

(75) 不連続性岩盤内空洞の支保工としてのロックボルトおよびアンカーの評価方法

(株) 青木建設 正会員 永井 哲夫
正会員 ○國村 省吾
正会員 池尻 健

Estimating Effects of Rock Bolting and Rock Anchoring in Jointed Rock Masses

Tetsuo Nagai, Aoki Corporation
Shogo Kunimura, Aoki Corporation
Takeshi Ikejiri, Aoki Corporation

Abstract

The behaviour of jointed rock masses is dominated by the geometrical and mechanical properties of rock joints. It is extremely difficult for engineers to make an accurate estimate of mechanical behaviour of it, before constructing rock structures. Consequently, in practice, the design of rock reinforcements is based on the experience of and judgements by well-trained engineers. To construct an economical and rational cavern in jointed rock masses, it is very important to evaluate the mechanical behaviour of rock masses reinforced with rock bolts and/or anchors.

In the case of designing rock structures, such as tunnels and underground caverns, it is required to design rock reinforcements so as to keep the discontinuous behaviour of rock masses minimum. Accordingly, from a designing point of view, it is essential to know the infinitesimal deformational behaviour of reinforced jointed rock masses before failure rather than post-failure.

In this research, we propose a method based on continuum mechanics to estimate the behaviour of bolted and/or anchored jointed rock masses by using the results of an extensive literature survey on underground powerhouse caverns.

1. はじめに

地下有効利用の社会的要請に伴い、地下空洞の規模が大型化してきている。大規模地下空洞を建設する場合、ロックボルトおよびアンカーが主たる支保工として考えられる。いま、岩盤の力学的挙動がそれを構成する岩石そのものの力学特性よりも不連続面の特性により支配される場合、その岩盤を不連続性岩盤と呼ぶことにする。このような不連続性岩盤内に大規模地下空洞を合理的に建設するためには、空洞掘削に伴う周辺岩盤の挙動を的確に把握し安定性を評価して、所要支保数量を求め合理的な設計を行う必要がある。さらに施工に際しては、現場計測結果をもとに安定性の再評価を行い、当初設計の見直しを合理的に実施する必要がある。しかし、一般には経験的方法に頼らざるを得ず、合理的な設計・施工は十分にされていないのが現状である。そこで、不連続性岩盤内に設けられた空洞の安定性の評価方法、ロックボルトおよびアンカーにより補強された空洞周辺岩盤の挙動予測方法の確立が望まれる。

不連続性岩盤の挙動を予測し安定性を評価する方法を分類すると、連続体的手法と不連続体的手法に大別できる。不連続面の間隔が構造物の寸法に比べてかなり小さい岩盤を対象とする場合、全ての不連続面を個々に調査・評価せず、巨視的観点からその岩盤の力学特性と類似の特性を有する等価な連続体を考える前者の方法が、実際の設計・施工においては有効であると考えられる。本研究では、既設揚水発電所地下空洞に

関する調査・試験、設計、施工および計測等の実績について文献調査を行い、それらの結果を分析・検討することにより、連続体的手法に基づく不連続性岩盤内空洞の安定性の評価方法、さらにロックボルトおよびアンカーにより補強された空洞周辺岩盤の挙動予測における支保効果の評価方法について考察を行う。

2. 調査対象とデータ分析に用いたパラメータ

揚水発電所地下空洞は、一般に硬岩からなる岩盤内に建設されることが多く、そこでは空洞周辺岩盤や支保工に関する詳細な計測が実施されており、変状事例についてもかなりの資料が残されている。以上のことから、これらのデータは不連続性岩盤内に設けられた空洞の実際の挙動および安定性を検討するのに適していると考え、過去30年余りの各種文献（例えば、発電所工事誌、電中研報告書、発電水力など）の調査を行った。そして、本研究で必要とする種々の情報が得られる24地点の大規模地下空洞を対象として取り上げた。これらの空洞の大部分は、横断面形状がきのこ型であり、側壁部岩盤のみがロックボルトやアンカーにより補強されている。本研究では、これらの支保工により補強された不連続性岩盤内空洞の挙動や安定性の評価方法について考察を行うため、側壁部周辺の岩盤挙動に着目する。

ここでは、連続体的手法に基づき空洞周辺岩盤の挙動および安定性に関する検討を行うため、次のようなパラメータを定義してデータの分析を行った。

- ・全体ひずみ＝岩盤変位計による最長計測区間の最大変位／最大岩盤変位計測断面における側壁高さ
- ・局所ひずみ＝最大岩盤変位発生地点の岩盤変位計による区間最大変位／区間最大変位計測地点の区間長
- ・変位速度＝最大変位計測地点の掘削最盛期の期間最大変位／期間最大変位の計測期間（3～15日）
- ・岩石、岩盤限界ひずみ¹⁾＝岩石または岩盤の見かけの一軸圧縮強度／見かけの弾性係数
- ・側壁ひずみ＝最大内空変位または2×最大岩盤変位／最大変位計測断面における側壁高さ
- ・地山強度比＝岩盤の見かけの一軸圧縮強度／土被り圧（ γ は初期応力測定結果から回帰して算定）
- ・ひずみ比＝側壁ひずみ／岩盤限界ひずみ
- ・支保内圧＝最大変位計測断面におけるアンカーの緊張力の総和／アンカーの設置面積
- ・ボルト密度＝最大変位計測断面におけるロックボルトの総数／ロックボルトの打設面積

3. 空洞周辺岩盤の安定性

まず、空洞掘削により周辺岩盤に生じる変位の空間的、時間的不連続性を表すパラメータとして、局所ひずみおよび変位速度を取り上げ検討を行った。これらのデータを分析すると、局所的には不規則で不連続的な変位が空洞周辺岩盤に生じていることが分かる。次に、これらのデータを全体ひずみとの関係でまとめると図-1および図-2のようになる。図-1を見ると、局所ひずみが小さい間は全体ひずみとの間に線形関係があり、ある限界値を境に局所ひずみが卓越するようになり、空洞周辺の岩盤では何らかの変状（表-1）が生じていることが分かる。この原因として、節理の開口や滑りなど不連続体的挙動の発生が考えられる。岩種別（表-2）に見ると、このような傾向は火成岩において強く、堆積岩および変成岩ではほとんど見られない。同様の結果が、ボアホールテレビ装置による間隙幅の計測結果と岩盤変位計測結果の比較をもとに報告されており²⁾興味深い。

このように、連続体的挙動や不連続体的挙動を示すデータが混在しているにもかかわらず、全体

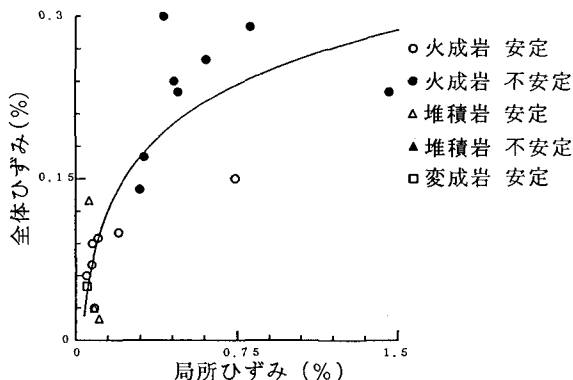


図-1 全体ひずみと局所ひずみ

ひずみと局所ひずみおよび変位速度の間には高い相関（式（1）および（2））のあることが分かる。これらのことと、側壁部における主な変状は表-1から岩盤の微小変形によるものと推測されることから、岩盤内で生じている不連続体的な挙動は、巨視的に捉えると岩盤と等価な連続体の挙動により評価できると考えられる。

$$\varepsilon_t = 0.168 \log \varepsilon_1 + 0.257 \quad (r = 0.83) \cdots (1)$$

$$\varepsilon_t = -0.939 v^{0.503} \quad (r = 0.70) \cdots (2)$$

ここで、 ε_t は全体ひずみ、 ε_1 は局所ひずみ、 v は変位速度を表す。

そこで、岩盤と等価な連続体の限界ひずみ（岩盤限界ひずみ）によりその連続体の力学特性を表し、巨視的に捉えた側壁岩盤の変位（側壁ひずみ）との関係を見ると図-3のようになる。この図から、等価な連続体の限界ひずみに対してある限界以上の変位を生じさせると、空洞周辺岩盤では何らかの変状が生じていることが分かる。この限界線は次式で与えられ、施工管理基準としても意味をもつものである。

$$\varepsilon = 0.771 \varepsilon_{0j} \cdots (3)$$

ここで、 ε は側壁ひずみ、 ε_{0j} は岩盤限界ひずみを表す。

この限界ひずみについて、対応する岩石と岩盤の限界ひずみを求め、それぞれの一軸圧縮強度との関係でまとめると図-4のようになる。この図から、ここで対象とした不連続性岩盤の場合、不連続面の影響により一軸圧縮強度や弾性係数は大きく低下するが、その比として得られる限界ひずみはほぼ等しいか向上する傾向にあり、その変化の度合いは小さいことが分かる。一方、ロックボルトにより補強された不連続性岩盤モデルによる実験的研究から、ロックボルトにより見かけの一軸圧縮強度および弾性係数

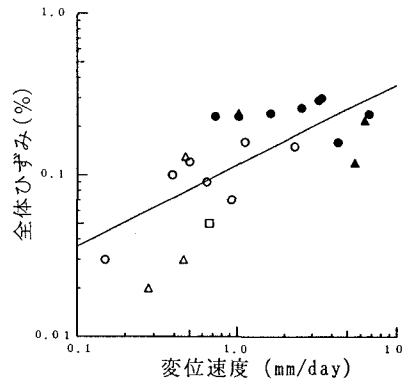


図-2 全体ひずみと変位速度

表-1 主な変状状況

側壁における主な変状状況
内空変位、岩盤変位の急増 PC鋼線・PC鋼棒の緊張力の急増 吹付コンクリートにクラック発生

表-2 地下空洞周辺岩種

岩 種	岩石の名称
火成岩	花崗岩 流紋岩 ひん岩 石英斑岩 閃緑岩
堆積岩	砂岩 礫岩 頁岩
変成岩	片岩

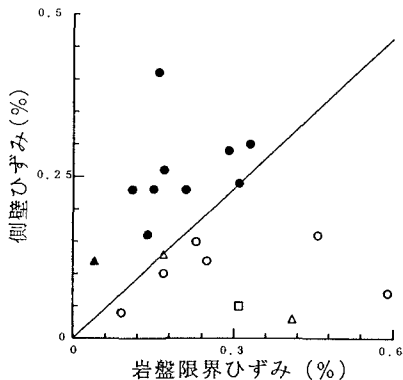


図-3 ひずみによる安定性の基準

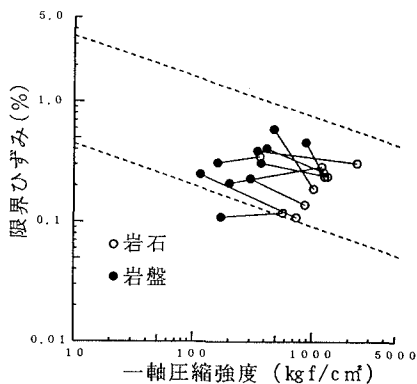


図-4 対応する岩石と岩盤の限界ひずみ

は向上するが、限界ひずみはあまり影響を受けないことが分かっている³⁾。以上のことから、限界ひずみは、他の力学特性と比較して、不連続面や支保工の影響を受けにくい頑強なパラメータであることが分かる。そのため、図-3に示したようにロックボルトやアンカーにより補強された不連続性岩盤の安定性を評価する際に、有効な指標になると考えられる。

ロックボルトやアンカーにより補強された不連続性岩盤は高次の不連続体と考えられるが、現場計測結果を分析すると、微視的には不連続体的挙動を示す場合もあるが、巨視的に捉えたと等価な連続体としてその挙動を評価できることが分かった。そして、空洞周辺岩盤の安定性を評価する場合も、等価な連続体を考えればよいことが分かった。そのとき、安定性の評価基準として岩盤限界ひずみが有効で、これは岩石の室内試験結果から容易に推定できることを示した。

4. 空洞周辺岩盤の挙動の予測と支保工の評価方法

前章では、連続体的手法に基づき、ロックボルトやアンカーにより補強された不連続性岩盤の安定性を評価できることを示した。そこでは、補強された岩盤と等価な連続体の変形性に着目していた。次に、どのようにして空洞周辺岩盤の変形挙動の予測を行うか、また実際に岩盤で生じている支保工の効果をどのようにして挙動の予測方法に取り込むかが問題となる。

いま、対象として取り上げた不連続性岩盤と等価な連続体の限界ひずみと一軸圧縮強度の関係を見ると、図-5のように強い相関のあることが分かる。この図は主として火成岩を構成岩石とする岩盤に対して得られたものであり、図-4と比較すると不連続面の影響により強度の低下する度合いにある傾向が見られる。これらのことから、岩石の限界ひずみが室内試験などにより求められれば、ある程度岩盤の一軸圧縮強度を推定できることが分かる。

一方、初期応力測定結果から初期鉛直応力を求め、これを測定深度との関係でまとめると図-6のようになる。図中の回帰直線はほとんど原点を通るものであり(式(4))、初期鉛直応力は土被り圧に等しいと仮定することの妥当性を示している。

$$\sigma_v = 0.256H \quad (r = 0.91) \quad \dots (4)$$

ここで、 σ_v は初期鉛直応力、Hは土被りを表す。

以上のことから、岩盤一軸圧縮強度と土被り圧の比として 図-5 不連続性岩盤の見かけの力学特性
与えられる地山強度比は容易に求められることが分かる。

そこで、ひずみ比と地山強度比の関係をまとめると図-7のようになり、両者により相関が見られる。このことから、掘削による最大変位を空洞の側壁高さ、岩盤限界ひずみ、岩盤一軸圧縮強度および土被りというパラメータを用いてある程度推定できることが分かる。さらに、このデータを支保工の形態によって2つに区分し(アンカーのみ、ロックボルト+アンカー)、層別因子を含む回帰分析を行うと、相関が強いことが分かる(式(5)および(6))。図中の回帰直線の違いは、支保工としてロックボルトを含むかどうかだけであることから、ロックボルトにより発生する最大変位が抑制されることが分かる。

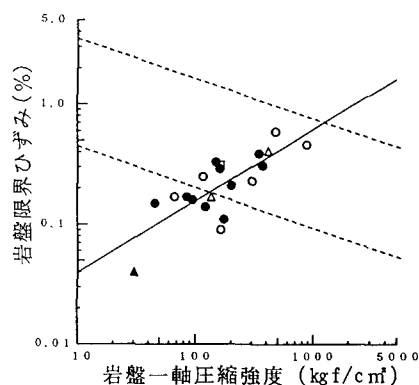


図-5 不連続性岩盤の見かけの力学特性

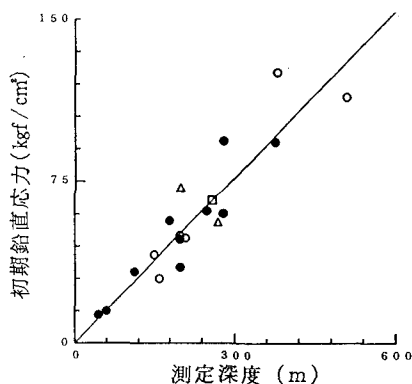


図-6 初期鉛直応力と測定深度

(アンカーのみ)

$$\text{Log} (\varepsilon / \varepsilon_{0j}) = -0.161 (\sigma_{cj} / \sigma_v) + 0.414 \quad \dots (5)$$

(ロックボルト+アンカー)

$$\text{Log} (\varepsilon / \varepsilon_{0j}) = -0.161 (\sigma_{cj} / \sigma_v) + 0.217 \quad \dots (6)$$

このように岩盤の挙動を変形性という観点から捉えると、ロックボルトの効果は岩盤に発生する変位の拘束として現れることが分かった。このような効果を解析に取り込むための方法を分類すると、等価支保内圧法と地山物性値向上法に大別できる。前者の場合、ロックボルト材料の許容耐力などをもとに容易に等価支保内圧を求めることができるため一般的である。ここでは、実測データをもとにロックボルトの等価支保内圧について考察を行う。

いま、支保内圧を岩盤の一軸圧縮強度により無次元化し、ひずみ比との関係を調べると図-8が得られる。この図からアンカーの効果は支保内圧として評価できそうであることが分かる。ここでも、支保工の形態の違いを層別因子として取扱い回帰分析を行うとよい相関が得られる(式(7)および(8))。

(アンカーのみ)

$$\varepsilon / \varepsilon_{0j} = -0.180 (p_i / \sigma_{cj})^{0.98} \quad \dots (7)$$

(ロックボルト+アンカー)

$$\varepsilon / \varepsilon_{0j} = 0.029 (p_i / \sigma_{cj})^{0.98} \quad \dots (8)$$

同図より、同一の岩盤で発生する最大変位を同一にするために必要な支保内圧は、支保形態により異なることが分かる。この支保内圧差はロックボルトの有無によるもので、ロックボルトにより見かけ上支保内圧が向上したと考えられる。

また、支保内圧を岩盤の一軸圧縮強度により無次元化し、ロックボルトの密度との関係をまとめると図-9に示すようになり、両者の間には強い相関($r=0.90$)が見られる。さらに、図-8および図-9を用いると、ロックボルト1本当たりが発揮している等価な軸力を求めることができる。例えば、ひずみ比を1.0、岩盤一軸圧縮強度を160 kgf/cm²として計算すると、ロックボルトは1本当たり29.3 tfの軸力を発生していることになる。これは、材料強度から考えると矛盾している。このことから、著者の一人が既に提案しているように、ロックボルトの効果を地山の力学特性の向上として定量的に評価する方法³⁾などが有効であると思われる。

【参考文献】

- 1) 櫻井春輔: トンネル工事における変位計測結果の評価方法, 土木学会論文報告集, No. 317, pp. 93-100, 1982
- 2) 本島睦・日比野敏: 岩盤内大規模地下空洞の掘削時挙動と安定性(その2) - 既設揚水発電所地下空洞の実測結果による岩盤挙動の検討 -, 電力中央研究所・研究報告, 385042, 1986
- 3) 永井哲夫: ロックボルトにより補強された不連続性岩盤の力学的挙動に関する研究, 神戸大学博士論文, 1992

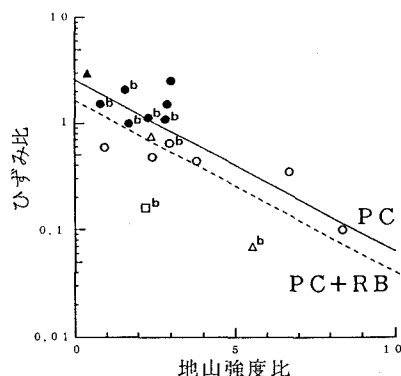


図-7 ひずみ比と地山強度比

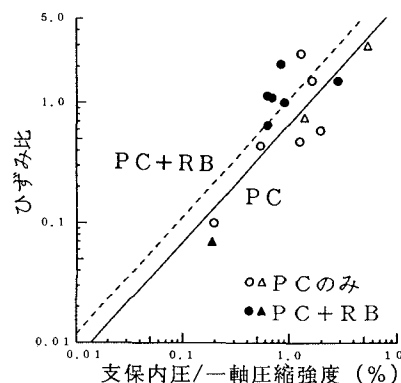


図-8 等価支保内圧

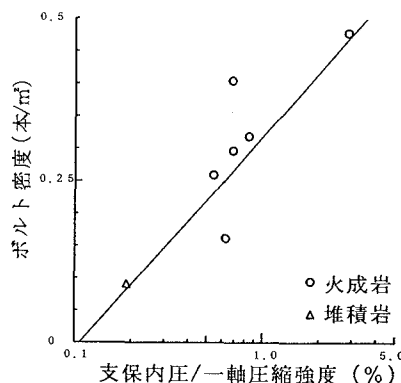


図-9 ボルト密度の推定