

## 不連続性岩盤の調査・解析と評価

### 4. 不連続性岩盤における調査・解析事例 (応力変形問題) (その4)

羽出山 吉 裕 (はつやま よしひろ)  
大成建設(株)札幌支店

大 津 宏 康 (おおつ ひろやす)  
京都大学大学院工学研究科

堀 井 秀 之 (ほりい ひでゆき)  
東京大学大学院工学研究科

吉 田 秀 典 (よした ひでのり)  
香川大学工学部安全システム建設工学科

#### 4.3 地下空洞

##### 4.3.1 クラックテンソル理論を適用した地下備蓄空洞の評価

###### 1) はじめに

地下石油備蓄は、オイルショック以降の原油の国家備蓄政策の下で、従来の陸上タンク方式に加えて新たな方式として採用されたものである。地下備蓄方式<sup>1)</sup>の最大の特徴は、地下水面下の岩盤内に空洞を掘削し、自然または人工の地下水圧によって漏油を防止する水封システムを採用していることである(図-4.3.1)。地下水位以下の岩盤中に空洞を掘削し放置すれば、周囲から空洞内への地下水の浸透が生じ、空洞は地下水によって満たされる。空洞から排水を行って、この中に石油を貯蔵すると、石油は空洞底部の水床上に浮き、さらに周辺から浸透してくる地下水に押し包まれて漏油することなく安全に貯蔵できる。地下備蓄空洞の要求機能は、岩盤中に所定の空間を造り石油を貯蔵することである。空洞断面、規模、形状について制約が無く、支保も吹付けコンクリート、ロックボルトを用いているのみである(図-4.3.2)。以上から、地下備蓄空洞での最重要検討項目は、

この水封システム機能を満足させるための不連続性岩盤の水理学的評価である。以下に菊間地下石油備蓄基地(愛媛県越智郡菊間町)の岩盤タンク工事で得た不連続面の情報を用いて、クラックテンソル理論による空洞評価を試みた結果を示す。

###### 2) 菊間地下石油備蓄基地における適用例

###### a) 概要

菊間地下備蓄基地は7本の岩盤タンクからなり、地表面からの土被りは80~100mである(岩盤タンク床面レベルEL.-65m)。断面形状は、幅20.5m、高さ30mの食パン型で、それぞれのタンクの長さは230~448mである。菊間岩盤地下タンクの岩盤は、領家花崗岩と呼ばれる白亜紀後期の花崗岩ないし花崗閃緑岩に属し、堅硬緻密である。岩盤の力学、水理学的調査結果<sup>2)</sup>を以下に示す。

- 岩盤等級<sup>2)</sup>は、電中研式岩盤区分  $C_H \sim C_M$  級に属し、コアでの一軸圧縮強度は、80~100 MPa (800~1 000 kgf/cm<sup>2</sup>) の範囲にある。
- 岩盤の不連続性を表す指数である RQD は80~85%であり、不連続面は比較的少ない。また、その不連続面に沿った風化変色もほとんどない。
- 空洞の安定性の検討段階で、岩盤は不連続面の分布状況等を考慮した等級に区分され、その平均的な巨視的

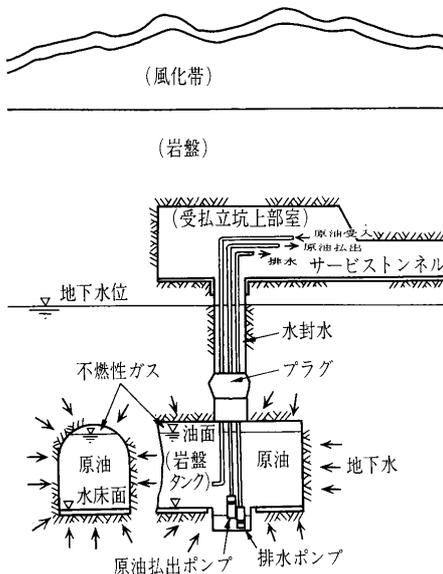


図-4.3.1 水封式地下備蓄の原理<sup>1)</sup>

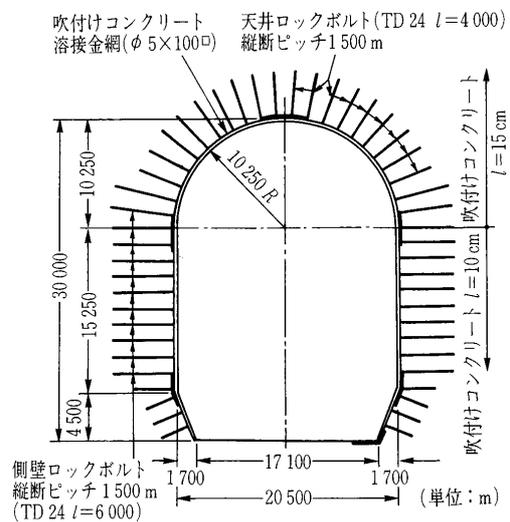
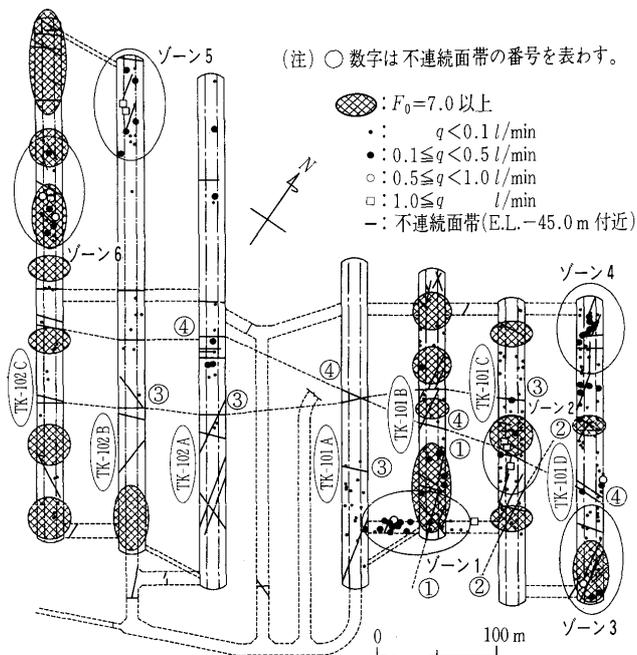


図-4.3.2 標準支保工<sup>1)</sup>

講座



図—4.3.3 空洞掘削時湧水箇所および  $F_0=7.0$  以上の範囲<sup>3)</sup>

変形係数<sup>2)</sup>は、6.4 GPa (65 000 kgf/cm<sup>2</sup>) と設定された。

- 破砕部を含めた岩盤の透水係数は、ボーリング孔を用いた透水試験結果で、 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8}$  cm/s 程度である。

b) 地下水挙動の計測結果

岩盤タンク掘削に伴う湧水の発生状況<sup>3)</sup>は、掘削された空洞上部からの湧水が支配的であり、図—4.3.3に湧水箇所と EL.-45.0 で確認した不連続面帯を図示する。図中のゾーン1~6での湧水が顕著であった。

c) クラックテンソルによる不連続面分布の評価

Oda<sup>4)</sup>によって提案されたクラックテンソル理論は、不連続面の幾何学特性 (密度, 大きさ, 方向, 開口幅) をテンソル量で表現したものである。クラックテンソル  $F_{ij}$  により、不連続面を含んだ材料の変形特性<sup>5)</sup>や透水係数<sup>6)</sup>を評価することが可能である。また、Odaらは、数値実験結果から、クラックテンソル  $F_{ij}$  の第1不変量  $F_0$  値が7以上の材料は透水性に影響を及ぼす不連続面の連続性がよいと判断している。

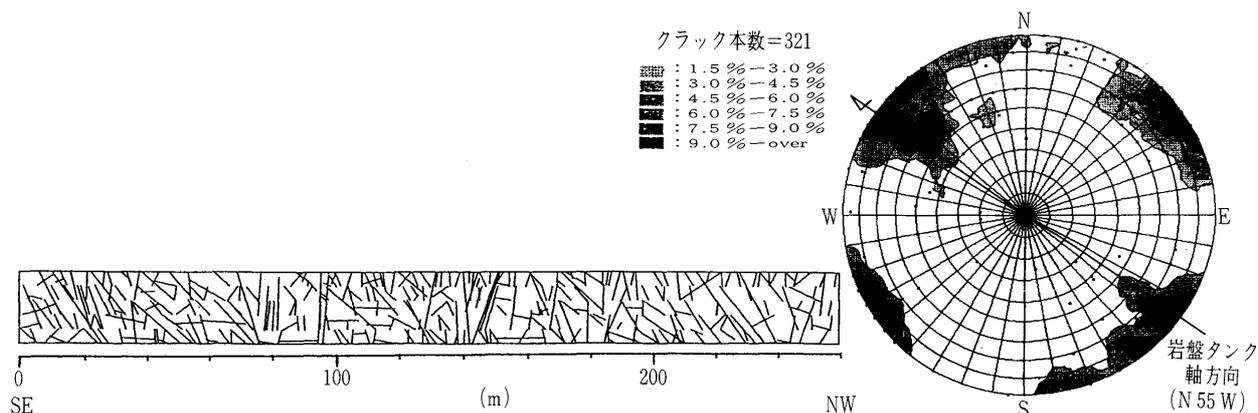
d) 湧水箇所とクラックテンソル

備蓄空洞で観察された不連続面の方向, 大きさ, 開口幅の情報が得られれば, クラックテンソルを用いて等価透水係数を算出することが可能である。しかしながら, 観察結果によると開口幅の情報が不十分であったこと, 介在物の有無といった性状の情報が少なかったことから, ここでは岩盤内の不連続面による空隙量を統計的に表すクラックテンソルの第1不変量  $F_0$  と空洞掘削時の湧水挙動との相関を考察する。

備蓄空洞施工時の不連続面調査では, 4.5 m ベンチ毎に詳細なスケッチと走向・傾斜の計測が行われている。図—4.3.4に TK-101D の岩盤タンクについてのトレースとシュミットネットを示す。この計測結果から, 式 (4.2) (4.2.1: クラックテンソルを適用したトンネルの評価) を用いてクラックテンソルを算出した。

図—4.3.3に  $F_0$  値とアーチ部の湧水マップを併せて示す。これから湧水箇所と  $F_0$  値7以上の箇所は半数程度が良い一致を示している。特に, 湧水が顕著であった領域の内, ゾーン1~3 およびゾーン6 はいずれもが不連続面の連続性がよいと判断される  $F_0$  値7以上の領域に含まれている。ただし, ゾーン4 およびゾーン5では, アーチ部では  $F_0$  値が7以上とはなっていない。一方, TK-101B の北西側端部付近および TK-102B の南東側端部付近のように, アーチ部からの湧水がほとんど見られなかった領域で  $F_0$  値が7以上となっている。このように湧水箇所と  $F_0$  値7以上の箇所の関係に相違が生じる原因は, この検討に適用したクラックテンソル  $F_{ij}$  では不連続面の走向・傾斜, 大きさ, 密度の幾何学情報を評価しているが, 岩盤の透水特性に大きな影響を与える不連続面開口幅, 不連続面内介在物の有無等の, 不連続面性状の要素を考慮していないためである。よって, 不連続面の数自体は少ないが開口性の不連続面が存在する領域では透水性がよくなり, 不連続面の数自体は多いが介在物を含んだ領域では, 透水性が悪くなるといった現象が評価できていない。

従来, シュミットネットを用いた不連続面の分布特性の評価やその間隔などの不連続面情報は, 事後解析により不連続面の存在が地下水挙動に及ぼす影響について, 定性的な議論を行う上での補足的なデータとして利用さ



図—4.3.4 岩盤タンク壁面不連続面トレース (左壁面) / シュミットネットプロット下半球投影 (TK-101D)<sup>3)</sup>

れてきた。これに対して、本研究によると、事前調査結果での不連続面の幾何学的な情報を基に、クラックテンソル理論を用いて算出した  $F_0$  値が岩盤の透水性を定量的に把握するための目安値として適用できる可能性がある。

e) 空洞掘削時の内空変位量とクラックテンソル

ここでは、地下備蓄空洞掘削時の変形計測結果を整理し、クラックテンソルの第1不変量  $F_0$  値と内空変位量との関係および岩盤分類との比較を示す。

空洞掘削時の岩盤の変形量は、タンク空洞軸方向に約30 mごとに設置された計測点において天端沈下と斜めに2測線、水平に5測線で計測している(図-4.3.5)。ここでは、水平に設置した測線の内、H3測線とH4測線で得られた内空変位量の平均を平均内空変位量として定義し、TK-101Dで得た  $F_0$  値との関係を計測点毎に整理した(図-4.3.6)。これから、 $F_0$  値と平均内空変位量の間には高い相関関係が認められる。最後に、岩盤タンク指針の岩盤分類の結果と  $F_0$  値の関係を図-4.3.7に示す。ここで、岩盤タンクの岩盤分類<sup>2)</sup> H, M, Lは電研方式の  $C_H, C_M, C_L$ に相当している。これから、ばらつきが大きいものの、両者には相関関係が認められる。

以上、地下備蓄空洞掘削時の湧水挙動および変形挙動に対してクラックテンソル理論を適用した事例を示した。その結果、湧水挙動および変形挙動に対してクラックテンソルの第1不変量  $F_0$  値によって定量的にこれらの評価することができる可能性を示した。この  $F_0$  値は、従来から、岩盤構造物の設計および施工管理において観察、計測が実施されている情報(地質観察図、不連続面の走

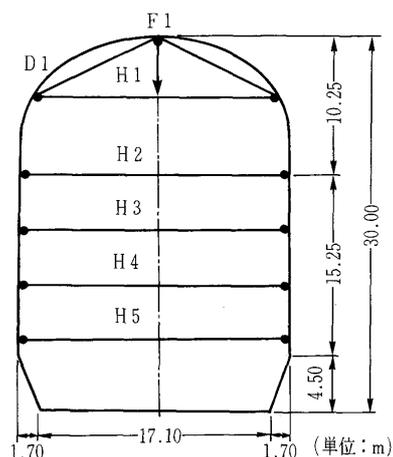


図-4.3.5 菊間地下備蓄基地計測概念図<sup>7)</sup>

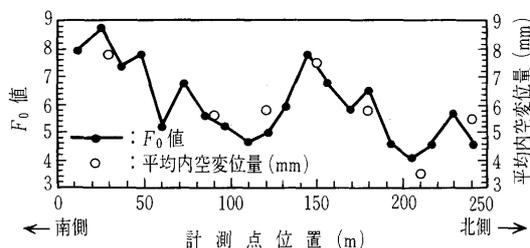


図-4.3.6  $F_0$  値～平均内空変位量関係 (TK-101D)<sup>7)</sup>

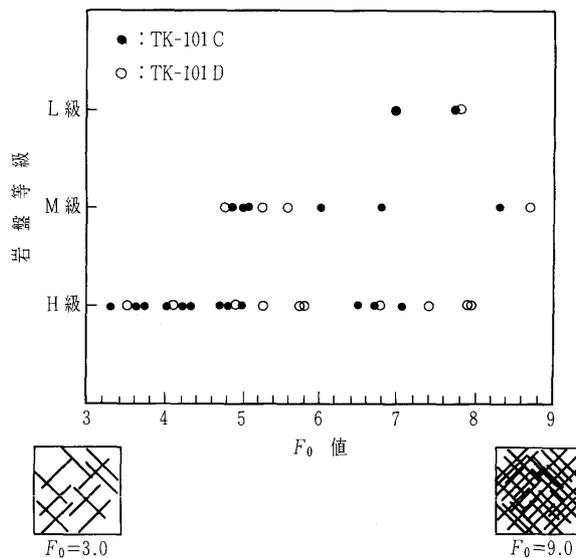


図-4.3.7  $F_0$  値～岩盤等級関係 (TK-101C, D)

向・傾斜)から算出可能なものである。今後は、このような事例を積み重ね検証を加えることによって、不連続性岩盤の設計手法の一つとして確立されるものと期待されている。(羽出山吉裕, 大津宏康)

4.3.2 MBC (マイクロメカニクスに基づく連続体) モデルを適用した地下発電所空洞の評価

1) はじめに

岩盤中には無数の不連続面が存在するが、こうした岩盤内に大規模地下空洞を掘削する場合、岩盤挙動の支配的なメカニズムは地山応力解放により生ずる不連続面のせん断すべり・開口であることが知られている。しかしながら、岩盤に含まれる不連続面の数は膨大で、これらを個別に扱うことは到底不可能であり、不連続面を含む岩盤を等価な連続体に置き換えた解析が望まれる。

材料内に存在する不連続面の変形を考慮に入れて連続体理論を構築する手段として、著者らは、マイクロメカニクスに基づく連続体理論を提案している<sup>8)</sup>。この理論は、材料の巨視的挙動の支配的メカニズムはマイクロクラックや不均一介在物という微視構造要素の存在、あるいはその発生・成長であるという見地に立って、微視構造要素を含む材料の力学的挙動をとらえようとする連続体理論である。定式化にあたっては個々の微視構造要素をモデル化し、その挙動に基づき代表要素内において平均化操作を行うことにより、等価な連続体としての挙動、すなわち巨視的な平均応力と平均ひずみの関係が求まる。これが等価な連続体の1点における材料の挙動を与えるものとして連続体の解析を行う。不連続面を多数含む岩盤の場合、代表要素内における平均応力と平均ひずみの関係は、内在する不連続面の寸法、平均間隔、および方向分布に依存し、材料は異方的な挙動を強く呈する。

前述のとおり、不連続面を多数含む岩盤において空洞掘削が行われる場合、地山応力解放により生ずる不連続面のせん断すべり・開口が岩盤挙動の支配的メカニズムである。空洞掘削時の空洞周辺の応力場は、掘削に伴っ

## 講座

て応力が解放されるとはいえ、依然として圧縮場にある。圧縮下において不連続面が開口変形を生ずるメカニズムとして、表—4.1.4 (4.1章参照) 内に示されているような起伏を有する不連続面を考える。不連続面の一方の面でクローンの摩擦条件が満足された時、その面でせん断すべりが開始し、別の面では開口を生ずる。こうしたモデル化を行うことにより不連続面の挙動が定式化され、さらに不連続面を含む岩盤の構成式を導くことができる。こうして導かれた岩盤の構成式を有限要素解析コードなどに組み込むことにより、任意の岩盤構造物・荷重条件における岩盤挙動の解析が可能となる。モデルの概要や基本方程式に関しては、「4.1 概論」を参照されたい。

この解析手法の特徴としては、地質調査で得られた不連続面の方向や間隔が直接解析の入力データとなる、不連続面のせん断・開口量の空間分布が解析結果として得られることなどが挙げられる。岩盤の挙動は不連続面の方向や岩盤に作用している初期地圧の大きさ・方向の組み合わせに依存するが、この解析手法はそのような影響を表すことができる。

## 2) 塩原発電所の例

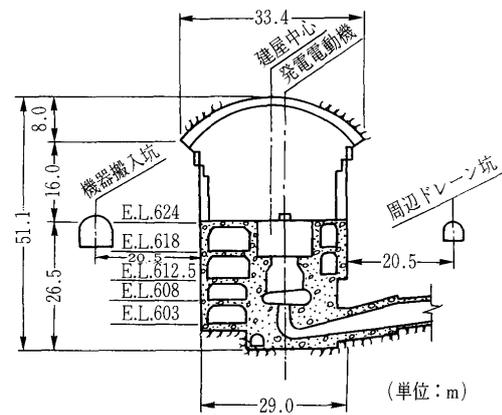
著者らは、開発したMBC解析の妥当性を検証する目的で、実際の地下空洞の掘削解析を行い、それらの解析結果と掘削時の計測結果の比較を行っている。解析例として、大断面トンネル、揚水式発電所の発電所空洞、岩盤タンクの掘削問題を取り上げており、例えば地下発電所空洞に関しては、東京電力㈱の塩原発電所<sup>8)</sup>、葛野川発電所<sup>9)</sup>とその模擬空洞<sup>10)</sup>、関西電力㈱大河内発電所<sup>11)</sup>などが代表的な解析例である。

解析結果と計測結果の比較を行う際に重要となるのは、単に空洞側壁の変位を合わせることができるというようなことだけでなく、客観的に決定された入力パラメータを用いて解析を行い、岩盤の地中変位量、不連続面のせん断・開口変位量、PSアンカーボルトの軸力の変化、アーチコンクリートの応力といった種々の計測結果と解析結果の合致性を示すことである。以下では、塩原発電所を例に、パラメータの決定方法について言及し、さらに解析結果と計測結果の比較を行う。

## a) 概要

東京電力㈱塩原発電所は、最大出力90万kW (30万kW×3)の純揚水式発電所であり、その規模は高さ51m、幅28m、長さ163m、掘削量は約19万m<sup>3</sup>に及ぶ。空洞形状は、天端にアーチコンクリートを配したきのこ型空洞で、掘削は天井アーチ部から空洞下部に向けて、15段階にわたって行われている(図—4.3.8参照)。発電所空洞は土被りが200mの地下に位置し、鉛直方向の地圧はほぼ地山被り相当の4.7MPa程度である。当該地点の初期応力は、第1主応力5.0MPa (N167W, 下向き60°)、第2主応力3.9MPa (N3W, 下向き28°)、第3主応力2.8MPa (N91E, 下向き7°)である。

文献<sup>12)</sup>によれば、発電所周辺の地質は流紋岩類を主体としており、これに凝灰角礫岩が混在分布している(口絵写真—15参照)。斑状流紋岩および流紋岩は岩質境



図—4.3.8 塩原発電所横断面図

表—4.3.1 当該地点の岩盤・岩石の物性

	試験項目	物性値
岩盤	弾性係数 (GPa)	2.9~4.9
	強度定数 (MPa)	$r=1.0+\sigma \tan 45^\circ$
	残留強度 (MPa)	$r=0.5+\sigma \tan 35^\circ$
岩石	弾性係数 (GPa)	25.5~69.6 (平均 42.1)
	一軸圧縮強度 (MPa)	58.8~137.2 (平均 83.3)

界面(WNW-ESE 走向・南急傾斜)と平行な板状節理と、これに直交する柱状節理が発達している。板状節理の間隔は0.5~2.0m、柱状節理の間隔は0.05~1.0mであり、特に流紋岩は柱状節理の発達が顕著である。

岩石・岩盤の力学的特性としては、岩石試験(一軸圧縮試験)および原位置岩盤試験(平板載荷試験、岩盤せん断試験)から表—4.3.1に示す値が得られている<sup>12),13)</sup>。

空洞の支保工としてはNATM工法に基づき、PS工、ロックボルト、吹付けコンクリートが採用されている。発電所空洞アーチ部には、掘削と同時に吹付けコンクリート(8~24cm)、ロックボルト工(5~12m)で一次支保した後、アーチコンクリートを打設している。また空洞側壁部には、各掘削ステップ終了後に吹付けコンクリート(24~50cm)、ロックボルト工(5~12m)で一次支保した後、157kPa~314kPaの導入力でPS工(10~25m)を施工している。PS工の公称断面積および弾性係数はそれぞれ8.336cm<sup>2</sup>( $\phi=17.8$ mmのストランド4本)、196GPaと報告されている。

## b) 解析

## • 入力パラメーター

MBC解析における解析パラメーターは、卓越不連続面を除いた基質岩盤の弾性係数・ポアソン比、初期応力のほかに、不連続面の走向・傾斜、平均間隔、摩擦角、有効寸法、起伏角である。このうち、不連続面の走向・傾斜、平均間隔は地質調査・観察より得られ、摩擦角、基質岩盤の弾性係数・ポアソン比は岩石・岩盤試験の結果から類推が可能である。これに対して、有効寸法および起伏角は実測が困難で、入力値の決定が難しい。以下では、上述した地質概況などを基に、本解析で用いる解析パラメーターの決定を行う。

まず、解析で考慮する卓越不連続面群であるが、口絵写真—15の節理密度分布図より、卓越不連続面群としては、N60W65S, N25E60S, N30E30NそしてN40E60Nという四つが考えられる。このうち掘削による空洞側壁のはらみ出しなどに関しては、走向が発電所長軸（ほぼN40E）と直交する卓越不連続面群であるN60W65Sの影響は小さいものと考え、その走向が発電所長軸とほぼ平行な残りの3セットを解析で考慮する卓越不連続面群とした。解析は、空洞断面を想定した二次元解析であるため、卓越不連続面群の傾斜を左落ち30度(N30E30N)、左落ち60度(N40E60N)、および右落ち60度(N25E60S)とする。

不連続面群の摩擦角については、表—4.3.1の岩盤の残留摩擦角( $\phi_r=35$ 度)や不連続面の摩擦角について言及している文献<sup>14)</sup>を参考に、左落ち30度の不連続面群の摩擦角を35度とし、急傾斜である左落ち60度については、これよりやや小さく30度と設定した。鉄管路側(口絵写真—14の空洞左側)では、掘削壁面に流れ目(右落ち)の連続した不連続面が認められており、露頭観察でも滑動が確認されている<sup>12),13)</sup>。そこで右落ち60度についてはさらに小さく25度とした。不連続面の平均間隔としては、上述した露頭観察の節理の平均間隔に関する調査結果(柱状節理で0.05 m~1.0 m)より右落ちの不連続面を0.3 m、左落ちを1.0 mと定めた。その他の不連続面群のパラメーターである有効寸法、起伏角度は計測が困難なため、地中変位などに関して解析値と計測値を比較したり、また掘削規模を考慮に入れて定めた。例えば、空洞の規模が大きい場合は、空洞の変形に寄与する不連続面の寸法(有効寸法)も大きいものと考えられるので、一連の解析では3 mから10 mの範囲で解析を行った。また、不連続面の起伏角と摩擦角の和がおおよそ岩盤の強度定数と同程度になるものと考え、起伏角は5度から25度(前述のとおり、摩擦角は25度~35度としている)として一連の解析を行った。その中で、解析結果が最も計測結果に近かった不連続面群の物性パラメーターを表—4.3.2にまとめて示す。

卓越不連続面群を除いた、連続体として挙動する基質岩盤の弾性係数は、表—4.3.1の岩盤の物性より、その下限値である2.9 MPaを採用し、ポアソン比は0.25とした。

解析は二次元平面ひずみの条件下で行うため、当該地点の3主応力を解析断面の二次元面内に変換して用いた(最大主応力4.7 MPa, 最小主応力3.6 MPa, 最大主応力方向が、鉛直方向より反時計回りに15度の方向)。

表—4.3.2 不連続面群の物性パラメーター

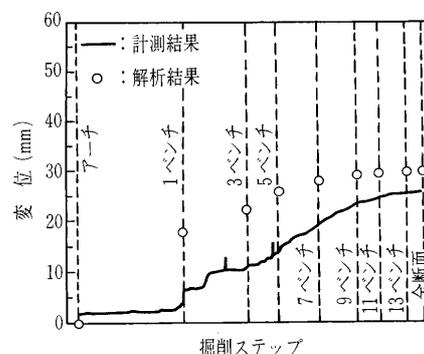
傾斜	左落ち30度	左落ち60度	右落ち60度
有効寸法 ( $L$ )	5.0 m	10.0 m	10.0 m
平均間隔 ( $d$ )	1.0 m	1.0 m	0.3 m
摩擦角度 ( $\phi$ )	35度	30度	25度
起伏角度 ( $\alpha$ )	5度	5度	5度

なお、解析領域内においては、深さ方向への自重による応力増加はないものとした。また、支保に関するパラメーターに関してはすべて、実施工より得られている情報を基に決定し、掘削手順も実施工に従って解析を行った。

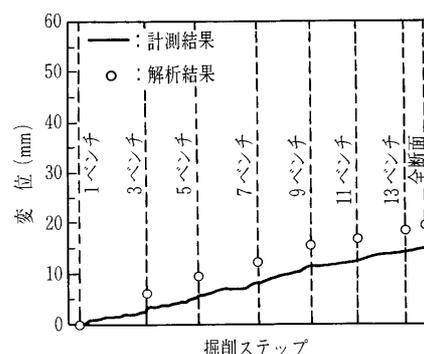
#### • 解析結果と計測結果の比較

発電所建設にあたっては、計測機器を設置して周辺岩盤変位、アーチコンクリート応力、PS工軸力、内空変位などを随時計測している。まず、周辺岩盤変位について、その壁面における変位量と掘削ステップの関係を示す。アバット付近の変位を図—4.3.9(鉄管路側)および図—4.3.10(放水路側、口絵写真—14の空洞右側)に、また空洞中腹部付近の変位を図—4.3.11(鉄管路側)および図—4.3.12(放水路側)にそれぞれ示す。

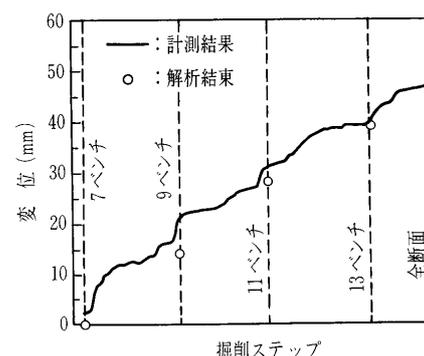
どの計測点においても、掘削に伴い変位が増大しているが、空洞上部では、掘削ベンチが進むにつれてその変位は収束する傾向を示す。一方、空洞中腹部ではこうした傾向は示さず、変位は増大し続けている。例えば、鉄



図—4.3.9 壁面変位の経時変化(鉄管路側, アバット)

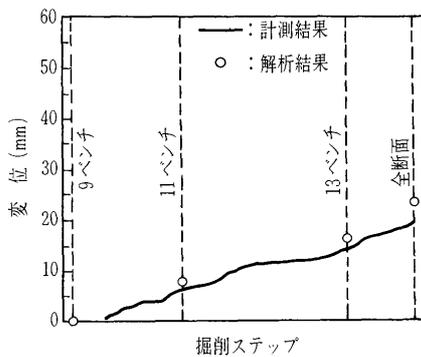


図—4.3.10 壁面変位の経時変化(放水路側, アバット)



図—4.3.11 壁面変位の経時変化(鉄管路側, 空洞中腹)

## 講座



図—4.3.12 壁面変位の経時変化（放水路側，空洞中腹）

管路側のアバット付近では、第7ベンチ掘削以降、変位が収束に向かってののに対し、空洞中腹部付近では、掘削ベンチ（第7ベンチ）が計測点を通過後も変位が増大し続けており、この傾向は、放水路側よりも鉄管路側で顕著である。解析はこうした現象をよく再現できているが、これには不連続面の変形が大きく関与している。解析においては、当該ベンチを掘削すると、主として流れ目の不連続面群が空洞周辺で変形を生ずる。掘削ベンチが下がるにつれ、流れ目の不連続面群の変形領域は空洞周辺から深部方向へ広がり、さらに、差し目の不連続面群も空洞周辺で変形を生ずる。解析では、こうしたことに起因して、空洞中腹部において変位が増加し続ける。

さらに、掘削に伴い変化するPSアンカーの軸力について、計測結果と解析結果の比較を試み、その一例を図—4.3.13（鉄管路側中腹部）に、計測および解析結果を併せて示した。なお、ストランド1本当当たりの初期導入力は235 kNである。図より、PSアンカーの軸力についても、解析結果は計測結果と良く合致している。

最後に、計測との比較はできないが、解析による全断面掘削後の最大せん断ひずみ分布を口絵写真—14に示す。

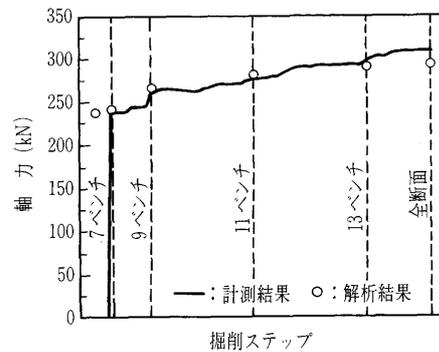
## 3) 今後の課題

解析手法が実際の設計・施工において利用可能となるためには、解析手法が支保の効果などについても説明できるものでなくてはならない。したがって今後は、構造物の安定と支保の効果について検討していく必要がある。謝辞：東京電力(株)および東電設計(株)より貴重なデータを賜りました。ここに付記して謝意を表します。

(堀井秀之，吉田秀典)

## 参考文献

1) 岡本 淳・山本和彦・西嶋國昭：領家花崗岩に急速施工で大断面連続空洞を築く菊間地下石油備蓄基地，トンネルと地下，第23巻2号，pp. 238～247，1992。



図—4.3.13 PS工軸力の経時変化（鉄管路側，空洞中腹）

- 2) 宮永佳晴・福原 明：地下石油備蓄基地の設計について，電力土木，No. 219，pp. 95～106，1989。
- 3) 岡本 淳・有元 平・山本和彦・大津宏康：菊間石油備蓄基地工事での空洞掘削に伴う地下水挙動に関する検討，土木学会論文報告集，No. 480/6-21，pp. 33～42，1993。
- 4) Oda, M.: Fabric tensor for Discontinuous Geological Materials, Soils & Foundations, Vol. 22, No. 4, pp. 96～108, 1982.
- 5) Oda, M., T. Yamabe, Y. Ishizuka, H. Kumasaka, H. Tada and K. Kimura: Elastic stress and strain in jointed rock masses by means of crack tensor analysis, Rock Mech. Rock. Engng., 26(2), pp. 277～284, 1993.
- 6) Oda, M., Hatsuyama, Y. and Ohnishi, Y.: Numerical Experiments on Permeability Tensor and Its Application to jointed Granite at Stripa Mine, Sweden, J. Geoph. Res., 92(8), 8037～8048, 1987.
- 7) 羽出山吉裕・大津宏康・大矢敏雄・岡本 淳：原位置岩盤の水理・力学特性評価に関する一考察，土木学会第48回年次学術講演会，Ⅲ，pp. 1366～1367，1993。
- 8) 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。
- 9) 吉田秀典・堀井秀之：地盤材料に対するマイクロメカニクスに基づく連続体モデル，応用力学論文集，Vol. 1，pp. 527～536，1998。
- 10) Yoshida, H., Horii, H. and Uno, H.: Micromechanics-Based Continuum Theory for Jointed Rock Mass and Analysis of Large-Scale Cavern Excavation, Proceedings of Eighth International Congress on Rock Mechanics, pp. 689～692, 1995.
- 11) 吉田秀典・堀井秀之・打田靖夫：マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルによる大河内発電所地下発電所空洞掘削の解析と計測値との比較，土木学会論文集，No. 547/Ⅲ-36，pp. 39～56，1996。
- 12) 前島俊雄・伊東雅幸：蛇尾川揚水発電所〈地下発電所空洞の設計と施工実績について〉，電力土木，No. 232，pp. 25～35，1991。
- 13) 前島俊雄・伊東雅幸：1 500 m<sup>2</sup>の大断面空洞を掘る〈蛇尾川揚水式地下発電所〉，トンネルと地下，第22巻8号，pp. 7～15，1991。
- 14) 例えば，(株)地盤工学会：不連続性岩盤と構造物に関する研究報告書，pp. 80～82，1995。