

ショートステップ立坑の変形挙動に関する計測と解析

Measurements and Numerical Analysis of Deformation of Deep Shaft
excavated by Short Step Sinking Method

延藤 遵¹・福田和寛²・佐藤稔紀³・黒田英高⁴

Jun Nobuto, Kazuhiro Fukuda, Toshinori Sato and Hidetaka Kuroda

¹正会員 工修 清水建設株式会社 土木技術本部 技術第二部
(〒105-8007東京都港区芝浦一丁目2-3) E-mail: nobuto@shimz.co.jp

²正会員 工博 清水建設株式会社 土木技術本部 技術第二部
(〒105-8007東京都港区芝浦一丁目2-3) E-mail: k-fukuda@shimz.co.jp

³正会員 工博 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
(〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64) E-mail: sato.toshinori@jaea.go.jp

⁴正会員 工修 日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門
(〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64) E-mail: kuroda.hidetaka@jaea.go.jp

The Mizunami Underground Research Laboratory is now under construction in order to build a firm scientific and technological basis for geological disposal. In this paper, we examine the mechanical behavior of shaft excavated by the short step sinking method, as part of the researches to verify the applicability of engineering technologies. Concretely, the deformation behavior during shaft excavation is analyzed with FEM to estimate the deformation and stress state of rock mass and concrete lining support. Next, we actually measure rock mass deformation around the shaft and compare them with the FEM analysis results. In addition, we apply the inverse analysis method to short step sinking in order to understand the shaft behavior better, and finally summarize the technological issues to enhance the accuracy of inverse analysis method.

Key Words : underground research laboratory, shaft, short step sinking, mechanism of deformation

1. はじめに

岐阜県瑞浪市で行われている日本原子力研究開発機構の瑞浪超深地層研究所における建設工事は、地層処分技術に関する研究開発の一環として実施されるもので、現在進めている立坑建設は、深度1,000mに達する立坑掘削という、土木分野の工事としては、世界的にも数少ない大深度の立坑建設工事である。この工事から得られる工学的データを記録し、分析することで、将来の処分場建設のみならず、他の大深度掘削工事に対しても、有用な資料を提供できるものと考えている。

同建設工事では、切羽を掘削後順次コンクリート覆工で巻き立てていくショートステップ工法が採用されており、同工法は立坑掘削工法として安全性に優れているため、立坑の一般的工法となっている（以下、ショートステップ工法で掘削する立坑をショートステップ立坑と称す）。本報ではこのショー

トステップ立坑における変形メカニズムを理解するために、覆工コンクリートが存在し、ゆるみの生じる地山における立坑切羽付近の岩盤と覆工コンクリートの力学挙動を予備的に解析し、その特徴を調べた。また、現場計測で、立坑切羽付近の各種挙動を計測し、その結果と予備解析結果の比較検討を行った。さらに、平面ひずみによる逆解析を試行し、ショートステップ立坑に対する適用性についても考察した。

2. 工事概要

(1) 施工方法

現在、瑞浪超深地層研究所で掘削している立坑は、主立坑と換気立坑の2本である。断面形状は円形で、仕様・寸法は表-1に示すとおりである。次に、立坑一般部の施工フローを図-1に示す。掘削と覆工のサイクルは、1.3mの発破を2回繰り返した後、

2.6mの覆工コンクリートを打設するパターンとして
いる。

表-1 立坑の概要

	主立坑	換気立坑
深度 (m)	1,025	1,010
内径 (m)	6.5	4.5
掘削径 (m)	7.3	5.3
覆工厚さ (m)	0.4	

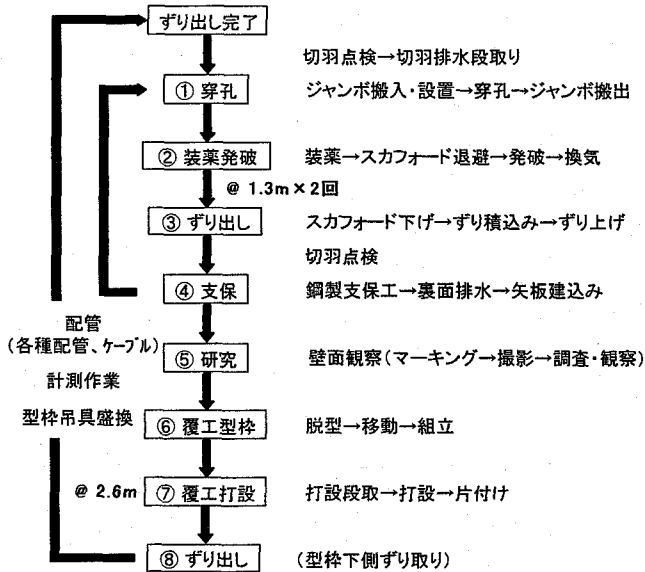


図-1 立坑一般部施工フロー

削孔はシャフトジャンボで行い、立坑の切羽には削孔水、湧水が溜まると考え、非電気式雷管と含水爆薬を使用している。掘削ずりは、ずりキブルを用いて上部に巻き上げることで坑外に搬出する。次に、裏面排水材を取り付け、必要に応じて鋼製支保工、矢板の建込みを行い、覆工前に坑壁の地質観察を行う。覆工コンクリートは、セントルを脱型、移動、セットした後、現場プラントで製造したコンクリートをコンクリートキブルで搬入し、スcaffolding上のコンクリートシュートに投入して打設する。

(2)地質概況

立坑周辺の地質は、深度約180m以深に中生代白亜紀の花崗岩が分布し、これを覆い新第三紀堆積岩が広がっている。以下の予備解析で使用した地質モデル(周辺ボーリングデータに基づき設定)を図-2に示す。

3. 予備解析による検討

(1) 解析の目的

瑞浪超深地層研究所の2本の立坑(主立坑、換気立坑)を対象に、ショートステップ工法による立坑

掘削の力学解析を実施することで、立坑の基本的な変形挙動を把握する。さらに、パラメータスタディを実施し、岩盤の塑性化、発破損傷領域及び覆工コンクリートの存在が、立坑の全体挙動に与える影響度合を把握する。

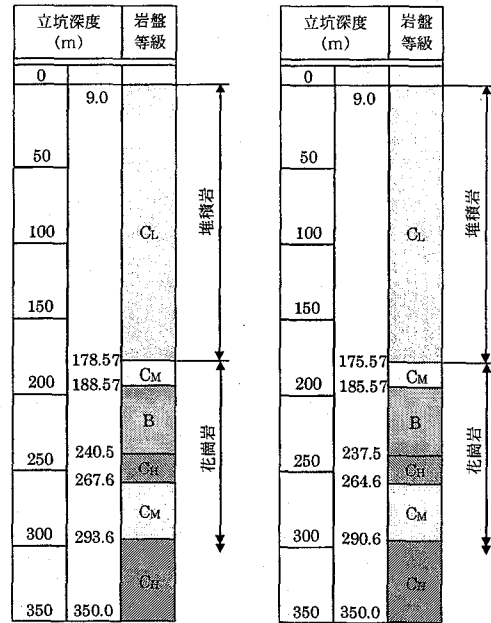


図-2 地質モデル(左:主立坑, 右:換気立坑)

(2) 解析方法

解析は、軸対称弾塑性モデルによる逐次掘削解析とした。解析対象深度は、B計測(表-4参照)を実施する75m, 150m, 250mの3深度とした。また、図-3に示すように1掘削ステップを2.6mとし、解析対象深度を中心とした上下各々5STEPとその上下30mを解析範囲とし、上下5STEPについては掘削の進展を逐次掘削解析により正確に模擬した。地山条件は、深度75mと150mは堆積岩(C_L級)、250mは花崗岩(C_H級)に相当ししており、これらの岩盤物性を表-2に示す。また、発破損傷領域については東濃鉱山における杉原らの研究²⁾を参考に、変形係数、粘着力を健岩部の25%に、範囲を掘削面から1.0m(側壁および切羽前方)に設定した。覆工コンクリートは設計基準強度24N/mm²の早強ポルトランドセメントであり、その弾性係数については切羽の進行に伴う時間硬化を考慮して土木学会式³⁾により算出した。さら

表-2 岩盤(健岩部)物性値

岩種	岩級	変形係数 (GPa)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)	粘着力 (MN/m ²)	内部摩擦角 (°)
堆積岩	C _L	1.90	0.3	19.5	2.18	18.8
	C _M	24.5	0.35	26.0	10.3	53.9
花崗岩	C _H	30.1	0.35	26.0	14.6	53.9
	B	35.6	0.35	26.0	18.9	53.9

に、実際の施工を考慮して覆工コンクリート下端と切羽面の間に20cmの空きを考慮した。

解析ケースは、基本ケースに加えて、岩盤の塑性化、発破損傷領域及び覆工コンクリートの存在による影響を把握するために、表-3に示す9ケースとした。

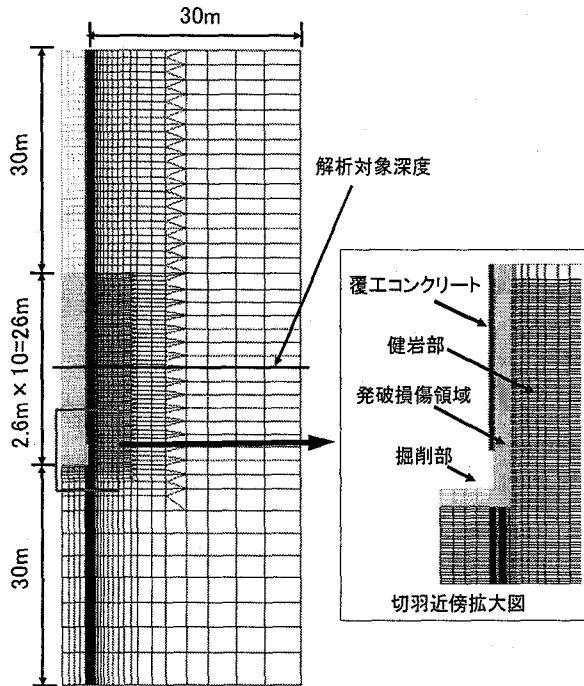


図-3 全体解析モデル(主立坑の例)

表-3 予備解析の解析ケース

対象深度	岩盤物性	発破損傷領域	覆工コンクリート	備考
75m (堆積岩)	弾塑性	考慮	考慮	基本ケース
	弾塑性	考慮	考慮せず	比較用
	弾性	考慮せず	考慮せず	比較用
150m (堆積岩)	弾塑性	考慮	考慮	基本ケース
	弾塑性	考慮	考慮せず	比較用
	弾性	考慮せず	考慮せず	比較用
250m (花崗岩)	弾塑性	考慮	考慮	基本ケース
	弾塑性	考慮	考慮せず	比較用
	弾性	考慮せず	考慮せず	比較用

(4) 解析結果

覆工コンクリート挙動に関し、2スパン分の覆工(5.2m)について覆工コンクリート周方向応力を変形図に重ねて図-4(基本ケース)に示す。覆工コンクリートに発生する応力は深度150mケース(堆積岩)で最大となり、以下75m(堆積岩)、250m(花崗岩)の順となっている。また、覆工コンクリート1リング中における変形量は、上端から下端にむけて増大しているため、覆工コンクリート応力も下端部において最大となり上端で最小となっている。

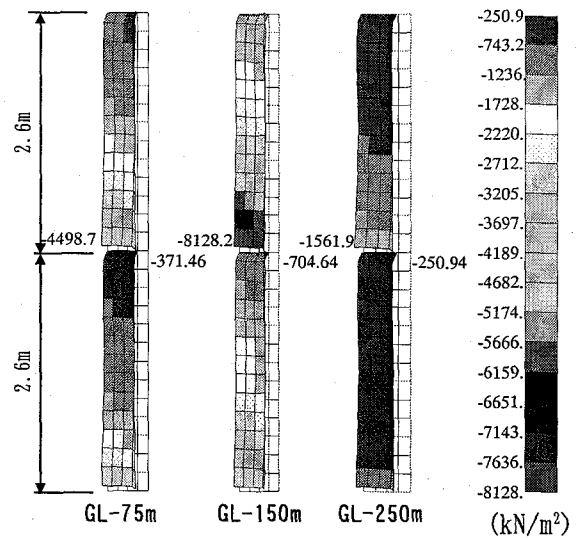


図-4 覆工コンクリート周方向応力(主立坑の例)

壁面変位について、図-5に壁面変位と立坑深度の関係を示す。同図より、堆積岩部(GL-150m)においては、弾塑性/発破損傷領域考慮/覆工有の場合の最終壁面変位は約7.5mmであるが、花崗岩部(GL-250m)のケースでは花崗岩の剛性が高いため、変位量の絶対値そのものが約1.0mmと大幅に小さくなっていることが分かる。また、堆積岩部においては、発破損傷領域の影響により変位が30~40%増大するが、覆工コンクリートの存在により覆工コンクリート打設以降において壁面変位が抑制されていることがわかる。一方、花崗岩部においては、発破損傷領

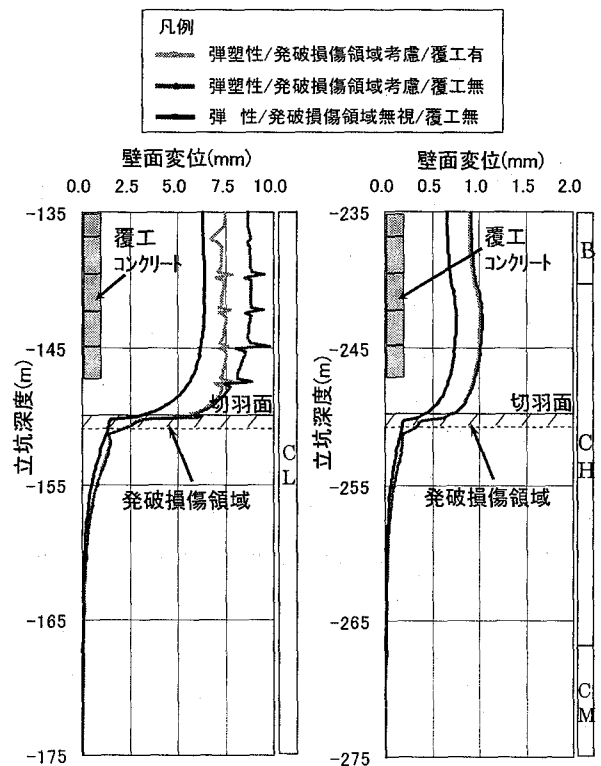


図-5 壁面変位と立坑深度の関係(主立坑の例)
(左:GL-150m, 右:GL-250m)

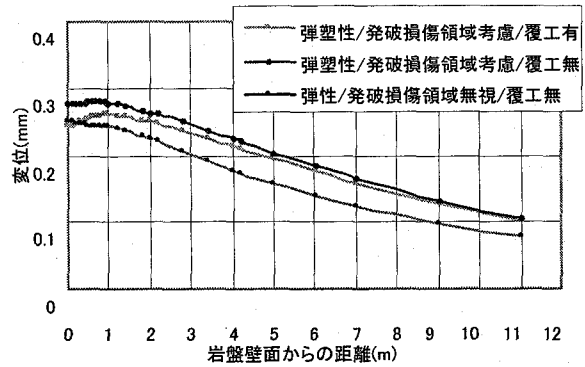
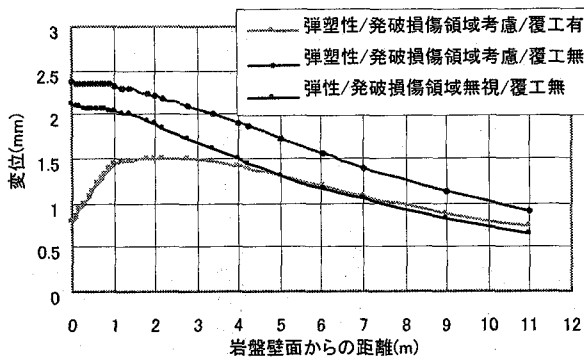


図-6 地中変位分布(主立坑の例, 左:GL-150m, 右:GL-250m)

域の影響で変位が増大するものの、堆積岩部にみられるような覆工コンクリートによる変位抑制効果は小さいことが分かる。

なお、GL-250mのケースにおいて240m以浅で変位が低下しているのは同レベル以浅においてB級岩盤が存在していることによる。

図-6に立坑半径方向の地中変位分布を示す。これは、変位計設置時からの増分変位を示しており、後述する地中変位計(図-7)で測定される変位量に相当する。堆積岩部(GL-150m)においては覆工コンクリートの影響を受けて壁面近傍において地中変位が抑制されており、特に発破損傷領域(壁面から1m)においてこの影響は顕著である。一方、花崗岩部(GL-250m)においては、地中変位は覆工コンクリートの影響をあまり受けていない。特に、壁面から離れた地中内部のデータについてはこの傾向は顕著である。

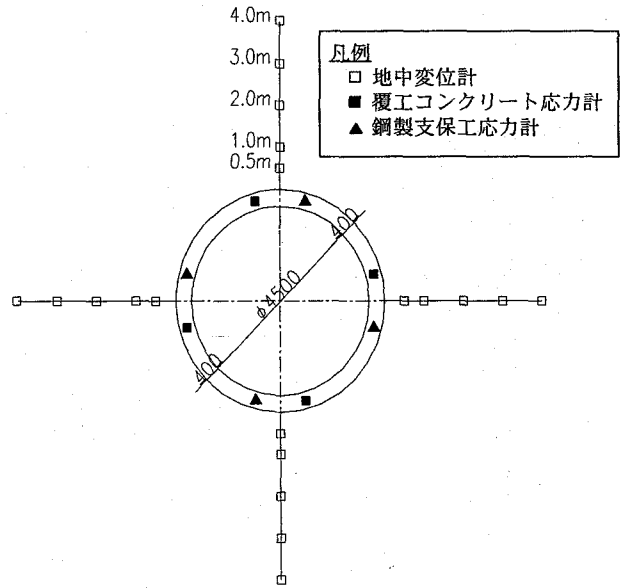


図-7 計測機器の配置(換気立坑、GL-80mの場合)

4. 変形挙動の計測

(1) 計測項目

立坑一般部におけるB計測の計測項目を表-4に示す。また、主な計測機器の配置を図-7に示す。なお、計測深度については、施工条件及び岩盤状況を考慮して、当初予定していた深度(GL-75m, GL-150m)から若干下方にずらしている(GL-80m, GL-160m)。

また、主立坑においては、立坑を鉛直方向の断層が貫通していたため、断層の影響により立坑掘削時の挙動が複雑になっていることが予想された。そこで、ショートステップ工法における基本的な変形挙動を検討するための対象としては適していないものと考え、以下には換気立坑における結果のみを示す。

表-4 立坑一般部の計測項目

	計測項目	測定深度
B計測	地中変位測定	80m, 160m
	覆工コンクリート応力測定	80m, 160m
	鋼製支保工応力測定	80m, 160m

(2) 計測結果と予備解析結果の比較

a) 覆工応力・鋼製支保工応力

表-5に換気立坑における覆工応力・鋼製支保工応力の計測結果と設計値との比較を示す。工事着手前に行った事前設計、修正設計では、周辺のポーリング調査結果に基づき岩級を想定し、ともに平面ひずみモデルにより応力解放率80%と設定して解析を実施している。また、事前設計では地圧の側圧比を2.0、修正設計では地圧の側圧比を1.2とし、初期地圧の異方性を考慮している。一方、予備解析においては、修正設計と同じ岩級を設定し(図-2参照)、軸対称モデルによる逐次解析を実施している。計測データと設計値を比較すると、実際の地盤条件は事前の想定よりも幾分悪かったにもかかわらず、GL-80m, GL-160mともに、計測結果の値は事前、修正設計の値に比べて小さい値が得られており、予備解析結果の値が最も近いことがわかる。これは、初期地圧の異方性に加えて、検討モデルによる違いによる影響が考えられる。設計においては平面ひずみモデルが用いられているが、実際の変形挙動は3次元的

であり、応力解放率、覆工剛性の仮定の違い等により覆工に作用する荷重が小さくなったためと推定される。

表-5 設計と計測結果の比較
(覆工・鋼製支保工応力)

測定深度		事前設計	修正設計	予備解析	計測結果
80m	岩級	D級	CL級	CL級	CL級
	覆工コンクリート応力 (N/mm ²)	6.2	1.4	0.8	0.48
	鋼製支保工縁応力 (N/mm ²)	88.0	52.5	-	36.3
160m	岩級	CL級	CL級	CL級	CL級
	覆工コンクリート応力 (N/mm ²)	7.8	2.8	1.6	1.51
	鋼製支保工縁応力 (N/mm ²)	99.6	100.8	-	20.5

b) 地中変位

図-8に、換気立坑のGL-80m, GL-160mにおける地中変位計測結果の一例と予備解析結果の比較を示す。同図より、予測解析結果と同様に、実際の計測結果においても地中変位の値が壁面付近で頭打ちになっている状況が読み取れる。すなわち、覆工コンクリートの影響を受けて、特に発破損傷領域において、地中変位が抑制されているものと考えられる。この現象は、ショートステップ立坑の力学的特徴と考えられ、解析結果と実際の計測結果を比較することで明らかにすることができた。

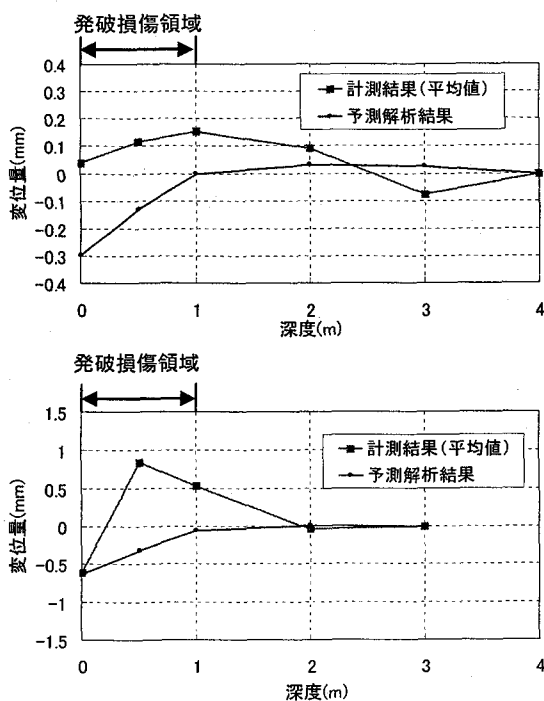


図-8 地中変位の設計と計測結果の比較
(上:GL-80m, 下:GL-160m)

5. 逆解析の適用性に関する検討

(1) 逆解析手法の概要

逆解析手法は、「結果」から「原因」を推定する手法として工学・理学の様々な分野で応用されている。トンネルや岩盤空洞の分野においても、内空変位、天端沈下、地中変位等の計測結果を利用して当初設計の妥当性を確認し、適宜設計の修正を実施する情報化施工のツールの一つとして、逆解析手法が用いられることがある。特に、NATM工法における掘削工事においては、その適用事例は豊富であり、線状構造物であるトンネルにおいては、岩盤ひずみを指標とした平面ひずみモデルによる逆解析手法が一般的に用いられている。一方、ショートステップ立坑は、NATM工法と異なり剛性の高い覆工コンクリートが打設されるため、平面ひずみモデルによる逆解析手法についてはその適用性が懸念される。そこで、掘削時メカニズムの解明を目的として、ショートステップ立坑の変形挙動に対して逆解析を適用し、その掘削時挙動の再現を試みた。

岩盤の変形係数を同定する逆解析は、理論解を用いる方法と数値解析を用いる方法がある。一般に、平面ひずみ状態の仮定の下に、地盤に作用する地圧や地盤内の変形係数が共に等方的（立坑軸を中心とした軸対称）と仮定できるときは理論解を用い、地圧・変形係数の両方、或いは一方が等方的であると見なせないときは数値解析が用いられる。

まず、解析がより容易な理論解による逆解析を行ったが、地圧の等方性の仮定に無理があり、地盤の変形係数を同定することができなかった。よって、数値解析によるパラメータスタディーにより逆解析を行うこととした。

モデルは、3層（健岩部、発破損傷領域、覆工コンクリート）からなる換気立坑の同心円モデル(図-9参照)である。また、図-10に逆解析の流れを示す。

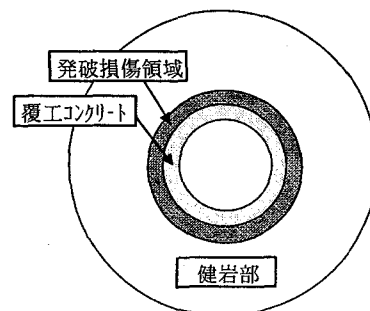


図-9 換気立坑を対象とした同心円モデル

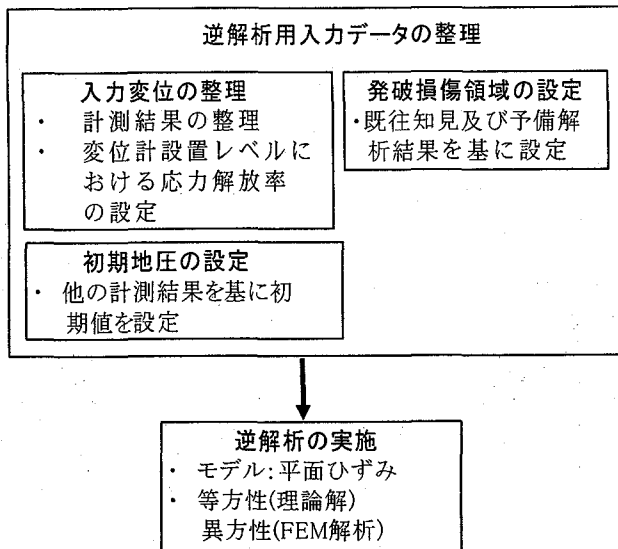


図-10 逆解析手法のフロー

なお、今回実施した逆解析は、断層の影響のない換気立坑を対象とした。また、換気立坑においては、GL-160m付近の岩盤が礫岩であった上に、多量の湧水の影響、さらに計測機器が一度水没したため精度の高い計測結果が得られなかった。そこで、以下においてはGL-80mにおける計測データを検討対象とした。

(2) 数値解析による解析方法

数値解析による逆解析では二次元平面ひずみ条件の逆解析プログラムDBAP (Direct Back Analysis Program) ⁴⁾を用いた。このプログラムは、地下空洞掘削時の現場計測データから周辺地山のひずみ分布を推定し、地山の安定性を評価するものである。本プログラムでは、変位計測データから空洞周辺の材料定数、および地山の初期応力を逆問題として求める。今回は、地山は等方均質な弾性体とし、ポアソン比は既知として仮定した。また、初期応力は異方性を有する地圧が、空洞掘削断面内で一様に作用しているものと仮定した。入力する地中変位は4方向の計測結果ならびに、4方向の平均値の2種類を用いた。解析には図-11に示す25m×25mのモデルを使用した。

計算条件については、別途計測した初期地圧測定結果⁵⁾に基づいて繰返し計算開始時の初期地圧を3.9MPaに設定し、岩盤のポアソン比は健岩部、発破損傷領域ともに0.3で固定、応力解放率は85% (岩盤のみをモデル化し、別途実施したFEM弾性解析結果により設定) 及び94.5% (予備解析結果より設定) に設定した。発破損傷領域は1mとし、発破損傷領域の健岩部に対する変形係数低減率を25%と40% (参考

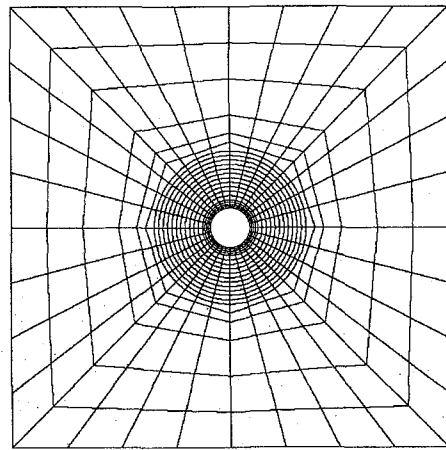


図-11 FEMによる逆解析モデル

文献6)より設定)の2種類に固定した。覆工コンクリートの弾性係数比は健岩部の860% (コンクリート材齢19日に相当)と460% (同材齢1日に相当)に設定し、コンクリートのポアソン比を0.17に固定した。

(3) 解析結果と計測結果の比較

換気立坑のGL-80mにおける解析結果を表-6に、計測した地中変位データと解析結果(ケース11)の比較図を図-12に示す。

地中変位計測結果をそのまま用いたケース1~8では、初期応力が大きな異方性を示し、最小主応力が負となるケースも現れた。これは計測値に大きなばらつきがあるためと考えられるため、計測値の平均値を4方向に入力して再計算した。(ケース9~11)。ケース11では、弾性係数は予備解析の値にかなり近くなり、初期地圧も現実的な値となった。すなわち、GL-80mの地中変位計の計測データはオーダーとして正常なものであり、計測データから今回のような逆解析を行うことで、ショートステップ立坑においても岩盤全体の弾性係数をある程度は推定出来ることがわかった。

しかしながら、応力解放率の設定値により岩盤弾性係数等の算定結果は大きく変わる結果となっており、解の信頼性に疑問が残る。特に、ショートステップ工法においては、覆工コンクリート剛性が高いため、同心円モデルの構造が覆工打設により2層構造(発破損傷領域、健岩部)から3層構造(覆工コンクリート、発破損傷領域、健岩部)へ変化するため、本質的に応力解放率の設定が難しいという問題点が存在する。特に覆工コンクリートに比べて岩盤の弾性係数が小さい軟岩においてこの傾向が顕著であると推定される。

表-6 FEMによる逆解析結果

解析ケース	入力データ			解析結果			
	地中変位	コンクリートの弾性係数比	ゆるみ領域弾性係数比	応力解放率	健岩部弾性係数 (MPa)	初期地圧 (最大、最小主応力) (MPa)	
1	計測結果	860%	25%	85%	4782	5.06、 3.06	
2		860%	40%		2173	4.12、 0.19	
3		460%	25%		3697	4.10、 -0.11	
4		460%	40%		1786	4.53、 -2.21	
5		計測結果の平均値	860%	25%	94.5%	1668	4.61、 3.12
6			860%	40%		779	4.14、 0.07
7			460%	25%		1298	4.15、 -0.31
8			460%	40%		641	4.54、 -2.27
9	計測結果の平均値	860%	40%	85%	3776	3.77、 3.65	
10		460%	40%		5685	3.79、 3.53	
11		860%	25%		94.5%	1610	3.77、 3.66

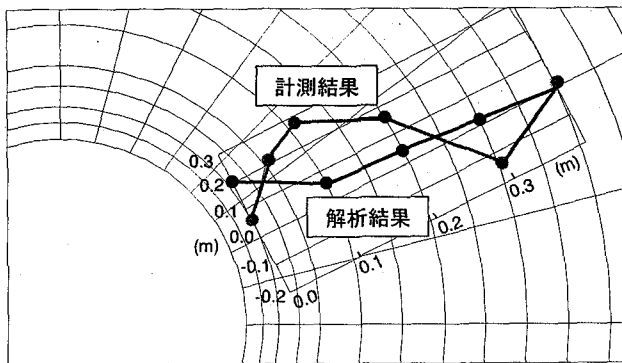


図-12 地中変位の解析結果と計測結果の比較

さらに、図-12に示す覆工近傍の地中変位に着目すると、発破損傷領域の変形挙動（計測結果）が今回の逆解析では再現ができていないことがわかる。これは、DBAPにおいては岩盤を弾性状態と仮定し、平面ひずみ問題としているが、実際は、切羽近傍は塑性化しているものと考えられること、さらにショートステップ工法においては覆工コンクリートの剛性の影響が大きいため深度方向で変形挙動が変わる3次元挙動を示すことに起因していると考えられる。このため、掘削時挙動を細部にわたり正確に再現するためには、順解析（軸対称逐次掘削解析）によるパラメータスタディを組み合わせる等の更なる工夫が必要と考えられる。

また、再現解析の精度向上のためには、先行変位を計測し正確な応力解放率を把握すること、覆工コンクリートの上下方向の変形挙動の違いを把握するために覆工コンクリート上中下の3地点における覆

工コンクリートひずみ（或いは、覆工コンクリート応力）を測定することが必要と考えられる。さらに、今後は硬質な花崗岩部の掘削となり地中変位の絶対値そのものが小さくなることを考慮すると、極力地中変位計の不動点を地中深部に設置し、高精度で地中変位を測定することが望ましいと言える。

6. まとめ

ショートステップ工法による立坑工事は、近年その適用実績が減少しているため、掘削時の力学的挙動について解析・計測した実績は極めて少ない。同工法は、剛性の高い覆工コンクリートを掘削後順次巻き立てていくため、本質的に安全性に優れていると考えられるが、放射性廃棄物処分のような大深度掘削工事に適用する場合には、そのメカニズムを解明しておくことが、安全性の確保及び経済的な設計という観点から重要であると言える。本報においては、まずFEM逐次掘削解析によりその力学的挙動を予測し、次に掘削時に計測工を実施し、両者を比較検討した。その結果、堆積岩のような軟岩においては、発破損傷領域の変位が覆工コンクリートにより抑制される現象が計測された。次に、変形挙動の理解を深める目的で、平面ひずみモデルを仮定した逆解析手法の適用を試みた。その結果、全体的な変形については適用性は確認されたが、覆工近傍の掘削損傷領域の挙動については再現することは出来なかった。これは、ショートステップ立坑は、深度方向に変形挙動が変わる3次元挙動を示すことに起因しているものと考えられる。今後は、以下に示す計測を実施し、平面ひずみモデルによる逆解析手法により岩盤の全体的な変形係数を同定し、さらに順解析によるパラメータスタディを実施することで3次元挙動を再現出来るのではないかと考えている。

- ・ 先行変位の計測
- ・ 覆工コンクリートひずみ（応力）の計測
- ・ 精度の高い地中変位の計測

上記に述べたショートステップ立坑のメカニズム解明のための再現解析の流れを図-13にまとめて示す。

なお、今回の検討は、計画段階では主にGL-160mの計測結果を利用して、図-13に示す逆解析及び順解析によるパラメータスタディを実施する予定であったため、覆工コンクリートのひずみ計等を同レベルに集中的に設置した。しかしながら、岩盤条件（礫岩層）や多量の湧水の影響により精度の高い計測結果が得られなかった。今後は先進ボーリング等

により前方の地質条件を把握し、計測に対して望ましい岩盤条件及び湧水条件を有する深度レベルを特定し、掘削時の変形挙動を計測し計測結果を分析することが、ショートステップ立坑のメカニズム解明に対して必要であると考えている。

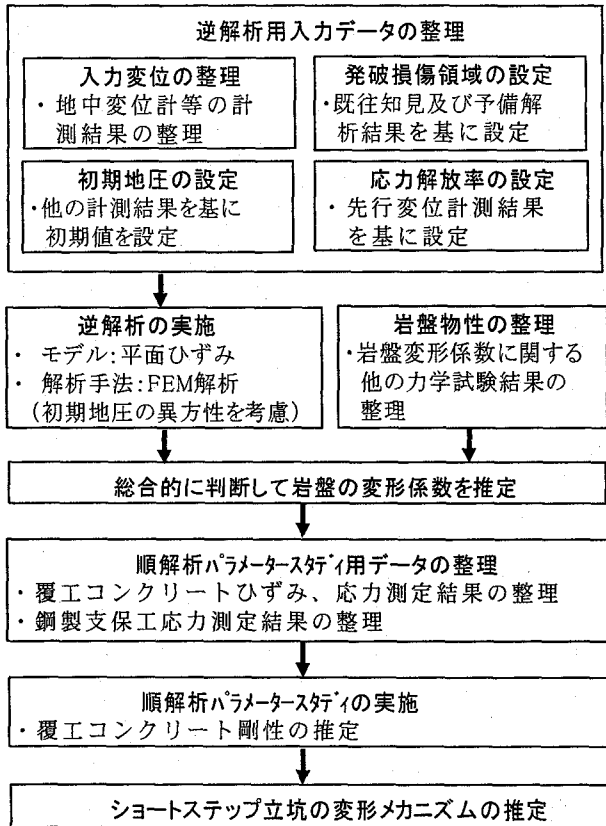


図-13 変形挙動のメカニズム解明のための再現解析フロー案

参考文献

- 1) 佐藤稔紀, 今津雅紀, 鈴木隆, 横井幹仁 (2004): “超深地層研究所計画における施設設計・建設工事の現状-研究坑道掘削に伴う計測のための事前解析-”, 土木学会第59回年次学術講演会
- 2) 杉原弘造, 亀村勝美, 二宮康郎 (1998): “堆積軟岩での発破による掘削影響の現場計測に基づく検討”, 土木学会論文集, No. 589, III-42, pp. 239-251
- 3) 土木学会 (2002): “コンクリート標準示方書, 施工編”, pp. 52-53
- 4) 地盤工学会 (2000): “地盤技術者のための情報化設計と施工入門”, 入門シリーズNo. 26
- 5) ジオテクノス株式会社 (2004): MIZ-1号孔における水圧破碎試験, 核燃料サイクル開発機構 公開資料
- 6) トンネル技術協会 (1982): トンネル掘削によるゆるみ領域の調査報告書 (関西電力株式会社委託)