Three Dimensional Monitoring System in Underground Cavern

by Masayuki KOSUGI¹

1. Dr., Head of Division, System Safety Division, Safety Engineering Department, National Institute for Resources and Environment, MITI, Onogawa 16-3, Tsukuba 305

For storage of industrial disposal and carbon dioxide, underground caverns are increasingly necessary due to the shielding effect of rock masses. Effective shielding properties of underground caverns are highly demanded for protecting surface environment. Thus, developing quantitative evaluation and long-term monitor methods for the properties of rock masses are indispensable. Additionally, shielding effects of rock masses are closely related to ground water flow through rock discontinuities, studies on the mechanism of discontinuity behaviour in rock mass based on three dimensional monitoring will be extremely useful for the safety control of underground caverns.

KEY WORDS: Underground Cavern, Three Dimensional Monitor, Jointed Rock, Measurement

1. ま え が き

地球上では、古来から人間生活に付随して、住居、貯蔵庫、墳墓、導水路などさまざまな形態で地下が利用されてきた。近代においては、地下資源の開発などに伴い、深部地下利用に関する施工技術が発展し、その後、多岐に及ぶ地下空間利用の形態が展開されてきた。例えば、関門や青函の海底トンネル建設によって培われた技術は、急峻な山岳部や大都市の居住域におけるトンネル建設などに継承され、一部日本の技術が世界をリードするまでに¹⁾なっている。また、地下発電所や石油備蓄など100万m³以上の大空洞も数多く建設され²⁾³⁾、大型化、深部化とともに、高機能な岩盤特性を利用した地下施設が期待されている⁴⁾⁵⁾。

このような地下施設は、地上環境の維持と保全のみならず、地下岩盤の断熱・恒温・恒湿性、気密性、無菌性、電磁波・放射線などの遮蔽性、隔離性、耐圧性、防振性などの特性を利用したものが多く、現在、岩盤の諸特性に関する数値情報は充分とはいえず、地下施設の立地に対する有利性を定量的に把握するのは困難である⁶⁾。地下施設は、地上施設に比べて膨大な建設コストを要するため、経済面、機能面、環境面などさまざまな側面から地下化のメリット、デメリットを定量化して総合的な判断を下す必要がある。このように、地下立地の優位性を明確に示すため、岩盤の特性や機能の定量評価および環境監視による現象評価に関する研究開発が急がれる。

一方、放射性廃棄物の海中投棄やフロンや二酸化炭素の大気中放出などによりオゾン層の破壊や温暖化が進行するなど、多くの国際的な環境問題がニュースを賑わしている。環境保全を目標とした環境管理システムの国際規格化 (ISO14000)、環境基本法、

化学物質審査規制法あるいは危機管理システム (TRZ0001⁷⁾) など、産業を取り巻く状況は有害物質等の管理強化を目指している。エコロジー (生態学) を踏まえたグローバルな視点での環境保全や社会安全管理に資するような技術の向上や独創的な研究開発が求められている⁸⁾。人工的に生成した有害物質を無害化する技術が第一義的な開発課題であるが、現状の技術では分解処理が不可能な物質も多く、人間生活の営みとともに蓄積されている。環境管理の国際規格化や安全管理の概念に配慮すると、これら有害物質は、処理技術が成熟するまで人間環境と接点のない閉空間に隔離 (Isolation) され、何時でも回収あるいは対策を施せる状態で管理される必要がある。このような背景から、岩盤の持つ優れた特性や機能を利用した地下施設が大きな役割を持ちつつあり、欧米では既に産業廃棄物の地中隔離 (あるいは処分) が着手されており⁹⁾¹⁰⁾、二酸化炭素の地中貯留も検討されている。

これらの処分施設は、環境保全と隔離性の観点から地下立地が望ましく、岩盤の機能が厳密に確保されることが必要条件になる。岩盤の隔離性は、地下水や間隙水を介した物質の移行の問題として、亀裂、ジョイント、断層など (以下、不連続系とする) の変形と水理系の挙動に密接に関連した特性である。このため、特性の定量的な評価手法と長期に渡る特性変化の検知および監視手法の確立が急務になっている。

以下に、岩盤の隔離性機能を利用した地下施設について、計測監視の概要を紹介し、三次元計測監視の必要性や背景について、著者の研究を織り交ぜて述べることにする。

2. 地下開発の流れ

大規模な地下施設の利用は、圧縮空気貯蔵、超電導エネルギー貯蔵、地下発電所など、多岐に渡っているが、以下では、資源および環境に関連する地下空間施設として、LNG、石油類の備蓄、放射性又は産業廃棄物の貯蔵、二酸化炭素の貯蔵処分などを対象として議論する。これらの地下施設では、岩盤の隔離性が共通す

* 1996年12月3日受付 1997年5月19日受理

1. 正会員 工博 資源環境技術総合研究所安全工学部システム安全研究室長
〔著者連絡先〕 FAX 0298-58-8558 (資環研・安全工学部)
キーワード: 地下施設, 三次元監視, 不連続性岩盤, 計測

る重要な基本機能になっている。ここで、隔離性とは、「施設内の物質が岩盤中へ移行することを防ぎ、周辺環境との接点がない閉容器を形成できる特性」であり、断熱性、放射能遮断性、気密性、化学的安定性と関連した機能であると考えられる。

2・1 設計施工の手順

地下施設となる空洞近傍の岩盤の安定性は、連続体として扱うと、ゆるみ（塑性）領域や大きな変形状態に基づいて評価される。一方、岩塊の局所的な滑動や崩落は、不連続系のすべり変形とダイレーション（膨潤作用）に依存した挙動パターンに基づいて評価される¹¹⁾。既設の貯蔵空洞や地下発電所の例を参照にして、局所的な不安定性に対応する大規模地下施設の設計・施工の手順を概念的にまとめると、図1に示すように考えられる¹²⁾。

調査と試験においては、一次元あるいは二次元的に得られた情報を構造や特性別に組み合わせ、三次元的分布として推定評価されている。これらの初期条件と地下施設の空洞形状や工法に関する条件を入力し、施工に伴う岩盤挙動の予測解析を行うことになる。設計では、条件の再設定と解析計算を繰り返し、最適な形状、開削工法、支保工法などが決定される¹³⁾。この設計に従う施工の過程で計測監視を行い、計測結果は設計の適合性評価に対してフィードバックされる。必要に応じて、設計変更のための解析が行われ、一部の施工法が変更されることになる¹⁴⁾。他方、施工後の計測監視は、施工の安全性や岩盤機能の安定性に対する長期的監視を目的として用いられる。このため、より経済的、効率的で長期安定な計測手法が望まれる。必ずしも、この手順のすべてがスムーズに流れる訳ではなく、評価に際して、従来の経験に基づく工学的判断が随所に発揮されることになる。

調査と試験から設計解析に至る情報の流れを図2に示す。解析では、地下施設の目的や施工の安全係数などに応じて適当な照査基準や解析手法を用い、岩盤の構造や特性と地下施設形状との関係を工学的に判断して、二次元あるいは三次元の計算を実施する。

2・2 調査・試験技術の概要

地質調査では、岩質、地質構造、地下水、不連続系など地下構造の評価を目的とし、地質踏査、ボーリング調査、物理探査、孔内観測（不連続系調査）などの調査法が用いられる。地質踏査は、

地表および空洞壁面において行われ、その情報は二次元平面上に限られる。また、ボーリング調査と孔内観測は、孔軸に沿った一次元展開の情報になるが、不連続系については、その方位と傾斜が標定できるため、ボーリング孔近傍の範囲内では三次元的に評価されることになる。

地質構造や岩盤区分については、ボーリング孔からの一次元情報を水平方向に展開して関連評価し、三次元的な分布状態を推測している。また、不連続系については、方位傾斜の展開と分布確立予測の組み合わせから、三次元的な分布ネットが予測されている¹⁵⁾。これらの調査では、基本の情報が一次元であるものの、コアなどによって実物の岩盤や不連続系を観測できるメリットを有している。

物理探査は、レーリー波（表面波）や反射法などによる弾性波探査、電磁波探査（ジオトモグラフィ）、比抵抗や自然電位などの電気探査などの手法によって行われ、振源、受信、電極などの配置の工夫によって、指向的な評価を可能にしている。これらの探査では、岩盤の特性と伝播特性や電気的特性との関連を利用して探査データを解釈しており、岩盤特性の定量的評価としては信頼性がやや低くなるものの、岩盤内部を三次元的に評価できるメリットを有している。

一例として、施工中のトンネル切羽前方の弾性波探査法の概念を図3に示す¹⁶⁾。この手法では、探査結果を直ちに施工に活用することを目指しており、今後、岩盤変形の定量的な計測と組み合わせることにより、地下施設に対しても有効な施工中の計測監視手法になるものと期待される。

岩盤試験は、岩盤の強度特性、変形特性、透水性などの力学的特性と初期地圧状態に関する情報を得ることを目的とし、現場の強度、変形試験、弾性波試験、地圧計測試験、その他各種の室内試験などからなる。ここで得られる特性について、岩石の賦存状態に関連する異方性の三次元性があり、これらを考慮した試験も検討されている。一般に、岩盤の挙動は、岩盤内の不連続系の存在に依存するため、岩盤の特性と室内の岩石試験による特性が直接対応することは少ないと考えられる。岩盤と岩石試験片の強度寸法効果が10倍近い例もあり、室内試験による特性値をそのまま設計解析に用いるには工学的な問題が残る。このため、強度、変形性、応力などに関する簡便な現場試験法や^{17)~19)}、現場の施工データから強度を推定する方法²⁰⁾などが提案されている。また、現場の変形計測結果と解析結果を比較し、これらが一致するような初期条件から岩盤の特性を評価する逆解析法も提案されて

図1 地下施設の設計・施工の手順の概略

図2 計測・試験から設計解析に至るフローチャート

図3 弾性波による切羽前方地山評価法 (HSP) (土木研究所, トンネル HSP 共同研究会¹⁶⁾)

いる²¹⁾。

室内試験は、変形性など定性的なメカニズム評価に有効な一面もあるため、クリープ (粘弾性) 挙動²²⁾、変形挙動²³⁾、破壊基準²⁴⁾などの解明を目的として実施されている。不連続系については、変形メカニズム²⁵⁾や不連続面粗さと変形性との関係²⁶⁾²⁷⁾について検討されており、ジョイントなどを有する岩石コアから不連続面の变形特性を評価し、寸法効果を補正して岩盤特性 (現場サイズに対応) を求める手法²⁸⁾も提案されている。

設計解析は、調査や試験に基づく岩盤の構造と特性に関する評価に基づいて地下施設の形状や工法を設計することを目的としている。ここでは、地下施設の目的や岩盤の状態に適合する岩盤の力学モデル (図1の照査基準) と計算手法を選択する必要がある。岩盤を連続体として扱う場合、弾性、塑性、粘弾性などの変形基準や破壊基準の岩石モデルを用い、有限要素法 (FEM) や境界要素法 (DDM) などの手法で予測計算 (シミュレーション) する。また、不連続系を対象とする場合、上記の連続体岩石モデルと不連続面の变形モデルを組み合わせた不連続変形法 (DDA)²⁹⁾³⁰⁾や個別要素法 (DEM)³¹⁾などが用いられる。DEM解析の一例を図4に示す¹⁴⁾。ここでは、岩盤変形の大部分が不連続面に依存しており、ロックボルトの打設によって不連続面の变形が押えられる効果を解析的に示している。

最近、コンピュータの演算速度が飛躍的に向上し、二次元計算に比べて膨大なマトリックス計算を要する三次元解析が、容易に短時間で行われ、また、説得力のある結果出力も可能になっている。解析では、キーボードから入力した初期条件や計算モデルにすべて依存して結果が導かれており、仮想現実 (ヴァーチャルリアリティ) の危険性を回避するためにも、これらの条件や予測結

果の信頼性 (あるいは精度) の検証は不可欠になっている。

3. 計測監視の定義

地下施設の設計・施工にあたり、これに必要な情報を得るため、各種の調査・試験・計測が行われる。広義の意味として、調査とは、設計・施工に必要な情報の収集と、必要な検討を加えることと理解され、試験や計測の手段を含むものとして用いられる。これらを区別する意味では、調査とは、地下施設の設計・施工に必要な地下構造や岩盤特性に関する情報を事前に観測あるいは機器を用いて推定する作業、試験とは、周囲岩盤あるいは施設材料の一部からなる供試体を一定の管理状態下におき、機器を用いて力学特性や性状を知る作業とされている⁶⁾。

ここでは、計測を調査や試験と区別し、「地下施設の施工に伴って生ずる周囲岩盤および地下施設の变形を知るために現場に機器を設置して測る作業および変形の検討」と定義する。調査から得た情報が施工に伴って変化する場合、これらの調査項目も計測監視の対象になってくる。

計測監視の対象となる変形、変化とは、「施工から維持にわたって生ずる地下施設と周辺岩盤の構造的変形と周辺岩盤の状態や特性の変化」である。地下施設の变形は周辺岩盤の潜在的な破壊を伴う容積変化に影響を強く被り、岩盤挙動の大部分は既存の不連続系や破壊面のすべりやダイレーション (膨潤作用) に依存している³²⁾。また、岩盤内の水理系も岩盤挙動に密接に関連して影響を被ることが多い³³⁾。このため、岩盤の隔離性機能を利用した地下施設では、不連続系と水理系の連成挙動のメカニズム解明と定量的評価法の開発が必要になり、現象把握とメカニズムの検証のために計測監視の役割が極めて重要になってくる。

図4 個別要素法 (DEM) による岩盤挙動予測解析の例¹⁴⁾

4. 計測監視の役割

設計解析は、的確な地下施設の形状や開削、支保工法などを評価するため、いかに岩盤挙動を十分な精度で予測し得るにかかっている。この精度を検証するプロセスが不可欠であり、地下施設などの施工中の計測監視は重要な役割を担っている。

4・1 検証と監視の役割

従来から、地下施設の安定性に関する計測監視は、地下施設と周辺岩盤の構造変化を把握することによって、開削や支保などの施工を検証あるいはチェックすることを目的としている。ここで、安定とは、「施工中、施工後の構造変化が設計において想定した地下構造物の安全率の範囲内にある」ことを表している。計測監視したデータは、場合によっては、開削法や支保工法の設計変更の基礎データになる³⁴⁾。例えば、トンネルにおける NATM 施工では、「現場計測を行いながらトンネル周辺地山の安定状態をチェックし、その結果を基に必要な手段を講ずる。」ことを基本としている³⁵⁾。この概念は、図1の手順において、計測監視の結果が設計解析にフィードバックされるループに相当しており、地下施設に対しては、不連続系に依存して不安定な挙動を呈する局所的な岩盤を対象とし、不連続系の計測監視と解析が組み込まれる。また、地下施設の施工後には、施工の安全性や適合性の評価を目的とし、長期的な構造変化の計測監視が行われる。

他方、地下施設の機能に関する計測監視は、隔離性に関する特性変化の評価を目的としている。岩盤の隔離特性は、岩盤内において三次元的にランダムな方向と分布をもつ不連続系の賦存状態とこれに密接に関連した水理系の特性に依存しており、三次元的な計測評価が望まれる。

4・2 計測の対象と範囲

計測監視の対象は、「地下施設の施工に伴って生ずる周囲岩盤および地下施設の変形」であり、直接的には、岩盤や施設の変形量として現れる。これらに密接に関連する現象として、変形の誘因となる応力変化、変形に伴って生ずる破壊および透水変化が間接的な計測対象となる。

変形は、岩盤壁面（内空）、岩盤、岩盤内不連続系、支保工などの変位として現れ、応力変化は、岩盤内応力、地山荷重、岩盤内支保力などの変化として現れる。破壊は、岩盤内の微小破壊、岩塊の滑動や崩落、山ハネ、ゆるみ領域の変化などとして現れ、透水変化には、岩盤中の透水率変化、水位変化、湧水などが含まれる。計測監視における対象と計測手法の関係を表1に示す。計測手法の例として、内空変位の長期的な計測³⁶⁾やマイクロメーターなどによる高精度計測、地中変位の効率的計測³⁷⁾などがあり、総合的な計測によるゆるみ領域の評価³⁸⁾も試みられている。内空変位、地中変位、支保軸力などは、一次元方向に関する計測情報である。このため、図5（(株)大林組提供資料）に示すように、計測ボーリング孔や計測方向を空洞断面内で放射状に展開した二次元的な計測が実施されている。

5. 三次元計測監視

5・1 三次元計測の役割

従来、二次元的な考察によって設計などが行われてきたが、三次元解析が実用的になっており、さらに精度を高めた岩盤挙動評価を行うためには、三次元的な考察が必要になっている。「三次元」には、岩盤材料特性、地質構造、不連続系の賦存状態、初期地圧の三次元性のほか、地下施設形状の三次元性がある。このような構造の変形現象などを把握するには、三次元的な計測監視と三次元解析が必要になる場合も多い。また、岩盤の隔離性に関連

表1 地下施設の計測監視における計測対象と項目

計測対象	計 測 監 視 項 目
岩 盤	内空変位、地中変位、不連続面変位、地山応力、ゆるみ領域
支 保	支保工内空変位、支保工反力、ロックボルト軸力、吹付コンクリート応力
施 設	変形
水 理	間隙水圧、地下水位、湧水量

計 測 項 目	記号	仕 様	数 量	凡 例
計 坑内観察調査				
測 天端沈下測定	F			↓
A 内空変位測定	C			
計 ロックボルト軸力測定	M	3m4P	3	=====
測 地中変位測定	E	6m5P	3	+++++
吹付けコンクリート				
応 力 測 定	T	接線方向	3	▲
B 地山圧力測定	R	半径方向	3	▲
鋼アーチ支保工応力測定	S	N, M	5	□

図5 空洞断面における計測配置の例（(株)大林組より資料提供）

する水理系の評価では、不連続系の三次元的な分布予測に基づいて透水性の三次元分布が予測されているものの¹⁵⁾、定量的な評価は難しく、現状の技術では、特性の変化を検知する計測が有効であると考えられている。岩盤の隔離特性に直接的に関連する不連続系の変形挙動や透水性の変化と、間接的に関連する応力変化や水位変化が計測対象になり、これらを総合的に評価して、特性の変化を推測することになる。岩盤内では、三次元的に賦存する不連続系をパスとし、地下水や間隙水が物質と共に移行する。このような岩盤内の水理挙動を監視するには、不連続系の分布状態に配慮した効果的な三次元計測が必要になる。とりわけ、地下施設の境界となる空洞壁面近傍の岩盤においては、計測ボアホール方向に拘束されないような三次元評価が必要になる。

他方、岩盤挙動の解析の初期条件は、必ずしもすべてが的確とはいえず、工学的な判断による仮定も含まれる。また、解析の照査基準になる岩盤モデルや解析手法の適合性も解析結果に影響を及ぼす。計測と解析の比較は、これらすべての要素を含んだ検証として、一つの指標を示すことになる。一つの指標によって複数の要素の適合性を判断するのは困難であり、局所的であっても、三次元の情報を得ることが、このような検証の糸口になる。このため、現場で変形現象をよりの確に把握することが非常に重要であり、三次元計測監視の役割は大きく、変形のメカニズムの解明や不連続系モデルの構築にも不可欠であるものと考えられる。

三次元の計測監視としては、岩盤マス全体を対象とした三次元的な配置による計測と、不連続系など局所的な挙動を対象にして一計測点から三次元情報を得る計測手法とが考えられる。前者は、連続体の設計解析に対応して用いられることが多く、図5に示し

図6 不連続面の三次元変形計測装置（ジョイント変位計）

図7 円錐孔底ひずみ法におけるゲージの配置⁴¹⁾

た計測断面を重ねることによって三次元的な計測配置を実現している。しかし、三次元の岩盤挙動に関する予測解析の結果を検証するには、計測断面に直交する方向の計測も必要になる。

後者は、ボアホール内などの一計測点から三次元情報を得る計測手法であり、三次元的にランダムな方向で賦存する不連続系の変形挙動の評価³⁹⁾⁴⁰⁾や、一計測点における三次元応力変化の監視⁴¹⁾⁴²⁾などが提案されている。計測手法の概略を、それぞれ図6と図7に示す。図6に示す手法では、ジョイントなどの不連続面を挟む岩盤の相対変化を3成分計測し、この計測値の座標変換から、不連続面内のすべり変位ベクトルと開口変位を評価している⁴⁰⁾。図7に示す手法では、ボアホール底部の円錐面に16素子のゲージを配置し、差ひずみデータから6成分の応力変化を評価して三次元応力変化を求めている⁴²⁾。これらの計測監視手法は、局所的な不連続体解析結果の精度検証や局所的な三次元変形現象の把握に有効であり、一地点から得られる情報の多さから、効果的な計測手段ともいえる。また、岩盤内の破壊位置を検知するAE計測⁴³⁾やゆるみ領域を評価する弾性波検層¹⁶⁾も、空洞壁面近傍の評価においては、三次元的な計測監視手法と考えられる。

5・2 三次元の構造安定計測

地下施設の構造安定性に関する計測監視では、空洞の設計形状や開削工法、支保工法などの適合性をチェックする目的で、施工中に実施される。設計解析は、地下施設の施工に伴う岩盤の予測挙動を結果として提供しており、設計の適合性のチェックあるいは

a) 三次元解析によるせん断応力分布

b) 内空変位の計測結果

図8 三次元有限要素法解析による岩盤内応力と内空変位計測結果⁴⁵⁾

図9 三次元個別要素法解析と地中変位計測による変形の比較例⁴⁷⁾

は精度検証においては、現場で計測監視した挙動と予測結果を比較することになる。

地質構造や地下施設の形状を考慮して三次元的解析を行う場合、計測監視も三次元的に展開することになる。不連続系を含む岩盤を連続体として扱う場合、有限要素法や境界要素法などの解析法が用いられ、図5に示した二次元の計測断面を空洞軸方向に数段設ける三次元的な計測配置が多く利用され¹¹⁾、空洞交差部などの幾何学的に三次元で表す必要がある形状に対して、三次元解析が多く用いられ^{44)~46)}、解析結果を直ちに施工に反映させる情報化三次元解析も行われている。図8に、解析結果と変形計測結果を比較検証した例を示す⁴⁵⁾。これらでは、内空変位、地山変位、吹付コンクリート応力、ロックボルト軸力、地表沈下など、一次元の計測情報によって、三次元解析の精度を検証している。

他方、岩盤の不連続性に着目し、不連続面の挙動モデル評価と個別要素法による三次元解析の手法による岩盤挙動予測も試みられており⁴⁷⁾、解析結果を地表沈下や内空変位の計測監視によって検証した例を図9に示す。本来、不連続体の解析では、不連続面の挙動が岩盤マスの変形の大部分を占めるため、計測監視によって、挙動モデルと岩盤の予測挙動の両方を検証するのが望ましい。つまり、不連続面挙動モデルの一部を検証するには、特定の不連続面の三次元挙動を的確に計測することが有効であり、図7に示すような三次元情報を得られる計測手法が必要になる。また、不連続面のすべり変位ベクトルと開口変位からなる三次元挙動が得られれば、不連続面挙動モデルを用いて周辺の応力状態を推定できるため⁴⁸⁾、有限要素法などによる逆解析と同様の解析評価が可能になるものと期待される。

6. あとがき

本文では、岩盤の隔離性機能を利用した地下施設における三次元計測監視の役割と手法について述べた。岩盤の高機能を期待する地下利用においては、岩盤内の不連続系と水理系を対象とした設計・施工が必要であり、これらの挙動現象を把握する必要性が高まっている。近年、不連続系の挙動メカニズムや解析手法の研究がさかんに行われ、三次元的なモデルの構築や三次元的な挙動予測解析手法の開発を目指している。これらが工学的に利用されるためには、現場の三次元現象を把握した上での精度検証が不可欠であり、今後は、メカニズム、解析、計測を組み合わせた総合的な研究が望まれる。

引用文献

- 西 淳二・佐藤邦明：地下空間の歴史的背景、土と基礎、Vol. 38, No. 4, p. 90-97, (1990)
- 松村義章：新技術を駆使しての大規模地下発電所の建設<電源開発・下郷発電所>、地下大空洞の設計と施工、日本トンネル技術協会、p. 72-81, (1981)
- 日本地下石油備蓄株式会社：久慈・菊間。串木野プロジェクト、広報資料、(1987)
- 奥村敏恵：地下利用の現状と将来展望、とくにLNGと石油の地下貯蔵について、地下大空洞の設計と施工、日本トンネル技術協会、p. 1-18, (1981)
- 地下空間利用技術に関する研究小委員会：21世紀の新しい地下空間に向けて、土木学会論文集、No. 403, p. 25-35, (1988)
- 土木学会編：ニューフロンティア地下空間、技報堂出版、(1990)
- 日本工業標準調査会基本部会審議：危機管理システム、日本規格協会、TR Z 0001, (1996)
- 資源環境技術総合研究所、資源研究 - 21世紀の展望 -、(1996)
- Saeb, S., Francke, C. T. and Patchet, S. J. : Effect of clay on the performance of WIPP excavation, Proc. of the 2nd Conf. on the Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Vienna, Austria, p. 835-840, (1995)
- Closs, K. D., Papp, R., Bechthold, W., Engelmann, H. J. and Hartje, B. : Thermal, operational and economic aspects of repository design alternatives, Proc. of the Joint Intl. Waste Management Conf., Vol. 2, ASME, (1989)
- 土木学会岩盤力学委員会、トンネルの地質調査と岩盤計測、土木学会、(1983)
- 川本勝万・Aydan, O.・土山茂希：大型地下空洞設計の現状分析と局所不安定性に関する考察、トンネルと地下、Vol. 23, No. 3, p. 215-221, (1992)
- Barton, N., Loset, F., Smallwood, A., Vik, G., Rawlings, C., Chrysanthakis, P., Hansteen, H. and Ireland, T. : Radioactive waste repository design using Q and UDEC-BB, Proc. of the Conf. on Fractured and Jointed Rock Masses, Lake Tahoe, U. S. A., p. 709-716, (1992)
- 小杉昌幸・中川光雄・石原治幸：不連続岩盤の挙動予測に基づくトンネル支保設計、土木学会論文集、No. 487, p. 21-30, (1994)
- Kulatilake, P. H. S. W., Wathugala, D. N. and Stephansson, O. : Joint network modelling with a validation exercise in Stripa mine, Sweden, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 30, No. 5, p. 503-526, (1993)
- 土木研究所、トンネル HSP 研究会：トンネル HSP、弾性波による切羽前方地山評価法、研究会広報資料、(1996)
- Marchetti, S. : In situ tests by flat dilatometer, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 106, No. GT3, p. 299-321, (1980)
- 岩崎公俊・亀井健史：フラット・ダイヤルメーター試験による原位置強度・変形特性の評価、土木学会論文集、No. 499, p. 167-175, (1994)
- 小杉昌幸・野川道雄・小林秀男・松永 烈：地圧計測のための原位置水圧破壊実験-異方性岩石の水圧破壊に関する実験的研究(第5報)-、日本鉱業会誌、Vol. 103, p. 1-8, (1987)
- 唐澤廣和・大野哲二・小杉昌幸：岩石強度と刃先磨耗の推定方法-坑底情報解析技術に関する研究(第3報)-、資源と素材、Vol. 112, p. 688-694, (1996)
- 坂井春輔・川嶋幾夫・皿海章雄：地盤の非弾性挙動の逆解析、土木学会論文集、No. 505, p. 133-140, (1994)
- 山下 秀・杉本文男・山内 優・川辺金光：大谷石のクリープ特性とクリープ過程について、資源と素材、Vol. 110, p. 875-882, (1994)
- 小杉昌幸・緒方義弘：応力解放に伴う孔井変位に関する研究、資源と素材、Vol. 105, p. 597-602, (1989)
- 松本浩二・青木智幸：岩石の破壊特性に及ぼす封圧および間隙水圧の影響、資源と素材、Vol. 106, p. 713-718, (1990)
- 梶見晴重・寺岡克己・谷口敬一郎：不規則な岩盤不連続面におけるせん断強度の定式化に関する研究、土木学会論文集、No. 499, p. 13-21, (1994)
- 木村 強・江崎哲郎：不規則な表面形状を有する岩盤不連続面のせん断破壊特性、土木学会論文集、No. 499, p. 41-50, (1994)
- 小杉昌幸・石原治幸・玉井昭雄：岩盤不連続面の粗さ特性とせん断挙動、資源・素材学会平成8年度春季大会講演要旨集、p. 61, (1996)
- Bandis, S., Lumsden, A. and Barton, N. : Fundamentals of rock joints deformation, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 20, p. 244-268, (1983)
- Shi, G. H. and Goodman, R. E. : Discontinuous Deformation Analysis, Proc. 25th U. S. Symposium on Rock Mechanics, p. 269-277, (1984)
- 佐々木猛・大西有三・吉中龍之進：不連続変形法(DDA)とその岩盤工学への適用に関する研究、土木学会論文集、No. 493, p. 11-20, (1994)
- Barton, N. : Predicting the behaviour of underground opening in rock, Proc. 27th U. S. Symposium on Rock Mechanics, p. 267-274, (1986)
- Wagner, H. : Design and support of underground excavations in highly stressed rock, Keynote Paper, Proc. of 6th ISRM Cong., Montreal, Canada, Vol. 3, (1987)
- 高橋 学・小出 仁：地震時における炭鉱内の震度について、地質ニュース、No. 472, p. 24-39, (1993)
- 鶴見憲二・藤井伸一郎・中川哲夫：スーパーカミオカンデの空洞掘削について、資源と素材、Vol. 111, p. 381-386, (1995)
- 高崎英邦：トンネル工学における方法論としての NATM の評価と今後の課題、土木学会論文集、No. 547, p. 243-248, (1996)
- Pan, Y. -W. and Dong, J. -J. : Time-dependent tunnel convergence II. Advance rate and tunnel-support interaction, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 28, No. 6, p. 469-475, (1991)
- 小杉昌幸・玉井昭雄・小野寺勇記：効率的な地中変位計測法について、土木学会論文集、No. 529, p. 197-202, (1995)
- 石塚与志雄・斎藤 章・泉谷泰志：不連続性岩盤のトンネル交差部における緩み領域の計測結果について、土木学会論文集、No. 475, p. 129-136, (1993)
- 小杉昌幸・玉井昭雄・石原治幸：岩盤内不連続面の三次元変位計測法の開発、土木学会論文集、No. 517, p. 181-188, (1995)
- 玉井昭雄・小杉昌幸：地下空間の保全技術 - 3次元岩盤変位計測 -、計測と制御、Vol. 33, No. 12, p. 1020-1023, (1994)
- 坂口清敏・尾原祐三・中山智晴・菅原勝彦：円錐孔底ひずみ法の応力測定精度、資源と素材、Vol. 108, p. 455-460, (1992)
- Corthesy, R., Leite, M. H., He, G. and Gill, D. E. : The RPR method to the doorstopper technique : Four or six stress components from one or two boreholes, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 31, No. 5, p. 507-516, (1994)
- 望月常好・斉藤義信・石山宏二・亀岡美友：雁坂トンネルにおける山はね現象、第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、p. 139-144, (1990)
- 赤木寛一・小宮一仁：有限要素法によるシールド工場の施工過程を考慮した地盤挙動解析、土木学会論文集、No. 481, p. 59-68, (1993)
- 多田浩幸・石塚与志雄・山辺 正・小田匡寛：岩盤不連続面を考慮したトンネル交差部の応力・変形解析、土木学会論文集、No. 511, p. 47-55, (1995)
- 小森 博・堀地紀行・熊耳哲雄・大津安康・瀧 治雄：NATMにおける支保構造の三次元効果とその評価について、土木学会論文集、No. 529, p. 57-68, (1995)
- Barton, N. et al. : Predicted and measured performance of the 62 m span norwegian olympic ice hockey cavern at Gjovik, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 31, No. 6, p. 617-641, (1994)
- Tamai, A. and Kosugi, M. : Development and field application of joint deformer and high-accuracy extensometer, Proc. of the 2nd Conf. on the Mechanics of Jointed and Faulted Rock, Vienna, Austria, p. 489-494, (1995)