

地下構造物周辺岩盤における地質状況を考慮した地山補強調査・設計・施工システムの開発

宇津木慎司¹・中谷 匡志²

¹正会員 安藤ハザマ土木事業本部土木設計部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)

E-mail: utsuki.shinji@ad-hzm.co.jp

²正会員 安藤ハザマ土木事業本部土木設計部 (〒107-8658 東京都港区赤坂6-1-20)

E-mail: nakaya.masashi@ad-hzm.co.jp

地下深部に設置が計画されている高レベル放射性廃棄物地層処分空洞やリニア新幹線トンネルなどにおいては、高地圧に起因する空洞の不安定化や空洞掘削時における突発湧水の発生などが想定されている。これに対して、施工時の安全確保や恒久的な地下空洞の安定性保持を実現するために、種々の対策を講じる必要があると考えられるが、とくにこれらの構造物においては、高い品質を確保しながら全体工費を抑制することが重要視されているため、地質状況を的確に把握した上で最適な調査、設計、施工を実施することが求められる。本論文においては、地質状況を考慮した最適な地下空洞周辺岩盤における地山補強を実現するために考案した調査、設計、施工システムについて、その具体的な内容を示すとともに、その妥当性を評価するために実施した解析結果について述べる。

Key Words : *underground structure, rock masses, tunnel support, anisotropy*

1. 緒言

地下300m以深における設置が検討されている高レベル放射性廃棄物地層処分空洞や、1,000mを超える高土被り部におけるトンネル掘削が計画されているリニア新幹線トンネルなどにおいては、高地圧に起因する空洞の不安定化や空洞掘削時における突発湧水の発生などが想定されている。これに対して、施工時の安全確保とともに、恒久的な地下空洞の安定性を保持するために、種々の対策を講じる必要があると考えられる。さらに、これらの構造物においては、通常の地下構造物建設より高い品質が要求されることとともに、全体工費の抑制が重要課題として指摘されており、より効率的かつ効果的な調査、設計、施工の実現が求められる。

これに対して筆者は、地質状況に応じた最適な止水対策を実施するためのグラウチング品質管理支援システムを開発し、ダム現場の施工に適用する¹⁾とともに、地下構造物施工における適用性を検討した²⁾。本システムは、①最も割れ目と交差しやすい注入孔削孔方向を算定する割れ目密度ダイアグラムと②岩盤の水みちを地球統計学的解析により推定コンター図化する手法を組み合わせ、地質状況に応じた最適な止水対策を実現するものである。

ダムや上述した地下空洞計画箇所分布している岩盤においては、節理面や層理面などの割れ目が卓越しており、岩質部は硬質かつ低透水であっても、割れ目に沿って極端に強度が低く透水性が高い、異方性を有していることが知られている。たとえば、図-1のダムグラウチングの例に示すように、実際の基礎岩盤に分布する割れ目が上下流方向の走向を有してしかも傾斜角が高角度である場合においては、既往の設計どおり注入孔が鉛直下方に設定されると両者が交差しにくいことにより、高透水を呈する割れ目にセメントミルクが注入されないことが懸念される。これにより、改良されずに残存する水みちがダム基礎を貫き、その状況によっては漏水を引き起こす可能性がある。また、地下構造物周辺岩盤におけるグラウチング孔は、図-2に示すような立坑を例にとると、壁面から数mの範囲の岩盤を改良するために、等間隔で下方放射状に計画される事例が多い。この場合、図に示すような高角度の割れ目が卓越して分布する際には、上述したダムの場合と同様に、高角度の注入孔と割れ目が交差しにくく、とくに、割れ目と削孔方向が平行に近い箇所では水みちが改良されずに残存する可能性がある。

上述した異方性岩盤における止水対策で懸念されたグラウト注入孔と割れ目の交差密度について、地下空洞周

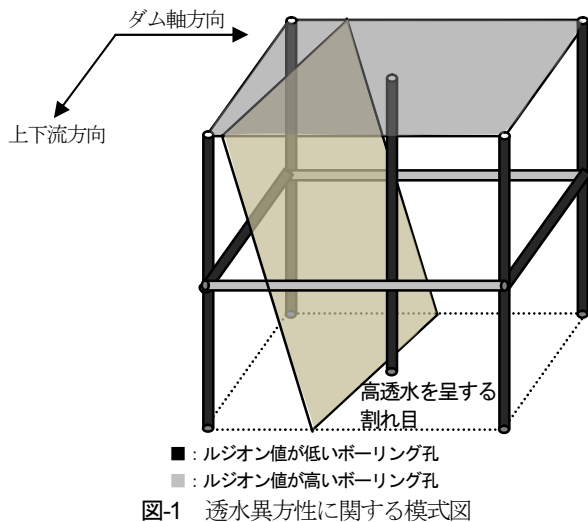


図-1 透水異方性に関する模式図

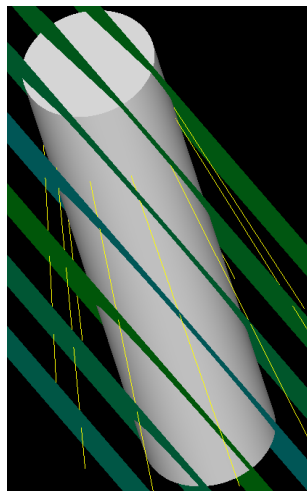


図-2 空洞でのグラウチング孔配置例

辺岩盤の安定性についても同様のことが考えられる。すなわち、岩質部は堅硬であっても割れ目に沿って極端に強度が低い岩盤において、空洞の安定性を保持するためのロックボルトを打設する場合、より効率的かつ効果的な施工を実現するためには、ロックボルトとより多くの割れ目とが交差させることが重要となる。具体的には、図-3に示すような高角度の割れ目が卓越する層状岩盤においては、現状のトンネル壁面に対して直交方向に打設されるロックボルト(青点線)と交差しにくいいため、より多くの割れ目と交差しやすい方向(赤線)に打設する必要があると考えられる。

これに対して筆者らは、グラウチング品質管理支援システムの構成項目である①最も割れ目と交差しやすい注入孔削孔方向を算定する割れ目密度ダイアグラムなどを用いて、より効率的かつ効果的に地下空洞安定性確保を実現するための、新たな調査、設計、施工システムを構築した。本論文においては、この地下空洞周辺岩盤における地質状況を考慮した地山補強調査、設計、施工システムについて具体的な内容を示すとともに、その妥当性を評価するために実施した解析結果について詳述する。

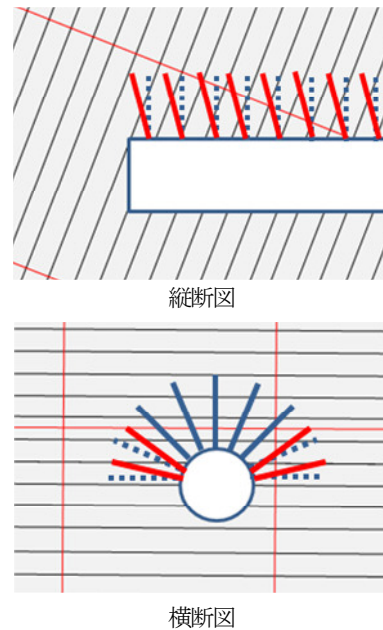


図-3 異方性を考慮したロックボルト打設例

2. 既往の地下空洞建設における調査、設計、施工に関する課題

本章においては、既往の地下空洞建設における調査、設計、施工に関する課題について、(1)事前地質調査と空洞掘削時における地質状況確認、(2)異方性岩盤を考慮した支保設計に関する内容を詳述する。

(1) 事前地質調査と空洞掘削時における地質状況確認

地下空洞の地質調査は、当該地点の文献調査に始まり、その状況や構造物の規模に応じて地表面踏査、弾性波探査、ボーリング調査などが実施されるとともに、比較的規模の大きい地下発電所などにおいては初期地圧の測定なども行われる。しかしながら、施工事例の多い道路や鉄道トンネルなどは、線状の細長い構造物が数kmにわたって計画される場合があるとともに、最大数百m程度以深の地山深部に設置されるため、掘削箇所全線にわたり地質状況を詳細に把握することは困難である。

これに対して、実際の空洞掘削時には、切羽における地質観察が実施されるとともに、切羽前方の状況確認手段として、探りボーリングや各種切羽前方探査が適用される事例が増えてきている。これにより、断層などの地山不良部や大量湧水発生分布位置などを事前に予測し、その状況に応じた追加対策などを実施することにより、空洞の安定性を確保している。

上述した現状や課題を踏まえ、地質状況の複雑な日本において、高土被りで重要度の高い地下構造物を建設する際には、事前地質調査結果より得られる情報に限界があることを認識するとともに、施工時に得られる地質情

報や物理探査結果をもとに実際の地質状況をより詳細に把握した上で、その状況に応じたより効率的かつ効果的な施工を実現する必要があると考えられる。

(2) 異方性岩盤を考慮した支保設計

地下空洞の安定性に関して、岩盤の割れ目が及ぼす影響は広く知られており、Bieniawskiが提唱しているRMR法によるトンネル地盤分類の中に、図4に示すような空洞に対して不利な不連続面が示されている³⁾。このような岩盤中の割れ目の分布状況によって空洞の安定性が異なる、岩盤の異方性については、地下発電所などの大規模空洞における設計の際、空洞の設定位置や方向を考慮する事例があるものの、通常の道路や鉄道トンネルにおいては全体路線の線形などが優先されることが多い。

現在、山岳トンネル工法の主流であるNATM工法において、空洞周辺地山を効果的に支持する支保部材の一つであるロックボルトについては、①縫いつけ効果、②はり形成効果、③内圧効果、④アーチ形成効果、⑤地山改良効果などが、空洞周辺地山において複合的に作用するとされている。これに対して、上述したように、掘削対象とする岩盤は割れ目に起因する異方性を有しており、たとえば図3に示すように、高角度を呈する層状の割れ目が卓越する場合においては、現状のトンネル壁面に対して直交方向に打設されるロックボルト(青点線)と交差しにくいため、所要の支保効果が得られないことが懸念される。とくに上述した高土被り部の施工となる地層処分空洞やリニア新幹線トンネルなどにおいては、ロックボルトを増設するだけでなく、より多くの割れ目と交差しやすい方向(赤線)に打設する必要があると考えられる。

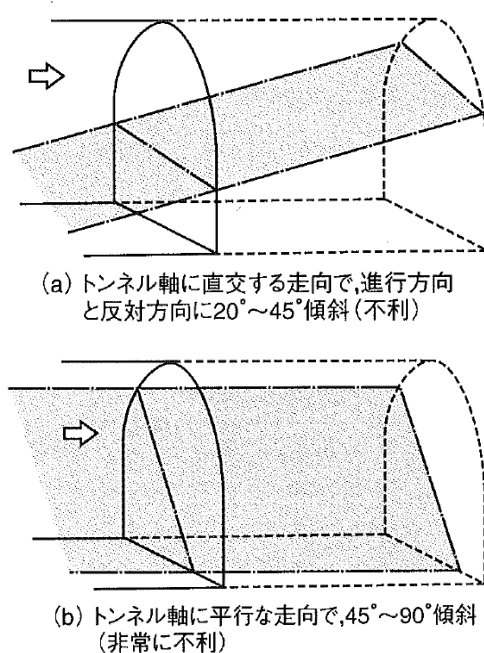


図4 空洞に対して不利な不連続面³⁾

3. 地下空洞周辺岩盤における地山補強調査、設計、施工システムの検討

本章においては、2章で示した課題に対して、とくに、高土被り部における地質状況を考慮した最適な地下空洞建設を目的とした、調査、設計、施工システムを検討した。以下に、(1)システムの全体概要とともに、本システムの最も特徴的な項目である(2)割れ目密度ダイアグラムを用いた最も割れ目と交差しやすいロックボルト設定方向の評価手法について詳述する。

(1) 地下空洞周辺岩盤における地山補強調査、設計、施工システムの概要

ここで図5に本システムの実施概念図を示す。本システムは、空洞掘削時において、a)ボーリング探査1回当たりの実施範囲300m程度を一つの施工単位として、逐次、空洞掘削を進めながら、切羽前方探査と掘削部における地質観察を実施することにより、その状況に応じた最適な施工を実現することを目的としている。以下に個々の項目について詳述する

a) 探りボーリング

地下空洞掘削の進捗を確保しながら前方の地質調査を実施するために、状況に応じて図に示すような拡張部を設定して、前方300m程度まで探りボーリング孔を削孔する。施工性と工期を優先してノンコア施工とし、単位区間あたりの掘進速度やくり粉の採取により地質状況を確認するとともに、数mごとに地山の湧水量を継続的に測定することにより、前方における大量湧水発生位置を事前に特定する。さらに、地山状況が不良であったり、土被りが大きい箇所などにおいては、コア採取を実施するとともに、状況に応じてボアホールテレビによる割れ目調査も行う。

b) TFT探査⁴⁾

空洞掘削時において、弊社が開発したトンネル発破震源を利用した物理探査手法である、TFT探査を実施する。この手法は、空洞掘削および支保工の施工を中止することなく連続的に探査を実施できる利点を有しており、①切羽前方の地山不良部の特定とともに、②当該実施地点近傍における空洞周辺地山の弾性波速度を測定できる。これにより、通常、地山の弾性波速度と関連付けて設定される空洞支保パターンの妥当性を検証しながら施工を進捗できるとともに、前方の地山不良箇所を手前から適切に処置することが可能となる。

c) 削孔検層システム

削孔速度やエネルギーなどから切羽近傍の地質状況を推定する目的で、現在、広く適用されているDRISS工法を採用し、上述したa)ボーリング探査とb)TFT探査により想定された断層などの地山不良部や大量湧水発生箇所

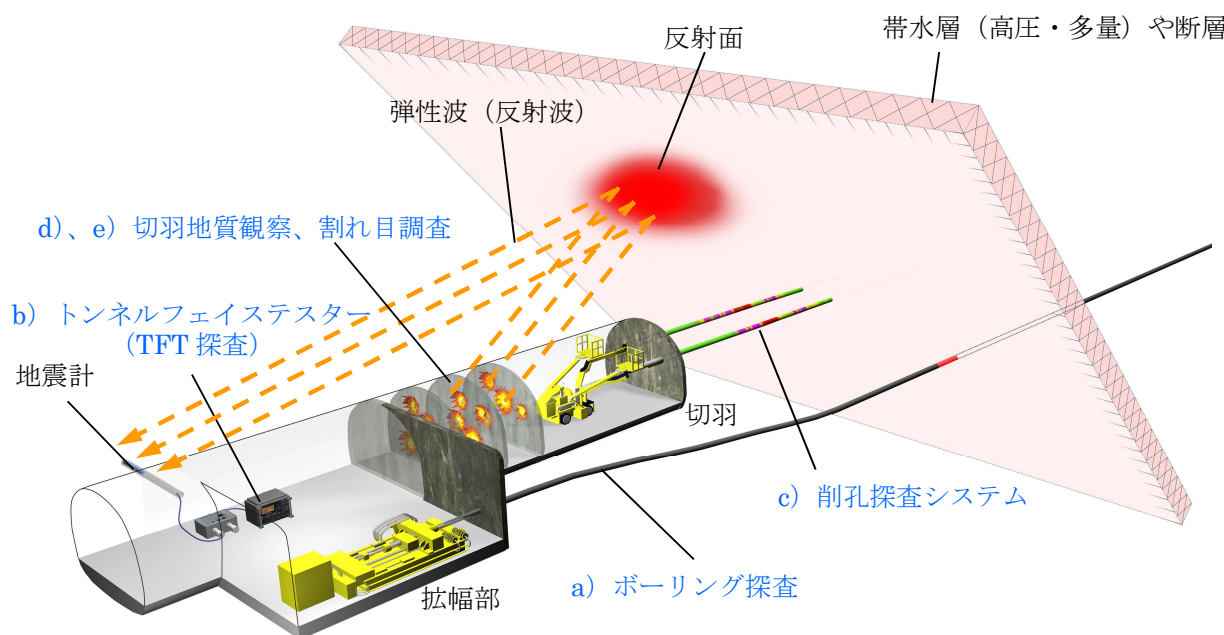
の分布位置を、より精度よく特定する。

d) 切羽地質観察

地下空洞掘削時に通常行われる地質観察を実施し、当該地点における実際の地質状況と事前調査結果との差異確認、上述した探査結果などの妥当性検証などにより、地質に関わる評価結果の精度向上を図るとともに、当該地点における支保の妥当性を評価する。

e) 切羽および側壁における割れ目調査

本システムの最大の目的である、割れ目の卓越傾向がもたらす岩盤の力学的特性に関する異方性を考慮した空洞支保設計を実現するために、空洞掘削時の切羽と側壁において、層理面や節理面など割れ目の走向、傾斜、割れ目の状態などを測定する。この結果をもとに実施する具体的なf)解析処理方法やg)設計方法については、次項において詳述する。



●調査

実施項目	調査範囲	調査内容	調査目的
空洞掘削前	a) 探りボーリング	切羽前方 300m 程度 ノンコア削孔 湧水量調査	地質概要確認 湧水点確認
空洞掘削時	b) TFT 探査	切羽前方 100m 程度 掘削発破を用いた 前方探査、 弾性波速度測定	地質調査精度向上
	c) 削孔検層システム	切羽前方 30m 程度 削孔検層	
	d) 切羽地質観察	切羽、側壁 地質スケッチ 切羽評価点算定	地質調査結果確認
	e) 割れ目調査	切羽、側壁 割れ目の卓越傾向 確認	異方性評価

●設計

実施項目	実施内容	実施目的
f) 割れ目密度ダイアグラムを用いた異方性評価	ロックボルト設定方向ごとの割れ目密度算定	g) 支保設計に用いる評価指標算定
g) 異方性を考慮した支保設計および安定解析	より多くの割れ目と交差する支保設計実施、妥当性確認	効率的かつ効果的な支保設計実施

●施工

実施項目	実施内容	実施目的
h) 計測工による支保効果確認	内空変位計側、ロックボルト軸力計測など	効率的かつ効果的な支保設計の確認

図-5 本システムの実施概念図

(2) 割れ目密度ダイアグラムを用いた最適な空洞支保設計の検討

本項においては、図-5で示したシステムの内、設計段階における割れ目密度ダイアグラムを用いた異方性評価およびその結果を考慮した支保設計方法について述べる。

a) 割れ目密度ダイアグラムの概要

土木、岩盤構造物基礎岩盤の調査においては、地質構造の解明や岩盤性状の評価を目的として、掘削面および切羽などの地質観察やボアホールカメラ観察などにより、割れ目などの地質学的不連続面の方向性が検討される。

測定された割れ目は、図-6に示すように、シュミットネットなどの球面投影法を用いて整理されるが、この方法は割れ目の卓越傾向を評価する目的で利用されるに留まっており、2.(1)で述べた課題に対してより多くの割れ目と交差する削孔方向を定量的かつ具体的に評価することはできない。これに対して筆者⁵⁶⁾は、この球面投影法を用いて割れ目分布を評価し、定量的に設計、施工に反映できる新しい図的解法を提案した。以下に、この方法を用いたより多くの割れ目と交差する削孔方向の検討内容について詳述する。

土木、岩盤構造物基礎岩盤の調査において割れ目を観察する方法としては、図-7に示すように、掘削面などの平面で割れ目を観察する方法（ウインドーズ法、青線囲み）と、調査線を設定しそれに交差する割れ目を観察する方法（スキャンライン法）とに大別される。この図には等間隔で分布する複数の割れ目系を実線で記載するとともに、調査線と交差する割れ目を太く表示しているが、図-1に示したボーリング孔の削孔方向によって割れ目と交差しやすさが異なることと同様に、図中の調査線の設定方向によってそれぞれの割れ目系のサンプリング頻度が異なることがわかる。

このような偏向を補正するにあたっては、各割れ目を等質に取り扱うのではなく、それぞれの割れ目について抽出される確率を加重した統計計算により推定量を求め、これに実現値を代入することによって、不偏性、有効性を備えた推定値を求めればよい。本論文においては、調査線による割れ目観察方法を例に、このような方向性による偏向を考慮した評価方法について詳述する。ここで、割れ目の調査線単位方向ベクトル $\hat{n}_L$ と割れ目面の法線方向単位ベクトル $\hat{n}_i$ との関係を用いて検討を行うと、この両ベクトルが平行に近いほど程、つまり割れ目と調査線方向が直交に近い程、両者が交差しやすく、両ベクトルが直交する程、割れ目が交差しにくい。このような調査線の方向性による偏向に関する加重値 W_i は、両単位ベクトルの内積を用いて以下の式で表される。

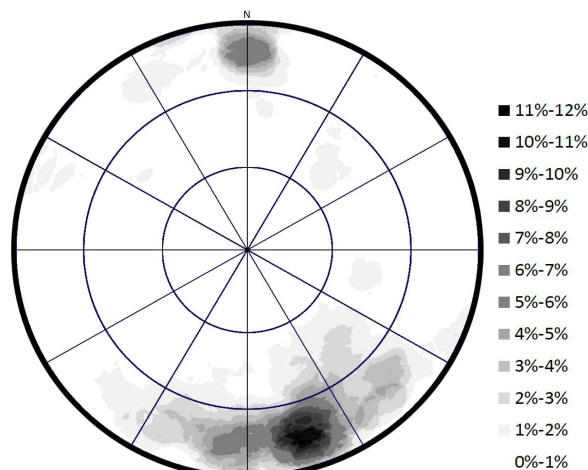


図-6 シュミットネットによる割れ目分布性状図の一例

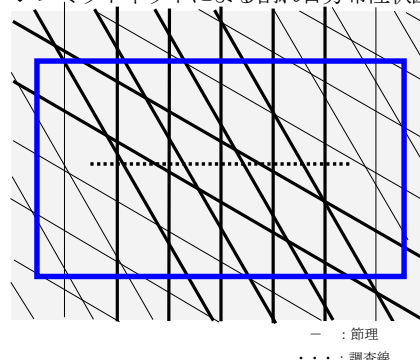


図-7 割れ目調査手法模式図

$$W_i = \operatorname{cosec} \left\{ \frac{\pi}{2} - \cos^{-1}(\hat{n}_i \cdot \hat{n}_L) \right\} \quad (1)$$

$$= \frac{1}{|\hat{n}_i \cdot \hat{n}_L|}$$

$\hat{n}_L$: 調査線の単位方向ベクトル

$\hat{n}_i$: i 節理面の単位法線ベクトル

$$0 \leq \cos^{-1}(\hat{n}_i \cdot \hat{n}_L) \leq \frac{\pi}{2}$$

ここで、任意の削孔方向 m において交差する割れ目の頻度を算定するには、サンプリングされた個々の割れ目を調査線の設定方向による偏向を式(1)で補正した上で、 m 方向における交差頻度を算定し、その後、すべての割れ目について実施した計算結果を足し合わせる必要がある。具体的には、図-7のような調査線長さ ΣL において観察された個々の割れ目 i について考える。この割れ目 i の法線方向における分布頻度 P_{Ri} は、偏向を考慮しない分布頻度 $1/\Sigma L$ にサンプリング方向による影響を排除する目的で式(1)の加重値を乗じた、式(2)のように表すことができる。

$$\rho_{Ri} = \frac{W_i}{\Sigma L} \quad (2)$$

W_i : 調査偏向を補正する荷重値

ΣL : 調査線の長さの合計

このとき、任意の削孔方向 m における割れ目の見掛けの1次元密度 $P_R(m)$ は、式(3)で表される。

$$\rho_{pi}(m) = \rho_{Ri} |\hat{n}_i \cdot \hat{n}_m| = \frac{W_i |\hat{n}_i \cdot \hat{n}_m|}{\sum L} \quad (3)$$

$\hat{n}_m$: 原点を始点、計測点を終点とする単位ベクトル

したがって、 m 方向における割れ目密度 $P(m)$ は、すべての割れ目に関する1次元密度を合算することにより、式(4)によって与えられる。

$$\rho(m) = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_{pi}(m)}{\sum L} = \frac{\sum_{i=1}^N (W_i |\hat{n}_i \cdot \hat{n}_m|)}{\sum L} = \frac{\sum_{i=1}^N \hat{n}_i \cdot \hat{n}_m}{\sum_{i=1}^N \hat{n}_i \cdot \hat{n}_L} = \frac{\sum L}{\sum L} \quad (4)$$

そして、上述した式で算出した任意の方向における割れ目密度を算出し、その結果を図-8に示すようなシュミットネットに整理したのが割れ目密度ダイアグラムである。この図は、後のb)項で詳述する新第三紀泥岩が分布する地下構造物の検討事例であり、任意の削孔方向において得られた割れ目密度(単位:個/m)がシュミットネット上にコンター図として整理されている。

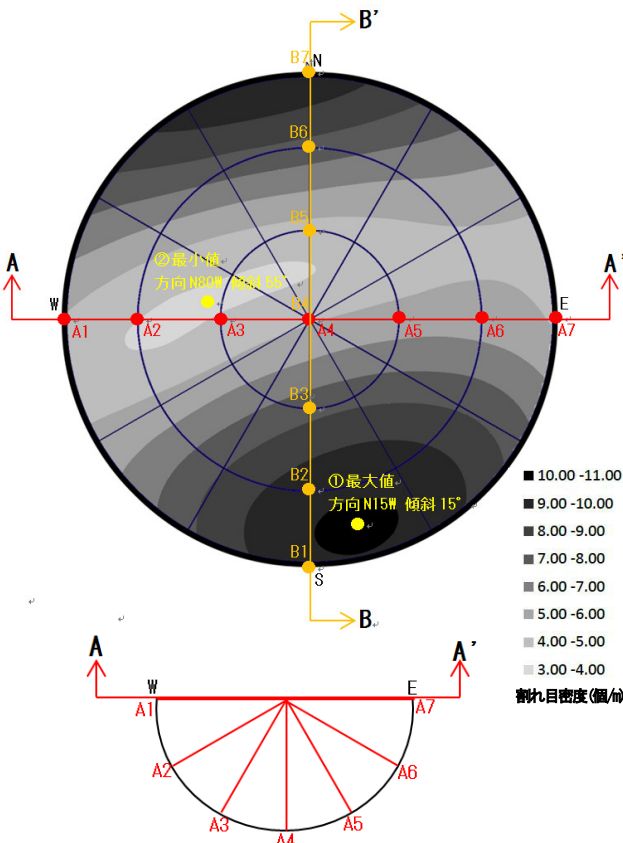


図-8 割れ目密度ダイアグラムの検討例

b) 地下構造物周辺岩盤における最適な支保設計手法の検討

本項においては、上述した割れ目密度ダイアグラムについて、実際の地下構造物周辺岩盤における割れ目データを用いて最適な支保設計評価した事例について詳述する。

検討を実施した地下空洞の地質は、新第三紀の泥岩であり、連続性のよい高角度の割れ目が卓越し、これらの割れ目に沿って透水性が高いことが確認されている。当地点では、立坑掘削直後に壁面で割れ目調査が実施されており⁷⁾、ある高さ20mの掘削区間で得られた193個の割れ目を既往のシュミットネットにより整理した結果が図-6である。これをみると、当地点においては、上述したように、東西走向を有し傾斜角 70° 以上を呈する高角度の割れ目が卓越していることがわかる。

2)において、既往の地下空洞施工に関する課題について述べたように、当地点で卓越する傾斜角 70° 程度以上の高角度で分布する割れ目は、図-2に示すように、同じく高角度で設定される事例の多い立坑におけるプレグラウチング孔や空洞上方設定されるロックボルトと交差しにくいことが懸念される。これに対して最適な削孔方向を検討する際には、図-6で最も卓越する割れ目系である東西走向高角度系の割れ目となるべく交差させる必要があると考えられる。ただし実際には、それと斜交する割れ目系なども比較的多く分布しており、既往のシュミットネットのみから最も多くの割れ目と交差する削孔方向を評価することはできない。

これに対して、前項で詳述した割れ目密度ダイアグラムを用いて、この193個の割れ目に対して任意の方向に削孔した際に交差する割れ目の密度を算出した結果を図-8に示す。この図は、下半球に整理された任意の削孔方向における割れ目交差密度を投影したものであり、下に示す東西方向の断面図を例にとると、円の中心A4が削孔方向鉛直下方の密度を、右端の点A7が東方向に 0° 、その間の点が東方向に 30° (A6)、 60° (A5)の密度をそれぞれ示している。

この図をみると、南北方向に低角度で削孔する場合で交差密度が大きく、東西方向および高角度に削孔する場合で交差密度が小さい傾向が認められる。なお、実際の割れ目密度値については、①最大値：方向N15W、傾斜角 15° ：約1個/mに対して、②最小値：方向N80W、傾斜角 55° ：約0.3個/mと大きな差異があることがわかる。

ここで以下に、本論文の主題であるロックボルトの最適な打設方向について検討を実施する。図-9に示すように、当該地点において南北方向に地下空洞を掘削し、ロックボルトをトンネル軸と直交する東西方向のA-A'断面において等間隔に壁面直交方向へ設定する場合を想定する。図-8において赤色の円で示したのが、ロックボルトごとの割れ目交差密度を示したものであるが、これを見

ると、当地点で卓越する東西走向で高角度を呈する割れ目と東西方向に設定するロックボルトが交差しづらいため、交差密度が低いことが分かる。これに対して、地下空洞を東西方向に掘削し、ロックボルトをトンネル軸と直交する南北方向のB-B'断面において等間隔に壁面直交方向へ設定する場合、まったく逆の結果が得られる。すなわち、図-8の橙色の円で示した鉛直から60°(図中のB3～B5)までは比較的交差密度が低いものの、0～60°まで(図中B1～B3, B5～B7)は密度が大きいことが分かる。

このように、地質状況が同一の地点において空洞を掘削する場合において、割れ目の卓越傾向と空洞設定方向との関係により、空洞支保の重要な役割を担うロックボルトによる抑止効果に差異がでると考えられる。これに対しては、たとえば、図-8の中心に示す鉛直方向のロックボルトを例にとると、図-9に示すA-A'断面図の赤線のように、南方向へ数十°傾斜させることで交差密度が1.5倍程度になるなど、当該ダイアグラムを用いて最適な設定方向を評価することが可能となる。このような評価結果については、次章で述べるロックボルト打設角度を変更した場合の変位解析結果や、実際の施工実施箇所における計測工などによる効果確認結果をもとに、その妥当性を検証していく必要がある。

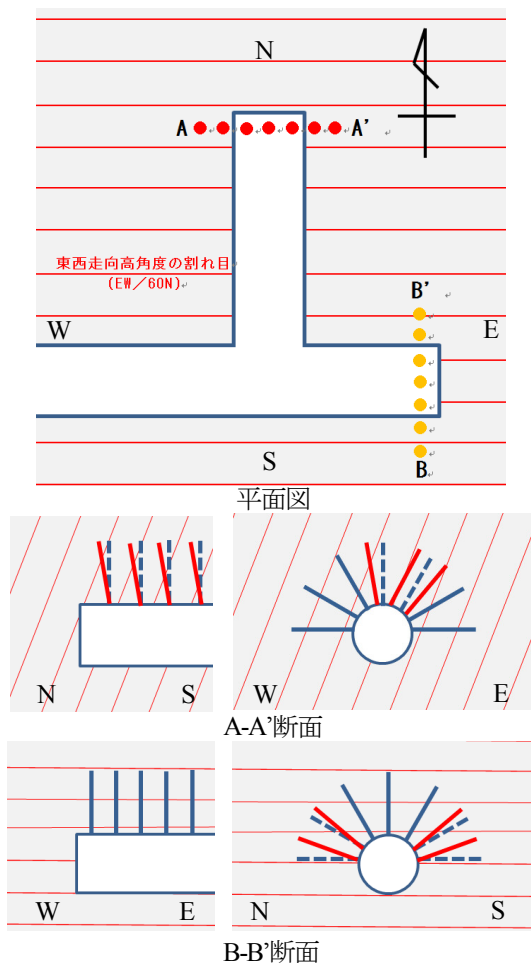


図-9 地下空洞方向ごとのロックボルトと割れ目の関係

4. 安定解析による本システムの妥当性検討

本章においては、上述した本システムによる評価結果の妥当性を検証する目的で、異方性を有する岩盤における空洞掘削について、ロックボルトの打設角度を変化させた場合の空洞安定性の差異について、FEM解析により評価した。以下に具体的な検討内容について詳述する。

(1) 解析モデルの構築

図-10に示すように、堅岩中に水平な弱層が繰り返し出現するような積層構造の地盤を考える。ここで堅岩部の弾性係数 E_1 、弱層部の弾性係数を E_2 とすると、x方向とy方向の等価な弾性係数 E_x 、 E_y は以下のとおりとなる。

$$E_x = E_1(1 - t) + E_2 t \quad (5)$$

$$E_y = \frac{E_1 E_2}{E_2(1 - t) + E_1 t} \quad (6)$$

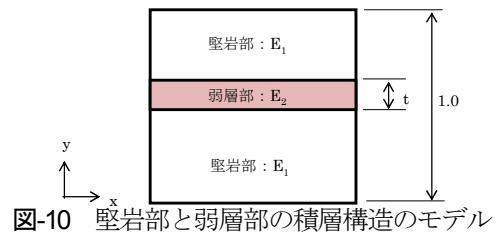


図-10 堅岩部と弱層部の積層構造のモデル

ここで、積層構造を図-11に示すような3次元弾性コンプライアンスへ拡張する。3次元の積層構造では弱層を含む面内は等方性であり、 $E_1 = E_2 = E_p$ 、弱層に直交する方向では $E_3 = E_t$ とすると、応力-ひずみ関係は式(7)～(9)で表される。

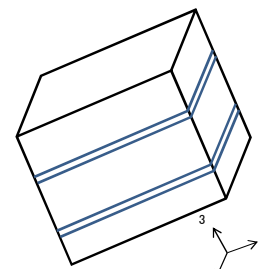


図-11 積層構造の3次元弾性コンプライアンスへの拡張模式図

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_p & -\nu_p/E_p & -\nu_{tp}/E_t & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_p/E_p & 1/E_p & -\nu_{tp}/E_t & 0 & 0 & 0 \\ -\nu_{pt}/E_p & -\nu_{pt}/E_p & 1/E_t & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G_p & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G_t \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$G_p = \frac{E_p}{2(1 + \nu_p)} \quad (8)$$

$$G_t = \frac{E_p E_t}{E_p + E_t + 2E_t \nu_{pt}} \quad (9)$$

ここで表-1~3に示す条件を用いて、図-12に示すように、100m相当の土被りを作用させた際の変位量をFEM解析により算出する。図-13に示すように、弱層部の傾斜角を30°、45°、60°と変化させた場合における、ロックボルト打設角度ごとの空洞沈下量を計算した結果、改良深度の同一なロックボルト打設角30°と150°および60°と120°において、より多くの割れ目と交差する120°と150°のほうがいずれの弱層傾斜角においても、変位を抑制できていることが分かる。そして、打設角が150°から120°と改良深度が深くなるほど変位が小さくなり、既往の打設角90°よりもより多くの割れ目と交差する打設角110°~120°で最も変位量が小さくなっている。これは、打設角110~120°は、90°よりもやや改良深度は浅くなるものの、より多くの割れ目と交差するため、より大きな抑止力が作用するものと考えられる。

ここで、ロックボルト補強効果という指標を定義し、図-13の右側に解析結果を示す。この指標は、ロックボルトなしの沈下量を0%、最も効果的なロックボルト配置時の沈下量を100%とした時の沈下量の比率を示したものである。これを見ると、既往の打設角90°の補強効果が、弱層の傾斜角30°から45°、60°へと急峻になるにしたがって小さくなり、弱層の傾斜角が60°の場合、効果率が85%と比較的大きな差異ができることが明らかになった。これは、弱層が低角度であればある程、上方

表-1 健岩部と弱層部の物性

項目	記号	単位	健岩部	弱層部
弾性係数	E	MPa	1,000	50
ポアソン比	ν		0.3	0.3
単位体積重量	γ	kN/m ³	25	25
弱層厚さ比率	t		—	0.2

表-2 等価な積層構造の物性

項目	記号	単位	弱層平行方向	弱層直交方向
弾性係数	E	MPa	810	208
せん断弾性係数	G	MPa	312	148
ポアソン比	ν		0.3	0.3
弱層傾き	θ	°	—	30, 45, 60

表-3 ロックボルトの諸元

項目	記号	単位	数値
弾性係数	E	MPa	200,000
ポアソン比	ν		0.3
長さ	L	m	5.0
間隔		m	2.0
断面積(D25)	A	cm ²	4.91

上部境界に上載荷重 50m 相当(トンネル中心で 100m)

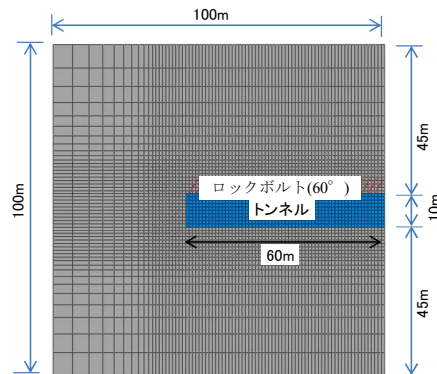
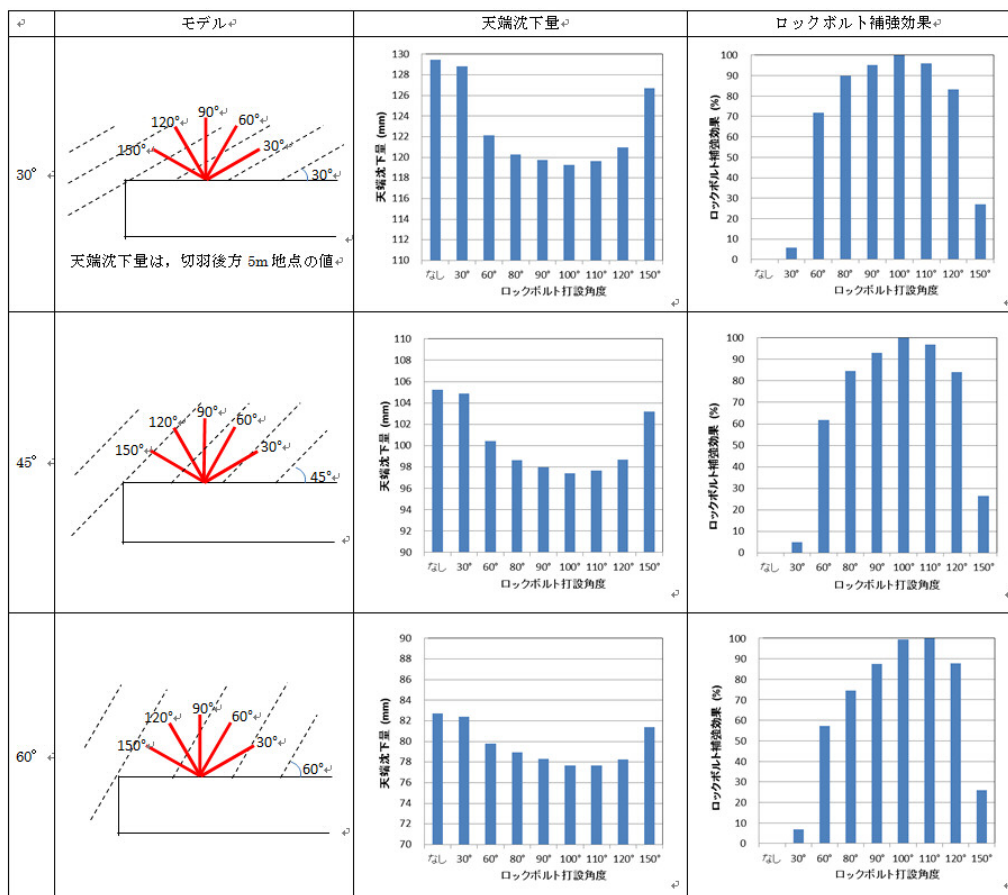


図-12 解析モデル



注) ロックボルト補強効果はロックボルトなしの沈下量を 0%, 最も効果的なロックボルト配置時の沈下量を 100%とした時の沈下量の比率

図-13 ロックボルト打設角度ごとの天端沈下量および補強効果

に設定されるロックボルトと弱層が交差しやすいため、抑止効果が大きくなる、逆に、弱層が高角度であればある程、ロックボルトと弱層が交差しにくく、その分、抑止効果が小さくなるためであると考えられる。

本システムを実施工に適用する際には、事前により詳細な解析を実施することにより、当該箇所の地質状況に応じた最適なロックボルトの打設角度と改良深度を選定するとともに、実際の空洞における変位測定やロックボルト軸力測定などにより、当該評価の妥当性を検証しながら施工を進捗させる必要があると考えられる。

5. 結論および今後の課題、展開

(1) 結論

本論文においては、地下構造物施工時に掘削箇所周辺における地質状況を調査するとともに、その状況に応じた最適な支保設計を実施することにより、より効率的かつ効果的な地下構造物施工を実現するための、調査、設計、施工システムを構築した。これに対して、本システムの妥当性を検証するためのFEMによる安定解析を実施したところ、既往の支保設計の場合と比較して、地山の抑止効果を15%程度、改善できることを確認した。

(2) 今後の課題、展開

今後の展開については、本システムを実施工において適用し、空洞における既往設計との変位抑制効果の差異などを確認することにより、その適用性をより高めてい

く必要があると考えられる。そして、同様の検討を多種の岩盤において実施することにより、地質状況に応じた最適な検討方法を確立していく所存である。

参考文献

- 1) 宇津木慎司, 水戸義忠他: 地質状況を考慮したグラウチング品質管理支援システムの構築, 土木学会論文集 C(地圏工学), Vol.69, No.1, 118-125, 2013.
- 2) 宇津木慎司, 中谷匡志, 澤田純之, 水戸義忠: 地下構造物周辺岩盤におけるグラウチング調査・設計・施工システムの構築, 応用地質学会年次講演会論文集, No.24, 2014.
- 3) 古部浩他: 建設工事と地盤地質, pp.73, 2013.
- 4) 中谷匡志, 山本浩之, 宇津木慎司, 大沼和弘, 鈴木雅行: 掘削発破を用いた切羽評価システムの開発と適用事例, 土木学会トンネル工学報告集, vol.23, pp.209-215, 2013.
- 5) 水戸義忠: 節理分布性状の確率モデルを用いた節理性岩盤の解析に関する基礎研究, 早稲田大学博士論文, 1993.
- 6) Mito, Y., Kito, T. and Kikuchi, K.: Joint Linear Density Diagram for the Description of Jointed Rock Masses, ISRM International Symposium - EUROCK 93 Lisbon, Portugal, June 21 - 24, 1993.
- 7) 稲垣 大介, 常盤 哲也, 村上 裕晃: 幌延深地層研究計画; 平成 23 年度地下施設計測データ集, JAEA-Data/Code 2012-029, 2012.

(2016.8.5 受付)

DEVELOPEMENT OF AN EXPLORATION, DESIGN, AND CONSTRUCTION SYSTEM FOR BEDROCK REINFORCEMENT CONSIDERING GEOLOGY IN THE TUNNEL

Shinji UTSUKI, and Masashi NAKAYA

The primary concern when constructing underground spaces for dumping and storing high-level radioactive waste deeper than 300 m in the earth, is space destabilization due to high ground pressure or sudden water leakage. Therefore, it is necessary to take measures to assure construction safety and maintain the stability of the underground space for as long a time as possible. Furthermore, the reduction of construction costs is very important; this means that more efficient and effective designs and construction methods are required.

For this, the authors developed a grouting quality control system to provide the best water stopping measures, which differ according to the geological features present, and applied it to the construction of a dam and examined the applicability to underground space construction. Although the intersection density between grouting injection holes and cracks is important in designing the water stopping measures in anisotropic bedrock, the stability of bedrock around the underground space is also of concern. In other words, for the construction to be efficient and effective, it is necessary that the rock bolts intersect with quite a lot of cracks in anchoring them so as to maintain the stability of the space in bedrock, assuming that the strength is very low in cracks and high in the main body of bedrock.