

(73) 立坑掘削に伴う応力再配分とその数値解析

動力炉・核燃料開発事業団 ○吉岡尚也

動力炉・核燃料開発事業団 杉原弘造

(株) 大 林 組 木梨秀雄

(株) 大 林 組 畑 浩二

(株) 日本パブリック 井上 朗

A Study on Stress Redistribution in Rock Formation by Shaft Excavation

Hisaya YOSHIOKA Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

Kozo SUGIHARA Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation

Hideo KINASHI Obayashi Corporation

Koji HATA Obayashi Corporation

Akira INOUE Nihon Public Co.LTD

Abstract

An experimental and analytical study was carried out in order to evaluate stress redistribution of the sedimentary rock due to excavation of a shaft with a diameter of 6m and a depth of 150m. Stress variation in the rocks was measured using 8-element strain gauges embeded in two points around the shaft before excavation. An axisymmetric finite element analysis was conducted for comparison with the results of the measurements.

Following conclusions were obtained:

- 1) Stress in rocks tends to be drastically enlarged in a half of shaft diameter region apart from the shaft face.
- 2) Stability of underground space can be formed by the surrounding rock mass.

1. はじめに

乱されていない原位置岩盤には、自重等の作用により初期応力が存在する。このような初期応力を有した岩盤内に空洞を掘削すると、新たな力学的平衡状態に達しようとして空洞周辺の応力場が変化する。空洞周辺の初期応力場が変化していく現象を理解しておくことは、空洞の力学的な安定性を評価する上で有益な情報をもたらしてくれる。

Sauer ら(1981)は、空洞を掘削することにより2重、3重に応力集中帯のシェルが形成されることを現場計測およびモデル実験から確認している。石田ら(1991)も、空洞掘削時にひずみを計測することにより、応力集中帯と免圧帯が形成されることを確認している。これらの現場計測結果を総括すると、空洞が適切な支保設計のもとで掘削される場合の力学的な安定性は、空洞周辺の岩盤によって保たれているとも言える。

著者らは、堆積岩地山に仕上がり内径6m・深さ150mの立坑を掘削する際に、岩盤内のひずみを経時的に計測することにより空洞周辺の応力場が変化していく過程を把握することを試みた。また、FEMによる軸対称弾塑性解析を実施し、原位置計測結果との比較検討を行った。以下、これらの結果について報告する。

2. 調査地点の地質概要および室内試験結果

2.1 調査地点の地質概要

立坑掘削地点の地層は、下位から上位に向かって約7000万年前に貫入した基盤岩の土岐花崗岩、その上に約2000万年前に堆積した土岐夾炭累層、明世累層、生俵累層そして約500万年前に堆積した瀬戸層群から成

っている。土岐夾炭累層は、主に花崗岩起源の碎屑性レキ岩相、凝灰質砂岩相、炭質相からなる。明世累層は、凝灰質中粒～細粒砂岩よりなり、生俵累層は凝灰質シルト岩からなる。瀬戸層群は花崗岩およびチャートなどのレキ岩相が主体である。また、調査地点には、走向 N80° E、傾斜60° の月吉断層がある。この断層は、南側の地層が北側の地層の上に衝上している逆断層で、その垂直落差は30mという特徴を有している。月吉断層は立坑の掘削深度がG.L-120m付近に達した時点で現れる。

2.2 室内試験結果

立坑を掘削する前に、立坑中心部に調査ボーリングを行なった。この調査ボーリングで採取したコアを用いて一軸圧縮試験・透水試験などの室内試験を実施した。一軸圧縮強度については、最大が8.4MPa、最小が3MPaで、平均的には6MPaであった。透水係数については、最大が 10^{-7} cm/sのオーダー、最小が 10^{-10} cm/sのオーダーで、平均的には 10^{-8} cm/sのオーダーであった。

3. 計測方法

3.1 計測位置

計測は立坑壁面から半径方向への離れが2.06mで月吉断層の上層(G.L-106.5m)および下層(G.L-124m)の2 か所に埋設したひずみ計を介して行なった(図-1参照)。

3.2 計測機器

計測には電中研式地圧ゲージとして使用実績が多い埋設型多軸岩盤ひずみ計を用いた(金川他,1986)。このひずみ計には、図-2のように8 成分のひずみゲージがシステマティックに配置されている。

3.3 計測方法

計測は以下の手順で行なった。

1) 立坑を第2計測坑道の底盤レベルまで掘削し、さらにそのレベルで第2計測坑道(幅4.5m、高さ4.5mの幌型形状)を掘削した後、第2計測坑道から鉛直下向きのボーリング孔を2孔掘削する(図-1参照)。

2) 多軸岩盤ひずみ計を2つのボーリング孔にそれぞれ挿入し、ボーリング孔とひずみ計の間の空隙部分にはセメントモルタルを注入した。ひずみ計は図-2に示すNo.1ゲージが南北方向、No.2ゲージが東西方向となるように埋設した。

3) 第2計測坑道の底盤レベルから立坑未掘削部分が掘進される時、図-1に示すように先行埋設した多軸岩盤ひずみ計を介して、連続的にひずみを計測した。

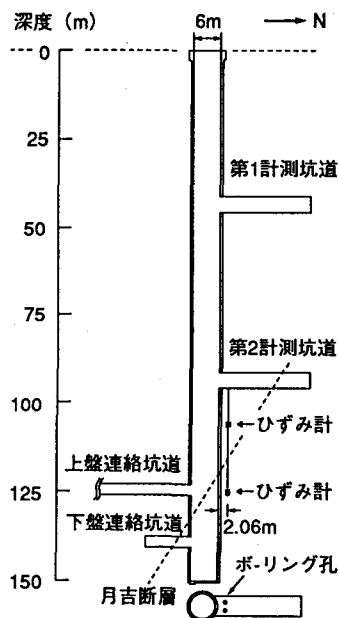


図-1 計測位置

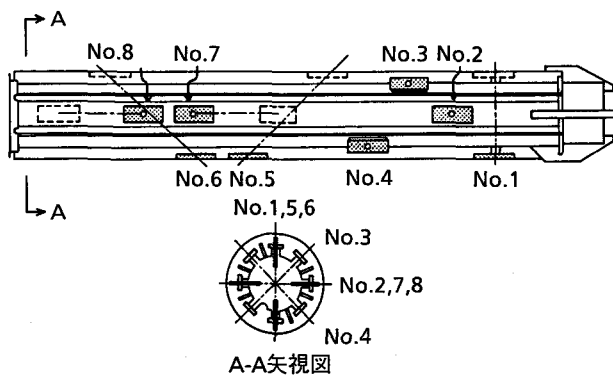


図-2 多軸岩盤ひずみ計におけるゲージ位置の概念図

4. 計測結果および数値解析

4.1 掘削に伴うひずみの変化

図-1の月吉断層の上側に埋設した多軸岩盤ひずみ計を介して立坑掘削中に計測したひずみのうち、No.1～No.4を立坑切羽位置との関係で示すと図-3のようになる。図の横軸は、漸次進行する立坑切羽位置を立坑直径 D で除し無次元化して整理したものであり、負符号は立坑切羽がひずみ計埋設レベルより手前にあることを意味している。縦軸のひずみは引張り側を正、圧縮側を負で表している。図-3より、立坑切羽がひずみ計の埋設レベルに到達する直前から各成分のひずみが急激に変化するが、その後は切羽の進行とともに平衡状態に至っていることがわかる。

つぎに、観測された8成分のひずみから立坑の半径・接線・掘進方向におけるひずみ成分 ϵ_r 、 ϵ_t 、 ϵ_z を求め、これらを立坑切羽位置の関係でプロットしたものが図-4である。図-4より、立坑切羽がひずみ計を埋設したレベルに到達する直前から、半径方向のひずみ ϵ_r は引張り側に、接線方向のひずみ ϵ_t は圧縮側に変化していくことがわかる。一方、掘進方向のひずみ ϵ_z はほとんど変化していない。このようなひずみの変化は、谷本ら(1982)が概念的に指摘している空洞壁面を空洞中心に引きずり込む掘削外力の作用によって生じたものと考えられる。

さらに、計測したひずみから主ひずみ ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 を算出し、その方向をウルフネット(上半球投影法)上にプロットすると図-5のようになる。ただし、引張りひずみを○印、圧縮ひずみを●印で示した。図-5において、例えば最大主ひずみ ϵ_1 の方向は、立坑切羽がひずみ計埋設レベルに到達する前には(-0.4Dの場合)、方位がほぼ南北方向で南から上向きに約60°の傾斜を有しているが、切羽の通過とともにこの最大主ひずみ ϵ_1 の方向が大きく変化していることがわかる。そして、切羽通過後はほとんど変化が見られず、最終的には最大主ひずみ ϵ_1 の方向は(+3Dの場合)、方位が北からほぼ20°で傾斜が20°程度となる。立坑壁面を立坑中心に引きずり込む掘削外力のもとで生じた主ひずみの方向は、図-1に示している月吉断層の影響を受けているものと考えられる。

4.2 FEMによる数値解析

立坑掘削に伴う周辺岩盤挙動の計測結果を理論的

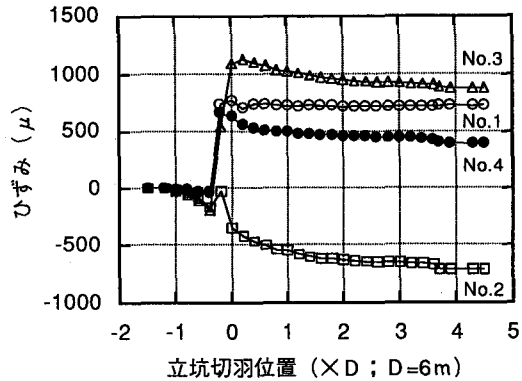


図-3 計測されたひずみと切羽位置の関係

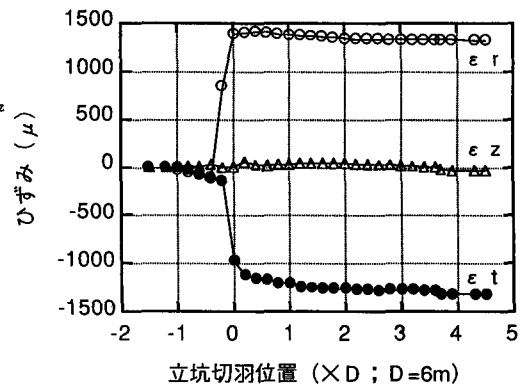


図-4 ひずみ成分と切羽位置の関係

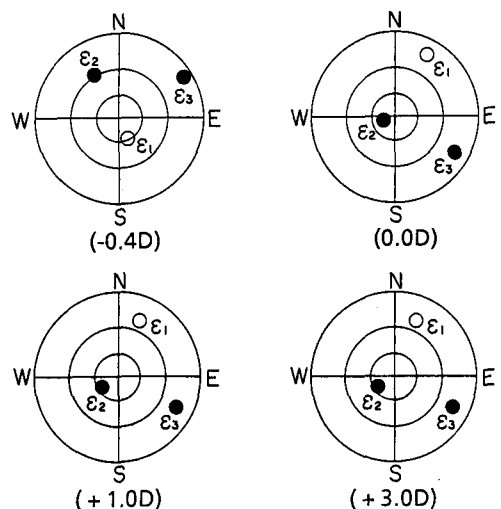


図-5 立坑掘削に伴う主ひずみ方向の変化

に解釈する目的で、FEM による弾塑性解析を実施した。解析は切羽の進行を考慮でき、しかも簡便に実施できる軸対称とした。降伏条件式にはDrucker-Pragerの規準を用いた。覆工コンクリートを考慮するために掘削毎に軸対称シェル要素を付加した。初期応力は側圧係数を1.0 とした自重解析により求めた。解析対象領域の岩盤および覆工コンクリートの入力物性値を表-1に示す。このうち岩盤の弾性係数は、多軸岩盤ひずみ計埋設位置周辺で行なった孔内載荷試験結果の平均的な値を用いた。ポアソン比と単位体積重量は室内試験結果より決めた。粘着力と内部摩擦角はBieniawski (1979) の岩盤分類に基づいて決めた。また、覆工コンクリートの弾性係数は、土屋(1985)の提唱する値を用いた。解析による立坑の半径・接線・軸方向のひずみ成分 ϵ_r 、 ϵ_t 、 ϵ_z を立坑切羽位置の関係でプロットすると図-6のようになる。解析結果(図-6)と計測結果(図-4)を比較すると、各ひずみ成分が変化していく傾向はよく一致していると言える。

つぎに、図-6に対応した応力成分 σ_r 、 σ_t 、 σ_z を切羽位置の関係で示すと、図-7のようになる。掘削外力の解放により半径方向には引張り応力が、接線方向には圧縮応力が生じるが、切羽の進行に伴って平衡状態に至っていることがわかる。

4.3 計測したひずみに基づく応力の変化

計測したひずみから、立坑切羽の進行に伴う応力場の変化過程を考察するために、Hooke 則により応力を算出した。計算に用いた弾性係数は、ひずみ計埋設位置周辺で実施した孔内載荷試験の結果に基づいて決めた。また、ポアソン比は0.3 とした。算出した立坑の半径・接線・軸方向における応力成分 σ_r 、 σ_t 、 σ_z を切羽位置の関係でプロットすると図-8、図-9のようになる。ただし、図-8は断層上側での応力変化を、図-9は断層下側での応力変化を示したものである。図-8に示した計測結果と図-7に示した解析結果を比較すると両者の傾向はおおむね一致していることがわかる。

図-9に示した断層下側での計測結果は、立坑切羽がひずみ計埋設レベルに到達するまでは断層上側における計測結果と同様な挙動をしている。しかしながら、切羽が計測位置を通過すると3成分の応力は圧縮側に転じ、図-7に示した解析結果とは異なる現象を示している。

表-1 入力物性値一覧

岩	単位体積重量 γ_R	15.7	kN/m ³
	側圧係数 K	1.0	
	弾性係数 E_R	1,086	MPa
	ポアソン比 ν_R	0.3	
	粘着力 c	0.3	MPa
盤	内部摩擦角 ϕ	0.52	rad.
覆工	弾性係数 E_c	3,333	MPa
	ポアソン比 ν_c	0.2	
	厚 さ t	0.4	m

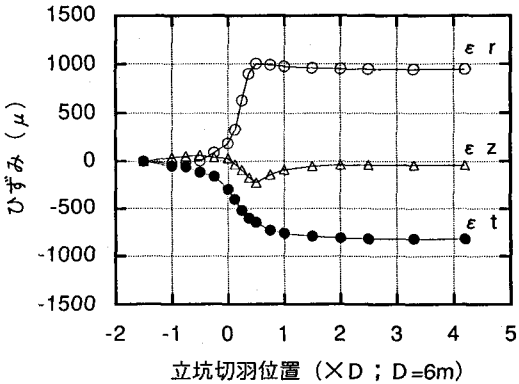


図-6 FEM によるひずみ計埋設位置のひずみの変化

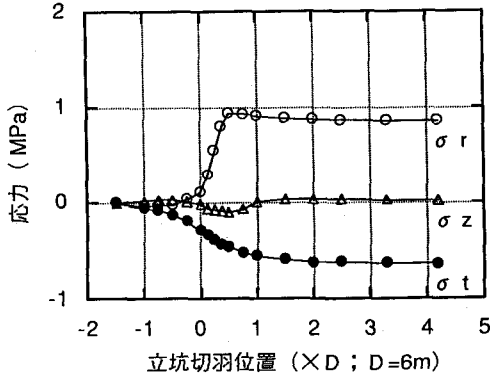


図-7 FEM によるひずみ計埋設位置の応力の変化

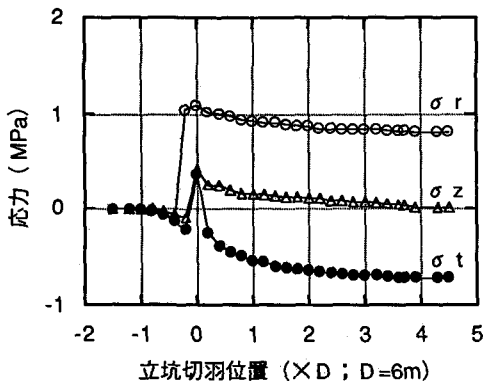


図-8 立坑掘削に伴う応力の変化(断層上側)

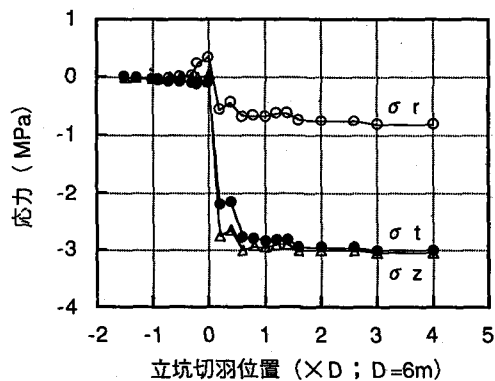


図-9 立坑掘削に伴う応力の変化(断層下側)

5. 考察

Sauer ら(1985)は、空洞周辺に複数の応力集中帯と免圧帯が交互に形成されることを確認しているが、断層下側での応力変化は空洞近傍に形成される応力集中帯に当たるものと考えられる。さらにSauer ら(1985)は、岩盤の不連続性が卓越するほど応力集中帯が顕著に現れることを指摘しているが、多軸岩盤ひずみ計を埋設したボーリング孔のコアを観察した結果、ひずみ計埋設位置周辺の平均的なき裂本数は断層の上側で1.4本/m、断層の下側で3.4本/mであったため、図-9に示した応力変化は岩盤の不連続性の影響を強く受けたものと考えることができる。このような現象は、FEM解析では求められていない。しかし、図-8に示したように、き裂頻度が1.4本/m程度の岩盤状態での応力変化は、連続体を仮定したFEM解析でシミュレーションでできることがわかった。

6. おわりに

空洞の力学的な安定性を評価することを目的として、原位置に先行埋設した多軸岩盤ひずみ計により、立坑掘削に伴う周辺岩盤における応力再配分過程の把握を試みた。今後は、再配分後の応力状態と空洞の長期安定性との関連性について検討していきたい。

参考文献

- 1) Sauer・谷本(1981)「応力測定と掘削による応力再配分過程」トンネルと地下 Vol.12-4 pp.57-64
- 2) 石田・金川・矢田・田仲(1990)「空洞掘削時の応力再配分に着目した岩盤ゆるみ域測定法の提案」第24回岩盤力学に関するシンポジウム講演概要集 pp.227-231
- 3) 金川・日比野・石田(1986)「オーバーコアリング法による3次元地圧計測法～埋設型8成分ゲージの開発～」電力中央研究所報告 385033
- 4) Bieniawski(1979)「The Geomechanics Classification in Rock Engineering Application」Proc.Int.Cong.on Rock Mechanics pp.41-48
- 5) 土屋(1985)「トンネル設計のための支保と地山物性値に関する研究」土木学会論文報告集 Vol.364 pp.31-40
- 6) 谷本・畠(1982)「切羽周辺での地山挙動を考慮したトンネル支保の基本概念」土木学会論文報告集 Vol.325 pp.93-106