

計測に基づく既設地下発電所 挙動評価のケーススタディ

柏柳 正之^{1*}・吉元 義隆²・石川 昌義³・清水 則一⁴

¹電源開発株式会社水力エンジニアリング部土木技術室（〒104-8165 東京都中央区銀座六丁目15-1）

²株式会社開発設計コンサルタント（〒164-0013 東京都中野区弥生町一丁目58-4）

³山口大学大学院博士前期課程（研究当時，現 中電技術コンサルタント（株））

⁴山口大学大学院（〒755-8611 山口県宇部市常盤台二丁目16-1）

*E-mail: masayuki_kashiwayanagi@jpower.co.jp

運用中の既設地下発電所において、建設中から現在まで長期にわたって、周辺岩盤や内空変位の挙動計測が実施され、一部で岩盤変位、支保工軸力および内空変位の増大が認められた。このため計測システムの検証および計測された岩盤挙動を再現する逐次掘削解析による周辺岩盤のモデル化検討を行った。この結果、空洞周辺岩盤の一部に低い物性値の領域が生じたものと仮定することにより、計測結果が良好に再現されること、検討内容を総合的に勘案すれば現時点での空洞安定性は確保されていることが評価された。

Key Words : *underground powerhouse, cavern, monitoring, stability assessment*

1. はじめに

地下発電所空洞の安定性は、掘削中および完成直後において実施される、空洞周辺の岩盤変位や支保工の軸力、また空洞内空変位などの計測により評価される。空洞完成時において安定性が確保される場合では、一般にはその後の運用において空洞安定性を低下させるような新たな荷重は発生しないので、安定性に関わる懸念は小さいものと考えられている。このため、空洞完成後においては安定性評価に関わる詳細な調査が行われることは少ない。一方、地下発電所の長期運用では、支保工の劣化や地下水変動に伴う周辺岩盤内の応力変化などが考えられることから、長期挙動の監視・評価は重要である。

本稿で対象とする発電所地下空洞では、掘削開始と共に地下空洞挙動の計測が開始され、さらにこれら挙動計測は空洞完成後から10年以上にわたって継続実施されている。地下発電所運用中の計測結果からは、完成後においては安定していた岩盤の一部において変位の増大や空洞内空変位の増大が認められた。これらは空洞建設中の変位量に比べて小さく、直ちに空洞安定性に影響を与えるものとは考えられない。しかしながら、同様な傾向が将来にわたって継続することも考えられることから、発電所地下空洞の長期安定性評価の観点からの検討が必要であると考えられた。

本稿では、運用中の地下発電所長期安定性評価を目的として、計測システムの信頼性評価および計測値に基づく再現解析から空洞周辺岩盤の状況を同定することにより空洞安定性を評価した事例について述べる。再現解析モデルでは周辺岩盤とともに空洞支保効果を考慮することができることから、周辺岩盤特性や支保工の長期的な変動シナリオが設定できるのであれば、空洞の長期挙動の評価が可能となり、さらに解析に基づく管理基準値を合理的に設定することが可能であると考えられる。

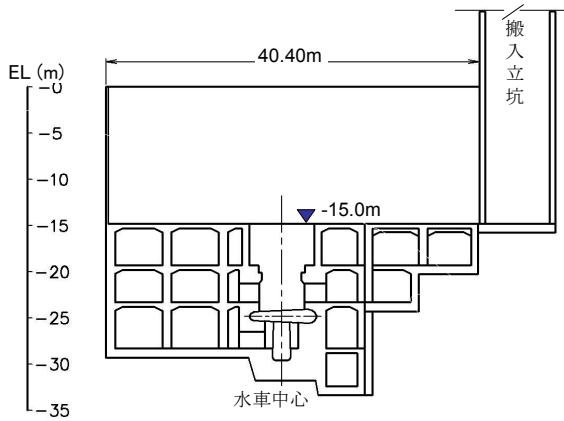
2. 地下発電所空洞の長期挙動

(1) 地下空洞の概要と掘削工事¹⁾

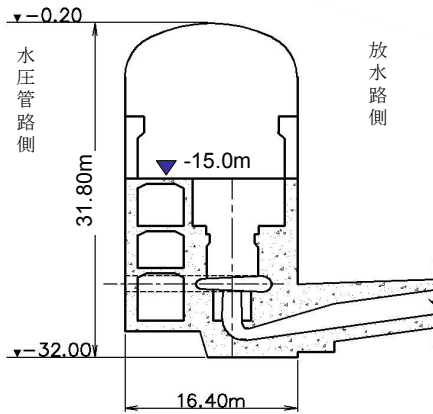
対象とする既設地下発電所は弾頭型空洞形式であり、土被り約150mおよび幅16.4m、高さ31.8m、長さ40.4mの空洞寸法を有する。これを図-1に示す。地下発電所の構造的特徴は、アーチサイズが小さい偏平なアーチ形状であり、組立盤（EL-15m）より上部は基本的には吹付けコンクリートとロックボルトにより支保されていることである。

地下発電所の周辺岩盤は、中硬岩に分類される千枚岩であり、剥離性を有する。また、掘削中の地質記録から、周辺岩盤にはいくつかの主要な不連続面が分布している。

これを図-2に示す。また、地下発電所の北側側壁（水圧管路側）では差目、南側側壁（放水路側）では流れ目の片理が卓越している。



a) 縦断面



b) 横断面

図-1 検討対象とする既設地下発電所空洞

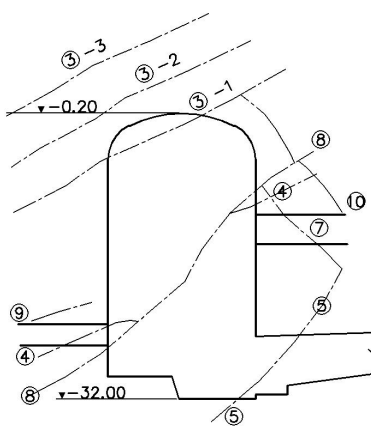


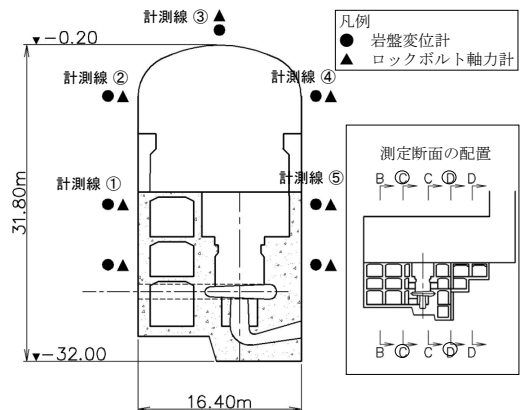
図-2 空洞周辺の主要不連続面の分布状況

地下発電所の施工は、頂設導坑、アーチ切上げ、ベンチ掘削の順に行った。頂設導坑、アーチ部は、高さ5.3m（標高-0.2m～-5.5m）であり、ベンチ掘削は標高-5.5m～-32mを11段ベンチとして施工した。支保工は、吹付けコ

ンクリート（厚さ0.2m～0.3m）およびロックボルト（長さ5m）とした。

施工管理として、岩盤変位、ロックボルト軸力、天端沈下および内空変位計測を実施した。埋設計器の配置を図-3に示す。このうちB-B断面、C-C断面およびD-D断面の天端部に埋設した岩盤変位計は、地下発電所掘削開始前に隣接する搬入立坑から事前に設置したものであり、以降の空洞掘削による先行変位を含む岩盤変位が測定可能となっている。

頂設導坑掘削開始後間もなく、事前のボーリング調査では確認されていなかった断層・破碎帯に遭遇し、アーチ切上げ以降、天端沈下や内空変位の増大、ロックボルト軸力が降伏荷重を越える箇所が散見されるようになる。特に、不連続面③（図-2参照）が横断するアーチ部中央付近の変形が顕著であり、一部で吹付けコンクリートにクラックが発生した。このため、ベンチ掘削を組立盤標高の-15m（図-1参照）でいったん休止して、変状調査を行い、これに基づき追加支保工として長尺ロックボルト（長さ8mおよび12m）およびPSアンカー（長さ11m, 15m, 20m, PC鋼より線2本組, 初期導入力200 kN）を施工した。その後、ベンチ掘削は順調に進み、1992年5月に掘削を開始した建設工事は、1993年9月に全掘削が完了した。



注：B-B, C-C, D-D 断面の天端部岩盤変位計は、搬入立坑（図-1参照）より設置、計測線①～⑤は以降の検討にて参照

図-3 発電所空洞の計測

(2) 空洞の長期挙動

発電所完成後の運用中は、施工に行った埋設計器による計測を継続するとともに、空洞内空変位計測として、発電所組立て盤（EL-15m）より上部の5測線、各2～4標高について測量による内空変位計測を行った（年1回実施）。埋設計器のうちロックボルト軸力は、運用中の時間経過に伴い、ほとんどの計測値が異常に大きな変動を示し、引張強さを超える軸力を示すなど、計測の信頼性が低下したものと考えられた。これについては、以降に述べる解析検討において考察する。以下、主に岩盤変位

および空洞内空変位について検討する。

岩盤変位の一例として、発電所中央断面（C-C断面）における天端部（図-3で計測線③）の岩盤変位挙動を図-4に示す。これより、天端岩盤変位は掘削完了時（1993年9月）から1年間程度で収束安定状態を示し、これ以降減少・増大するなど複雑な挙動を示すが、概ね安定した値を示している。一方、発電所完成後から計測を開始（1997年）した内空変位（図-5 a）参照）は、いずれの測線および標高においても継続して断面縮小の傾向を示す。現時点（2007年2月）における内空変位の縦断方向分布を図-5 b）に示す。このような傾向は、発電所縦断方向に設けた岩盤変位および内空変位の各5測線において同様である。

発電所運用中に内空変位が増大する要因としては、空洞周辺岩盤中の地下水変動、周辺岩盤のクリープ挙動、また周辺岩盤の劣化による応力再配分などが考えられ、いずれも空洞安定性に直接関連する。本稿では、空洞安定性検証を目的として、①埋設計器の信頼性評価、および②計測結果の再現解析に基づく周辺岩盤物性の評価を行う。

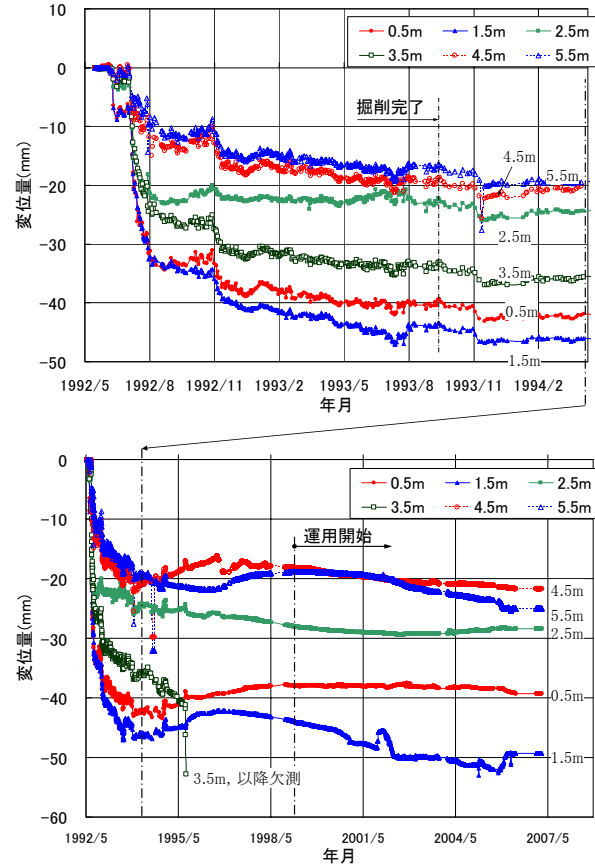


図-4 岩盤変位の経時変化（C-C断面，天端，計測線③）

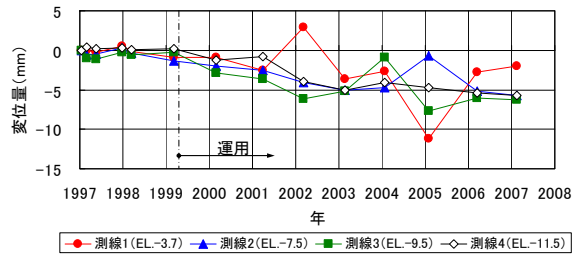
3. 埋設計器の点検，変状調査

埋設計器は、空洞掘削直前（1992年）より設置を開始し、

空洞完成（1993年）以降、現在まで継続して計測を行っている。計測システムの概念図を図-6に示す。

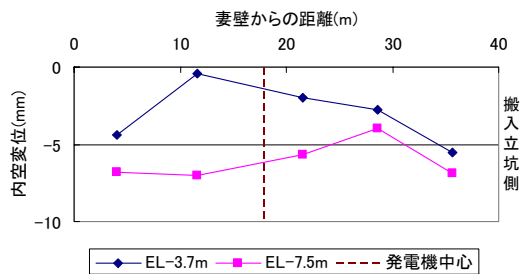
埋設計器は、設置後15年以上を経過しており、計器そのものの劣化が懸念される。しかしながら直接的に計器の信頼性を評価する方法がないことから、以下のような検討を行った。

まず、地下空洞そのものの状態を評価するために、空洞変状調査を実施する。図-5に示すような内空変位が空洞に発生しているのであれば、空洞壁面にも何らかの兆候が発生しているものと考えられる。このため変状調査は、空洞壁面に施工されている吹付けコンクリートのクラックの発生・分布状況、ロックボルト定着部の変状および過大な湧水の発生等について、目視により行う。また、計測システムの信頼性評価として、表-1に示す検討を行う。



注：負値は内空の縮小を示す。

a) 内空変位の経時変化（図-3 C-C断面近傍，発電所中央部）



b) 内空変位の発電所軸方向分布（2007年2月）

図-5 既設地下発電所の内空変位

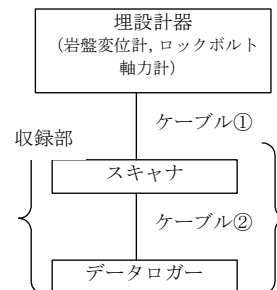


図6 埋設計器による計測システム

これら調査結果をまとめれば以下のとおりである。

① 埋設計器の一部では、データにばらつきが大きく安定しないもの、ケーブル絶縁抵抗値が小さいものがある。

これらは測定値としての信頼性が低いと判断される。このような信頼性の低い測定値を除いても、なお岩盤変位の長期的な変動は認められる。

② スキャナやデータロガーのデータ収録部は、正常に稼動している。

③ 空洞壁面には、特に変状は見当たらず、空洞の不安定化につながるような兆候は見当たらない。

変状調査に基づけば空洞安定性への基本的な懸念はないものと考えられるが、一方で、内空変位の増大や長期的な岩盤変位の変動などが計測されていることから、さらに詳細な検討を行うため、次章において解析的手法による検討を行う。

表-1 埋設計器計測システムの信頼性評価の方法

構成要素	評価方法
埋設計器 (岩盤変位計, ロックボルト軸力計)	測定値の安定性をケーブル①の端部にて測定
ケーブル① (計器～スキャナ)	絶縁抵抗の測定
スキャナ	較正信号入力による測定 測定値の安定性
ケーブル② (スキャナ～データロガー)	スキャナ, データロガーにおける測定値の比較
データロガー	

4. 空洞挙動の再現解析

ここでは岩盤変位計測値に基づく再現解析による周辺岩盤物性の同定を行う。再現解析は、掘削完了時 (1993年) および現状 (2007年) を対象として行い、同定される空洞周辺岩盤の状態を比較することにより、空洞安定性を評価する。

(1) 再現解析に用いるモデル

再現解析は、図-7に示す解析モデルを対象として実施する。解析モデルは、地下発電所空洞とその周辺岩盤で構成し、個別要素法 (UDECO[®], Itasca社) を適用することとして要素分割を行う。また、空洞天端までの土被りは150mであり、初期応力の鉛直成分は土被り深さと単位体積重量の積で求め、水平成分は側圧係数0.5として算定する。解析領域は、空洞諸元の5倍程度として、幅80m、高さ96.5mとする。また、不連続面として、厚みがやや大きい破碎帯と一般の不連続面の2種類を考慮し、前者は岩盤一般部より低い物性値の要素としてモデル化し、後者は要素間の不連続面としてモデル化する。支保工としては実際に施工されたロックボルトを考慮し、吹付けコンクリートはこれまでの同様な解析事例にならって地山の岩盤強さに含まれているものと仮定する。解析モデルの詳細を図-8に示す。

解析では、まず岩盤や不連続面の力学特性をパラメー

タとして仮定し、施工手順に沿った逐次掘削解析 (線形解析) を行い、空洞周辺の岩盤変位と計測値を比較し、両者の整合性が最も良好な岩盤や不連続面の力学特性を評価する。また、検討は空洞掘削施工時およびその後の運用中に比較的大きな岩盤変位や内空変位が生じたB-B断面 (図-3参照) を対象として実施する。

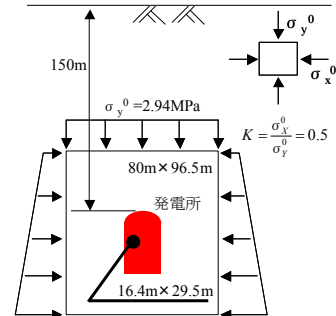
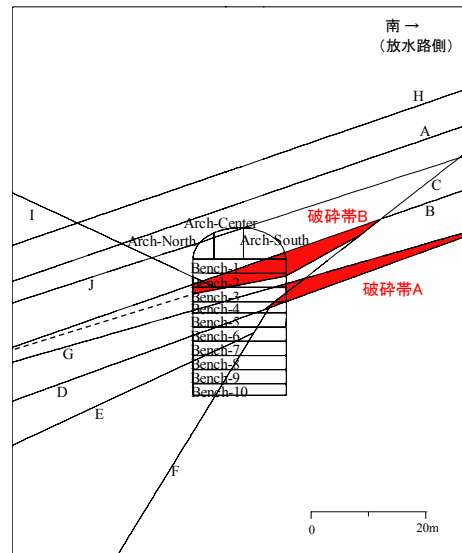


図-7 解析モデルの概要



注: B~Jは不連続面を示す

図-8 解析モデル、不連続面の分布 (B-B断面の例)

(2) 再現解析の結果

空洞完成時の解析結果として、岩盤変位およびロックボルト軸力の分布を図-9に、また計測値と解析値の整合が最も良いと判断された物性値を表-2に示す。計測値と解析値を比較すれば、計測線③では、岩盤変位およびロックボルト軸力のほぼ同じ位置で差が認められる。一方、そのような傾向は他の測線においても部分的には生じているものの、全体的な整合性は良い。

次に、現状における再現解析を行う。B-B断面においては空洞高さの中央付近 (EL-16m) での計測値 (計測線⑤) に岩盤変位の増加が観察された。ここで、図-10に示す新たな岩盤物性値の劣化領域を仮定して、計測結果が再現されるような物性値を求める。その結果を表-3に示す。以上の条件にて評価した岩盤挙動と計測値の比較を図-11 a)に示す。完成後10年間に岩盤変位がみとめ

られた計測線①および計測線⑤では、岩盤劣化領域を設定したことにより、一部の測定点を除けば計測値と解析値の整合は良い。また、図-11 b)にロックボルト軸力についての計測値と解析値の比較を示す。これからロックボルト軸力については両者は大きく乖離しており、岩盤変位では整合性が良いこと、前述したロックボルト軸力計測値の挙動などを勘案すれば、計器の信頼性が低下したものと考えられる。また、解析に基づけば、このような岩盤劣化領域が発生したとしても、なおロックボルト軸力は、ごく一部を除いて許容値(表-2参照)以内であり、空洞の不安定化につながるような現象は発生していないものと評価される。

表-2 解析モデルの物性値

a) 岩盤物性

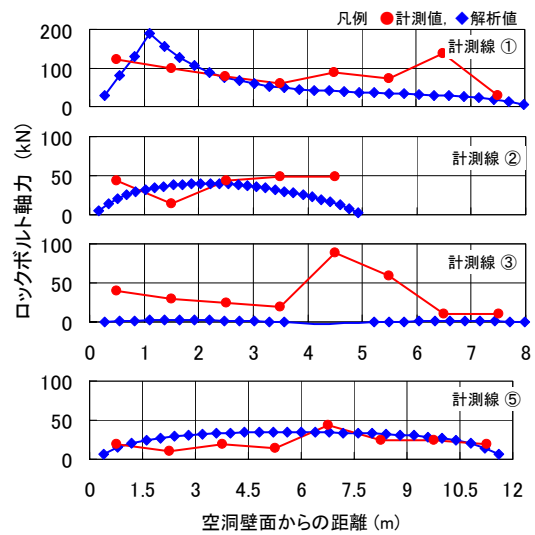
物性	単位	地山	破碎帯
弾性係数	MPa	4000	150
ポアソン比	-	0.25	0.25
密度	kg/m ³	2700	2700
内部摩擦角	度	30	30
粘着力	MPa	1.47	1.47
引張強度	MPa	0	0

b) 不連続面

鉛直剛性	MPa/m	150
せん断剛性	MPa/m	150
内部摩擦角	度	20
内部摩擦角(C, l)	度	15
粘着力	MPa	0.3
引張強度	MPa	0

c) ロックボルト

物性	単位	長さ5m	8m, 12m
鉛直剛性	GPa	200	200
密度	kg/m ³	7850	7850
グラウト付着剛性	MN/m/m	100	100
グラウト付着強度	MN/m/m	1.176	1.176
引張降伏強度	kN	173.46	226.38
圧縮降伏強度	kN	173.46	226.38



b) ロックボルト軸力

図-9 空洞完成時における測定値と解析値 (B-B断面)

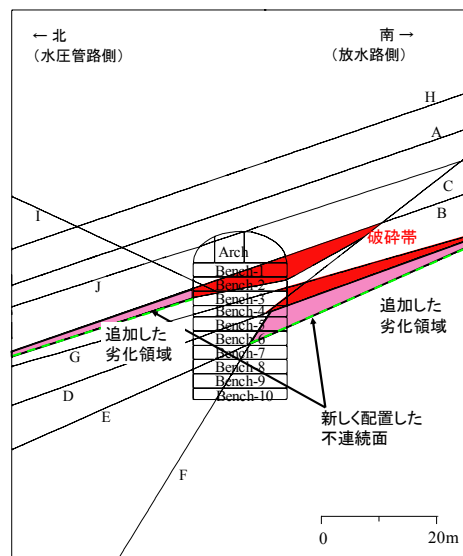
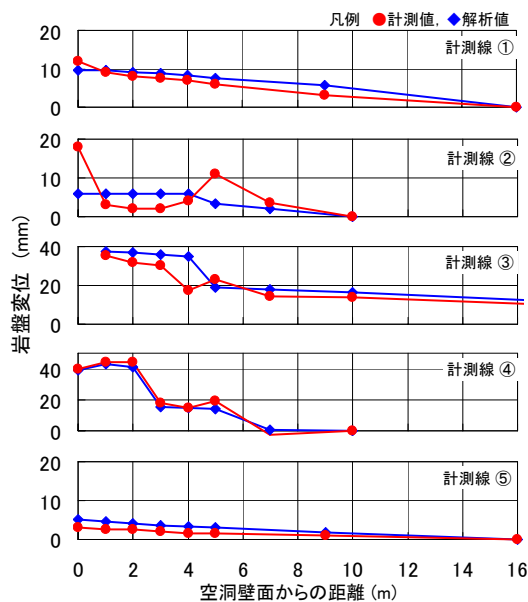


図-10 現状の空洞挙動再現モデル

表-3 劣化領域の岩盤物性

弾性係数	MPa	2000
ポアソン比	-	0.25
密度	kg/m ³	2700
内部摩擦角	度	30
粘着力	MPa	1.47
引張強度	MPa	0



a) 岩盤変位

5. まとめ

発電所の運用中において計測された周辺岩盤変位の変動は、周辺岩盤の一部に弾性係数が小さくなったとする劣化領域を想定することにより、解析的検討からある程度説明することができた。さらに、解析からは、空洞周辺岩盤の一部に劣化領域が発生したとしても、支保工として施工したロックボルトはなお健全な状態を保ってお

り、また空洞壁面近傍では空洞完成後からの変位増大は小さいことが示された。これらより、本解析に基づけば、本発電所においては、空洞安定性は運用中においても低下していないものと結論付けられる。

また、ここで示されたように、計測値の信頼性が確認されるのであれば、長期の計測結果を詳細に再現することにより、空洞周辺岩盤の挙動や物性変化などの推定が可能であり、これに基づき空洞安定性を合理的に評価することが可能であることがわかる。

一方、解析からは内空変位の増大は評価されず、計測値とは整合しない。これについては、空洞変状調査においてもその様な内空変位の兆候がまったく確認されていないことから、今後は内空変位に関わる測量精度の評価・向上を図るとともに、他の方法を用いる検証を予定している。

以下に本稿の結論を列記する。

- (1) 空洞内面の変状調査からは、空洞安定性が低下しているとの兆候は確認されない。
- (2) 岩盤変位の増大は、空洞周辺岩盤にもともと存在する破碎帯の周辺に劣化が生じると仮定することにより、説明できる。また、このような岩盤劣化は、空洞の全体的な安定性低下にはつながらない。
- (3) 各検討結果を総合的に判断すれば、ロックボルト軸力の経時的な増大は、計器劣化等に起因する可能性が高く、計測値の信頼性は低いと考えられる。
- (4) 以上をまとめれば、現状での空洞安定性は確保されているものと評価される。

参考文献

- 1) 佐藤専夫, 福原 明, 小山喜久二: 沖縄海水揚水発電所パイロットプラント建設工事のうち地下発電所の施工について一千枚岩における地下空洞掘削の実績一, 電力土木, No.253, pp.69-76, 1994.
- 2) Itasca Consulting Group, Inc.: *UDEC version 4.0 User's Guide*, 2004.

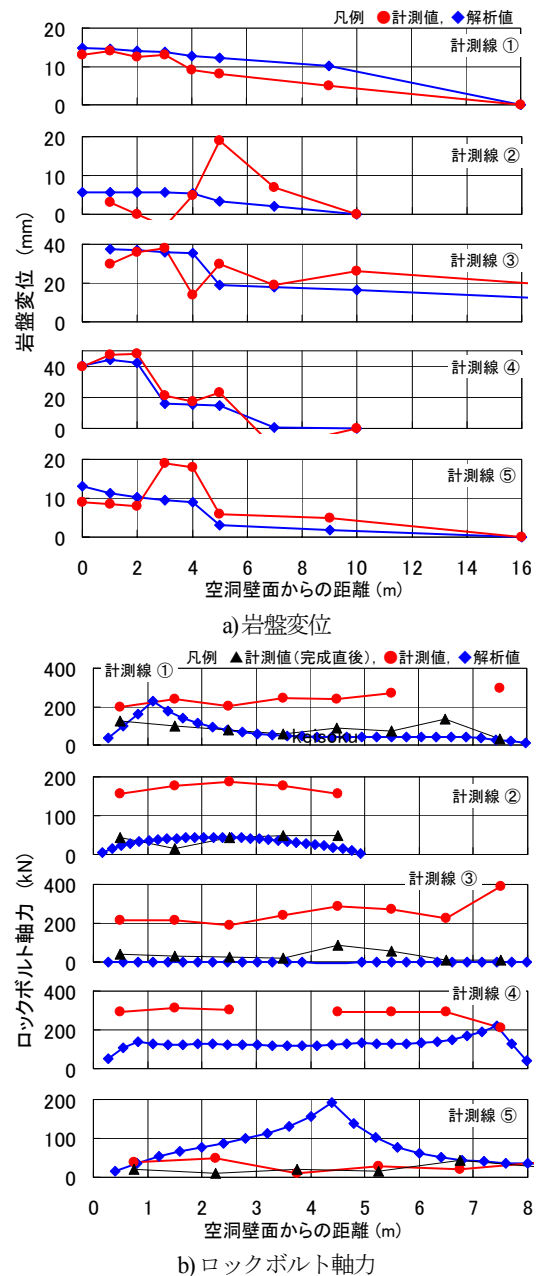


図-11 現状における計測値と解析値の比較 (B-B断面)

CASE STUDY ON STABILITY ASSESSMENT OF UNDERGROUND POWERHOUSE BASED ON LONG-TERM MONITORING

Masayuki KASHIWAYANAGI, Yoshitaka YOSHIMOTO, Masayoshi ISHIKAWA and Norikazu SHIMIZU

The monitoring has been conducted on surrounding rock behavior by extensometers and axial force meters of rockbolt since the construction period, and width contraction of the existing underground powerhouse. Some increases are found recently in monitoring data, suggesting the degradation of the stability of the cavern. For verification, the physical model of the cavern involving the surrounding rock is studied. It requires the less mechanical property rock area in order to meet the monitoring, however, which has little influence of the stability of the cavern. The studies clarify the present soundness of the cavern together with the verification of the monitoring system, comprehensively.