

大規模地下空洞掘削時におけるキーブロック解析

手塚 昌信¹・大西 有三²・田中 誠³・西村 毅⁴

¹ フェロー 工博 関西電力㈱ 土木建築室土木部長 (〒530-8270 大阪市北区中之島 3-3-22)

² フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³ 正会員 工修 京都大学助手 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴ 正会員 工修 ハザマ技術研究所 (〒305-0822 茨城県つくば市荻間西向 515-1)

岩盤掘削面において不連続面に囲まれて崩落の可能性のある岩盤を検出する手法であるキーブロック理論を、大規模地下空洞の施工現場で適用するために、切羽観察、キーブロック解析、追加補強工の設計、施工へのフィードバックに至る一連のシステムを開発した。開発したシステムを奥多々良木増設地下発電所における発電所空洞の掘削工事において運用し、発見されたキーブロックに対して追加補強工を実施した。その結果、キーブロック解析を用いて効果的な支保の施工を迅速に行えるので、設計時における支保数量を低減でき、合理的な地下空洞の設計・施工が可能であることが示された。また、計測された岩盤の変形挙動を検討することにより、不連続面に対する試験結果について考察を加えた。

Key Words : block theory, stability analysis, discontinuous rock, underground cavern, rock support

1. ま え が き

我が国では過去数十年にわたり、地下発電所空洞や石油備蓄基地などの大規模地下空洞^{1)~3)}が岩盤中に多数建設されている。これらの地下空洞の安定性を確保し、かつ経済的、合理的な施工を実施するための研究⁴⁾も実施され、多くの実績をあげている。空洞の形状はきのこ型からたまご型あるいは弾頭型へと変化してきており、岩盤補強工においても NATM の設計思想に基づく吹付けとロックボルトおよび PS アンカーによるものが一般的となってきた。また、施工中においても各種の計測を行い、空洞の安定性の評価と将来予測を実施する情報化施工⁵⁾も多用されている。しかしながら、岩盤構造の複雑さから、事前に予想しなかった空洞の変形や支保の変状が施工中に生じ、追加の補強対策工の実施を余儀なくされた事例^{6)~7)}も多い。その原因としては、岩盤中には断層・破砕帯や節理などの様々な規模の不連続面が多数存在し、これらの不連続面の分布形態やその力学的な性状を、事前調査の時点で十分に把握することが困難であることが指摘されている。この岩盤の不連続性に関する研究は、岩盤力学

の中でも重要な分野であるといえる。

このような不連続性岩盤の力学的な安定性を論ずる手法として Shi と Goodman⁸⁾によりキーブロック理論が提案されている。これは岩盤中に存在する不連続面と掘削面により囲まれ、滑動あるいは崩落する可能性のある岩盤ブロックを見つけ出し、そのブロックの安定性を論じ、必要ならば補強工の設計を行うものである。キーブロック理論が提案されたから、その適用性に関する研究⁹⁾が実施されるようになり、実施工への適用事例も報告されている。しかしながら、地下空洞での実施例は事前調査に基づく予備的な解析^{10)~11)}や、補強工の効果を確認する補助的な解析¹²⁾として実施されており、施工中の日常管理として実施された例は少ない。そこで本研究では、施工中の切羽観察のデータをもとにしたキーブロック解析の結果から次工程の補強工の設計をリアルタイムで実施するためのシステムを開発し、実際の施工現場において適用を図ることを試みた。さらに、キーブロック解析の結果や計測での空洞の変形挙動を検討し、不連続面に関する試験結果に対する考察を加えた。

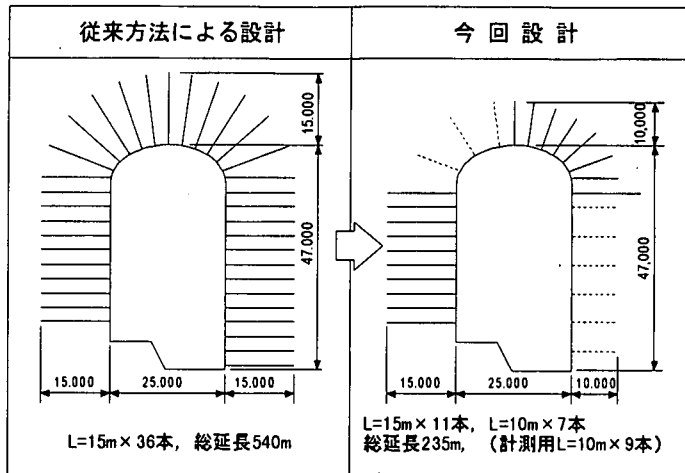


図-1 PSアンカーの初期設計

2. 合理的支保設計の考え方

(1) 従来の地下発電所空洞における設計の課題

従来、大規模地下空洞の設計では、補強対象とする岩盤挙動の不安定要因として以下の2つの要因に対する設計が実施されている。

- ①空洞掘削による初期応力の解放に伴い、連続体として挙動する周辺岩盤に発生するゆるみ域に対する補強設計。
- ②空洞周辺に存在する不連続面に起因する、すべりや崩落に対する補強設計。

しかしながら、これら事前に実施される支保設計は必ずしも、最適かつ合理的なものとはなっていないと考えられる。たとえば、連続体としての解析結果からは、得られた最大の補強対象の深さが空洞の全周にわたって分布していると仮定し、PSアンカーで岩盤を縫いつけた支保設計となっていたり、不連続面に対する事前設計では、多くのすべり線を仮定し最大規模の岩盤ブロックに対して支保設計を行っている場合が多い。

このような、安全側に考えた支保設計が行われてきた理由としては、設計時に実施される解析は事前調査での岩盤を代表する入力物性値と、ある仮定条件のもとで岩盤をモデル化した数値モデルによって実施される推定値に過ぎず、実際の岩盤挙動とは異なることが十分に予想されるからである。掘削時の岩盤挙動を正確に予測するためには岩盤中の複雑な亀裂、地質の差や初期応力などを正確に把握しなければならず、現状の調査技術、設計技術では非常に困難であることは言うまでもない。

また、地下発電所空洞はアーチ部を施工後、盤下げ掘削によって内空断面の高さが高くなり、アー

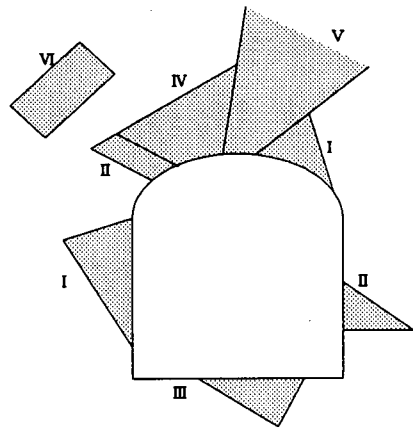
チ部や側壁上部に異常な岩盤挙動が発生した場合、その対策を実施するためにトンネルのような線上の構造物とは比較にならないほど多くの費用と時間が必要となることも理由の一つである。

(2) 合理的支保設計の考え方

本研究では、従来の空洞設計における課題点を解決するために、岩盤地下空洞の新しい設計・施工・情報化施工の取り組みを試みた。その初期支保設計の関する基本概念は「NATMの考え方にに基づき、地山自体の持っている保持力を最大限に利用した支保設計を行い、最小限の支保量で地下空洞の掘削を開始すること」である。ここで言う「地山保持力の最大限の利用」とは、本当に補強を必要とする領域を適切な手法を用いて推定し、最小限のPSアンカーを効果的に打設することに他ならない。

そこで、事前設計としての周辺岩盤の支保は原則的に吹付けコンクリートとロックボルトとし、事前実施する連続体の数値解析結果から想定されるせん断破壊領域と引張破壊領域の落下・すべりに対してのみPSアンカーで補強することとした。不連続面に対する補強は、事前設計段階では考慮せず、情報化施工により必要に応じて施工中に対応することとした。その結果、図-1に示すとおり、初期のPSアンカーの設計では、空洞に対して左右非対称の配置となり、PSアンカーの必要本数と導入力は、従来方法の設計に比べて大幅に減少している。なお、解析により安定領域であり、補強工としてのPSアンカーが不要とされた部分に対しては、施工中の不安定挙動を迅速にとらえるためのリスク管理として、アンカー軸力計を備えた計測用のPSアンカーを設置した。

このように、初期支保設計として大幅にPSアンカーの数量を減少させた支保設計を実現するために、情報化施工では、従来の計測と観察を主体とする方法に加え、キーブロック解析を日常管理の中に導入することとした。すなわち、キーブロック解析導入の効果は、施工中の地質観察結果を最大限に活用して、不安定なブロックにのみ必要量の補強が可能になるため、初期設計時における空洞の支保の量を必要最低限なものに低減することを可能にすることにある。さらに、掘削直後の段階で不安定なブロックを予測することができるため、早期に空洞の安定性が確保されると共に補強工実施の遅延が回避できる効果も期待される。



I: キーブロック, II: 潜在キーブロック
III: 安定移動可能ブロック, IV: 先細りブロック
V: 無限ブロック, VI: ジョイントブロック

図-2 ブロックのタイプ

3. キーブロック解析システム

(1) キーブロック理論の概要

岩盤中には多数の不連続面が存在し、これらは互いに交差することにより多数の岩盤ブロックを形成している。さらに、岩盤の掘削面上には、既存のブロックが掘削面により切断されてきた新たなブロックが存在している。Hoek と Bray¹³⁾ は、掘削面上に現れたくさび状の岩盤ブロックが安定か否かを図解法により調べるとともに、補強工の設計を行う方法を提案している。さらに Shi と Goodman⁸⁾ より体系付けられたキーブロック理論では、得られる不連続面群の位置と方向性から、ステレオ投影法に特徴付けられる図解法によりブロックの分類を行い、移動可能なブロックを同定することができる。さらに、作用している重力などの合力とすべり面の摩擦力から極限平衡解析を行い、滑動の可能性のあるブロックを決定し、その安定性と支持力を求めることができる。キーブロック理論では、不連続面と形成されるブロックに対して以下のような基本的な仮定を有している。

- ① 不連続面は、完全な平面である。
- ② 不連続面は、注目する岩盤内で無限の広がりを持って存在する。
- ③ ブロックは完全な剛体であるとし、ブロック自身の変形性や破壊は考慮しない。
- ④ 不連続面および掘削面の幾何学条件は既知であり、それらの位置と方向性が入力パラメータとなる。

キーブロック理論によって、一般に岩盤に存在するブロックは6種類に分類される。図-2 はこれらのブロックのタイプを示したものである。タイプVIはジョイントブロック (joint block) と呼ばれ、掘削面 (自由面) を持たないが残りの5つのタイプ

は自由面を持つ。タイプVは無限ブロック (infinite block) と呼ばれ、岩盤内に無限に広がっており空洞方向に移動することはできない。タイプIVは先細りブロック (tapered block) と呼ばれ、無限ブロックと同じく空洞方向に先細りとなっていて移動できない。これら無限ブロックと有限ブロックの分類および移動可能ブロックと移動不可能ブロックの分類を行うために、Shi により、それぞれ有限性定理と移動可能性定理が提案されている。残ったタイプI～IIIはすべて有限な移動可能ブロックである。移動可能ブロックの分類は、ブロックの幾何学形状および、合力方向とすべり面の摩擦力により決定される。タイプIIIは安定ブロック (stable block) と呼ばれ、重力下では安定である。タイプIIは、摩擦力により安定となっている潜在キーブロック (potential keyblock) である。タイプIは掘削後支保を実施しなければ滑動の危険性を持つキーブロックである。

(2) 安定計算手法

検出されたブロックのうち、タイプIIおよびタイプIのブロックの分類を行うためには極限平衡安定解析が必要となる。その結果タイプIに分類されたキーブロックに対しては、吹付けコンクリートやアンカー等による導入力を検討し、必要な安全率を満たすための補強工の設計を行うことになる。極限平衡解析は、ブロックを形成する不連続面と掘削面および重力方向の幾何学的関係から求められる3つの破壊モード、すなわち落下、平面すべり (1面すべり)、くさびすべり (2面すべり) のモードのいずれかに対して実施される。

安定計算で考慮した抵抗力は、不連続面に対し

ては粘着力と内部摩擦角によるせん断抵抗であり、不連続面の引張抵抗は考慮しなかった。吹付けコンクリートに対しては、吹付け面におけるキーブロックの境界線に沿ったせん断抵抗を不連続面の粘着力の増分として考慮した。吹付け厚さ、せん断強度および吹付け領域は施工状況に応じて変化させた。ロックボルトあるいはPSアンカーについては、その打設方向に設計強度に相当する導入力が外力としてブロックに作用するものとした。ここで、積極的に導入力を作用させるPSアンカーと導入力のない全面接着型のロックボルトは、支保としての作用メカニズムが異なるが、安定計算上は同じ扱いをした。その理由は、ここで検討対象としているのは不安定な岩盤ブロックであり、このような状態では、ブロックが滑り出そうとする力に対抗する形で、後からロックボルトに軸力が発生することになり、ロックボルトに導入力がかかった状態で安定性を論じることと同等であると考えられるからである。なお、PSアンカーおよびロックボルトのせん断抵抗は考慮していない。

また、安全率については、釣り合い式を構成する各要因ごとに異なった数値を用いる考え方を採用した。

以上の考え方にもとづいた極限平衡解析の釣り合い式の導入について、以下に平面滑りの場合を例として示す。

平面すべりの場合の安全率は一般に、

$$F_s = \frac{c \cdot A + (W \cos \beta + T \cos \theta) \tan \phi + t \cdot l \cdot \tau_R}{W \sin \beta - T \sin \theta} \quad (1)$$

で表される。ここに、 F_s =安全率、 W =ブロック重量、 T =導入力、 β =すべり面の傾斜角度、 θ =導入力方向とすべり面の法線方向のなす角度、 c =すべり面の粘着力、 ϕ =すべり面の内部摩擦角、 A =すべり面の面積、 τ_R =吹付けコンクリートのせん断強度、 t =吹付け厚さ、 l =ブロックの掘削面での周長である。

しかし、式(1)における安全率は、釣り合いの状態を構成する各要素に対して、同じ安全率で評価していることになる。これに対し、Londeら^{14,15)}は、釣り合い式を構成するそれぞれの要素の不確実性に対応した安全率を与えることを提案している。この考え方を採用すると、式(1)は、

$$1 = \frac{\frac{c \cdot A}{f_j} + (W \cos \beta + \frac{T \cos \theta}{f_T}) \frac{\tan \phi}{f_j} + \frac{t \cdot l \cdot \tau_R}{f_c}}{W \sin \beta - \frac{T \sin \theta}{f_T}} \quad (2)$$

となる。ここに、 f_j =不連続面抵抗に関する安全率、 f_c =吹付けコンクリートに関する安全率、 f_T =導入力に関する安全率である。このとき、必要な導入力 T は、

$$T = \frac{W \left(\sin \beta - \frac{\tan \phi \cos \beta}{f_j} \right) - \frac{c \cdot A}{f_j} - \frac{t \cdot l \cdot \tau_R}{f_c}}{\frac{1}{f_T} \left(\frac{\tan \phi \cos \theta}{f_j} - \sin \theta \right)} \quad (3)$$

で表される。

今回は、不連続面抵抗および吹付けコンクリートに対しては、強度のばらつきやキーブロック解析を日常管理に採用する初めての例であること等を考慮して、 $f_j=f_c=3$ と十分に安全な値とした。また、導入力に対しては、設計強度にすでに安全率が反映されていることから $f_T=1$ とした。

4. キーブロック解析システムの運用方法

(1) 奥多々良木地下発電所増設工事の概要¹⁶⁾

今回キーブロック解析を適用した地下空洞は、関西電力㈱奥多々良木発電所増設工事の地下発電所空洞として建設されたものである。奥多々良木発電所は昭和49年に運転を開始した最大出力121.2万kWの純揚水式発電所であり、今回建設されるのは既設の水路・発電所に隣接した増設の水路および地下発電所(出力72万kW)である。建設地点は兵庫県のほぼ中央に位置し、工事は平成6年12月に着工し、平成10年6月に発電所の営業運転を開始している。増設発電所地下空洞の縦断面図および断面図をそれぞれ図-3、図-4に示す。発電所空洞は幅25m、高さ47mの弾頭型形状の断面を有し、支保工はNATMの設計手法によっており、吹付けコンクリートとロックボルトおよびPS工により実施している。ロックボルトは長さ5mで、1.5m×1.5mの配置となっており、吹付けコンクリートはアーチ部で厚さ32cm、側壁部で24cmとなっている。PSアンカーの設計では、原位置における岩盤試験の結果に基づく空洞周辺地山の非線形弾性逐次掘削解析結果(電中研式)¹⁷⁾から岩盤の破壊領域を求めて、

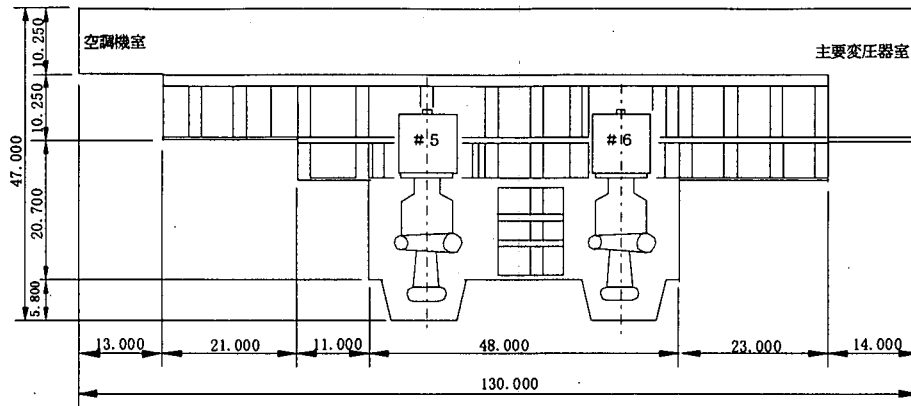


図-3 発電所空洞の縦断面図

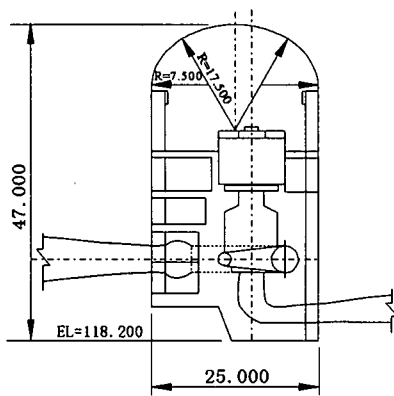


図-4 発電所空洞の断面図

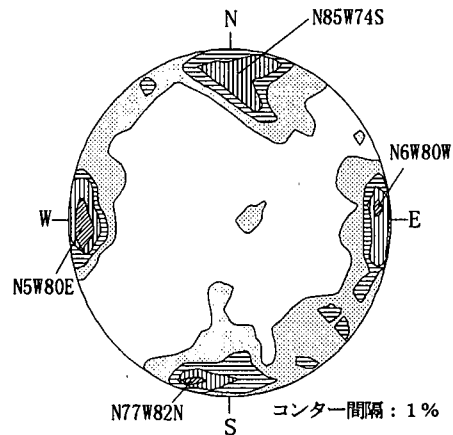


図-5 不連続面分布のステレオ投影図

必要導入力、長さ、配置密度を決定している。その結果として、導入力は 445.9~465.5kN/本 (45.5~47.7tf/本)、配置密度は 13.5~9m²/本、自由長が 6~11m となった。

掘削はアーチ部では中央導坑掘削後に側壁拡幅を行い、本体部では高さ 3m 程度のベンチ掘削により順次盤下げを行っている。キーブロック解析はアーチ掘削時と盤下げ時の各段階で実施した。

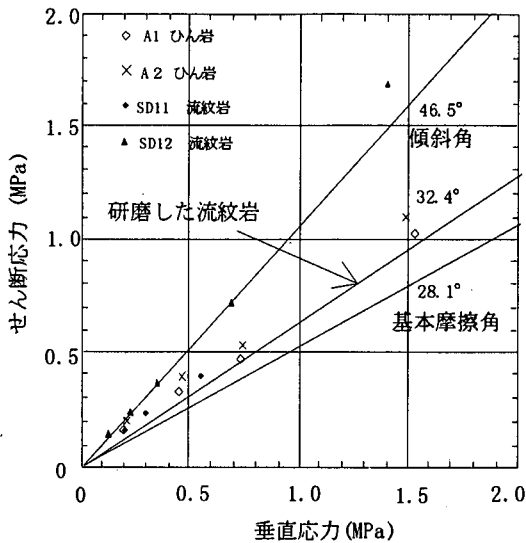
(2) 地質調査、試験結果

地下発電所周辺の地質は大部分が中生代の生野層群に属する流紋岩類で一部に流紋岩質凝灰岩およびひん岩の岩脈が見られる。断層、破碎帯は比較的小規模なものしか確認されておらず、破碎帯幅は最大で 60cm 程度であるが平均すると 1~10cm である。岩盤等級は概ね B~CH 級と良好であり、ひん岩岩脈の貫入面近傍や、破碎帯や変質を受けた狭い範囲に、CM 級以下の劣化した岩盤が分布している。

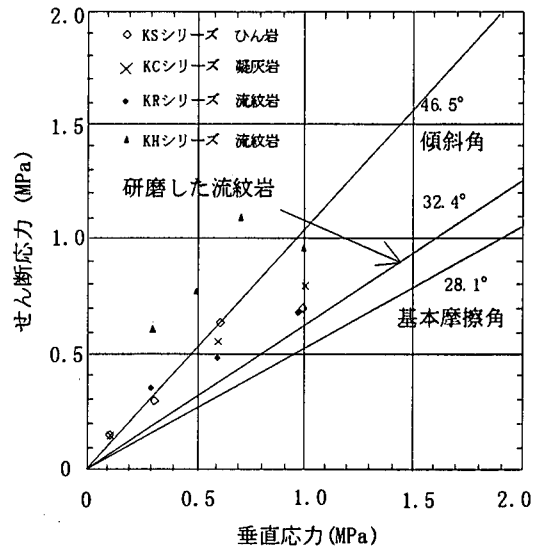
事前の不連続面調査は、空洞建設地点周辺の試

掘坑および換気立坑において実施し、不連続面の幾何学的特性 (方向性、長さ、間隔、粗度、亀裂の分布密度や卓越方向) について調査した。調査は、予備調査として 1m×1m のウィンドウサンプリング調査を計 4ヶ所実施し、主に小規模な不連続面分布の特徴を把握した後、スキャンライン調査を試掘坑および換気立坑にて計 200m の範囲で実施した。図-5 に調査結果のうち、発電所空洞の主な地質区分である流紋岩中の不連続面の下半球ステレオ投影図を示す。同図から、傾斜角は鉛直に近く、走向は南北系と東西系の 2種類からなる卓越方向が存在することがわかる。この卓越方向は、岩種に関わらず一定であり、また岩脈、破碎帯と同系統の節理群と判断された。

安定計算に用いる不連続面の物性値を決定するために、現場におけるブロックサンプリングならびにボーリングコアを用いて多段圧縮三軸試験¹⁸⁾、一面せん断試験を実施した。それとともに各試験結果の妥当性を評価するために、傾斜試験¹⁹⁾および



(a) 多段三軸圧縮試験結果



(b) 一面せん断試験結果

図-6 不連続面試験結果

研磨した流紋岩の一面せん断試験を補助的に実施した。各試験の結果を図-6 に示す。多段三軸試験に用いたコアは $\phi=5\text{cm}$ 、高さ 10cm で総数 4 供試体であり、一面せん断試験では、せん断面が $10\times 10\text{cm}$ 程度の岩盤ブロックをモルタルで固めて整形した試料を 14 個用いた。試験結果は、傾斜試験から得られた平滑な表面を持つ岩石コアによる基本摩擦角 (28.1°) と、実際の不連続面サンプルの傾斜角 (46.5°) の間に分布しているが、不連続面のかみ合わせによって大きく左右される傾向も見られた。よって、当地点の不連続面粗度¹⁹⁾ (JRC) の値が 1~8 と小さいことから、研磨した流紋岩の一面せん断試験結果が不連続面物性の下限值を示しているものと判断し、安定解析に用いる物性値として、粘着力(c)を 0.0Pa 、内部摩擦角(ϕ)を 32.4° とした。

(3) キーブロック解析の運用体制

キーブロック解析を効率的に実施するために、日常管理とステップ管理という 2つの手法を導入した。これは、キーブロック解析を実施工で運用する場合における、解析の迅速性と正確性に対応した考え方に基づくものである。

切羽近傍に出現するキーブロックは、掘削直後の状態が最も危険であり、施工が進み、吹付けやアンカー等の補強工が実施されるに従い安定性は高まると考えられる。従って、切羽近傍に存在するキーブロックに対しては、その存在をできるだけ早く察知することにより、補強対策を行う必要がある。このため、日常管理においては 1 回分の切羽観察結果

を基に、切羽と切羽周辺の空洞部分の解析を実施する。解析は数時間程度で終了し、掘削サイクル内あるいは次掘削サイクル中に対策が実施できることを目標とするものであり、リアルタイムの管理手法となる。

一方、個々の切羽の観察データは空洞全体の不連続面分布の断片的な情報であり、正確な不連続面情報を得ようとすれば複数の観察データを集約した不連続面図を作成しなければならないが、この作業には時間を要する。これは、キーブロック解析では不連続面を完全な平面と仮定しているが、実際には粗度や折れ曲がりによって同一の不連続面でも切羽によって出現する位置や方向性が異なるからである。また計測誤差も存在するはずである。従って、全体の不連続面データを作成するためには、個々の不連続面の連続性を判断したり、場合によっては岩級区分や岩質区分なども加味して判断するという地質学的な能力を必要とする。ステップ管理は、このようにして作成された不連続面データに基づいて実施し、空洞掘削におけるいくつかの段階において実施されるものであり、日常管理では検出できない空洞全体に対する、比較的大規模なキーブロックを検出する目的で実施された。図-7 は、これら日常管理とステップ管理のフローを示したものである。

地質観察は、発破の後のズリ出し、こそく作業が終了した時点で実施される。ここで、計測対象とすべき不連続面の下限値を求める目的で微小なブロックに対する安定計算を実施した。ブロックとしては最も危険なモードであるアーチ天端での落下型の

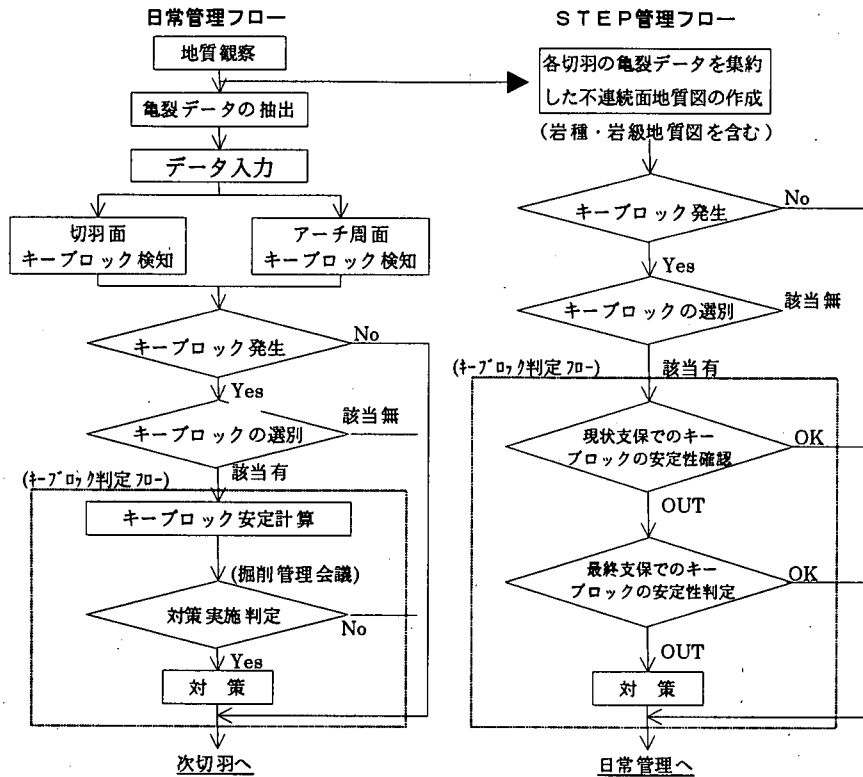


図-7 キーブロック解析のフロー

正三角錐あるいは正四角錐のブロックを考えた。ブロックに作用する力は、自重と吹付けコンクリートのせん断抵抗のみである。計算の結果、掘削面での面積が 1m^2 以下、重量が 3t 以下のブロックは、1次吹付けの厚さ 8cm 、2時間強度の 440kPa のせん断抵抗で十分な安全率を有しており、安定解析の対象外として良いことが分かった。したがって、地質観察においても数 m 規模以上の主要な不連続面についてのみ、スケッチと走向傾斜の測定を実施した。また、岩級、岩質や不連続面の充填物、湧水に関する情報など、通常の切羽観察で実施される項目についても観察シートに記載するとともに掘削面の写真撮影を行った。

各不連続面は、観察シートより始点、終点の座標と走向傾斜を読みとり、入力データを作成し、キーブロック解析プログラムを実行する。プログラムは、切羽面でのキーブロックを検出する平面用プログラムと、アーチ面を含んだ空洞周囲のキーブロックを検出するトンネル用プログラムからなっている。いずれのプログラムもすべての処理がパソコン画面を見ながら対話形式で実施できるようになっており、現場事務所において解析することが可能である。

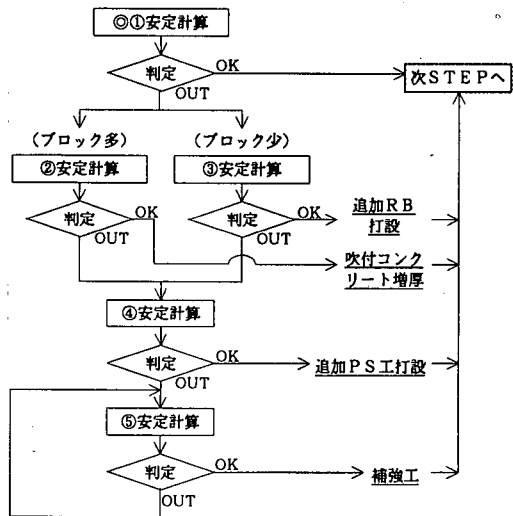


図-8 キーブロック安定判定フロー

キーブロック解析プログラムにより、移動可能ブロックを検出し、ブロックの大きさ、形状等の幾何学的情報を計算する。移動可能ブロックのうち、安定計算をする必要のない安定ブロックおよび前述した1次吹付けで安定している微小ブロックを除く

表-1 安定解析の判断基準

対策メニュー	判定基準 (対策OKとなる基準)	物性値
⑥ 吹付Cなし	$f_j \geq 3$	粘着力(c) = 0.0 kPa ^{*1)} 内部摩擦角(ϕ) = 32.4° ^{*1)}
① 吹付Cのみ(t=3 or 8cm)	$f_c \geq 3$	せん断強度(τ_c) = 440 kPa (試験結果2時間強度)
② 吹付Cのみ(t=16cm)		
③ 吹付C + 追加RB	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤と注入材間の極限引抜力に対し $f_T \geq 2$ $\min(0.6T_{su}, 0.75T_{sy}) \geq T$ RBと注入材との許容付着強度に対し $f_T \geq 1$ 	引抜強度(C_T) = 2.0 MPa ^{*2)} 引張強度(T_{su}) = 240kN 降伏強度(T_{sy}) = 169kN 付着強度(C_b) = 1.6 MPa ^{*3)}
④ 吹付C + (追加RB) + 追加PS	<ul style="list-style-type: none"> 岩盤と注入材間の極限引抜力に対し $f_T \geq 2$ $\min(0.6TP_u, 0.75Py) \geq T$ PSと注入材との許容付着強度に対し $f_T \geq 1$ 	引抜強度(C_T) = 2.0 kPa ^{*2)} 引張強度(P_u) = 967 kN 降伏強度(P_y) = 823 kN 付着強度(C_b) = 1.6 kPa ^{*3)}
⑤ 補強工		

*1) 試験結果より *2) 「グラウンドアンカー設計・施工基準」硬岩の平均値より
*3) 「グラウンドアンカー設計・施工基準」より

たブロックについてキーブロックの安定解析を実施した。

図-7 におけるキーブロック判定フローの詳細を図-8 に示した。図-8 の各ステップでの安定計算の内容は表-1 に示してある。ここで示した安全率のうち、不連続面に対する安全率は、吹付けコンクリートのせん断抵抗に対する安全率3と同等とし、ロックボルトおよびPSアンカーに対してはグラウンドアンカー設計施工手順によった。また、ロックボルトは異形棒鋼(SD345, D25mm)であり、PSアンカーはPC鋼より線(F100)である。ここに示すように安定解析は、考慮する抵抗力に応じて実施されるが、安定計算の各段階において安全率の計算結果に対する判断基準により打ち切れ、必要ならば対策工が実施される。

安定計算①では、不連続面抵抗のみの場合の安全率とこれに吹付けのせん断抵抗を考慮した場合の安全率が計算される。ここで必要安全率を満たしていないものは、追加補強の対策を必要とするキーブロックであり、次の項目へ進む。安定計算②と③は、対策工として追加の増し吹付けを実施する場合と、追加のロックボルト工を実施する場合である。どちらの対策工を実施するかは、例えば多数のキーブロックが集合体で存在する場合には増し吹付け、ブロックが単体で存在する場合にはロックボルトを用いるというように使い分ける。また、施工サイクルのなかで次工程として実施しやすい方法を選ぶこともできる。安定計算⑤は吹付け、あるいはロックボルトでは対応できない場合であり追加のPS工に対する安定計算を実施する。

表-1 の判定基準及び物性の値は、建設地点の地質や不連続面の状況あるいは空洞規模等に対応して

決定されるものである。

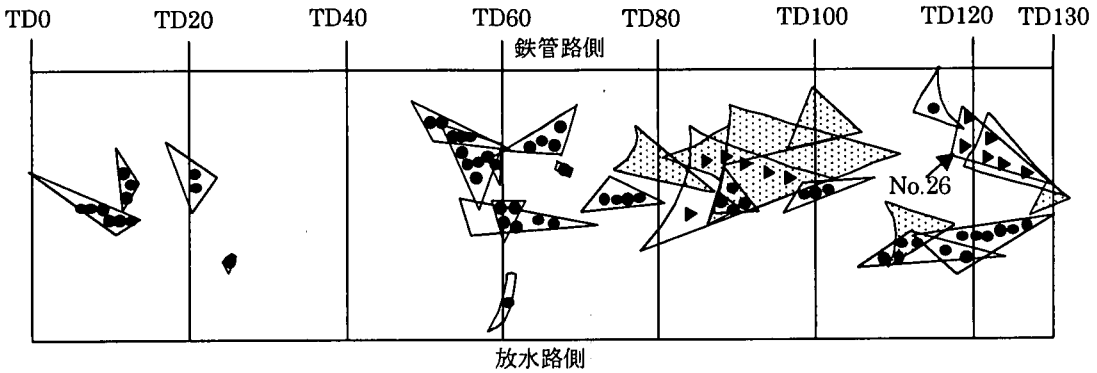
5. キーブロック解析の実施結果

(1) アーチ掘削時のキーブロック解析

アーチ掘削時においては、導坑掘削および側壁拉幅の各サイクルにおいて切羽観察を実施し、前述のフローにしたがってキーブロック解析を実施した。切羽観察は、施工に関わる地質状況の把握とキーブロック解析の入力となる不連続面データの取得の両方に主眼をおいて実施した。作業は、発破・ザリ出し・こそく作業が終わった後 30 分程度で実施し、施工工程を妨げないようにした。

切羽観察シートからキーブロック解析の入力データとして不連続面の座標と走向傾斜を求める。キーブロック解析の結果、補強対策工が必要なものに対しては安定計算シートが出力される。安定計算シートには、キーブロックの3次元形状が空洞上に図示され、視覚的に形状が認識できる。また、同図中にはキーブロックを形成する不連続面の情報やキーブロックの大きさ、重量等の幾何学的情報および、安定計算の結果が出力され、これをもとに補強工の種類、打設位置、本数等の検討を行うことになる。

このようにしてアーチ部において追加対策工を必要としたキーブロックを図-9 に示す。対策を要したキーブロックは計 28 個あり、うち落下型は 9 個、平面すべり型は 9 個、くさびすべり型は 10 個で、それぞれ前述したフローに従い対策を実施した。キーブロック規模は平均で掘削面での面積 70m²、質量 182t、最大で面積 500m²、質量 1,300t であった。また、対策を施したキーブロックは、追加ロックボルトによるものが 19 個、追加吹付けコンクリート



□ 増吹き付け(486m²) ● 追加ロックボルト(69本) ▲ 追加P S(12本)

図-9 対策工を必要としたアーチにおけるキーブロック

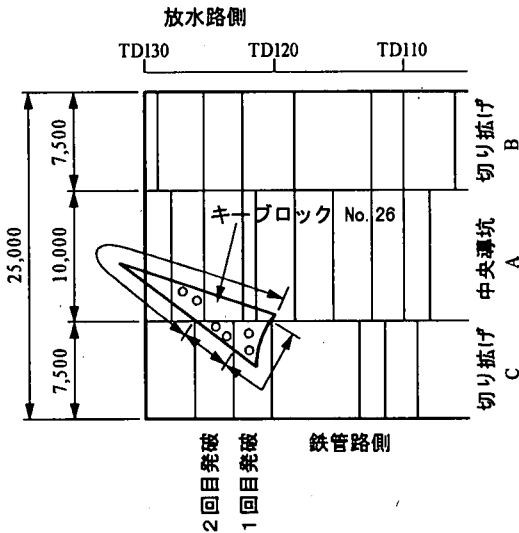


図-10 No.26のキーブロック

によるものが7個、追加P S工によるものが1個、追加吹付けコンクリートと追加P S工の併用によるものが1個であり、集計すると追加ロックボルト69本、追加吹付けコンクリート486m²、追加P S工12本となった。

(2) No. 26のキーブロックに対する追加補強検討

キーブロックに対する検討過程の実施例として、図-9に示したNo.26のキーブロックの解析結果と追加補強について以下に示す。このキーブロックは、中央導坑の切羽位置TD120mにおける切羽観察結果を用いて解析を実施したところ、切羽直上から前方アーチ終端までの約10mの範囲で検出されたものである。図-10にキーブロックの平面図を、図-11に

計算結果の安定シートをそれぞれ示す。ブロックは高さ10.5m、重量3,678kNであり、抜落ちモードは落下型である。特に高さ10.5mは空洞幅25mの約1/2に相当し、キーブロックが落下した場合、重大な災害が発生するだけでなく、アーチ部周辺の応力経路が遮断されることによって空洞の安定性が大きく損なわれることになる。

キーブロックは中央導坑と切羽部にわたって発生しており、掘削を進める上で以下のような追加補強対策および掘削作業を実施することとした。

a) 必要導入力の算定

1層目の吹付けコンクリートを施工し、2時間強度として440kPaを期待する。せん断抵抗力は、以下の式で算定される。

$$440 \text{ (kPa)} \times 8 \text{ (cm)} \times 31 \text{ (m)} = 1,091 \text{ (kN)} \quad (4)$$

この場合、キーブロックのすべり力はキーブロック重量3,678kNに相当し、安全率を算定するとFs=0.3となる。吹付けに対して必要な安全率は3.0であるから、不足する抵抗力は以下の式で算定され、これは追加補強するロックボルトもしくはP Sアンカーの負担分に相当する。

$$3,678 \text{ (kN)} - 1,091 \text{ (kN)} / 3 = 3,314 \text{ (kN)} \quad (5)$$

b) 補強対策工の数量算定

不足する抵抗力をロックボルトで補強する場合を考えると、表-1に示した判定基準に従い、(A)岩盤と注入材との極限引抜力、(B)ロックボルトと注入材との許容付着力、(C)ロックボルト耐力のそれぞれから算定されるロックボルトの必要本数で最大となるのは(C)であり、ロックボルト必要本数(RB)を算定すると、以下ようになる。

$$RB = 3,314 \text{ (kN)} / \min(0.6T_{su}, 0.75T_{sy}) \\ = 3,314 \text{ (kN)} / \min(0.6 \cdot 240 \text{ (kN)}, 0.75 \cdot 169 \text{ (kN)})$$

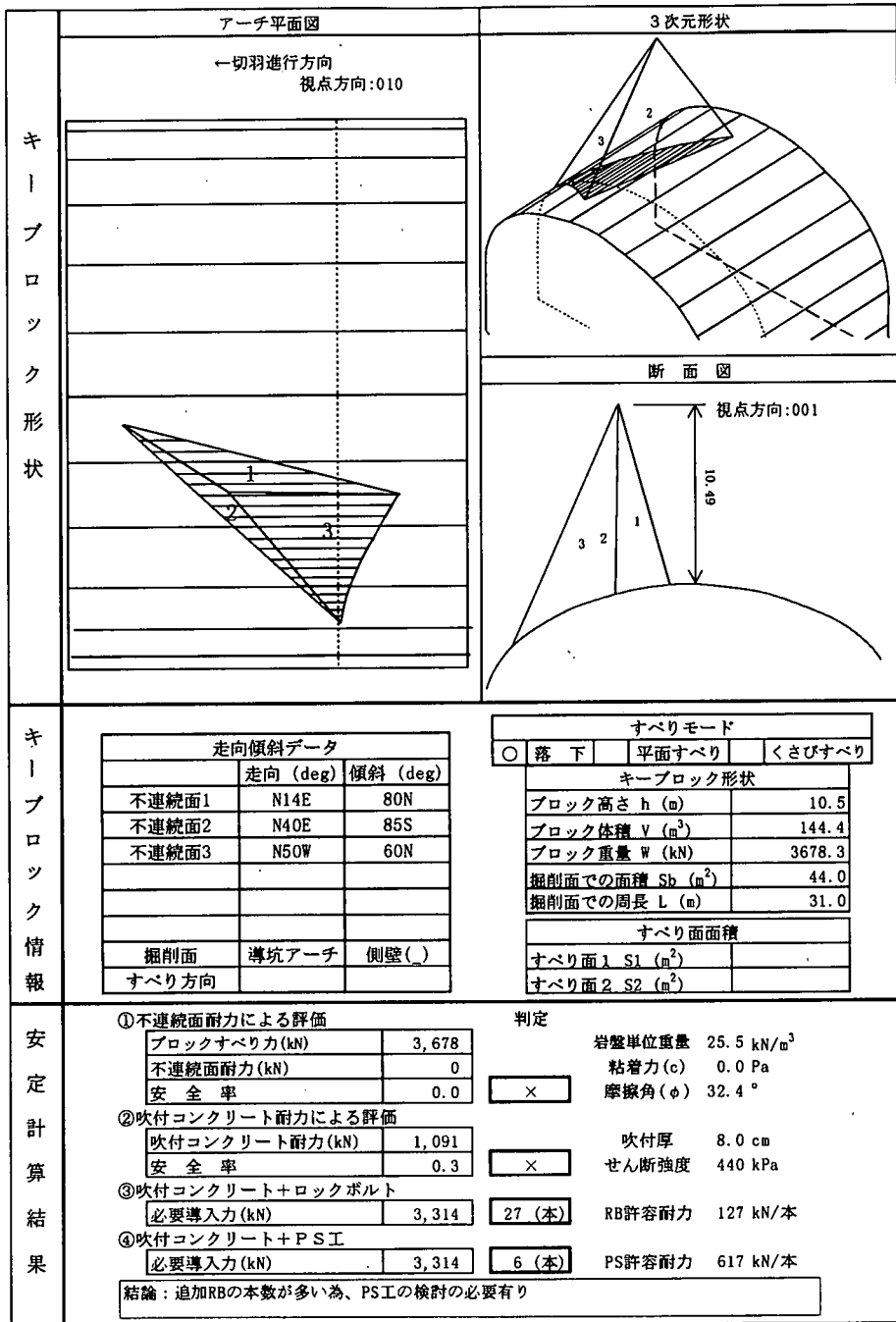


図-11 キーブロック安定計算シート

= 26.1 本

(6)

同様に不足する抵抗力をPCアンカーで補強する場合、(A)岩盤と注入材との極限引抜力、(B)PCストランドと注入材との許容付着力、(C)PCストランドの耐力のそれぞれから算定されるPSアンカーの必要本数で最大となるのは(C)であり、PSアンカーの必要本数を算定すると、以下ようになる。

$$PS = 3,314 \text{ (kN)} / \min(0.6PS_u, 0.75PS_y)$$

$$= 3,314 \text{ (kN)} / \min\{0.6 \cdot 967 \text{ (kN)}, 0.75 \cdot 823 \text{ (kN)}\}$$

= 5.4 本

(7)

以上の計算結果より、1次吹付けコンクリートに加え、ロックボルトであれば27本、PSアンカーであれば6本の追加補強が必要となる。

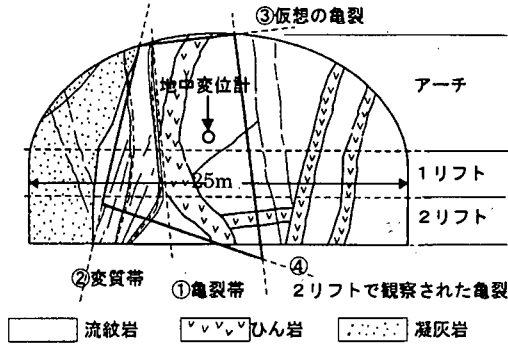


図-12 主要変圧器室側壁の地質図

ここでは、ロックボルトでは本数が多くなること、キーブロックの高さが10.5mでありロックボルト長さ $L=5m$ では定着長が不足すること等の理由により、追加補強としてPSアンカーを採用することとした。このように、キーブロックを構成する不連続面が80N, 85S, 60Nのように高傾斜である場合、キーブロック高さが高くなる可能性が生じ、定着部をキーブロックの外側に設定するために十分な長さを有するPSアンカーを打設する必要がある。

c) 補強対策工の施工

前述の通り、このキーブロックは中央導坑と鉄管側切上げ部にわたって発生しているため、中央導坑を掘削しただけでは落下しない。よって以下に示すように、まず中央導坑をTD130mまで到達させ、順次追加補強を実施することとした。すなわち、中央導坑をアーチ部終端まで到達させ、長期強度を期待するために1層の吹付けコンクリートを施工し、ロックボルトを初期支保設計の $2.25m^2/本$ で打設した。これは、キーブロックの周長31mのうち約65%に相当する20mが中央導坑部に発生するため、切上げ掘削を実施する間に吹付けコンクリートの長期強度を発現させる効果は大きいと判断したためである。続いて放水路側B切羽を切上げ、初期支保設計のPSアンカーを打設すると同時に、b)で計算された追加補強PSアンカー6本のうち中央導坑部の2本を打設した。B切羽の掘削終了後、鉄管側C切羽の切上げを実施した。この際、キーブロックの発生位置直前までは通常通りの進行速度とし、キーブロックの箇所は順次1次吹付けコンクリートとロックボルトおよびPSアンカーを打設するために、2分割にして掘削を行なった。中央導坑の最終吹付けからの経過時間は約20日であることから、吹付けコンクリートのせん断強度が設計強度の約80%発現していると仮定すると、既打設の2本のPSアン

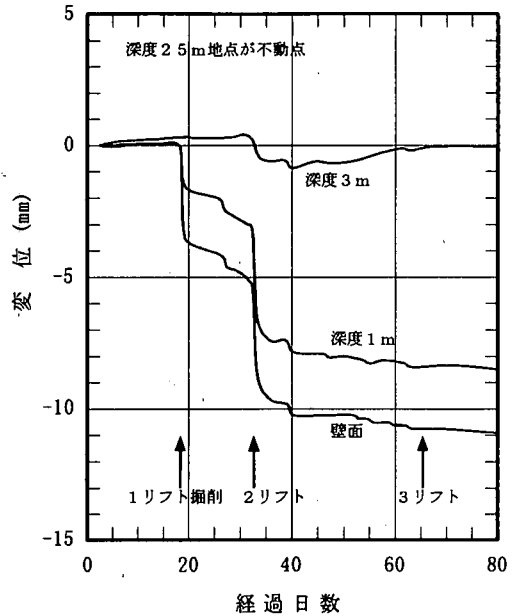


図-13 地中変位の経時変化

カー導入力 considering the remaining required input is approximately 1,500kN. At the first breakthrough of the cutting edge of the iron pipe on the side, a residual length of approximately 6m of the circumference appeared, and the strength was maintained for 2 hours. Assuming that the first secondary concrete and PS anchor were installed at this time, the required input in this area is approximately 1,400kN, and the required input for the entire key block is almost satisfied. As a result, the second excavation work is in a sufficiently safe state to be implemented. It became possible to implement, and the required PS anchors were installed, resulting in the completion of additional reinforcement for the key block.

6. 岩盤挙動にもとづく

不連続面物性値評価の一例

キーブロックの安定計算に用いた物性値は、前述した通り事前に実施した不連続面試験結果から得られたものである。不連続面の物性値は、キーブロック解析の結果を左右する重要な要因であるにもかかわらず、事前に決定する事が困難な物性値でもある。そこで以下に岩盤挙動にもとづく不連続面物性値の評価を試みた例を示す。これは、空洞掘削中において変状のあった岩盤挙動のうち、キーブロックによるすべりが原因と考えられるものを対象に安定計算を行い、補強対策工を実施した結果をもとにして、不連続面の物性値を逆算し、不連続面物性として設定した値の妥当性を検討したものである。

図-12 に示したのは主要変圧器室側壁の地質図

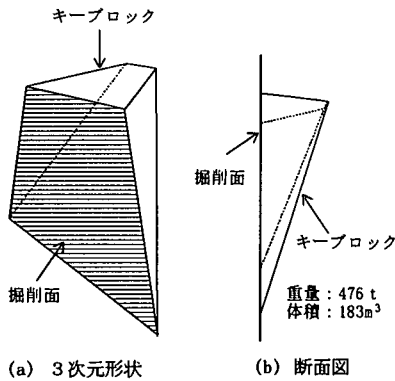


図-14 仮定したキーブロック形状

である。また、同壁面にアーチ掘削後設置された地中変位計の計測結果の経時変化を図-13に示す。1リフト掘削時には壁面および深度1mの地点で最大4mm程度の変位が生じており、その後も増加傾向にあった。2リフト掘削時には変位計設置点より掘削地点が遠くなっているにもかかわらず、1リフト掘削時よりもさらに大きな変位増分が5mm程度発生しており、異常な変形挙動であると認識された。

また、地質観察では1リフトでは観察されなかった流れ盤となる不連続面が現れた。そこで2リフト掘削直後にこの不連続面を含むブロックがすべり始めたものとし、地質観察結果と周辺のPSアンカー軸力計の計測結果から図-12の太線で示した4つの不連続面から形成されるキーブロックを仮定して、不連続面物性を逆算した。図-14にこのキーブロックの形状を示す。その際計測から得られたPS軸力がキーブロックに導入力として作用しているものとし、そのときの安全率を1とした。不連続面の粘着力と内部摩擦角は一義的に求めることはできないが、一方の値を仮定した場合の物性値を図-15に示す。粘着力の値は小さく44kPa以下である。粘着力を0とすると内部摩擦角は47.8°となり、事前に実施した傾斜試験の傾斜角にほぼ等しい値となる。粘着力を20kPaとすると内部摩擦角は31.2°となり今回設定した値にほぼ等しくなる。したがって、粘着力は設計値よりも若干大きく20kPa程度であるとみなせば、内部摩擦角の設計値32.4°は、岩盤の挙動に合致している。

また、このキーブロックに対しては追加補強工として安全率を3にするために必要なPSアンカーの本数を求めて、3リフト掘削前に追加で施工した。その結果、図-13に示すように3リフト掘削後は、地中変位の増加はほとんど認められず、対策工が有効であったと判断された。

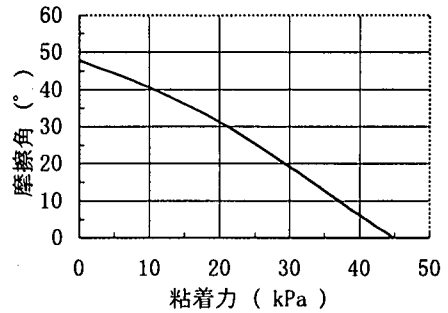


図-15 不連続面物性の逆算結果

ここで実施した不連続面物性値の評価は、数少ない一例に過ぎないが、今後キーブロック解析を有効な情報化施工の手法とするために必要なアプローチであり、データの蓄積を進めることにより、合理的な物性値や安全率の設定が可能になると考えている。

7. 結論

本研究の目的は大規模地下空洞の掘削時においてキーブロック解析を運用することにより、補強が必要な部分について重点的に補強工を実施し、それ以外の部分については軽い支保設計とし、全体としての支保の数量を低減し経済的かつ合理的な地下空洞の設計・施工を実現することである。そこで、キーブロック解析を運用するためのシステムの開発を行い、大規模地下空洞の実施工に適用した。その結果、発見されたキーブロックに対して、適切な補強工の設計・施工を実施することができ、より合理的な地下空洞の施工が可能となった。さらに、事前検討における不連続面物性値の設定法の妥当性について検討した。

今後さらに本手法を有効なものにするために以下のような課題が挙げられる。

キーブロック解析の結果は、入力する不連続面情報の精度に大きく左右される。したがって施工時の限られた時間内により正確で詳細な切羽観察を行う方法および、掘削毎に得られる観察結果からデータの追加、修正を適切に実施できる手法が必要となる。

また、安定解析の結果は不連続面の強度特性に左右される。強度特性の設定方法としては海外ではNGIの手法があるが、国内では標準的な手法として確立されておらず、今後試験方法とその評価方法についての手法の確立が待たれる。

謝辞：本研究を進めるに当たっては、京都大学工学部足立紀尚教授より御指導および数多くの貴重な御意見を賜りました。また、キーブロック解析システムの開発、運用に関しては、奥多々良木発電所増設工事共同企業体ならびに基礎地盤コンサルタンツ㈱を始めとする多くの工事関係者の御協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 竹川正臣, 宮崎進一: 奥多々良木発電所の設計と施工, 発電水力, No.132, pp.10-33, 1974.
- 2) 原田稔, 片山武, 矢田篤: 大河内水力発電所地下発電所空洞掘削の設計と施工, 電力土木, No.230, pp.46-57, 1991.
- 3) 林信儀, 田中耕一, 上山邦彦: 大規模地下空洞の施工実績, 電力土木, No.243, pp.80-88, 1993.
- 4) 土木学会岩盤力学委員会: 大規模地下空洞の情報化施工, 土木学会, 1996.
- 5) 片山武, 矢田篤, 平川芳明: 大河内水力発電所地下発電所空洞掘削の情報化施工, 電力土木, No.237, pp.97-107, 1992.
- 6) 野崎隆司, 伊藤洋, 日比野敏: 大規模地下空洞における各種安定化対策とその考察, 電力土木, No.209, pp.40-48, 1987.
- 7) 本島睦, 日比野敏: 実測結果による大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動の検討, 電力土木, No.186, pp.36-46, 1983.
- 8) Goodman, R.E. and Shi, Gen-hua: *Block Theory and Its Application to Rock Engineering*, Prentice-Hall, 1985.
- 9) 大西有三, 長野恵一, 藤川富夫: ブロック理論による不連続性岩盤掘削時の安定性評価について, 土木学会論文集, 第364号/Ⅲ-4, pp.209-218, 1985.
- 10) Yow Jr. J. L. and Goodman, R. E.: A Ground Reaction Curve Based Upon Block Theory, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 20, 167-190, 1987.
- 11) Chan, R. and Goodman, R. E.: Predicting the Number of dimensions of Key Blocks of an Excavation Using Block Theory and Joint Statistics, *28th US Symposium on Rock Mechanics*, 81-87, 1987.
- 12) 大橋 敏行, 西村 毅, 草深 守人: 節理性岩盤の調査・解析システムを用いたキーブロック解析, 第20回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.189-193, 1987.
- 13) Hoek, E. and Bray, J. (小野寺, 吉中共訳): 岩盤斜面工学, 朝倉書店, 1979.
- 14) Londe, P., Vigier, G. and Vormeringer, R.: The Stability of Rock Slopes - a Three Dimensional Study, *J. Soil Mech. and Foundation Div.*, ASCE, Vol.95, No.SM1, pp.235-262, 1969.
- 15) Londe, P., Vigier, G. and Vormeringer, R.: Stability of Slopes - Graphical Method, *J. Soil Mech. and Foundation Div.*, ASCE, Vol.96, No.SM4, pp.1411-1434, 1970.
- 16) 手塚昌信, 吉舎廣幸, 美野誠一: 奥多々良木発電所工事の設計と施工, 電力土木, No.260, pp.51-59, 1995.
- 17) 本島睦, 日比野敏, 林正夫, 北原義浩: 大規模な地下構造物掘削時の安定解析プログラムの開発とその適用例, 電力中央研究所報告, No.376011, 1977.
- 18) 西垣好彦, 城戸渉: ジョイントを含む岩への多段三軸試験の適用, 土と基礎, Vol.31, No.7, 1983.
- 19) Barton, N. and Choubey, V.: The Share Strength of Rock Joints in Theory and Practice, *Rock Mechanics*, Vol.10/1-2, pp.1-54, 1977.

(1997. 6. 16 受付)

KEY BLOCK ANALYSIS DURING EXCAVATION OF UNDERGROUND ROCK CAVERN

Masanobu TEZUKA, Yuzo OHNISHI, Makoto TANAKA and Tsuyoshi NISHIMURA

Block Theory, which can find falling or sliding blocks by intersecting structural discontinuity, was applied for the excavation of large scale underground rock cavern. This paper proposed the procedure how to observe the excavation surface, to search key blocks and then to design support system. This method was executed during the excavation of Okutataragi underground power station, and detected key blocks were supported by shotcrete, rock bolting or rock anchor. It is shown that the proposed method based on block theory can help to reduce an amount of supporting system and to design the structures of rock cavern properly in discontinuous rock mass.