

不連続性岩盤の調査と試験・計測

土木学会岩盤力学委員会 試験・計測小委員会

委員長 赤木知之（豊田高専）

概要

rock mechanics という用語が欧米で使われ始めたのは 1950 年頃で比較的新しい。この語の日本語訳は、材料学や鉱山学の分野では「岩石力学」、土質工学の分野では「岩の力学」と、それぞれ材料としての岩をイメージしているのに対し、土木工学の分野では「岩盤力学」と訳され、ダム基礎岩盤の支持力、トンネルや地下大空洞の周辺岩盤の挙動および岩盤斜面の安定性などと、いわゆる土木構造物の一部としての岩塊の力学挙動を評価する学問として捕らえている。

岩盤とは亀裂や節理などの地質構造的な不連続面を含んだ岩の集合体であると定義できるから、その力学的性質の定量的な評価は、単に採取試料の実験室規模での材料試験のみでは不可能であり、連続体力学を応用した解析的アプローチが必要となる。

岩盤力学委員会試験・計測小委員会では、そのために、平板載荷試験、ブロックせん断試験、ロックせん断試験および孔内載荷試験などの岩盤の力学的性質を把握するための原位置岩盤試験法の指針化を試みてきた。しかし、このような原位置岩盤試験によって得られる結果は、その試験体である岩盤に含まれる節理、層理、亀裂などの不連続面の状態によって異なり、大きくばらつくのが普通である。したがって、岩盤試験結果の評価とその設計への適用に関しては、常に岩盤に含まれる不連続面の定量的評価の結果を加味しなければならなかった。すなわち、興味の対象は、試験結果と不連続面量および母岩の力学特性との相関性を探り、母岩の特性を不連続面の状態に応じて如何に修正するかにあった。

一方、数値解析技術の飛躍的進歩に伴い、不連続面の状態を明確にした種々の解析モデルが開発され、不連続性岩盤の挙動を直接解析できる研究が目を見張る程の勢いで進んでいる。しかしながら、結果として、不連続面情報の収集・評価の技術が相対的に追いつけないこととなり、全体としての不連続性岩盤の評価精度を著しく向上させることができないでいる。したがって、我々岩盤工学に携わる技術者の目の関心事は、岩盤中に含まれる不連続面分布の性状を如何にして定量的に把握するか、および、不連続面そのものの力学特性をどのように評価するかに集中せざるを得ない状況となっている。

岩盤中に内在する不連続面は、その地質学および物理的成因の多様性のため、密度・方向・寸法・形状・開口幅・粗さ・挟在物などの違いで千変万化の様相を示す。これらを定量的に評価することは並大抵のことで

はないであろう。しかし、我々はそれにもめげずに困難に立ち向かい、一つ一つの難問を克服して、不連続性岩盤を上手にスマートに取り扱う方法を模索する努力を重ねる必要がある。

そのような認識の下に、試験・計測小委員会では今後の研究課題として標題のようなテーマを選んだ次第である。我々、小委員会のメンバーは、必ずしも不連続性岩盤に精通している訳ではないが、岩盤力学が抱える難問に敢えて挑む覚悟でいる。そのためには、まず、この分野に関心を持ってお集まりいただいた皆様から、広くご意見を賜ることが肝要かと、このテーマでのパネルディスカッションを企画した次第である。

本パネルディスカッションは以下のような内容で進められる。

1. 不連続性岩盤の指標

不連続性岩盤の挙動を解析的に予測する種々のモデルが開発されているが、大きく分けると等価弾性コンプライアンス法、クラックテンソル法、等価体積欠損法などの等価連続体解析法とジョイント要素法、個別剛体要素法、剛体ブロックモデルなどの不連続体解析法に分類される。

このような解析法において要求される各種の入力パラメータについてまとめる。パネリストは東京大学土木工学科の堀井秀之氏である。

2. 岩盤不連続面の力学特性

不連続面の力学特性を評価するパラメータとして代表的なものに垂直剛性とせん断剛性があるが、それらの試験法および試験結果の事例について解説する。パネリストは埼玉大学建設工学科の山辺正氏である。

3. 不連続性面分布性状の調査とその評価

不連続面の存在密度、寸法、方向など、その性状を特定するためのパラメータは非常に多い。しかし、現状ではそれらの定量的評価に困難を極めている。現状におけるこれらの具体的な調査法についてまとめる。パネリストは応用地質（株）の田中達吉氏である。

4. 不連続性岩盤の挙動

岩盤挙動に顕著に影響をおよぼす不連続面を事前に特定できないために、施工時の計測において、予測もつかない挙動に遭遇し困惑させられる場合が多い。そのような事例を地下発電所空洞の施工時の計測結果について示す。パネリストは関西電力（株）の打田靖夫氏である。

不連続性岩盤の指標・原位置試験法と岩盤の解析手法

東京大学 正員 堀井秀之 学生員 吉田秀典

1 岩盤の指標と解析手法

岩盤の物性を的確に表しうる指標（パラメータ）とそれに対する調査・試験方法を提案するという試みは、次のような結末を迎えがちである：「確かに物性を表しているのだが、現場の設計・施工でどう使えばいいのか？・・・」

用いるべき岩盤の指標と対応する調査・試験方法は、対象となる岩盤構造物がどのようなもので、設計・施工管理で何が必要になるかによって異なる。岩盤分類で十分な場合もあるし、高度な解析が必要な場合もある。議論を大規模地下空洞に限るとする

岩盤の指標と解析手法

- 用いるべき岩盤の指標と対応する調査・試験方法は、対象となる岩盤構造物の設計・施工で用いる解析手法によって決まる
- 岩盤の解析手法の確立が重要

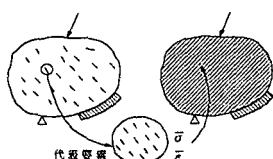
設計・施工

指標・原位置試験

解析手法

マイクロメカニクスに基づく連続体理論 MBC理論(Micromechanics-Based Continuum Theory)

- 個々の挙動+平均化 = 等価な連続体の挙動
- 代表要素の平均応力と平均ひずみの関係 = 等価連続体の構成式



ならば、より合理的な設計・施工管理法を目指すためには岩盤の挙動をよりの確に捉えた解析手法が不可欠である。設計・施工管理で用いられる解析手法の入力パラメータのうち岩盤の物性を表すものは、岩盤の指標そのもの、あるいは岩盤の指標から一意的に定まるものとなっていないてはならない。従って、岩盤の指標とそれを決定する調査・試験法の議論は、設計・施工管理でどのような解析手法を用いるかに依存しており、対象となる構造物における要求に応じた、岩盤の挙動を予測・再現しうる解析手法は何かということが基本的な問題点であることが理解される。

2 マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデル

岩盤に対する解析手法を大きく類別すれば、塑性論の拡張である現象論的解析法とDEMなどの不連続体解析法に分けられよう。前者ではジョイントの開口・せん断変形により生ずる強い岩盤の異方性を扱うことが難しく、後者では全ての不連続面を取り扱うことができないため、少数の不連続面で多数の不連続面を表すこととなり、結局非現実的な物性パラメータを用いないと現象を再現できない、といった不都合が生ずる場合がある。

著者らはマイクロメカニクスに基づく連続体理論（MBC理論）を岩盤に適用し、岩盤の連続体モデルを提案した。その特徴は、個々のジョイントの開口・せん断変形を評価した連続体モデルであること、卓越するジョイントセットの走向・傾斜、平均間隔等の情報を解析の入力データとして直接解析に反映すること、さらに解析結果としてジョイントの開口・せん断変位量の空間分布が得られることにある。これまでに実際の地下発電所空洞の掘削解析を行い、解析結果を実測結果と比較し、その適用性を検討してきたが、結果は今回の講演論文集にも発表した通り解析手法の適用性を示していると考えられる。

岩盤のMBCモデルの特徴

- 個々のジョイントの開口・せん断変形を評価した連続体モデル
- 卓越するジョイントセットの走向・傾斜、平均間隔等の情報を解析の入力データとして直接解析に反映
- 解析結果としてジョイントの開口・せん断変位量の空間分布が得られる

不連続面分布性状の調査法

応用地質(株)

田中達吉

1) はじめに

岩盤が構造物の基礎あるいは構造物の収容体とされるときに、岩盤の強度および透水に関する性質について岩盤中に存在する不連続面の影響を考慮した設計検討が必要とされる。不連続面は地質の違いによって性質が異なり、検討するにあたって地質構造との関連を考察し成因、規模、分布形態等を調査分析していくことが肝要である。近年、計算機の発達と解析手法の研究開発が進み、様々な地盤モデルに対する数値解析が可能となってきているが、実岩盤中の不連続面の分布性状を調査する手法が数値解析に適合するような精度の成果を出し得ていないのが現状である。大規模地下構造物の建設に際し、不連続面調査の要求が高まってきている中で新しい試みが行われているので、ここではその一部を紹介し、期待される精度と調査成果について考えてみたい。

2) 岩盤不連続面分布の調査法

調査の手法は目的により様々な形態をとっているが、全体を概括すると図-1のようになろう。不連続面の分布の特徴は、節理等に見られるような等間隔なものと、断層等に見られる局所集中的なものに大別される。後者はフラクタル性を有している。また、全くランダムな分布を示すものもある。モデル化する場合には、不連続面がどちらのタイプに支配されているかを判断しておくことが必要である。調査計画を立案する際にも重要な問題である。

間接的な調査法では、調査可能な不連続面の規模はある程度大規模なものに限られている。物理探査も概査段階で用いられていたが、最近ではトモグラフィや地下レーダー等の技術で小規模な不連続面の探査手法が開発されている。

直接観察による調査法は、露頭等でスキャンライン法や枠内調査法がよく用いられている。直接観察は、大規模なものから微小な割れ目まで調べることができることが長所ではあるが、対象となるものを調査する前にある程度規定しておかないと統計的に処理する際に大変繁雑になる。

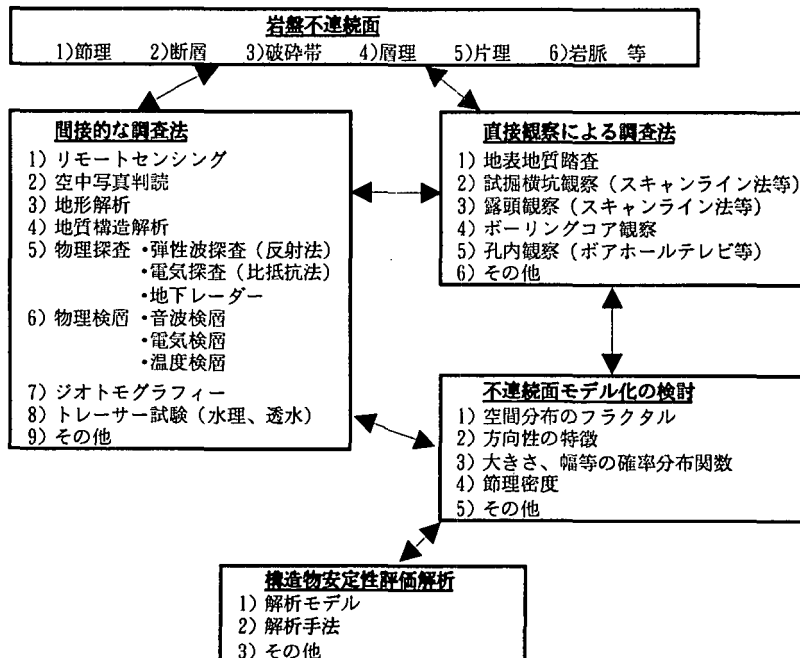


図-1 岩盤不連続面分布の調査・評価の流れ

モデル化の検討に際して、大規模な断層は地質構造解析により推定されるが、比較的小規模な不連続面は分布密度をボーリングコア観察や物理探査の結果から推定して岩盤分類として表現する場合とひとつひとつトレースさせる必要がある場合では取り扱いが異なる。後者の場合は、統計的な推定に頼らざるを得ないので不連続面の分布位置については信頼性が劣る。

3) 調査事例 1), 2)

調査の事例として、反射法地震探査を用いて中規模な不連続面の分布を探査した例を示す。

測定および解析方法は、反射法の応用技術であるオフセットVSP (図-2 参照) によっている。この事例では互いに直交する調査横坑を利用している。図-3 は、本調査により得られた反射面の分布である。これらの反射面にあたる数ヶ所では幅十数cmの破砕帯を伴う弱層であり、他の箇所は分布する岩種の違いである。反射面が検出された位置と地質観察による位置は多少異なっているが、これは3次元空間の反射データを2次的に解釈しているための誤差とみなされている。

一方、トンネル坑内を利用した反射法によって切羽の前方あるいはトンネル周辺に分布する弱層を捉える手法も試みられている。図-4 は、掘削中のトンネルで行った反射法地震探査データにVSP処理した波形記録である。トンネル軸と斜交した構造からのものと推定される反射波が見られる。

4) まとめ

不連続面の分布状況調査は、前に述べたように地質構造との関連もあり、一般に困難である。物理探査技術は露頭観察データとの関連やトレーサーを用いて不連続面の物理的性質を強制的に変化させるなどして見えない部分を可視化することができ得る手法として期待が持たれる。しかし手法の適用性(探査対象の規模や分布範囲等)はこれからの検討課題である。詳細な調査を行おうとするほどコスト高になるので、対象となる構造物の安定性評価に必要な不連続面を抽出して、合理的な調査手法を選択・実施していくことが重要である。

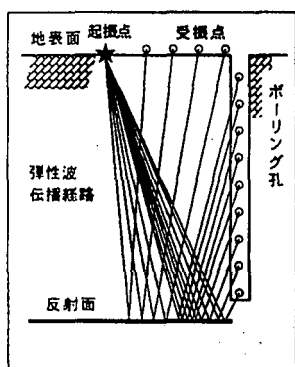


図-2 オフセットVSPの観測概念図

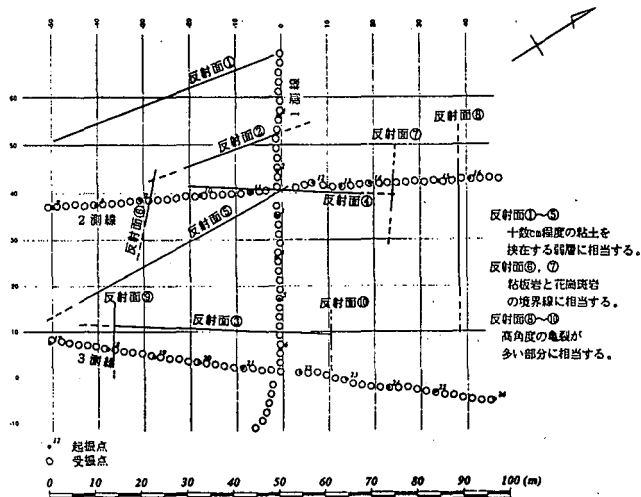


図-3 横坑間VSPによる反射面の分布状況

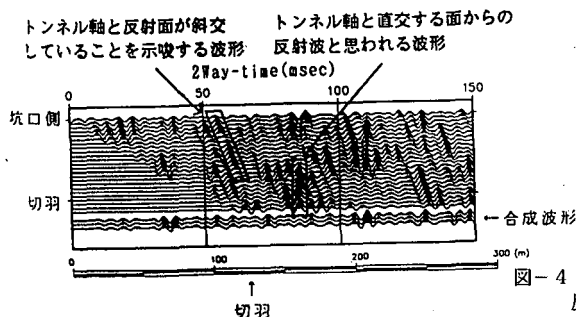


図-4 トンネル坑内を利用した反射法の解析結果とその解釈

参考文献

- いずれも第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集(1996)
- 1) 影山・原口・山田・吉田「横坑間反射法地震探査を用いた断層等の検出の試み」
- 2) 林・斎藤「地震探査によるトンネル切羽前方の反射面分布予測」

不連続面の力学特性

埼玉大学工学部建設工学科 山辺 正

1. はじめに

不連続面の力学特性のうち、ここでは特に変形特性に限って話を進める。この変形特性については、多くの室内実験や現位置試験の結果^{1),2)}が報告されている。本論では、それらの実験結果を踏まえて提案されている多くの解析手法³⁾に現れる特徴的な物性値について議論したい。これらの解析手法には、それぞれの手法が着目した不連続性岩盤の力学特性を如何に表現するかが含まれている。不連続性岩盤の変形特性のうち、どの側面を主に取り上げたかによって当然、モデルの持つ表現力も異なるはずで、それらを一律に比較することにはあまり意味がない。力学特性に対応した物性値を求めなければ、解析手法に合致した入力も得られないことを考えると、それらのパラメータ一覧表のようなものここでは相応しいとは言えない。そこで、本文では不連続性岩盤の変形解析手法を分類して、それらの解析手法に含まれる不連続面の力学特性に関連するパラメータの決定にあたって留意すべき点について論ずる。

2. 不連続性岩盤解析手法の分類

不連続性岩盤の力学的性質を特徴づけているのは、岩盤内部に含まれる断層・節理・層理などの不連続面である。この不連続面の影響を数値解析に取り込む方法は大きく分けて、次の二通りといえる。第1は、不連続面の規模や位置の判っている場合に適用できる方法で、具体的にはGoodmanに代表されるジョイント要素^{4)~6)}を採用する方法であろう。ここでは、この種の解析手法を不連続体解析手法と呼ぶ事にする。第2の方法は、不連続面を多数含む岩盤をそれと等価な連続体に置き換える方法である。これを、連続体解析手法と呼ぶ。

現位置で決定しがたいパラメータを逆解析によって決めて、その後の挙動予測をする方法も有効で第3の方法となり得るが、ここでは論じない。以下に不連続体解析と連続体解析において特徴的なパラメータの決定方法について考える。なお、ここで取り上げる方法も含めて不連続体解析・連続体解析の両者の相互関係や広範な論文を参考にして現状を解説した資料³⁾が桜井・清水によって発表されており有用である。

3. 不連続体解析に現れる不連続面の力学特性

従来からGoodmanらのジョイント要素に用いる垂直剛性を求めるために、ジョイントを挟む供試体を用いて垂直応力と垂直変位の関係が利用されてきた。この場合には、亀裂を一本あるいは多数含む供試体の圧縮試験を実施して、供試体表面において不連続面をまたぐ変位を計測する必要がある。不連続面に作用している垂直応力を決定するためには、注目している不連続面の基準軸からの三次元的な傾きを予め計測しておくことが必要である。同様にせん断応力とせん断変位との関係からジョイント要素に用いるせん断剛性が求められている。過去に実施された多くの実験によると、クラックの垂直剛性のみならずせん断剛性も、クラック面への垂直応力に強く依存することが知られている。クラックに作用する平均的垂直応力に置き換える何らかの平均化が必要とされる。さらに岩盤の力学定数の寸法効果は力学的に重要なポイントである。この効果を表現できるパラメータを含むか、あるいは結果としてこの寸法効果を表現できる必要がある。

多くの実験が単に、特定の不連続面で観測される垂直剛性やせん断剛性を求めることにのみ集中していて、それらを構成関係に取り入れる努力を怠っているように見受けられる場合がある。岩石実験の解析ではなく、実岩盤の解析を最終的な目標とするならば、少なくともそのような視点を欠くことは出来ないはずである。以上、簡単に不連続体解析に含まれる力学パラメータについて検討したが、Cundallの開発した個別剛体要素法⁷⁾やShiとGoodmanが開発した解析手法⁸⁾に含まれるパラメータについてはここでは論じていない。また、不連続面の粗さ⁹⁾を取り込むとする努力も継続的に行われている。

4. 連続体解析に用いる不連続面の力学特性

岩盤内部に含まれる全ての不連続面の位置と規模を決定し、その力学特性までを決めることには相当の無理があるだろう。何らかの形式で連続体としての近似を持ち込む必要がある。ただし、連続体解析を実施するためには、対象領域の特定に関して不連続性岩盤をそれと等価な連続体として定義するための最小構造単位 Representative Elementary Volume の評価法について検討しなくてはならない。一度、この連続体解析を実施して良いことになれば、あとは不連続面の力学特性をどのように取り入れるかの問題である。いくつかの連続体解析^{10)~13)}においては、不連続面の特性として、亀裂の幾何学と亀裂の力学特性さらには岩石実質部分の力学特性を入力パラメータとしている。それらの解析手法において現れる不連続面の力学特性は従来からの実験結果を取り入れたものであって特に決定困難なものではない。それらをどのように構成則の中にとり入れたかが、解析手法ごとに異なるだけである。

5. おわりに

注意しなければならないことは、万能な道具は無いという認識だと思う。また、調査・試験や解析も含めてそれらが独立して存在するのではなくて、有機的に結びついている中で不連続面の力学特性が初めて意味を持つということだと思われる。不連続面の力学特性を表すパラメータの内、いくつかについての計測法は極めて複雑であり、これがデータの蓄積を妨げていることも考えられる。不連続性岩盤の本質を見極めるためには精度の高い計測法開発の努力も怠ってはならないが、簡便で実用的な計測法を開発することも必要であると考えられる。実岩盤においては、不連続面の走向・傾斜方向と、地圧の作用方向さらには構造物の持つ方向の3者が複雑に絡み合っている。調査や計測の結果を、解析に直接反映できる地質情報として与えることのできる処理システムをより一層完備することが望まれる。

参考文献

- 1) N. Barton & O. Stephansson ed. (1990): Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Balkema.
- 2) A. Pinto Da Cunha ed. (1990): Scale effects in rock masses, Balkema.
- 3) 桜井春輔・清水則一 (1992): 不連続性岩盤の解析手法の現状, 土と基礎, Vol.40, No.11, 39-44.
- 4) Goodman, R.E. et al. (1968): A model for the mechanics of jointed rock, SM3, ASCE, 637-659.
- 5) Zienkiewicz, O.C. et al. (1970): Analysis on non-linear problems in rock mechanics with particular reference to jointed rock systems, Proc. 2nd. Int. Cong. ISRM, Vol.3, 501-509.
- 6) Ghaboussi, J. et al. (1973) Finite element for rock joints and interfaces, SM10, ASCE, 833-848.
- 7) Cundall, P.A. (1971): Computer model for simulating progressive large movements in blocky systems, ISRM Symp., Nancy, IV-8.
- 8) Shi, G. & Goodman, R.E. (1981): A new concept for support of underground and surface excavations in discontinuous rocks based on a keystone principle, Proc. 22nd. U.S. Symposium on Rock Mechanics, 310-316.
- 9) Bandis, S., Lumsden, A.C. & Barton, N. (1983): Fundamentals of rock joint deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., Vol.20, No.6, 249-268.
- 10) Kawamoto, T., Ichikawa, Y. & Kyoya, T. (1988): Deformation and fracturing behaviour of discontinuous rock mass and damage mechanics theory, Int. J. for Numerical and Analytical Methods in Geomech., Vol.12, No.1, 1-30.
- 11) Kaneko, K., Tanaka, Y. & Koike, K. (1991): Nonlinear elastic analysis of jointed rock by equivalent volume defect method, Proc. 7th Int. Congress ISRM, 1, 755-758.
- 12) Cai, M. & Hori-i, H. (1992): A constitutive model of highly jointed rock masses, Mechanics of Materials, Vol.13, 217-246.
- 13) Oda, M., Yamabe, T., Ishizuka, Y., Kumasaka, H. & Tada, H. (1993): Elastic stress and strain in jointed rock masses by means of crack tensor analysis, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol.26 No.2, 89-112.

大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動

関西電力㈱総合技術研究所 打田 靖夫

1. まえがき

大規模な地下空洞を掘削する場合、事前に掘削に伴う岩盤の挙動予測解析が行われ、この結果を参考にし、補強工設計が行われている。掘削時には、岩盤の変形挙動に関する数多くの測定を行って予測結果と対比し、補強工増強の必要性が検討されている。しかし、節理等の不連続面に富む岩盤では、従来の連続体解析手法では説明困難な挙動がしばしば見受けられている。本稿では、事前予測とは異なる結果を得た地下発電所空洞掘削時の岩盤挙動計測事例を紹介する。

2. 掘削時の岩盤挙動計測事例

2-1. 計測地点の概要 計測地点は、斜面から約280mの地下に建設した発電所空洞の放水路側側壁部である。空洞横断面形状、測定位置と初期応力状態を図-1に示す。空洞周辺岩盤は、電中研式岩盤分類でC_{II}~C_{III}の堅硬なひん岩である。卓越する節理群は3組存在し、それらのうち2組は走向が空洞長軸にほぼ平行で、傾斜が流れ目および差し目である。

2-2. 不連続面の挙動¹⁾ 観測位置の真横を空洞盤下げ掘削が通過した段階で側壁から6mの範囲に多数の新規亀裂が発生した。さらに、その後の掘削により亀裂の開口が進み、その本数が顕著に増加した(図-2)。これらの亀裂の開口幅増大量を、併設トンネル壁面を起点とする累計値「累計開口変位」として表し、図-3に示す。この結果によれば、この開口変位が側壁から14mの範囲にまで及んでいたことが分かる。

2-3. 応力状態の変化²⁾ 図-4は、埋設ひずみ計で測定した各掘削段階における岩塊中の鉛直ひずみ分布である。これらの結果から、測定範囲内に2つの圧縮帯が形成されたことが分かる。空洞側の圧縮帯のピークは、計測位置の真横の3ベンチ掘削により1m深部に移動した。これらの圧縮帯は、空洞掘削による応力再配分が不連続面を含めた地質構造の支配を受け、限定された位置に形成されたものと推定できる。

2-4. 変形形態の推定³⁾ 図-5は、観測位置の真横を盤下げ掘削が通過した段階で、ボアホールの併設トンネル側で観察された開口亀裂面沿いの局所的なずれである。また、図-6は、観測位置より下方の掘削によって断線した埋設計器の位置と断線時期およびボアホール内で確認した亀裂面沿いのずれである。これらの現象から、空洞掘削に伴う側壁岩盤の変形形態は、亀裂面沿いのすべりであると推定できる。

3. 不連続性岩盤の変形要因

上述の計測結果から不連続性岩盤の変形要因として、岩盤の初期応力状態、基質岩石の力学特性、不連続面の走向・傾斜、長さ、表面粗度と密度、空洞形状、掘削による応力解放、応力再配分による主応力状態の変化(一軸化、圧縮帯と免圧帯の形成)などが考えられる。

4. 今後の課題

地下空洞周辺岩盤のような除荷時の岩盤挙動は、拘束・載荷の場合に比して不連続面の影響を大きく受けると考えられる。したがって、不連続面の調査項目と調査法、除荷過程における不連続性岩盤の力学特性試験法、数値解析による不連続性岩盤の挙動予測方法(モデル化を含む)が今後の課題となろう。

参考文献

- 1) 打田・他：空洞掘削時の岩盤不連続面の進展性状に関する一考察，第9回岩の力学国内シンポジウム，1994. 1.
- 2) 打田・他：地下空洞掘削時の岩盤内鉛直ひずみ分布に関する一考察，第15回西日本岩盤工学シンポジウム，1994. 7.
- 3) 打田・他：大規模地下空洞掘削における不連続性岩盤の変形形態，土木学会第49回年次講演会，1994. 9.

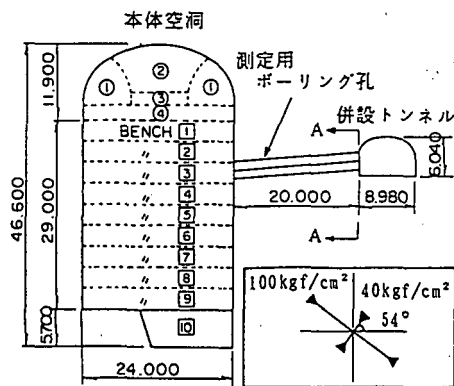


図-1 空洞横断形状、測定位置と初期応力状態

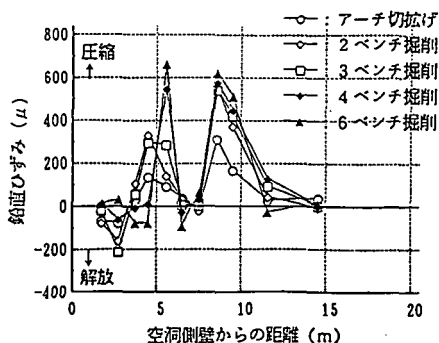


図-4 各掘削段階における鉛直ひずみの分布

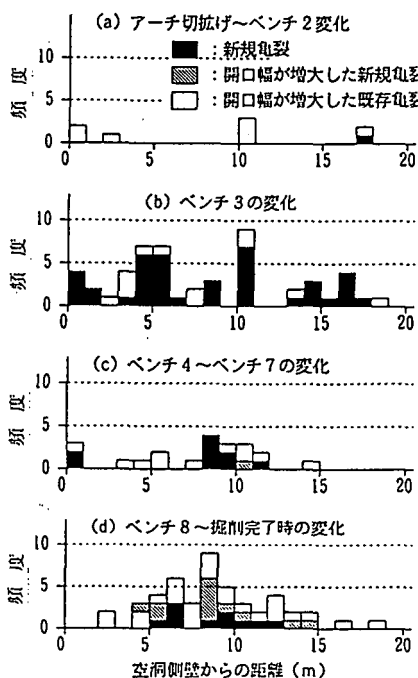


図-2 各掘削段階で進展した亀裂の頻度分布

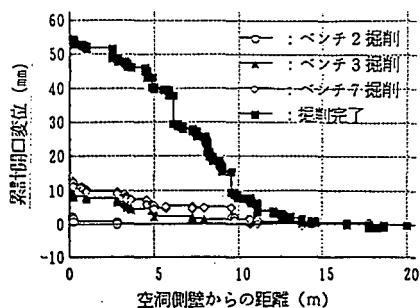


図-3 各掘削段階における亀裂累計開口変位

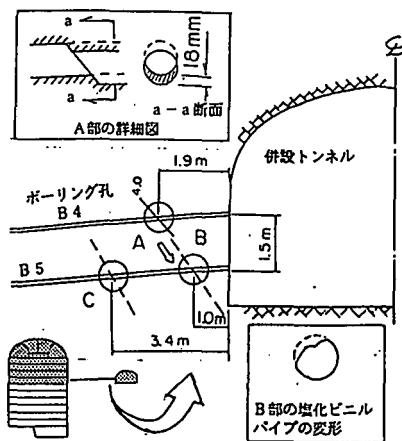


図-5 空洞掘削時にボアホール内に生じた変形

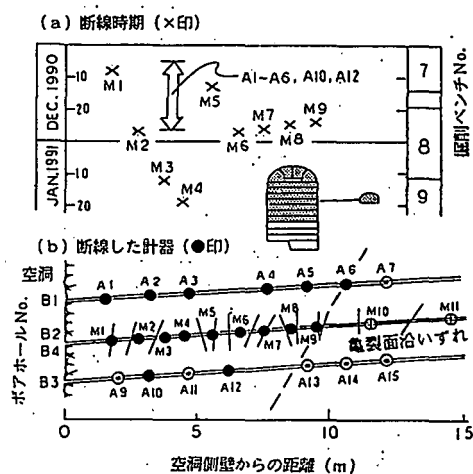


図-6 空洞掘削時に断線した埋設計器の位置、断線時期と亀裂面沿いずれの位置