でき、そして可能な限り複雑な面を排除して現場技術者にとっても理解が容易な解析フロー(数値解析手法も含む)を提案すると同時に、岩盤構造物を均質と仮定できる条件などを議論するための情報提供を念頭に置いて、非均質性が岩盤構造物に及ぼす影響について考察を行った。フローとしては、まず、岩盤から得たボーリングコアによる室内試験から変形特性や強度特性を把握し、それから構成モデルを導き、予測/安定解析手法を構築する。次に、調査によって得られた情報(地質や地層構造)を構造物の予測/安定解析に反映させ、その上で解析を実施するというものである。

一連の検討/考察より、材料中に非均質性が認められるもののその領域が大きくない範囲では、材料非均

質性は材料全体の挙動に大きな影響を及ぼすものではなく、また、実構造物のような問題では、材料非均質性より構造物の形状や境界条件の方が影響が大きいという感触を得た。また、補強材の導入に関しては、補強材をトラス要素でモデル化したため引張クラックに対する効果が顕著となったが、せん断すべりに対しても分布を分散させる効果があること、それにともない供試体の耐力が増加することが判明した。

なお、本研究では、こうした手法の妥当性を検討するために2つの実験を通して検討を行ったが、材料非均質性を強度の低下した初期欠陥という形でしか検討を行っていないため、現象を全て理解したとは言い難く、上記のような考え方がスタンダードであるとは断定できない。したがって、材料非均質性をより一般化させた検討と、解析モデル自体で局所化を考慮できるような手法との比較が今後の課題である。

付記： 本研究の一部は、文部科学省科学研究補助金(若手研究(B) 課題番号 14750392, 研究代表者: 吉田秀典), (財) 前田記念工学振興財団研究助成(研究代表者: 吉田秀典)の助成を得て行なった。

謝辞： 国土交通省・佐々木規雄氏、電源開発株式会社・星谷寛氏には、氏らの研究成果(図)の掲載を快諾して頂きました。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会編：岩盤構造物の設計に関する研究報告書，地盤工学会，1997
- 2) Hallbauer, D.K., Wagner, H., Cook, N.G.W. : Some observations concerning the microscopic and mechanical behavior of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Min. Sci. Vol.10, pp.713-726, 1973
- 3) Yoshida, T., Tatsuoka, F., Siddiquee, M.S.A. and Kamegai, Y. : Shear banding in sands observed in plane strain compression, Localisation and Bifurcation Theory for Soils and Rocks, Balkema, pp.165-179, 1995
- 4) Tatsuoka, F and Kim, Y.S. : Deformation of shear zone in sedimentary soft rock observed in triaxial compression, Localisation and Bifurcation Theory for Soils and Rocks, Balkema, pp.181-187, 1995
- 5) 佐々木規雄：東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻・修士論文，An Analysis of Progressive Failure of Soft Rock and Validation by Model Test, pp12-19, 1998
- 6) 星谷寛：東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻・修士論文，軟岩の破壊挙動に対する解析と模型実験による検証，pp17-40, 2000
- 7) 金子岳夫：東京大学工学部土木工学科・学士論文，人工軟岩の平面ひずみ圧縮試験と変形局所化の計測，1993
- 8) 西上裕之：東京大学大学院工学系研究科土木工学専攻・修士論文，人工軟岩の支持力試験とレーザースペックル法による進行性破壊の計測，1993

(2003年4月18日受付)