

地下空間利用に関する技術開発の現状 —建設産業の研究所における活動について—

青木 謙治¹⁾

1. はじめに

未固結地盤あるいは泥岩を対象とした大都市圏の地下空間利用は、大深度地下開発構想として、現在官学民協同で法制面の整備から技術的課題の解決、計画の具体化のための活動が進められている。

これに対して岩盤内の空洞利用については、昭和40年代から水力発電の分野で環境保全と発電機能の向上を目的に大規模な地下揚水発電所が多数建設され、さらに近年では岩盤空洞が持つ特性と土地の有効利用などの社会的、経済的要請から非常に大規模な原油の地下備蓄施設等の建設が行われつつある。このような岩盤空洞はわが国の生活及び産業構造の基盤を支えるエネルギーの生産及び備蓄という面から社会的重要度は大きく、今後ともその立地拡大努力が必要とされている。さらに、より多様な電力貯蔵の手段としての圧縮空気貯蔵ガスタービン発電 (CAES-GT) や原子力発電の地下立地等についての技術的な検討も行なわれており、さらに将来的な重要課題として高レベル放射性廃棄物の地層処分に対する検討も着実に進められている。このように地下空間の利用は、今後より一層重要になるものと思われる。

ここでは地下空間利用に対するニーズとこれを実現するために必要な課題について整理し、さらに建設産業の研究所における地下利用に対する技術開発の具体的な取り組み例の一つとして、鹿島建設技術研究所における岩盤空洞を対象とした技術開発の現状について述べる。

2. 地下利用のための技術開発の概要

2.1 地下空間利用の可能性

近年、都市部では都市化の進展に伴い土地利用密度が上昇し、急激な地価の高騰、周辺部への急速な拡大等の問題が生じている。このような状況下において地下空間が宇宙及び海洋とともに、広大な未利用空間としてその価値が注目されている。

地下には、第1表に示すように地上の自然や人為的活

第1表 地下の有利点 (日本産業技術振興協会, エンジニアリング振興協会, 1988)

特性	記 載
断熱性/恒温性	地下では地盤の有する大きな熱容量のために地表面からの熱伝達速度が空中よりも遅くなる。地下空間の熱負荷は理論的に地上の1/5~1/10といわれ、地中温度は地表から5m程度の深さで地表気温の変動の影響が少なくなり安定した状態となる。
電磁波遮断性	電磁波は一般的に電気伝導率の小さい岩盤の中では減衰しやすく、周波数および透過率が大きいほどその程度が著しいことが知られている。
遮光性	地下空間は、地盤の存在により太陽光線の届きにくい状態を作り出し、紫外線を遮断する。
放射能遮断性	地盤中に存在する放射性物質は、分子拡散、地下水流による連行及び毛管浸透により地盤中を移動すると考えられるが、大気中に比べて非常に小さく、更に岩盤への吸着による遅延効果も移動速度に影響すると考えられる。従って、地盤中に存在する放射性物質が地表に到達するには充分長い時間を要し、この間に放射能強度が減衰することが予想される。
気密性	地中に存在する気体は、圧力勾配の存在によって地盤の空隙中を移動するが、流量及び流速は大気中に比較すれば一般的に小さく、地下水がある場合はさらに小さくなる。
不燃性/防火性	地盤は燃えることがなく、地下空間に建設された構造物相互間の火災拡大を防止することができる。
防爆性	岩盤は大きな強度及び重量を有しているため、爆発により生じる衝撃に対する安全性を確保することができる。
防振性/低振動特性	強固な深層の岩盤の上に建設された構造物基礎では、地表または地表付近の土質地盤上に建設された基礎に比べ、地震動等の外力を受けた時に発生する振動振幅は、地下岩盤の持つ高い剛性に起因して小さい。
防音性/遮音性	音源で発生した波動エネルギーは、地盤における波動の透過損失が空気よりも大きいため、空気中よりも地盤中の方が伝わりにくい。

動からの影響が軽減されたり、逆に地上への地下からの影響を軽減するような遮蔽特性がある。このような特性を考慮すると、地下でなければ立地できない施設、あるいは地上に設置するよりもこれらの特性を利用して地下に立地したほうが有利な施設も考えられる。

そこで現在、考え得る地下空間の用途を、一般の市民が日常利用する都市生活、教育文化等に係わる施設と、資源・エネルギー・産業等の貯蔵・生産設備・産業廃棄物処理に係わる施設とに区分し、地下の特性がどのように利用されているかを第2表に示した。

まず第2表の生活関連施設の分野は、観光・レジャー施設として、人工的に作られ現在利用されていない廃坑や自然に存在する鍾乳洞・風穴を鉱業博物館、またはケービングスポーツの場として利用するという概念である。

1) 鹿島建設技術研究所：
〒182 東京都調布市飛田給 2-19-1

キーワード：地下利用, 岩盤, 研究開発, 調査技術, 設計技術, 施工技術

第3表 国内外の地下空間利用の事例（日本産業技術振興協会、エンジニアリング振興協会、1988）

利用形態	日 本	海 外
エネルギー 地下貯蔵	原油備蓄 菊岡（愛媛）、久慈（岩手）、 串木野（鹿児島） LNG備蓄 根岸（横浜）	LPG備蓄 フィンランド、スウェーデン、フ ランス、韓国、台湾、アメリカ 圧縮空気貯蔵 西ドイツ、フィンランド、ノルウ ェー 熱水貯蔵 スウェーデン
地下発電所	揚水式発電所 新高瀬川（長野）ほか40カ所	揚水式発電所 アメリカ、ヨーロッパ、オース トラリアほか多数 原子力発電所 ヨーロッパ5カ所、アメリカ1カ 所
食料貯蔵	岩盤冷凍庫 大谷石採石跡地（栃木）	ワイン、穀物、種子、飲料水等の貯 蔵、冷凍食品の貯蔵
地下都市	地下街 川崎、札幌市等多数	ライフラインの地中化、共同溝、地 下スポーツセンター、図書館、教室、 教会、音楽堂、会議場
地下工場	燐黄工場	精密機械工場、ワイン等の醸造工場
地下実験室	陽子崩壊観測施設 神岡鉱山（岐阜）	コロラド大、ミネソタ大（米）、 ハーゲンバッハ（スイス）、レマン 湖畔（フランスLEP）、ハンブルク （西ドイツ）
地下室付 住宅	新住宅開発プロジェクト「地下室利 用システム技術の開発」（筑波、製 料研究実験住宅）	欧米での住宅は地下室付が多い （米國中東北では80%）
その他	鉱山跡地の坑道観光 尾去沢（秋田）、鯛生（大分）等 地下展示場、世界最大のホログラフ イスタジオ 大谷石採石跡地（栃木）	防災施設（非常用飲料水、食糧の貯 蔵、シェルター、電気通信及びデー タ処理センター）

おり、これらについての開発・整備が必要である。

(2) 経済性の評価

地下空洞の利用は、地上に比べて実績が少ないことや、地下特有の不確実性等の理由により地下空間利用プロジェクトの経済性について検討する場合、単に地下と地上の建設費のみでの建設コストを比較すると当然、地上より不利な場合が多い。しかしながら、プロジェクト自体には、雇用効果、波及効果、所得効果、外部効果等

の社会的、経済的インパクトを伴うため、これらの効果も併せて総合的に評価できる経済性評価の技術（すなわち、費用/便益の評価技術）の開発・整備が望まれる。

(3) 環境影響評価

地下利用では、地下構造物・施設の建設に伴う地中、地表を含めた環境への影響を事前に評価することが必要となるが、地上及び海洋に比べて環境評価技術に経験・蓄積が少ないことが挙げられる。したがって地下空間利用に際して環境保全の立場から、地下水への影響や地盤沈下等についての検討をはじめとする環境影響評価技術の開発・整備及び評価基準についての研究を推進することが望まれる。

(4) 防災・安全技術の整備

地下空間の安全な利用に際して必要とされる地下への輸送、移動を始めとするアクセスや地下での動力源、換気システム等の諸設備についてもリスク評価、危機管理手法等を中心とした立場からの検討を行い、地下空間利用の防災・安全技術の開発・整備に対するガイドラインを作成しておく必要がある。

(5) 法制面の整備

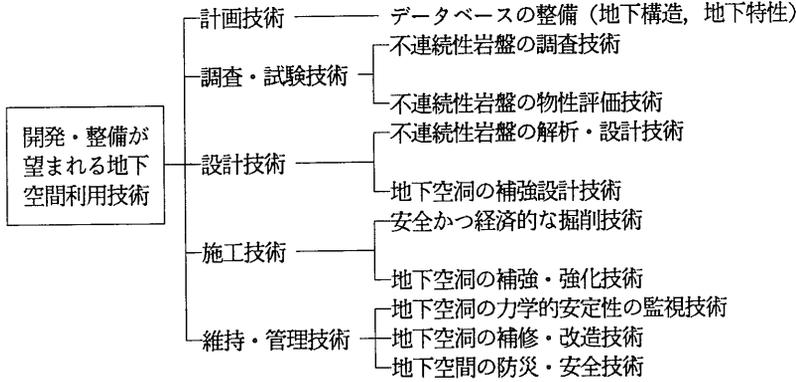
地下空間利用に関する現行法制類としては、民法、鉱業法等の基本法令に加えて、安全確保、土地規制及び維持・管理に関するもの等があるが、地下に関する法令・基準は地上に比べてその整備が進んでおらず、これらに対する問題点を系統的に抽出、整理するような研究も不十分である。そこで、地下空間の開発を「推進」とすると共に乱開発を防ぎ秩序ある利用を行うための行政面での条件整備が必要と考えられる。

(6) 心理的な側面

人間には一般に地下に対するネガティブなイメージや心理的・生理的不安感が意識の根底にある。したがって

第4表 地下空間利用における克服すべき点（日本産業技術振興協会、エンジニアリング振興協会、1988）

	阻 害 要 因	問 題 点	具 体 例
技術	技術水準が十分でない 掘削後のずり処理が難しい 掘削に伴う周辺への影響予測が難しい 取り直しや再建設が難しい アセスメント技術の開発が不十分 掘削技術のレベルが低い 長期安定性が確かめられない 調査費が高い 建設費が高い	地下空間利用技術の整備不足	地下に構造物・施設を構築する際の、安全性の確認を主体とする技術（事前調査から設計・施工、さらに運用まで）の整備が不完全であり、現状で開発中の地下利用技術についてもその精度及び信頼性を実証する機会に恵まれていない。 例えば、原油備蓄における実証プラントの建設は、この要件を満足する手段として有効であった。また、一般的な地下空間の利用において、掘削によって生じたずりの有効な用途が限定されており、これらの大量輸送法も見当らなかった。
	調査費が高い 建設費が高い	地下空間利用の経済性評価技術の不備	地下空間利用の構造物・施設の建設に際して、その経済性を評価できる手法が確立されていない。例えば、地下施設は地上施設に比べて建設・運用両面でのコストが高く、事業としてのリスクも大きいために、民間企業が独自で地下に対する投資を行っていく。ただし、これに対して都市部のトンネル施工では、大断面シールド掘削機の開発を行う、または生活廃棄物の焼却灰の処理に休廃止鉱山等の既存空間を利用する等の方策により建設費のコスト・ダウンを図った事例も見られる。
経済	技術水準が十分でない 経済性評価基準がない 資金が莫大である	地下空間利用による環境への影響評価技術の不備	地下空間を利用することによって生じることが予想される地中・地上への影響を安全性確認の立場から評価できる技術が確立されていないため、補償面で予定外の費用を必要とした事例も見られる。
	地下の権利がはっきりしていない 既存構造物が障害になる 法令基準が一元化されていない 地上とのアクセスが限られるので不便 地下空洞の確保が容易でない 地下利用に対する体系的な考え方がない 防災・安全対策の整備が不十分 周辺のコンセンサスが得にくい	地下空間利用に関する基準・規制等の整備不足	地下に関する法令や行政上の規制類は現状でも存在しているが、地上における都市計画法のような「地下を公共施設空間として計画的・体系的に開発するための法令類」が整備されておらず、都市部における送電用ケーブル等の建設に際して既存の地下構造物に対する処置・処理に費用を要することがあった。
社会	心理的不安 生理的不安 イメージが悪い	地下空間利用の防災・安全技術の整備不足	地下空間利用における防災・安全については過去の地下街等における災害の影響により、地上より規制等が厳しかったため、より綿密な検討が重要と考えられているが、これに必要な防災・安全に係わる技術の整備が充分に行われていない。
		地下空間利用に対するPRの不足	わが国では、地下に対して悪いイメージを抱き易く、北歐諸国のように地下が身近なものでならぬ違和感を感じないという状況にはまだ程遠い。例えば、都市部で地下変電所の建設時に、周辺地域のコンセンサスを得ることが困難であったために工期を大幅に延長せざるを得なかった事例も見られる。ただし、原油備蓄施設の建設の場合はオイルショックの影響でコンセンサスが得やすかった。



第1図 岩盤空洞利用の拡大のために開発整備が望まれる基盤技術 (日本産業技術振興協会・エンジニアリング振興協会, 1988)

地下利用の拡大のためには人間の心理面からの検討も必要であり、地下利用を進めるにはまず地下に対する“なじみ”を醸成するための活動が必要であろう。例えば、デモンストレーション・プラント、地下博物館、地下資料館等を建設し、その施設の中で直接人間が地下を体験できる場をふやすことも「魅力ある地下」をアピールすることにつながると思われる。

以上をまとめると、当面は地下利用推進の基盤となる経済的、社会的、心理的な側面も含めて技術レベルの発展、向上（技術開発の推進）がとりわけ重要であると考えられる。

3. 当研究所における技術開発の現況

3.1 概要

建設産業界における地下空間利用技術開発の現況を紹介するに当たり、本報文では既に述べたように、岩盤を対象とした分野に限定して議論することとしたい。まず基本的に岩盤空洞利用の拡大のためには、第1図に示したような調査・試験から設計、施工・施工管理、維持・運用に至る全フェーズにわたるバランスのとれた開発・整備が必要であると考えられる。

当研究所においても昭和40年代後半から始まった大規模地下発電所空洞の建設を発端として、岩盤の安定性評価技術や各種解析技術の開発に着手し、現在に至るまで基盤技術に関する多数のノウハウの蓄積を行ってきた。今日では、これらをベースとして、さらに将来のニーズを踏まえ基盤技術の合理化、高精度化を図るべく研究開発を推進中である。本章では、当研究所において現在までに開発した技術及び開発中の技術の中で、比較的ユニークと思われるものについて紹介したい。

3.2 調査・試験技術

(1) 水圧破砕法による地圧測定技術

岩盤空洞を設計する際には、地圧に関する正確な情報

が必要不可欠である。地圧の測定法としては従来オーバーコアリング法（以下O.C.法と称す）が多用されているが、この方法は埋設計器の設置に熟練を要し、複雑なオーバーコアリング操作を必要とするため測定に多大の時間と費用を要するといった問題点がある。水圧破砕法はO.C.法に比して大深度の地圧測定が可能であり、また応力の直接測定法であるので原位置において直ちに3次元地圧を求めることができ、操作が簡便であり計測費も低廉であることといった特徴を有している。測定方法は第2図に示したような計測システムにより各孔井内の地圧測定対象区間に一定流量で水圧を加えることにより孔壁を破碎して水圧の経時変化(第3図に例示)を測定する。また生成した破碎面の走向、傾斜をボアホールテレビや型取りパッカー等を用いて測定し、方向の異なった3孔

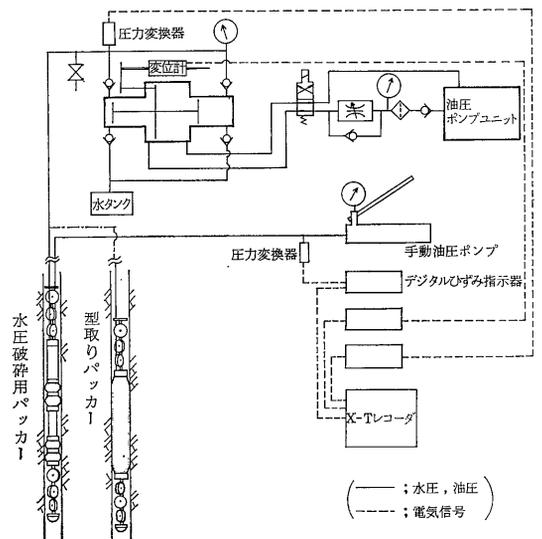
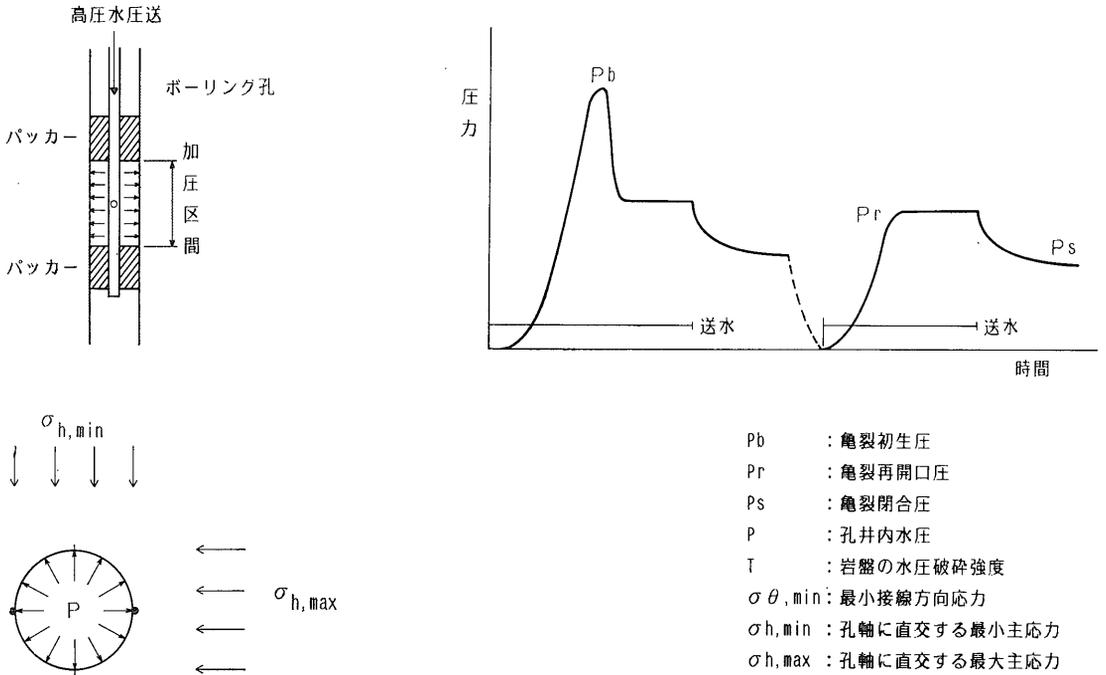


図-3 計測システム系統図

第2図 水圧破砕法における地圧測定システム系統図 (青木ほか, 1987)



第3図 水圧破砕における水圧の経時変化(例)

応力	水圧破砕法	オーバーコアリング法
σ_N	3.73 ± 0.30	2.95
σ_E	2.71 ± 0.19	3.02
σ_V	3.89 ± 0.21	3.27
τ_{NE}	0.57 ± 0.10	0.21
τ_{EV}	-1.37 ± 0.17	-0.80
τ_{VN}	-0.21 ± 0.12	-0.40
σ_1	4.99	4.12
σ_2	3.60	2.80
σ_3	1.74	2.32

(MPa)

以上の複数孔井に対する測定結果から3次元地圧の解析を行う。水圧破砕法を節理の発達した岩盤でも適用し得る技術として実用化するため、当研究所では『水圧破砕法による3次元地圧測定技術の実用化』を図った(1983~1986)。試験技術としての課題は、対象地点に適合するボアホールアライメントの決定、水圧特性値の決定方法や地圧解析方法の精度及び合理性の向上であり、これらの解決に取り組んだ。実施例として第4図に節理が発達した花崗岩岩盤中の測定結果を示したが、同図でも明らかのようにO.C.法による結果とはよく斉合しており、多数の地点での比較測定によって、水圧破砕法は信頼性、経済性の両面において十分な実用性を有するものと考えている。

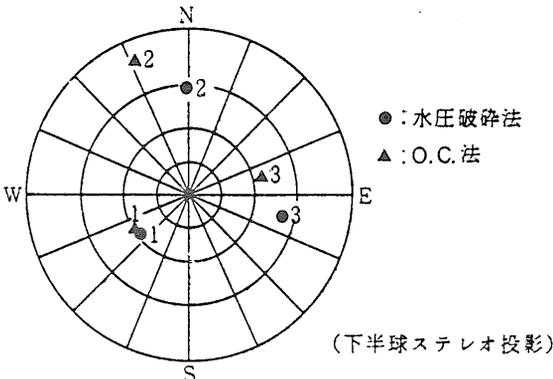
(2) クロスホール透水試験技術

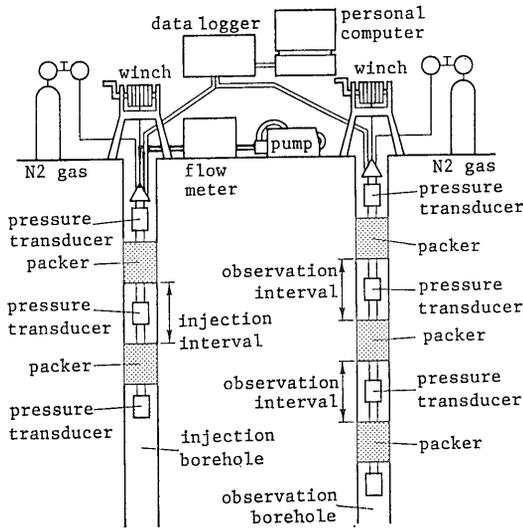
原油、LPGの岩盤タンクやCAES等の岩盤空洞の設計には、地下水挙動を正確に把握することが肝要である。当研究所では従来のルジオン試験に比して岩盤の透水特性をより精度よく評価できる原位置試験法として、複数のボーリング孔を用いたクロスホール透水試験技術に着目し、その実用性についての研究を1985年以来進め

第4図(左)

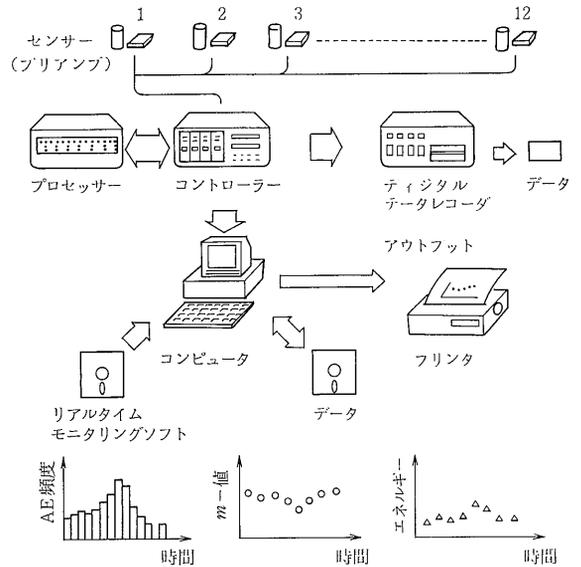
水圧破砕法による地圧測定結果(例)

下図は主応力方向を下半球ステレオ投影法によって図示したもの、O.C.法はオーバーコアリング法(青木ほか, 1987)





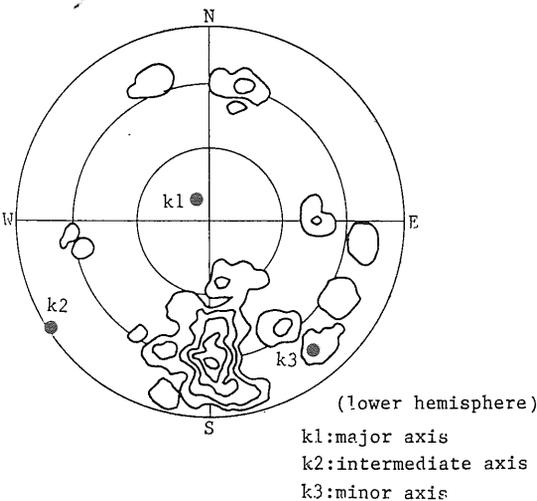
第5図 クロスホール透水試験システム系統図 (Aoki et al., 1991)



第7図 AE計測システム系統図 (青木ほか, 1990b)

Principal hydraulic conductivity (cm/s)	Principal axes	
	Trend	Plunge
$k1=1.82 \times 10^{-5}$	333°	81°
$k2=1.34 \times 10^{-5}$	240°	0°
$k3=2.59 \times 10^{-6}$	150°	9°

* Specific storage = $6.6 \times 10^{-7} m^{-1}$



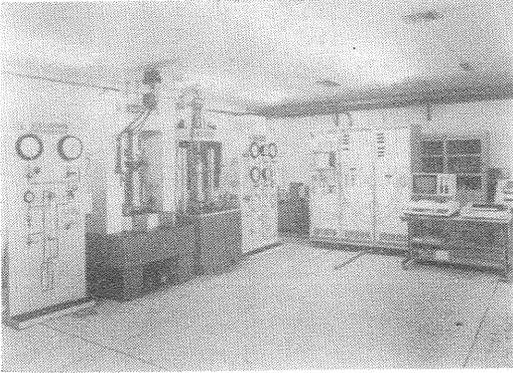
第6図 クロスホール透水試験による主透水係数の算定結果 (例) 下図は主透水係数の方向を下半球ステレオ投影法によって図示したもの (Aoki et al., 1991)

ている。具体的には第5図に示したように、注水孔内に設けた注水区間に注水することによって生じる周辺岩盤内の水頭の変動を、観測孔内に設けた観測区間で経時的に測定することにより、岩盤の透水特性を評価しようとするものである。第6図は亀裂性岩盤サイトでの原位置試験(定流量注水法)によって得られた主透水係数と節理の密度分布(下半球投影)との比較結果であるが、主透水係数の方向と節理の卓越方向がよい整合を示している。現在、注水をサイン波状で行うサイナソイダル(sinusoidal)試験法による透水特性分布の検知・評価技術の実用化研究を実施中である。

(3) AE計測による空洞安定性監視技術

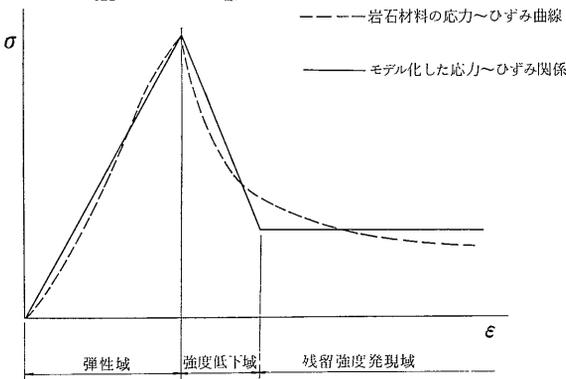
たとえば高レベル放射性廃棄物の地層処分や地下原発等の施設では空洞のレイアウトも複雑なものになり、建設時や完成後における空洞安定性の監視技術は重要な課題のひとつである。当研究所では岩盤空洞周辺の緩み域の発生・進展の検知手法として、岩盤の破壊に伴って発生する微小破壊音(アコースティックエミッション: AE)を用いた計測管理技術を開発中である。AE計測システムの概略構成を第7図に示したが、現在このシステムを用いて原位置における計測及び解析を実施中であり、これまでに以下のような成果を得ている(青木ほか, 1990d)。

- 1) 種々のAEパラメータの中で、発生するAEの振幅と頻度の比として表されるm値が岩石及び岩盤の破壊時に低下・反転現象を示すことから、AEの経時計測結果に基づいて算出したm値を指標として、岩盤中の緩みの



- ・ 供試体寸法/径50mm, 高さ100~125mm
- ・ 試験装置の剛性/総合剛性: 1,500t/cm, フレーム剛性: 5,500t/cm
- ・ 載荷装置/載荷能力 軸圧: 0~200t, 側圧: 0~500kg/cm²
 軸方向: 0.01~2mm/min 変位制御時
 1~50t/min 荷重制御時
 側方向: 0.005~1mm/min 変位制御時
 5~250kg/cm²/min 荷重制御時
- ・ 測定装置/軸変位計 (三軸セル内, 外), 径方向変位計,
 ひずみゲージ, 軸荷重計, 側圧計, A Eセンサー

写真1 高剛性三軸圧縮装置 (青木ほか, 1986)



第8図 緩み域の強度低下を考慮した応力-歪関係図 (青木ほか, 1986)

発生・進展の検知が可能と思われる。

2) 岩石及び岩盤が破壊する時の m 値の低下度合いは、岩盤中の既存のクラックの分布状況に影響を受ける。具体的には岩盤中に既存クラックが多いほど破壊前の m 値は小さく、破壊時の m 値低下量も小さくなる。

したがって、既存のクラックの状況を例えば弾性波速度等を用いて評価し、原位置計測に先立って、室内での岩石試験による A E 計測、弾性波速度測定を行うことで、原位置岩盤の緩みを判定する m 値の基準値を設定できる可能性がある。

1991年11月号

3.3 解析 (設計) 技術

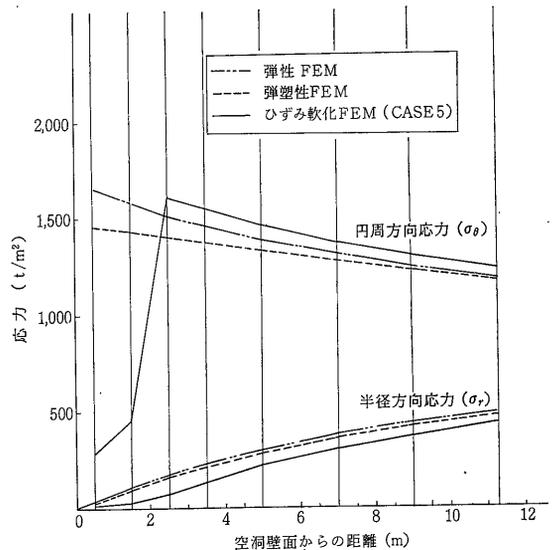
(1) 緩み域の岩盤の強度低下を考慮した地下空洞の安定解析技術

複雑な空洞のレイアウト上重要となることは、空洞周辺の緩み域の分布及びその挙動をより正確に予測することである。当研究所では1983年以来岩石材料の破壊強度点以降の強度特性 (残留強度) に着目し、緩み域岩盤の強度低下とそれに伴う応力再配分を考慮した数値解析手法の実用化を進めている。解析の手順としては、まず岩石材料の破壊強度点以降の力学特性を把握するために、当所で開発した高剛性三軸圧縮試験装置 (写真1) を用いて三軸試験を実施する。次にその試験結果から第8図に示したような応力-ひずみ特性をモデル化し、このひずみ軟化特性を考慮できる解析コード (FEM) を用いて解析を行なう。第9図は円形断面空洞における従来の非線形弾性解析との比較例であるが、ひずみ軟化特性を考慮した解析結果が、空洞近傍での応力低下等緩み域のより現実に近い挙動を評価しているものと考えられる。

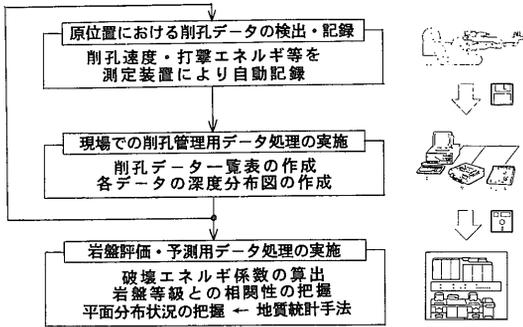
3.4 施工・施工管理技術

(1) 油圧ドリルによる削孔データを用いた切羽前方地質の予測技術

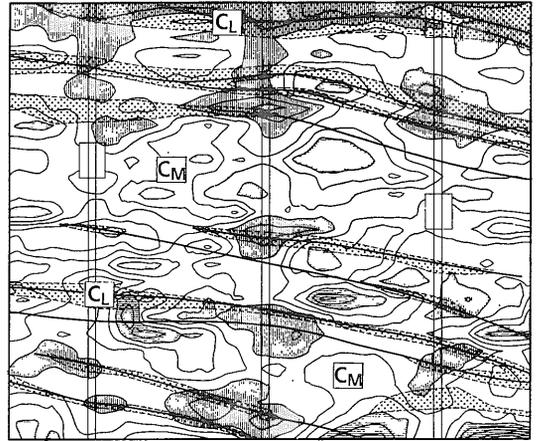
地下空洞を掘削する際に切羽前方の地質を的確に予測することは、安全かつ合理的な施工を行う上で重要である。当研究所では従来の地質調査・観察による予測手法を補足し、なおかつ施工の進捗に伴い時々刻々と変化する地山状況に柔軟に対応できる手法として、施工上日常



第9図 既往解析 (弾性, 弾塑性) と歪軟化解析による岩盤応力の解析結果との比較 (青木ほか, 1986)



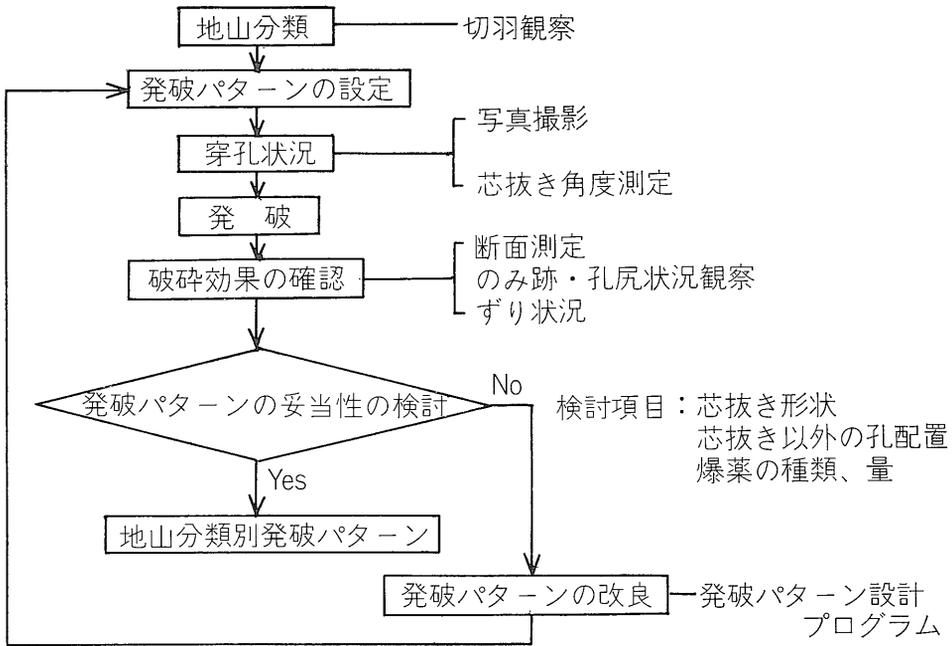
第10図 (上) 削孔検層システムにおけるデータ処理系統図 (青木ほか, 1990c)



削孔検層結果 地質観察による実績
 [Pattern 1]: $Ev \leq 5,000$ (L級相当) コンタは $1,000 \text{ kgf/cm}^2/\text{m}$ 間隔
 [Pattern 2]: $5,000 < Ev \leq 8,000$ (M級相当) C_M C_L C_H : 岩級区分
 [Pattern 3]: $8,000 < Ev$ [Symbol]: 断層, シーム
 (単位: $\text{kgf/cm}^2/\text{m}$)

第11図 (右) 削孔検層システムによる岩盤等級予測結果 (手塚ほか, 1991)

第12図 (下) 最適発破設計システムの処理フロー図 (塩釜ほか, 1989)



的に行われる油圧ドリルによる削孔時の、削孔速度・打撃エネルギー等を測定・解析することにより岩盤評価・地質分布予測を行うシステム(削孔検層システム)を開発し、実用化試験を実施中である。本システムは第10図に示したような手順に基づき機能し、岩盤評価の指標には破壊エネルギー係数(油圧ドリルが単位体積当りの削岩に要した仕事量に相当)を用いている。また地質状況の予測に

際しては地質統計手法(青木ほか, 1989, 1990a)を導入し、より確度の高い分布予測に供している。第11図は花崗岩サイトにおける適用例であるが、施工実績と本システムによる予測結果はほぼ整合しており、本システムの有用性を確かめている。

(2) 地山状況を考慮した最適発破設計技術

地下空間利用の拡大と共に要求される空洞の断面形状

も多種多様なものになり、そのような空洞の掘削に際しては、従来にも増して余掘量を低減し平滑な壁面の形成を目的とした、より合理的な掘削技術が要求される。そこで当研究所では、第12図に示したような『観測による修正』を基本とし、切羽における地山評価や破砕効果の確認を含めた『最適発破設計システム』を開発し、実際に現場で発破試験を行い十分な効果を発揮することを確認した。現在、従来の発破理論に対し、破壊時の岩盤に生じる亀裂の進展挙動を考慮するため破壊力学 (Fracture Mechanics) を導入することにより、主として硬岩を対象としたより精度の高い発破設計技術の確立について研究開発を推進中である(青木ほか, 1990 e)。

4. あとがき

地下空間利用の拡大に関して、主として技術的な面から現状、将来のニーズ、技術開発課題を概観した。

次に民間の建設産業における研究機関としての当研究所が実施している技術開発及びその成果の一部を紹介した。

この分野における技術開発は、例えば電子デバイス分野における革新的なイノベーションのようにドラスティックな変革を追及するというより、極めて多種・多様な固有技術のアッセンブルをいかに最適化して行くかが主体となると思われる。

従って今後共、幅広い技術課題に対する広範な取り組みが重要であろう。

文 献

- 青木謙治・大野 清・酒井 学・佐々木猛・松本 喬 (1986): 緩み域の岩盤の強度低下を考慮した地下空洞の安定解析, 鹿島建設技術研究所年報 no. 34, 57-62.
- 青木謙治・日比谷啓介・渥美博行 (1987): 岩盤内地圧測定法としての水圧破砕法の適用性について, 鹿島建設技術研究所年報 no. 35, 185-192.
- 青木謙治・稲葉武史・渥美博行・谷野郁子 (1989): 地質統計手法による地盤の弾性波速度構造の推定法, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 136-140.
- 青木謙治・稲葉武史・堀越清視 (1990 a): 地質統計手法を用いた地盤のモデル化について, 第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 501-505.
- 青木謙治・戸井田克・腰塚憲一 (1990 b): 微小破壊音 (A E) 計測による岩盤空洞の安定性監視技術, 鹿島建設技術研究所年報 no. 38, 187-194.
- 青木謙治・稲葉武史・塩釜幸弘・手塚康成 (1990 c): 油圧ドリルによる削孔データを用いた岩盤評価及び切り羽前方地質の予測技術について, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 67-72.
- 青木謙治・戸井田克・腰塚憲一 (1990 d): A E計測による岩盤空洞の安定性監視技術について, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 133-138.
- 青木謙治・森 孝之・村川浩一・腰塚憲一 (1990 e): トンネル発破設計における破壊力学の適用性について, 第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, 169-174.
- Aoki, K., Shioyama, Y., Tezuka, Y., Kobuchi T., Masumoto, K. (1991): Evaluation of hydraulic conductivities of jointed rock mass by crosshole permeability test, ISRM 7th Congress, 投稿中.
- 日本産業技術振興協会エンジニアリング振興協会 (1988): 地下空間利用技術に関するテクノロジー・アセスメント報告書
- 塩釜幸弘・広野 進・村川浩一・青木謙治 (1989): 地山状況を考慮した最適発破設計法について, 土木学会第44回年次学術講演会講演概要集第6部, 140-141.
- 手塚康成・稲葉武史・塩釜幸弘・青木謙治 (1991): 削孔検層システムによる地質分布予測時の地質統計手法の適用について, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第3部, 586-587.

AOKI Kenji(1991): R&D activities for the development of the underground space.

<受付: 1991年8月1日>