

ケーブルボルトによる岩盤の先行補強の メカニズムに関する考察

MECHANISM OF THE EFFECT OF CABLEBOLTS ON PRE-REINFORCEMENT OF ROCK MASS AROUND UNDERGROUND CAVERN

○星野貴史*・柏柳正之**・伊藤文雄***・清水則一****

Takashi HOSHINO, Masayuki KASHIWAYANAGI, Fumio ITOH, Norikazu SHIMIZU

Cable bolting is a support method for the pre-reinforcement of rock masses. It has the potential to strengthen rock masses and make them more ductile, thus decreasing the number of rock anchors which need to be installed after the excavation. Cable bolting may also be able to upgrade the construction efficiency and the stability of underground caverns, such as underground hydropower stations. Nevertheless, cable bolting has not been used much yet in Japan. In this research, field experiments are planned and carried out in order to investigate the applicability of cable bolting to the construction of an underground powerhouse. Numerical simulations are also conducted to better understand the mechanism of the effects of cable bolting from the viewpoint of the path of the rock stress.

Key Words : cable bolt, pre-reinforcement, underground opening, field experiments, numerical analysis

1. 研究の背景と目的

地下発電所や石油地下備蓄施設では、地下岩盤内に大断面の空洞が建設され、岩盤不良部などでは空洞掘削後に発生する岩盤の変状に対して、掘削後に施される支保工や補強工の負担が極めて大きくなる。また、地下発電所のような大規模地下空洞の建設においては、支保工や補強工が全土工費の大きな割合を占めている。そのことから、地下空洞の構造の安定性を確保しつつ経済性を向上させる工法の開発が望まれている。

そこで、本研究では、これらの課題に対し、全面接着型のケーブルボルト工法による先行補強効果¹⁾に注目する。ケーブルボルトによる先行補強は、硬岩主体の海外の鉱山で実績はあるが、わが国においては本格的な適用例はいまだになく、その効果についても十分明らかとなっていない。そこで、ケーブルボルトの先行補強効果の検証を目的として、我が国初めての、地下空洞施工時におけるケーブルボルト工法の現場実験を行った。この現場実験から得られたデータを用いてケーブルボルトの作用効果について考察し、さらに、個別要素法を基本とした解析を行い、ケーブルボルトによる先行補強効果のメカニズムについて検討する。

2. 地下空洞における現場実験²⁾⁻⁴⁾

(1) 実験目的

本実験では、大断面地下空洞にけるケーブルボルトの先行補強効果を検証するために、①ケーブルボルトの先行補強効果の評価、②ケーブルボルトの種類の違いによる先行補強効果の差異、③ケーブルボルト軸力計測方法の検討、の3つを目的とする。

(2) 現場および地下空洞の概要

実験は図-1、図-2および図-3に示す地下空洞において実施した。空洞は、高さ40m、幅20m、奥行き40mのキ

*学生会員 山口大学大学院 理工学研究科

**正会員 修士(工学) 電源開発株式会社エンジニアリング事業部

***正会員 修士(工学) 大成建設株式会社土木設計部

****正会員 博士(工学) 山口大学 工学部 社会建設工学科

ノコ型断面をしており、空洞近傍の地質は電研式岩盤分類においてC_H級で、ほとんど緩みも見られず良好である。

現場実験は、地下空洞掘削に先立って施工された小規模周辺トンネル（以下ケーブル(CB)トンネルという）と地下空洞にはさまれた幅約10mの岩盤を対象に実施した（図-1および図-2参照）。

実験位置の岩盤条件は、比較的亀裂密度が多い領域であり、小規模ながら明瞭な3本の断層が存在し、地下空洞掘削による変位が予想された。

地下空洞の掘削は、アーチ部より開始し、以降1ベンチあたりの高さ2.3m～3.2m、総ベンチ数12のベンチ掘削によって実施された。

(3) ケーブルボルトの配置

a) ケーブルストランドの種類と1孔あたりの本数

海外の鉱山においては、ケーブルストランドを2本1組（ダブルストランドという）で使用するのが一般的である⁹⁾。本研究でもこれにならうこととした。ストランドの種類は標準的なプレーンストランド（7本より線、径15.2mm）を用いる孔に加えて、バルブストランドを用いる孔を設定する。これはストランドの違いによる差異を調べるためである。なお、バルブストランドとは、グラウトの付着特性の向上を図るために、一定間隔にふくらみを持たせたストランドである（図-4参照）。

b) ケーブルボルトの長さや打設間隔

ケーブルボルトの長さは、トンネルと空洞の壁面間距離から10m程度とし、打設間隔は、地下空洞壁面において1.5m間隔とした。打設範囲は、地下空洞壁面において、高さ9m×幅3mとし、この範囲に縦に7本、横に3本、合計21本のケーブルボルトを打設する。ケーブルボルト配置断面を図-2に、地下空洞壁面から見たケーブルボルト配置を図-5に示す（全体における配置は図-3参照）。

(4) 現場計測

計測は、2(1)項に示した本実験の目的毎に、以下のように行った。

①ケーブルボルトの先行補強効果の評価、については、ケーブルボルトの先行補強効果を、ケーブルボルトを打設する断面（D断面）と打設しない断面（K断面）（図-5参照）の岩盤変位を計測することで検討する。計測機器としては、地中変位計をケーブルボルト施工と同時に設置した（図-5において△の位置）。

②ケーブルボルトの種類の違いによる先行補強効果の差異、については、プレーンストランド（図-5において○の位置）とバルブストランド（図-5において●の位置）を用いて、ケーブルボルトの軸力や周辺岩盤の変位挙動について比較し、効果の差異を調査する。

③ケーブルボルト軸力計測方法の検討、については、軸力

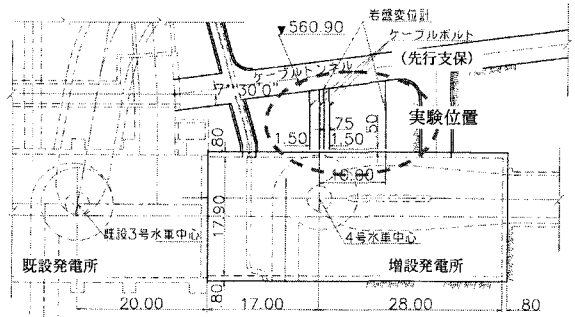


図-1 地下空洞平面図および実験位置

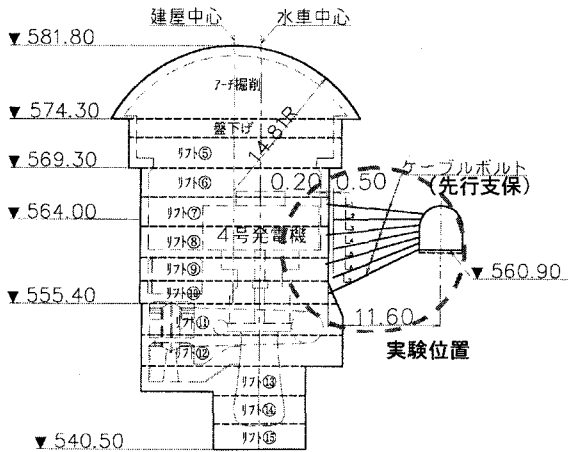


図-2 地下空洞断面図

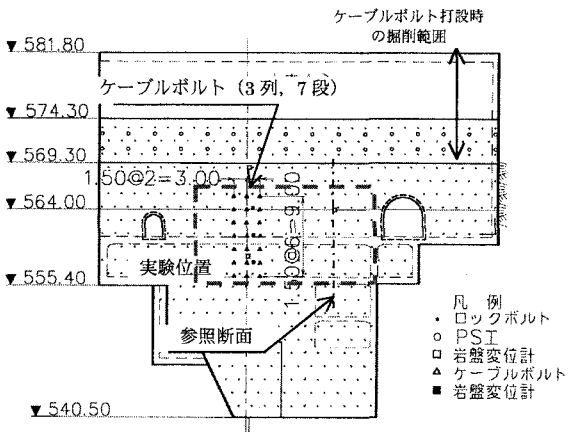


図-3 地下空洞縦断面図と現場実験位置

	ケーブル側面	横断面
シングルプレーンストランド		
バルブストランド		

図-4 プレーンストランドとバルブストランド

計測機器として国内でよく用いられているひずみゲージ型と、海外の鉱山で用いられているTENSMEGに加え、新たにSMARTをカナダより導入し、この3タイプの長短所を調査する。図-5においてS、T、Kが付されている位置がSMART、TENSMEGおよび、ひずみゲージタイプの軸力計の設置位置である。

3. 計測結果

ここでは、2(1)項に示した本実験の目的の①ケーブルボルトの先行補強効果の評価、について触れる。

(1) 岩盤変位

空洞ベンチ掘削に伴う岩盤挙動をケーブルボルト打設断面(D断面)およびケーブルボルトを打設しない断面(K断面)の岩盤変位計に着目し、図-6にLift8盤下げ時から掘削終了時までの岩盤変位を示す(掘削Liftについては図-2参照)。なお、図-6中の α 、 β 、 γ はD断面においてボアホールテレビにより確認された顕著な不連続面の位置を表している。

これより以下のことが指摘できる。ケーブルボルトは、空洞壁面ではLift7～Lift10間に施工したが、岩盤変位の発生・進行は、Lift8掘削後から始まり、Lift12掘削後までの間において顕著である。これらをケーブルボルト打設断面(D断面)と非打設断面(K断面)で比較すると、Lift9に到達するまでは、両者の岩盤変位に顕著な差は認められない。さらに掘削が進行(Lift10～Lift12)すると、D断面では壁面から1.4～2.4m、5.4～7.4mおよび3.9～5.4m深度で顕著な岩盤変位増加が認められ、特に1.4～2.4m、5.4～7.4mではK断面より大きな増加を示す。K断面では4～5.5m深度で比較的大きな変位増加を示すが、全体として平均的な変形状況を示す。この結果、空洞壁面での最終変位は、D断面のほうがK断面に比べて大きくなる。

両者の岩盤変位の違いは、D断面に存在する顕著な不連続面 α 、 β 、 γ に起因するものと考えられる。すなわちD断面における顕著な変位増加位置は、不連続面位置と対応しており、不連続面の局所的な開口・せん断変形が支配的であると考えられる。一方、K断面では、ボアホールテレビにより顕著な不連続面は存在していないことが確認されているため、ここでの岩盤変位は計測範囲での岩盤変形や分布する小規模な亀裂の開口・せん断変形が支配的と考えられる。

また、空洞壁面側の最終変位量については、両断面の岩盤状況の違いが大きく影響したものと考えられる。ケーブルボルト打設断面では非打設断面に比べ、岩盤状態が悪い上、K断面にはロックボルトが(RB)が掘削後に打設されているにもかかわらず最終変位の差は大きくないことから、先行補強の効果はあったものと考えられる。

ケーブルボルト打設断面

参照断面

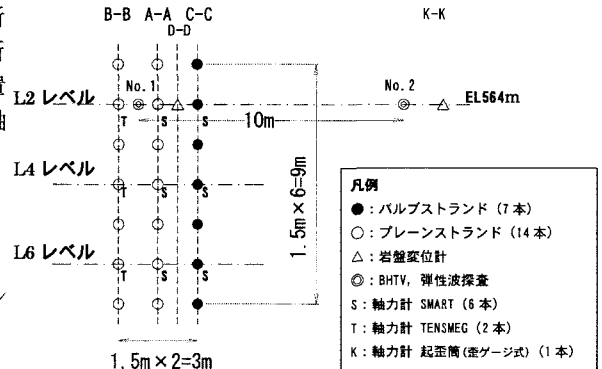
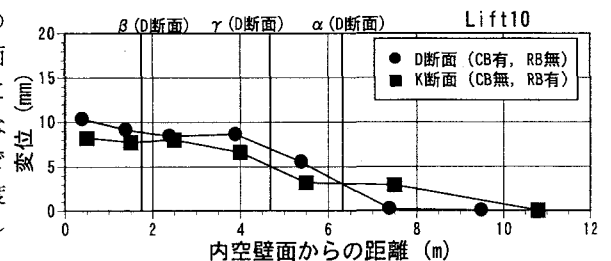


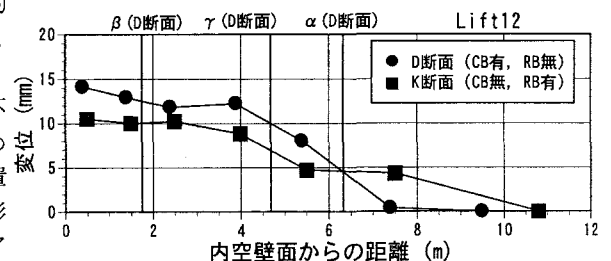
図-5 ケーブルボルト配置図



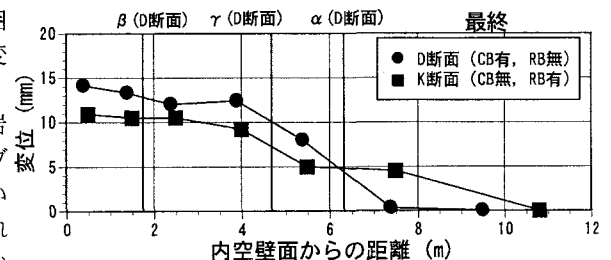
(a) Lift8 盤下げ時



(b) Lift10 盤下げ時



(c) Lift12 盤下げ時



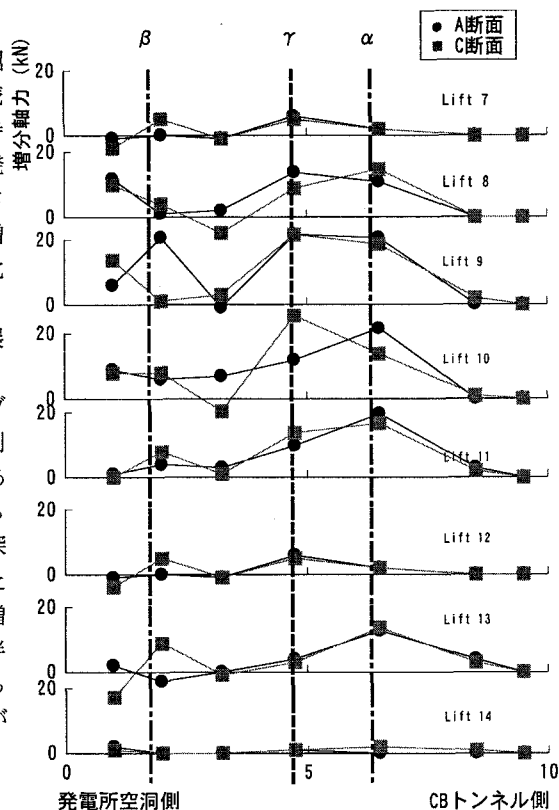
(d) 掘削終了時

図-6 岩盤変位の変化

(2) 空洞掘削に伴うケーブルボルト軸力の変化

空洞掘削に伴うケーブルボルト軸力の増加に着目して、掘削リフト毎の軸力変化を図-7に示す。図-7より、①不連続面 α 、 β 、 γ 位置と軸力増大位置の相関は高く、このうち特に α と γ 位置で顕著であること、②ケーブルボルト軸力の発生はケーブルボルト設置上限標高付近の掘削から始まり、さらに以降の4段ベンチの掘削に合わせて、特に大きな軸力増分が発生すること、③これらは図-6に示す岩盤変位の変化傾向と一致すること、④ケーブルボルト軸力の発生位置は、ベンチ掘削の進行に伴って、空洞側から見た岩盤深部に進展することが考えられる。

これらは空洞掘削に伴う岩盤挙動とそれに抵抗するケーブルボルト挙動を示すものと考えられる。すなわち、空洞掘削に伴う岩盤挙動は、亀裂の開口やせん断挙動が支配的であり、特に連続性のある不連続面で顕著である。また、これらは空洞ベンチ掘削による岩盤応力開放の進展に伴って岩盤深部に進展してゆくものと考えられる。先行して設置されたケーブルボルトは、このような開口変位に抵抗して軸力を増加させ、変形抑制と不連続面上に作用する直応力の減少に伴う岩盤強度低下の抑制に寄与するものと考えられる。さらにこれらの結果として空洞周辺岩盤の安定に寄与することが可能であると考えられる。



4. 数値解析に基づくケーブルボルトの作用効果とそのメカニズムの考察⁷⁾

図-7 リフト掘削に伴うケーブルボルト軸力変化 (SMART, A, C断面, L2レベル)

前章では岩盤地下空洞における岩盤変位とケーブルボルト軸力の計測結果をケーブルボルト打設断面と打設しない断面で比較し考察した。ここでは、数値解析によって、さらに詳しくケーブルボルトの作用効果とそのメカニズムについて考察する。

まず、現場実験を行った地下空洞をUDEC (ITASCA社)⁸⁾を用いてモデル化し、現場実験と同じ変位が再現される不連続面の力学パラメータを推定する。そして、そのパラメータを入力値として、ケーブルボルトが打設されない場合の岩盤の挙動を数値解析によって求め、ケーブルボルトを打設した場合と比較して、その効果について調べる。なお解析では、岩盤初期応力は、土被り圧が静水圧的 (4.5MPa, 単位体積重量 28kN/m³, 土被り約 160m) に作用するものと仮定した。

(1) 岩盤変位

空洞掘削解析では、現場で実際に行われた掘削手順に基づいて、盤下げLiftを考慮した逐次掘削を行った。解析モデルを図-8に示す。空洞の大きさは、高さ40m×幅20mとした。図に示す不連続面は、不連続面 α 、 β 、 γ を表す。検討の結果、現場測定結果と最も良い整合を示す解析パラメータを表-1に示す。なお、表-1a)の岩盤物性は原位置試験結果を、表-1b)のケーブルボルトに係わる物性は既存の引抜試験値を参照して設定した。

図-9にケーブルボルト打設区間に設置した岩盤変位計 (D断面, L-2レベル)の岩盤変位 (図中▲) および解析によって再現した変位 (図中■) を示す。解析値と計測値は、よい一致を示している。また、同図には、ケーブルボルトを打設しないケースの解析結果 (図中●) を併わせて示している。これよりケーブルボルトを打設した場合と打設していない場合とでは、内空壁面から約2.5mの範囲で変位に大きな差が出ており、これは不連続面 β による影響であると考えられる。

このような岩盤変位の差は、ケーブルボルトによる不連続面の変形抑制効果に起因するものと考えられる。一方、このような変位抑制は、上記で示した位置よりさらに深部の岩盤内では明瞭ではない。これについては次節で考察する。

(2) 応力経路とケーブルボルト軸力

不連続面とケーブルボルトの交点の地下空洞壁面側をa点、深部の点をb点として（図-8参照）、不連続面上の垂直応力およびせん断応力を求め、ケーブルボルトを打設した場合と打設していない場合の比較を行った。

図-10に、掘削進行に伴う不連続面a点およびb点における応力経路を示す。空洞壁面に近いa点では、ケーブルボルトを打設した場合は、垂直応力、せん断応力共に一旦増加するものの、次第に破壊基準に達し、低下して行く。しかしながら、ケーブルボルトを打設しない場合に比べ垂直応力およびせん断応力の低下が抑制されている。一方、岩盤深部のb点においては、両者の差は、それほど認められない。

上記の岩盤応力変化は以下のように考えることができる。空洞壁面に近いa点では、掘削の進行に伴う周辺岩盤挙動に伴って、まず不連続面上に作用する垂直応力が急激に低下して破壊規準に到達する。そして、このような不連続面上の垂直応力低下が、せん断抵抗力の低下も招いている。しかし、ケーブルボルトの打設により、不連続面上の垂直応力とせん断応力の低下と破壊規準への到達はあるものの、その過程でケーブルボルト軸力が発生すると考えられる。その結果、垂直応力の低減は抑制され、また、せん断抵抗力の低下が抑制される。すなわち、ケーブルボルトを先行的に施工した場合には、空洞掘削の進展に伴って、ケーブルボルト軸力が増大し、不連続面上の垂直応力、せん断応力の抑制が対応して発生するものと考えられる。

一方、岩盤深部のb点においてもa点同様に、空洞掘削の進行に伴う破壊基準への到達、不連続面上の応力低下が発生する。このときケーブルボルトを打設することによって、軸力が発生し、程度は小さいものの垂直応力の増大効果が認められるが、a点で見られるような応力の低下抑制効果は、ほとんど認められない。このことは、このような岩盤深部においてもケーブルボルトの効果はあるものの、岩盤深部においては応力状態が空洞壁面に比べて高いことから、そのような効果は明瞭には現れにくいものと考えられる。

これらのことから、空洞壁面から2m程度のa点においては、比較的小さいケーブルボルト軸力によって不連続面の応力低下に伴う強度低下の抑制が期待でき、これがケーブルボルトの典型的な作用効果のひとつであると考えられる。一方、壁面から6m程度のb点では、ケーブルボルト軸力が不連続面上応力に与える影響は小さく、ケーブルボルトの効果は十分に発揮されづらい状況である。

両者の違いは、岩盤応力の大小に対応するものであり、また一定量のケーブルボルトが支保しうる岩塊のスケールに対応したものであると考えられる。すなわち、空洞周辺部などの限定された範囲のような比較的小規模なスケールの岩盤挙動に対しては、ケーブルボルトは有効に作用する。一方で空洞掘削の進行に伴って、周辺岩盤の変形がより岩盤深部まで及ぶようになると、もはやケーブルボルトはそのような挙動を十分に抑止することが難しくなる。

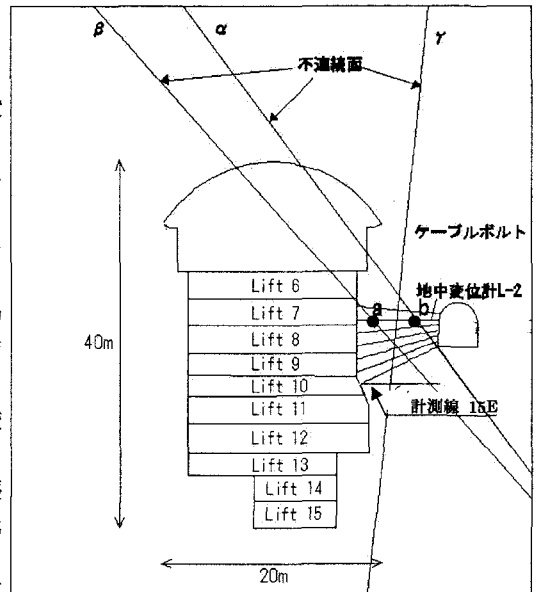


図-8 解析モデル図

表-1 解析物性値一覧

(a) 岩盤基質部

ヤング率	MPa	11900
ポアソン比		0.25
体積弾性係数	MPa	7940
せん断弾性係数	MPa	4760
密度	kg/m ³	2800

(b) ケーブルボルト

ケーブル弾性係数	MPa	2.E+05
ケーブル密度	kg/m ³	7800
グラウト付着剛性	MN/m/m	100
グラウト付着強度	MN/m	0.4

(c) 不連続面

不連続面		α	β	γ
鉛直剛性	MPa/m	1.E+06	1.E+05	1.E+04
せん断剛性	MPa/m	1.E+06	1.E+05	1.E+04
粘着力	MPa	0	0	0
内部摩擦角	°	35	35	35

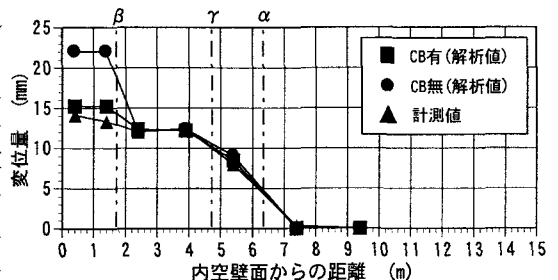


図-9 岩盤変位の比較（地中変位計，D断面）

このような考察から、本研究で対象としているような硬岩中に設置される空洞においては、ケーブルボルトは空洞周辺部においては、変位抑制あるいは岩盤補強に有効に作用し、岩盤深部ではその定着部として機能するものと考えられる。このような効果は、壁面近傍の亀裂開口と応力再配分がさらに奥の岩盤変位を発生させるといった進行的な破壊を抑止し得るものと考えられる。

また、空洞設計の観点からは、空洞掘削に先立つ事前補強によりこのような岩盤の変位抑制と岩盤補強効果を量的に見込めれば、掘削後に施工するPSアンカーなどの後施工支保の軽減が期待できる。

5. まとめ

本研究では、ケーブルボルトによる先行補強効果とそのメカニズムを解明するため、現場実験と数値シミュレーションによる評価を行った。その結果を以下に示す。

- (1) 現場実験に当たっては、地質調査結果と経験的な手法からケーブルボルトの配置を決め、岩盤変位やケーブルボルト軸力に対する綿密な計測計画を立案した。
- (2) 硬岩中に設置される空洞の掘削に伴う岩盤変位は、主に亀裂位置で生じたが、これらはケーブルボルトを用いた先行補強により抑制されることが、実証された。
- (3) ケーブルボルトの作用メカニズムを解明するため、数値シミュレーションを実施した。その結果、ケーブルボルトによる先行補強の効果のメカニズムは、1)不連続面のすべりや開口によってケーブルボルトに軸力が発生し、2)その反力によって不連続面の垂直応力が増加し、それが、3)せん断抵抗力の増加に結びつき補強効果が発揮する、ことが示された。その効果は、空洞壁面付近で顕著に現れ、そのことが岩盤のゆるみを抑制し、地下空洞掘削時の岩盤の安定性の向上につながったものと考えられる。

以上のことから、ケーブルボルトによって、空洞周辺部における岩盤劣化の進行が抑制され、このため後に施工されるPS工などの支保の軽減や工期短縮・工事の安全に寄与するものと考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、当時、山口大学大学院理工学研究科学生であった、深光良介氏、および岩崎進一郎氏に謝意を表する。

参考文献

- 1) 清水則一：ケーブルボルト工法による地下空洞岩盤の先行補強，電力土木，No.275，pp.1-7，1998。
- 2) 清水則一，柏柳正之，鳥羽瀬孝臣，伊藤文雄：ケーブルボルトによる地下空洞の先行補強に関する現場実験について，第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.206-210，2001。
- 3) 岩崎進一郎，深光良介，星野貴史，清水則一，柏柳正之，鳥羽瀬孝臣，伊藤文雄：ケーブルボルトによる地下空洞岩盤の先行補強に関する現場実験～数値解析による評価～，土木学会第57回年次学術講演概要集，III-253，pp.505-506，2002.9。
- 4) 深光良介，岩崎進一郎，清水則一，柏柳正之，鳥羽瀬孝臣，伊藤文雄：地下空洞のケーブルボルトによる先行補強に関する現場実験，土木学会第56回年次学術講演回講演概要集，pp.88-89，2001。
- 5) Hutchinson,D.J., Diederichs,M.S.: Cablebolting in Underground Mines, BiTech Publishers, 1996。
- 6) 杉山一，井筒庸雄：全周撮影型ボアホールテレビカメラの開発と現場への適用例，電力土木，No.247，pp.30-36，1993。
- 7) M. Kashiwayanagi, F. Ito and N. Shimizu: Field Experiments on Preset Cable Bolts for the Stabilization of Underground Caverns, Proc. the 3rd International Symposium on Rock Stress, RS Kumamoto2003, pp.543-549, 2003.11。
- 8) ITASCA Consulting Group, UDEC, Version3.0, Users Manual

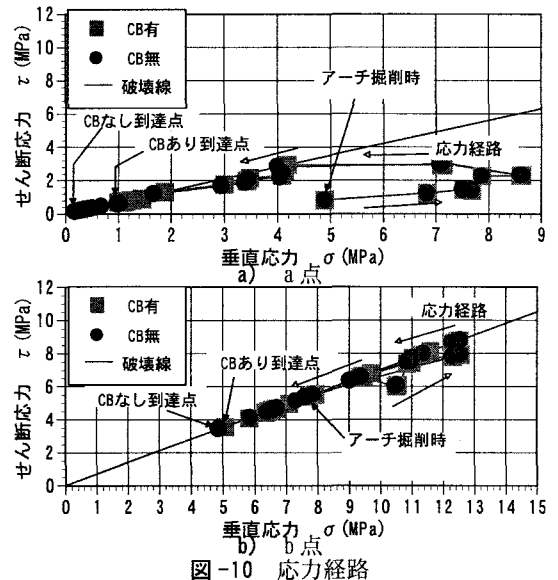


図-10 応力経路