

(60) 大規模地下空洞の掘削時挙動と補強設計

(財)電力中央研究所 正会員 ○日比野 敏
同 上 本 島 睦

1. はじめに

トンネルや地下発電所空洞などの岩盤構造物がこれまで数多く建設され、さらに今後も、石油備蓄、超電導電力貯蔵や地下式原子力発電所などと、その必要性は増大するものと思われる。しかしながら、これら岩盤構造物の解析・設計についてみると、まだ説明すべき事項が残されているように思われる。その原因の一つとしては、岩盤構造物に作用する「外力」の作用機構の複雑さや「材料」である岩盤の性質が必ずしも明確でないところにあると思われる。筆者らは、これまで地下発電所空洞の解析や計測にたずさわってきて、大規模な空洞の支保に対する外力の作用機構について若干の知見を得たのでここに報告する。

2. 大規模空洞掘削時の 2、3 の特徴的な岩盤挙動

多数の地点で実施した岩盤挙動の計測結果のうち、外力の作用機構に関連が強いと思われる 2 つの結果を以下に示す。

(1) アーチ上部岩盤の挙動

通常、大規模空洞を掘削する場合、まずアーチ部の掘削を行い次いで本体空洞の掘削を行う。図-1 にはアーチ上部岩盤の掘削時の挙動を示す。¹⁾ アーチ上部岩盤はまずアーチ部掘削時に沈下するが、つぎの本体掘削時には沈下を生じないでむしろ隆起の傾向を示すという特徴的な挙動を示すことがこの図より判る。つまり、アーチ上部岩盤はアーチ部掘削時に、上下方向の掘削相当外力(註)の作用によりゆるむと同時に沈下するが、本体掘削時には水平方向に圧縮される傾向にあることを示している。この傾向はアーチ部で実施された弾性波速度試験結果でも同じ傾向が示されている。²⁾ 従って、アーチ上部岩盤は①アーチ部掘削時には上下方向の外力を受け、②本体掘削時には水平方向の外力を受ける、と考えられる。

(2) アーチランニングコンクリートの挙動

アーチ部を掘削するとまずアーチ部にコンクリートライニング等を施工し、ついで本体部の掘削を行う。本体部を掘削するとその影響を受けてアーチライニングに応力が生ずる。図-2 には、本体掘削終了時のアーチライニングの応力の平均値と本体側壁部の内空変位との関係を示す。¹⁾ 11 地点での結果を示しており、地点ごとに岩盤物性や地圧なども異なっているが、両者の間にはほぼ比例関係があることが判る。このことは、本体掘削時に側壁が掘削相当外力の作用により空洞内側へ変位し、その結果アーチ部岩盤が水平方向に圧縮され、アーチコンクリートライニングに圧縮応力が生じたものと考えられる。上述のアーチ上部岩盤が、本体掘削時に沈下よりは隆起の傾向を示したのも、この圧縮の影響と考えられる。

大規模空洞掘削時の岩盤挙動の特徴的な傾向を示したが、これらの結果より、空洞の補強設計に際しては次章で述べる外力を考慮する必要があると思われる。

3. アーチ部支保の荷重とその補強

3.1 アーチ部支保の荷重

アーチ部の支保には、上述の岩盤挙動を考慮し

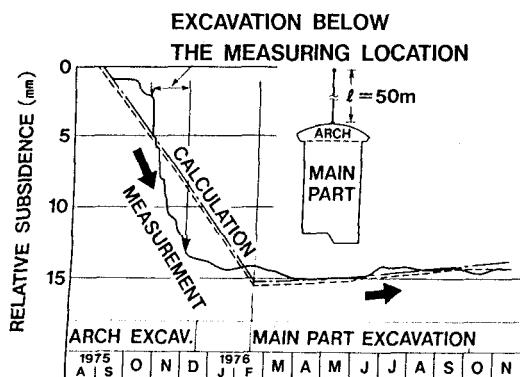


図-1 アーチ上部岩盤沈下の経時変化

て、少なくともつぎの荷重が作用すると考えられる。

(1) 緩み領域の自重 アーチ上部の緩み領域の岩盤が自重により落下しようとして作用する上下方向の荷重(図-3)。

(2) アーチ部の水平方向の変位に起因する荷重

図-4に示すように、本体部掘削時に、側壁部に掘削相当外力が作用し側壁は空洞内側へ変位 δ を生ずる。そのためにアーチ部周辺岩盤においても水平方向に変位 δ_i が生じ、アーチ上部岩盤は水平方向に圧縮され、アーチコンクリートライニングなどの支保には圧縮応力 $\sigma(\delta_i)$ が生ずることになる。

その他の荷重としては、支保をコンクリートライニングで施工する場合には、コンクリート硬化時の熱応力や、グラウト時のグラウト圧などがあるが、紙面の都合で、ここではこれらについては述べない。

3.2 アーチ部の支保の設計

アーチ部の支保の設計は、予想される荷重に対して、アーチ部の構造解析やゆるみ領域のすべり検討等を実施して、コンクリートライニングや吹付コンクリートの厚さ、ロックボルトやP S鋼棒等の長さ、ピッチ、太さなどを決めることになる。

すべりの検討手法等は文献にゆずり、ここでは3.1(2)の δ_i による荷重に対する支保方法について述べる。

図-5(a)に示すように、アーチの掘削面がスムーズな場合には、支保として吹付コンクリートを用いてもコンクリートライニングを打設しても、両者とも支保として同等な働きをするものと思われる。しかし、層理面などが発達してスムーズな掘削面が出来ない図-5(b)のような場合には、吹付コンクリートでは3.1(2)の変位 δ_i による荷重に耐えられなく、A、B点で吹付けが破壊し、局部破壊が生ずる可能性がある。

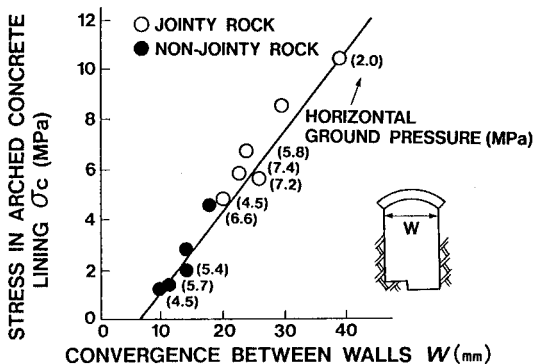


図-2 内空変位とライニング応力との関係

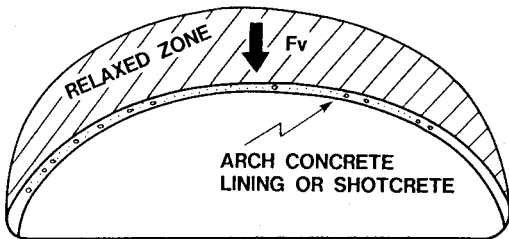


図-3 緩み領域の自重による荷重

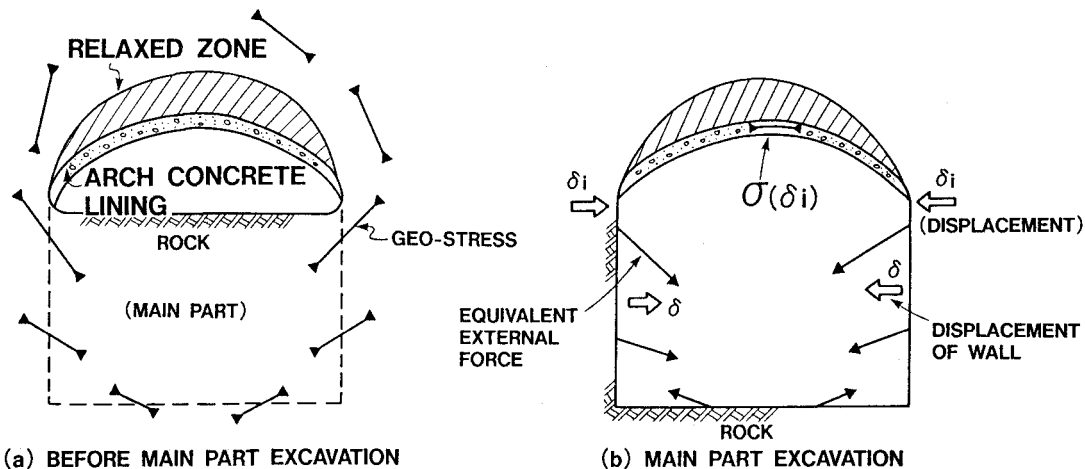


図-4 本体掘削時の側壁の変位によるアーチ部の水平方向の外力

掘削面の凹凸の程度によるが、このような場合には図-6(a)のように鉄筋コンクリートを打設し、局部破壊の進行を阻止する設計の方がよいと考えられる。

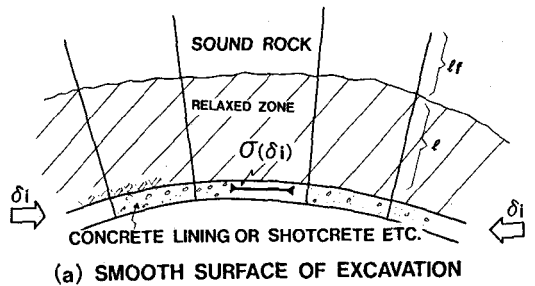
3.1(2)の変位 δ_i による荷重はかなり大きく、その結果コンクリートライニングには 300 kg/cm^2 のオーダーの応力が生ずる場合がある。日本においてはプレートテクトニクスで説明されるように、初期地圧の水平成分が鉛直成分よりも大きい傾向にあり、 δ_i による荷重は大きい。この荷重が非常に大きくてアーチコンクリートの局部破壊が予想される場合には、図-6(b)に示すように、アーチ部にスリットを入れることが考えられる。このスリットには硬質ゴム板などを用いて過大な変形を吸収させる。あるいは通常のコンクリートよりは軟かいコンクリートを打設して発生応力を低下させることが考えられる。要は、 δ_i による荷重が水平方向に作用するので、対抗する必要はないので、可縮支保の概念を導入して δ_i による荷重を受ける設計が可能であると考えられる。この考えをさらに進めれば、コンクリートライニングの代りに、工場生産による鉄筋コンクリートのセグメントプレート（pre-casted reinforced-concrete plate, PCRPC）を用いた支保が考えられる（図-6(c)）。シールドトンネルでのセグメントと同様なものであり、PCRPCの板と板の間には硬質ゴムなどを用いて δ_i の変形を吸収させる。PCRPCはプレキャスト板なのでコンクリートの養生期間が不要となり、万一局部的に破損した場合にも取替えが容易であるなど、工期や費用の面ですぐれていると思われる。図-7にはその施工時の概念を示す。

4. 側壁部の支保に作用する荷重

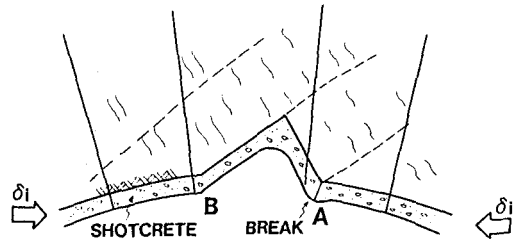
側壁部の支保には少なくともつぎの荷重が作用すると考えられる。

(1) 緩み領域の自重 図-8(a)においてWで示される。

(2) アーチ部の水平方向変位による反力の荷重
アーチ部の荷重の説明で述べた δ_i による荷重の反作用として $\curvearrowright$ ABFHCAをすべらせる力Fhが作用すると考えられる。アーチコンクリートライニングを打設している場合には、掘削解析等によるライニングの応力からFhを推定することがで

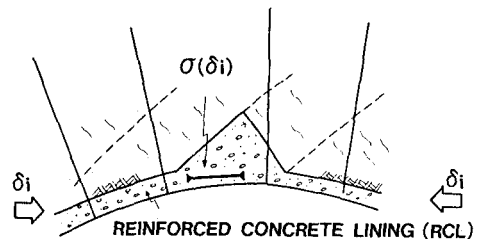


(a) SMOOTH SURFACE OF EXCAVATION

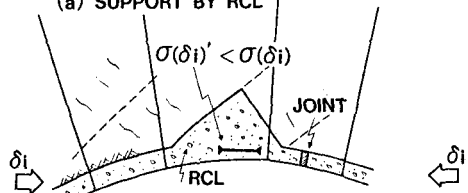


(b) ROUGH SURFACE OF EXCAVATION

図-5 掘削面の形状と支保の関係



(a) SUPPORT BY RCL



(b) SUPPORT BY RCL WITH JOINT

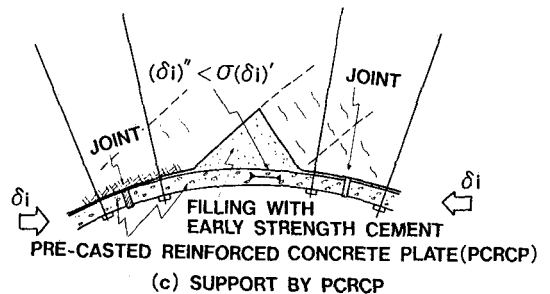


図-6 アーチ部の可縮支保の概念

5. まとめ

つぎに、上記外力は水平方向に作用するのでスリットなどを設置したりしての可縮支保的な設計が可能であることを示した。

註) 掘削相当外力：掘削予定面に作用している地圧の直応力とせん断応力を解放し、ゼロとするのに必要な外力。

6. 参考文献

- 1) S Hibino and et al. : Behaviour of Rocks Around Large Caverns During Excavation, Proc. of 5th Int. Cong. on Rock Mech., ISRM, Melbourne, pp. D199-202, 1983.
- 2) 本荘・本島：新高瀬川発電所の地下空洞掘削に伴う周辺岩盤の弾性波速度変化，電中研報告No.379003，1979.
- 3) 電力土木技術協会編：電力施設地下構造物の設計と施工，1986.
- 4) T. Kanagawa and et al. : In Situ Stress Measurements in the Japanese Islands, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 23, No. 1, pp. 29-39, 1986.

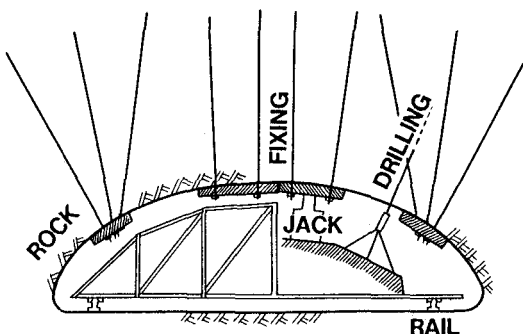


図-7 PCRCPによる支保作業

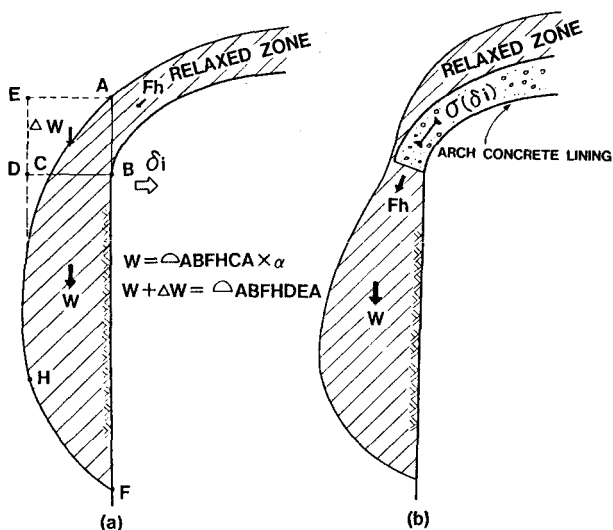


図-8 側壁部の外力

(60) Rock Behaviour of Large Cavern During Excavation and Support Design

Satoshi HIBINO and Mutsumi MOTOJIMA
Central Research Institute of Electric Power Industry
1646 Abiko, Abiko-shi, Chiba-ken, Japan

Synopsis

In this paper the authors showed a concept of external loads at the design of large cavern support, which were obtained through in situ measurements of rock behaviour during excavation of large caverns.

Following an arch part excavation, main part of a cavern is excavated and walls of the cavern move inward the cavern, which result in compressing the arch part rock and arch support such as an arch concrete lining or shotcrete. The value of stress in the lining reached in some cases about 300 kg/cm^2 . The value of this stress in the arch supports is superior to that of stress due to own weight of relaxed zones above the arch.

The mechanism of this external loads is different from that of tunnel excavation, so the attention should be paid in the design of a large cavern support.

The authors have proposed a new idea of an arch support which include slits to release the excessive compressive stress due to horizontal movements of the walls.