

神流川地下発電所における岩盤挙動計測に基づくゆるみ領域の評価

EVALUATION OF LOOSENED REGION BASED ON IN-SITU MEASUREMENT RESULT IN KANNAGAWA UNDERGROUND POWER PLANT CAVERN

前島俊雄*・森岡宏之*・平井秀幸*

Toshio MAEJIMA, Hiroshi MORIOKA and Hideyuki HIRAI

In case of carrying out observational construction management precisely, it is important to grasp correctly the development of the loosened region around underground cavern during excavation by monitoring and predict accurately the behavior of cavern in future by analysis. In Kannagawa site, before excavation of large cavern, rock stress measurement was performed at the pillar between two adjacent tunnels to inspect the model of the predicted analysis. As the methods of monitoring during excavation, the rock stress measurement and AE monitoring were applied to actual construction with the purpose of evaluating the loosened region directly, in addition to conventional methods which are focused on strain. In this paper, the results of the evaluation of loosened region based on some kinds of in-situ measurement data are reported.

Key Words: large-scale underground cavern, rock mass behavior, loosened region, stress measurement

1. はじめに

神流川発電所地下発電所は、地下深部約 500m に位置し、現在建設中の地下空洞は長さ 216m、幅 33m、高さ 52m、総掘削量約 22 万 m^3 、最大断面積約 1,400 m^2 の規模であり、地下発電所の本体工事は、調査、設計、計測、挙動分析において精度を向上させた情報化設計施工技術を活用して支保の最適化を図りながら、平成 12 年 10 月に 25 ヶ月にわたる掘削工事を無事完了した。

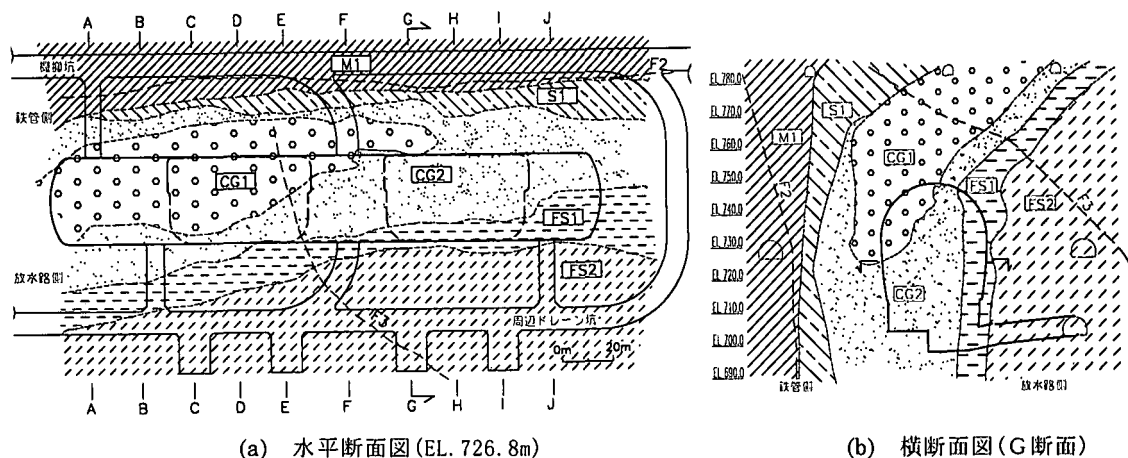
精度の高い情報化設計施工を実施する上で、掘削中の周辺岩盤のゆるみ領域の進展状況を正確に把握し、その後の挙動を予測することが重要となる。当地点では、本体空洞掘削前に作業坑を利用した双設空洞掘削試験を実施し当地点での挙動モデルの評価を行った。また、本体空洞掘削における計測手段として、従来の岩盤変位測定などのひずみに着目した計測に加え、岩盤応力測定、AE 測定等の直接的にゆるみ領域を評価する計測を日常管理の中に適用した。

本論文では、双設空洞掘削試験および本体空洞掘削における種々の計測データに基づく空洞周辺のゆるみ領域の進展について分析した結果を報告する。なお、ここで取り扱う「ゆるみ領域」とは、岩盤が荷重の増分を負担できなくなった領域（塑性領域）を示すものとする。

2. 地質および岩盤物性

神流川地点での地質は、中古生層がほぼ東西に帯状に分布する秩父帯南帯に位置し、構成する地層は、後

* 正会員 東京電力（株）神流川水力建設所 上野第二工事事務所



図－１ 発電所周辺地質図

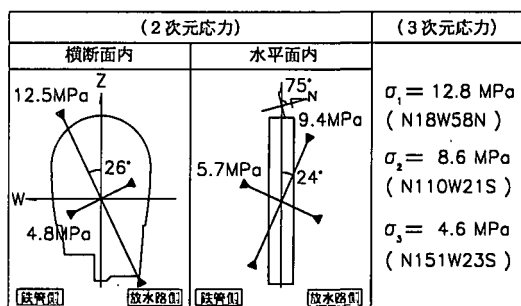
期古生代～中生代の海成堆積物がジュラ紀～白亜紀の海底地すべりによって再堆積したもので、泥岩を主体とする基質に砂岩、チャート、塩基性火山岩類、石灰岩等の礫(オリストリス)が不規則に混入する混在岩からなっている。

発電所周辺の地層は、図－１に示すとおり、礫種、基質の種類、混在率等に注目して、礫岩、粗粒砂岩の礫集合体からなるCG層を鍵層として6層に区分した。地下発電所は東西走向南傾斜の砂岩礫優勢な層に位置している。特に、S1、FS1層は堆積時の海底地すべりのすべり面を形成し、レンズ状に引き伸ばされた礫の周りに緑泥石付着面が発達するレンズ層が多く分布する。

岩盤物性値、初期地圧については、表－１、図－２に示す通りである。特に、M1、S1、FS1層については、東西走向急傾斜の不連続面が卓越することから変形異方性が認められ、鉛直方向に対して水平方向の等価弾性係数が約1/2となっている。

表－１ 解析用物性値

地層	等価弾性係数 GPa (鉛直, 水平)	ピーク強度		残留強度	
		Cp: MPa	$\phi p: ^\circ$	C _R : MPa	$\phi_R: ^\circ$
M1	10.0 (14, 7)	1.9	40		40
S1	22.5 (30, 15)	0.8			
CG1	60.0	5.2			
CG2	60.0	3.4	57	0.5	49
FS1	22.5 (30, 15)	3.4			
FS2	30.0				

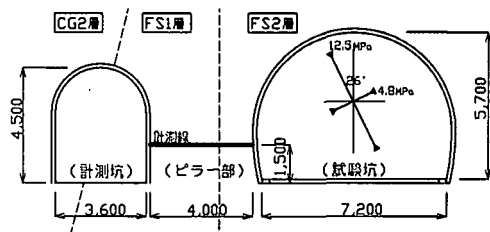


図－２ 初期地圧測定結果

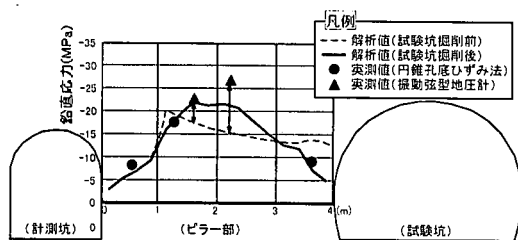
3. 双設空洞掘削試験による予測解析モデルの検証

予測解析は、当地点でのボーリングコアの剛性三軸圧縮試験結果から岩石のひずみ軟化特性が確認されたことから、ひずみ軟化モデルによるFEM逐次掘削解析を採用した。ひずみ軟化モデルによる解析手法は、ピーク強度を超えて破壊した要素の余剰応力を周辺の要素に再配分させるモデルである。

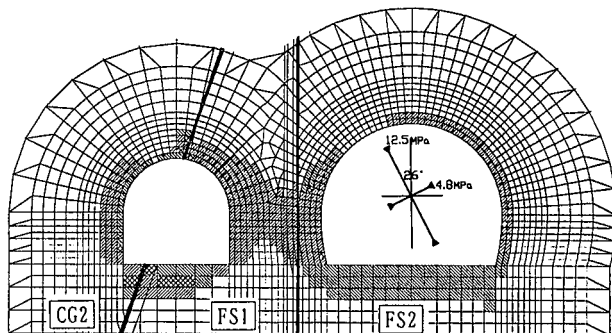
この予測解析モデルの妥当性を評価するため、離隔4mの近接する2本のトンネルを掘削し、ピラー部の応力変化の計測を実施した(図－３)。試験の手順としては、計測坑を先行して掘削し、岩盤変位計、振動弦



図－３ 双設空洞断面図



図－４ ピラー部の鉛直応力分布



図－５ シミュレーション解析結果（ゆるみ領域）

型地圧計等の計測器をピラー部に埋設し、次に双設する試験坑を掘削し、その経時変化を計測し、掘削完了後ピラー部で円錐孔底ひずみ法による絶対応力の測定を実施するというものである。また、シミュレーション解析は、ひずみ軟化モデルによるFEM逐次掘削解析を用いて実施した。

試験坑掘削後のピラー部での鉛直応力の予測値および実測値を図－４に示す。計測結果より、双設空洞掘削によりピラー部全体で応力再配分が進展し、ゆるみ領域に移行したものと考えられる（図－５）。ピラー部での応力状態はシミュレーション解析により再現できたことから、ひずみ軟化モデルによる解析は空洞周辺で発生する応力再配分過程を再現できることを確認した。また、初期地圧および岩盤物性値についてもほぼ妥当なものであると判断した。

４．H断面放水路側における挙動およびゆるみ領域の評価

不連続面による影響が顕著に見られた放水路側 FS1 層での各種計測器の挙動について分析した結果を以下に示す。不連続面については、切羽およびBTV観察結果によって３本(L2,L3,L4)の連続性の高い分離面が確認されている。

４．１ 岩盤挙動計測結果

盤下げ掘削に伴う岩盤の挙動計測結果は、図－６に示すとおりであり、各計測項目別に掘削ベンチ毎の変化を示した。計測器を設置している位置は、空洞中央部の掘削ベンチ高で４ベンチに相当する。

(１) 岩盤内絶対応力測定（円錐孔底ひずみ法）

全断面掘削終了後の計測データは、深度 6m 以浅では最大主応力が初期応力を大きく下回り、深度 9m 以深で空洞周方向に一軸化して応力集中が発生した。

(２) AE発生数および周波数

AEの計測は、計測線から±32m 区間内のすべての発破に対して直後２時間内に発生するものを計測した。掘削ステップに伴うAE発生数の変化に着目すると、５ベンチ掘削時には発生数のピークは深度 3m にあったものが、６ベンチ掘削時には深度 7.5m に移行し、その後は発生深度の移行は見られないことから、６ベンチ掘削時に深度 6m まで応力再配分が発生し、深度 7.5m 以深で応力集中しているものと考えられる。また、発生周波数の変化についても、６ベンチ掘削時に深度 6m で低下傾向が見られるのに対し、深度 7.5m では周波数に大きな変化が見られないことから確認できる。詳細な計測方法および分析結果については、本論文集の別の報告¹⁾を参照されたい。

(３) 水平方向変位および区間ひずみ（岩盤変位計）

区間変位が増大している区間は、不連続面 L2,L3,L4 の位置と良く一致している。不連続面 L4 と交差する

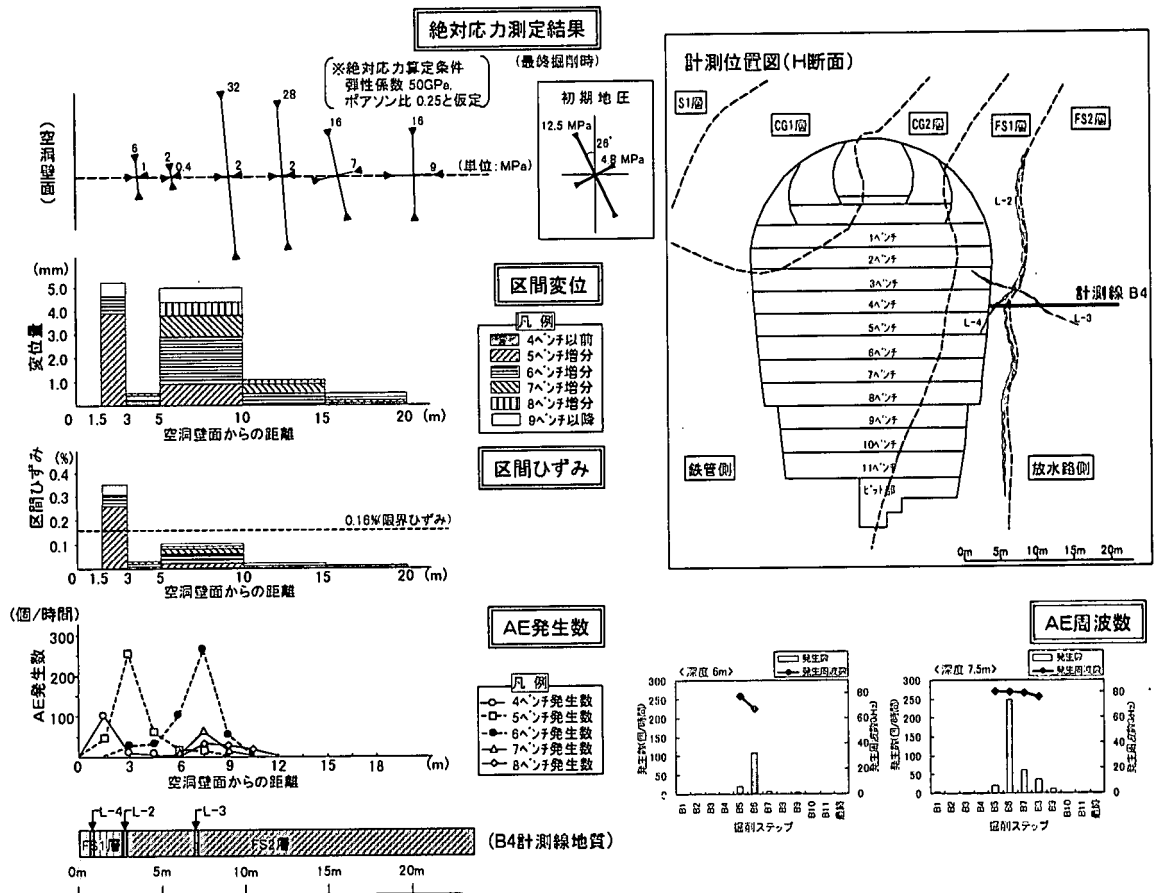


図-6 盤下げ掘削に伴う岩盤挙動計測結果(H断面放水路側4ベンチ)

深度 1.5~3m 区間では、不連続面が壁面と交わる5ベンチ掘削時に最大変位 4mm が生じた。不連続面 L3 と交差する 5~10m 区間では6ベンチ掘削時に最大変位 2.1mm が生じた。区間ひずみに着目すると、不連続面 L2,L4 と交差する深度 1.5~3m 区間では 0.35%に達しており、当地点での岩石一軸圧縮試験より求めた限界ひずみ 0.16% (軸ひずみ相当) を越えているが、深度 3m 以深ではいずれも 0.1%以下で限界ひずみを下回っている。

4.2 岩盤のゆるみ領域の評価

4ベンチでの岩盤は、AE発生数の変化および岩盤内絶対応力測定結果から、4ベンチ掘削時に深度 1.5m 付近で応力集中が開始し、5ベンチ掘削時に深度 3m、6ベンチ掘削時に深度 6m まで順次耐力を失いながら外側へ応力再配分が進行し、現在に至ったものと考えられる。このことから、最終掘削段階でのゆるみ領域は深度 7m 程度であると判断される。また、深度 3~10m については、区間ひずみが限界ひずみに達していないことから、不連続面 L3 の変形に伴いそれ以浅の領域では、基岩は強度を保持しているが岩盤として耐力を失った状態にあるものと考えられる。

4.3 岩盤挙動の予測

挙動の予測にあたっては、櫻井ら²⁾が提案する不連続面の剥離、すべりを考慮した異方性パラメータを用いて不連続面をモデル化し、これらのパラメータに不連続面の弾性係数を加えた3つをパラメータとして、ひずみ軟化解析により逆解析的にその物性の評価を行った。その結果、不連続面の物性を弾性係数

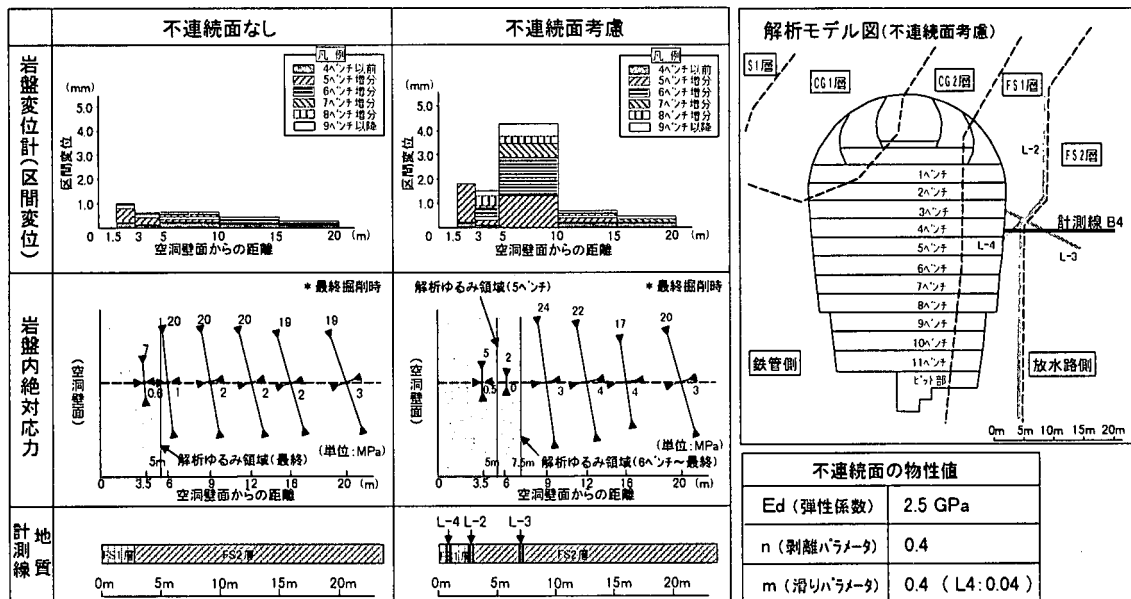


図-7 予測解析結果 (放水路側 4 ベンチ)

$E_d=2.5\text{GPa}$, 剥離パラメータ $n=0.4$, すべりパラメータ $m=0.04$ (L4 のみ) とした場合, ベンチ毎の区間変位分布, 岩盤内応力分布およびゆるみ領域の進展状況を概ねシミュレートすることができた (図-7)。このことから, 放水路側の不連続面による影響を再現しているものと考えられる。計測データより確認されたゆるみ領域は深度 7m 程度であり, 不連続面を考慮しない場合の予測に対して約 2m 深部に進展する結果となった。これは, 不連続面 L2, L3 が壁面近傍で剥離変形したことにより, 最小主応力 (空洞半径方向応力) が解放され, 背面の岩盤の一軸化が促進されたことによるものと考えられる。

5. おわりに

地下空洞掘削における不連続面を伴う周辺岩盤のゆるみ領域の進展状況について分析を行った結果を報告した。空洞背面に空洞軸方向と平行な不連続面が存在する場合のゆるみ領域の進展については, 不連続面の異方性を考慮したひずみ軟化解析によりほぼシミュレートできた。平行な不連続面による影響は, その剥離挙動に伴い最小主応力が解放され, 背面の岩盤の一軸化が促進することによりゆるみ領域が深部に進展することがわかった。また, ゆるみ領域の評価は, 不連続面の挙動が支配的な場合, 区間ひずみのみから評価することは困難であるため, 今回, 岩盤内絶対応力を測定し, AE 計測を日常管理化することでゆるみ領域の進展を監視したことは有意義であった。今後も空洞掘削時の挙動分析を行い, 大規模地下空洞の支保の最適化を追究していくこととしている。

参考文献

- 1) 前島俊雄; 森岡宏之; 森孝之; 青木謙治. 神流川地下発電所空洞掘削時の AE 測定による岩盤挙動の評価. 土木学会第 31 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集. 2001.1
- 2) 櫻井春輔; 谷河正也. 岩盤の不連続面の影響を考慮した大規模地下空洞の変位計測結果の逆解析. 土木学会論文集. 第 403 号/VI-10, 1989.3