

検証－実務における逆解析－

Verification – Back Analysis in Practice–

岩盤力学における逆解析に関する研究小委員会

Commission on Back Analysis in Rock Mechanics

1. はじめに

逆解析を現場計測結果の評価に利用することが考えられて 20 年近くが経過した。逆解析の概念や方法はそれ以前にも見られるが、1980 年代に導入された逆解析の意義は、力学解析を通して現場計測結果を評価・解釈し、設計・施工に反映させることを目的としたことにある。より積極的にいえば、逆解析は、調査、試験、設計、施工、計測などの岩盤構造物建設に関わる個々の要素技術を互いに連結し、一連の流れに一貫性をもたらす方法として発展してきた。そして、今日では多くの適用実績を通して、観測化施工あるいは情報化設計・施工を実現するための一つの方法として広く理解されるようになった。事実、土木学会や地盤工学会でも逆解析に関する委員会が複数活動し、研究論文だけでなく解説書や実務書においてもその方法や適用例が数多く取り上げられている。しかし、いまなお、「逆解析は役に立つ」、あるいは、「逆解析は役に立たない」という意見が合い半ばのように思える。

本委員会では、これまでの 20 年の間に発展してきた岩盤工学における逆解析を、実務における適用を通して、その有効性を検証し、それと同時に、問題点の所在を明確にし今後の課題と展望を与えようと考えている。事例分析に基づく検証や課題抽出は、トンネル、大規模地下空洞、斜面の 3 つのワーキンググループで検討しているが、いずれのグループも、逆解析の特徴を踏まえた共通の視点（本文 2、図－1 参照）から作業を行っている。

今回のパネルディスカッションでは、逆解析が役に立った事例はどのような点が優れていたのか、逆解析を適用したが十分な成果が得られなかった事例はどこに問題があったのか、有効性と適用限界、今後の課題と期待など、活発な意見交換ができればと考えている。本文は、議論の呼び水となるような話題を提供するために取りまとめた。構成は以下のようである。

1. はじめに
2. 逆解析適用事例の検証の視点
3. トンネルにおける逆解析
 3. 1 事例分析のとりまとめ
 3. 2 現場での有効活用の課題と対応について
4. 大規模地下空洞における逆解析
 4. 1 逆解析の適用事例分析結果の概要
 4. 2 掘削時の挙動評価における適用事例
5. 斜面における逆解析
6. 委員会での議論の紹介
7. むすび

2. 逆解析適用事例の検証の視点

岩盤力学・工学における逆解析の適用例を整理するにあたっては、その目的、手法、入力情報、出力情報、仮定などを明確にしておく必要がある。複雑な解析モデルを用いて、その主要パラメータを計測変位から求めるのも逆解析である。また、たとえば、トンネルの場合、トンネル切羽の変位速度を観測し、危険とした場合に早急な切羽支保を施工する決断をするのも広義の逆解析といえよう。このような事から、逆解析の適用例を整理する際の視点を整理し、どのような形で知識を積み上げ、経験を共有・比較していけるかを検討するためには何らかのガイドラインが必要となる。

図-1 にそのガイドラインとなる「逆解析プロジェクトのチェックポイントリスト」を示す。これはひとつの逆解析プロジェクトが、どのような形で行われたかを明確に描写することを目的として考えたリストである。図-1 から分かるように、逆解析手法が適用される際にはその目的、手法、適用条件など、様々な要因が存在し、その成果を整理する際においても十分な注意が必要である。

- 逆解析の目的について
 - 何を知るために逆解析を行ったか？
 - 施工管理にどのように役立てるつもりであったか？
- 計測について
 - 何をどのように計測したか？
 - 計測方法は結果の評価方法と関連付けて決定されているか？
 - どのデータがどのように活用されたか？
 - 結局活用されなかったデータはあったか？
 - あとで「測っておけば良かった」というようなデータはあったか？
 - 計測から得られた知見は何か？
 - いつから（どの時点から）計測したか？
 - 誰が逆解析をおこなったのか？
 - 逆解析にどれくらいの時間がかかったのか？
- 地山変形挙動の特性について
 - 基本的にどのような挙動特性を有する地山であるか？（弾性、塑性、時間依存、局所化など）
- 逆解析の手法について
 - どのような手法を用いたか？
 - 計測データの誤差を考慮しているか？
- 逆解析の問題設定について
 - 問題設定の基本方針
 - モデル化においてどのような仮定（簡略化）をしているか？
 - 必要な入力情報はあったか？
 - 何が未知数となっているか？
- 逆解析結果の評価について
 - 直接の出力結果は何か？
 - 逆解析結果は実挙動に合っているか？
 - その結果をどのように活用しているか？
 - その結果は以後の掘削過程の予測に使われているか？
 - その結果は一度得られるとそのまま用いるか、それとも更新されるものか？
- 結果の信頼性は評価されているか？
- 結果は満足できるものであったか？
- 当初の目的は達成されたと思われるか？
- 計測から得られた知見は何か？
- 実現象の理解に役だったか？
- 施工管理における基準値の設定について
 - 何を基準値としたか？また、値の設定における根拠は？
 - 限界ひずみをどう考えるか？
 - 基準値の設定と逆解析の適用は合理的に統括されていたか？
 - 挙動計測結果によって基準値が変更されたか？それはどのような根拠で変更されたか？
- 達成されたことについて
 - まとめとして、達成された事はなにか？
 - その結果は検証できているか？
- 達成されなかった事について
 - 達成されなかった事はなにか？
 - それはなぜ達成されなかったのか？
 - 本当は知る必要があるが、実は分かっていることがあるとすればそれは何か？
 - なぜ、それが分からないことになっているのか？
 - どうすればそれがわかるようになるか？
- 岩盤構造物（トンネル、地下空洞、斜面など）の合理的設計方法の確立について
 - 岩盤構造物の合理的設計方法の確立について逆解析の適用は貢献しているか？
 - 例えば、構造物への作用荷重が求まっているか？
 - 周辺への影響を抑制する合理的方法についての示唆が得られたか？
 - 補助工法の効果が評価できたか？
 - 水抜きなどによる安全性の向上が評価できたか？
- 逆解析の適用における注意点について
 - この種の問題で特に注意する事は何か？

図-1 逆解析プロジェクト分析のためのチェックリスト（芥川）

3. トンネルにおける逆解析

3. 1 事例分析のとりまとめ

逆解析プロジェクトごとの特徴をチェックリストによって記述するのは、そのプロジェクトを正しく把握するために必要な作業としてとらえることができる。このような作業をプロジェクトごとに行うと、類似した状況下でどのような手法が適用され得るのか、またそのように異なる手法が適用された場合の成果がどうであったかを議論する必要性が認識される。表-1 は「地山状況」をひとつの軸に、もうひとつを「逆解析によって何を求めようとしたか」を視点とした組み合わせを示すものである。

表-1 地山状況と逆解析の出力情報を視点としたプロジェクト整理マトリックス（芥川）

逆解析の出力情報 → 地山状況 ↓	初期応力、側 圧係数など σ_0, K_0	地山の弾性定数 E, ν	地山の強度定数 c, ϕ	覆工に作用 する荷重	Etc.
弾性挙動を示す地山					
被りが浅い土砂トン ネルで非弾性挙動を 示す地山					
岩盤不連続面の挙動 が支配的となる地山					
変形挙動の時間依存 性が顕著な地山					
地山強度比が低く大 きな塑性変形を生じ る地山					
特殊な施工形態を取 る地山					
Etc.					
Etc.					

（空欄は事例分析によって埋められる）

この表ではそれぞれのマスが「ある地山条件下で、何を知らうとしたか？」を示すものである。当然、それぞれの状況によって実際の逆解析手法は微妙に異なってくるが、「最も適切な形で行われるべき逆解析の方法」について議論を展開し、知見を比較・蓄積するのは、この表のそれぞれのマスごとに行われるべきものであることが分かる。また、そのような作業が行われ、マスごとの注意点、問題点などが明らかになる事によって、そのマスごとに解決すべき問題、あるいは全体に共通する問題点としての今後の課題などを抽出する事が可能となろう。

3. 2 現場での有効活用の課題と対応について

トンネル建設現場において逆解析を有効活用するには、逆解析の活用の道筋が明確であるかどうか重要なポイントである。ここではその観点から、

「課題：逆解析の活用の道筋ができあがっているか？」

についてその対応の流れを以下に示す（図－2 参照）。

（1）逆解析利用の目的の明確化

- ・ 目的例（山岳トンネル）
 - トンネル掘削に伴う地山状態、支保効果の評価と施工への反映
- ・ 評価の対象として、
 - 地山状態（支保を含む）、支保部材
- ・ 反映させるべき内容として、

○掘削方法（掘削工法，薬量，種類 機械），加背割，型（ベンチ長など）ラウンド長

（２）有効活用の範囲と程度の確認

○第一段階：施工業者内の安全施工，合理化，経済化（利潤追求）

○第二段階：スベックダウン・スベックアップ

発注者等の判断による契約内容の変更，請負金額の変更（主として増あるいはVE）

○鍵となる事項

責任の所在

契約変更の手順の整備

評価の信頼度，信憑性

恣意性の排除

（３）逆解析手法の有効性と手法の選択

○解析技術上の観点

手法の適用対象の明確化，利害得失

手法の精度，客観的有效性

結果の経験・概念との整合性

手法理論の難解度

手法と計測とのリンク（計測の簡便性，精度）

○現場での利用性の観点

活用機器とソフト（簡便性，コスト）

現場スタッフの理解度（施工サイド，発注サイド）

マニュアル整備

計測とのリンク（簡便性，コスト）

サポート体制（施工サイド：支店，技研）（発注サイド：委員会??）

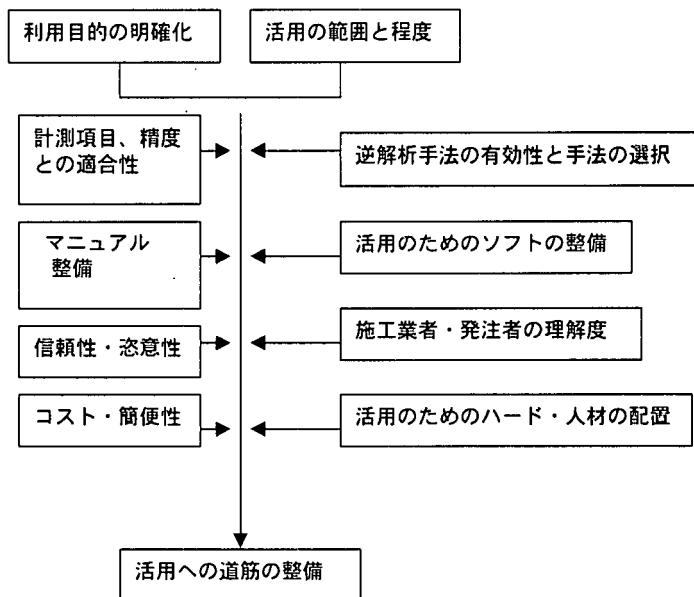


図 - 2 逆解析の有効活用のための道筋(木村)

4. 大規模地下空洞における逆解析

4. 1 逆解析の適用事例分析結果の概要

地下空洞における事例分析は、地下空洞掘削の情報化施工において逆解析を適用する場合に、現場の実務者が如何なる課題に直面するのか、また如何なる問題が未解決のまま受け継がれているのか、を抽出することが目的である。そのために、図-1 に示した、「逆解析プロジェクト分析のためのチェックリスト」を参考に、以下の5地点を適用事例として取り上げて分析している。

- ・地下発電所：葛野川発電所、塩原発電所（東京電力(株)）、奥多々良木増設、大河内発電所（関西電力(株)）
- ・石油備蓄基地：串木野石油備蓄基地（日本地下石油備蓄(株)）

事例分析では以下の点が重要な課題として抽出されている。

- ①逆解析の実施を意識した計測計画の策定。
- ②逆解析結果の情報化施工における活用法。
- ②' 逆解析結果と掘削管理基準値との関連。
- ③逆解析における解析モデルの妥当性。

情報化施工は NATM の最大の特徴である。すなわち、支保設計をトンネル延長に固定化しないという合理化の追求と、掘削中の安全性を確保すること、この2つの目的のベストバランスを目指すことが情報化施工の至上の題であり、その構成要素の一つである逆解析の担う役割は、「巧緻な地質調査と計測計画の下、その地点特性に合致したモデルを効率的に開発・運用することによって、現場技術者に対して如何に的確な支保設計支援を行い得るか」という言葉に集約される。上記の重要課題は、その役割を満たすために必要な条件であると言える。

以下にそれらに関連する評価項目の分析結果を示す。

(1) 逆解析と計測計画

逆解析に用いられる計測データは、最も信頼度が高い岩盤変位であり、その殆どが（多段式）地中変位計で計測されたものを使用している。岩盤変位を逆解析で利用するためには、初期変位を捉えることが重要であり、そのために地中変位計を掘削に先行して設置する工夫が取られている。周辺横坑から計画掘削線に向けて先行設置する手法が大半であるが（葛野川、大河内）、中には心抜ききのトンネルから計画掘削線の外側に地中変位計を設置し発破の防護を備えるといった手法も見受けられる（奥多々良木増設）。三次元的な特性を有する地下空洞の場合、線状構造物であるトンネルに比べ先行設置を計画する余地は多い。試掘坑や周辺空洞のレイアウト段階から、地中変位計の先行設置を考慮した計画を策定することが重要であると思われる。また、不連続面に起因する岩盤挙動は、火成岩の場合必ず生じると言ってもよく、走向傾斜と地中変位計の設置角度によっては、見かけ上の変位が小さい場合がある。それに続く後続掘削によって変位が生じた場合、解析結果に極めて高い異方性が現れ、逆解析によって得られるパラメータ、たとえば初期応力パラメータ（初期応力と弾性係数の比）、が非現実的な値となることがある。事前調査の段階で掘削中に起こり得る不連続面の挙動を予測することは困難であるが、逆解析のための理想的な計測機器配置を考えることは、今後の大きな課題である。

(2) 逆解析とその結果の活用法（管理基準値との関係）

逆解析によって得られたパラメータを用いて、弾（塑）性解析を行い、最大ひずみ分布と限界ひずみを比較し、追加支保の領域を判定することがある。さらに最終掘削形状における安定性の予測を実施する。これはいずれの地点にも共通する逆解析結果の活用法である。しかし、塑性領域または最大せん断ひずみ、もしくは他の項目など、どのような力学量で評価するのが良いかについては言及されてはおらず、今後の議論を必要とする。

また、管理基準値と逆解析結果が密接な関係を有する事例もある（葛野川）。当初想定し得なかった不連続面を有する地質箇所において、掘削面の地質情報、内空変位を基に、不連続面を考慮した逆解析を行い、これによる予測値から岩盤変位に関する基準値を変更している。日常の掘削管理において、傾向値管理のみを実施している事例

もあるが（奥多々良木増設）、絶対値管理を適用する地点も多く、掘削の進行に伴いモデルの変更、強いてはそれから得られる基準値の変更は合理的な逆解析の運用に不可欠であると考えられる。

（３）逆解析と解析モデル

当然、掘削前の地質ボーリング、試掘坑調査等だけでは十分な地質情報を得ることは困難で、掘削が進行するにつれてデータが蓄積され、対象としている岩盤特性の全貌が明らかになってくる。そうなるに必然的に逆解析においても、初期モデルの修正が必要となり、実現象を再現するための解析上の作業が行なわれる。一般的に現場では、掘削のサイクルタイム内に解析を終了させる必要があることから、パラメータ同定によって物性値などの修正が行なわれることが多い。その値は、当然、仮定したモデルに強く依存するため、岩盤を表現し得るモデルの選択、そのモデルの適用限界、それらの入出力情報の不適切性の対処等に特に注意する必要があると思われる。最近になって、当初、モデルを確定せず、逆解析を進めながら岩盤のモデルを決めて行く（観測化モデリング、あるいは、情報化モデリングとも呼べる）考え方に基づく方法が提案されている。

（４）まとめ

最も重要な課題は、以上の課題を踏まえ、掘削前に地質調査計画、情報化施工の計画を策定する際に、逆解析の存在意義（presence）をどれだけ意識できるかということである。逆解析を導入することにより、どれだけのコストメリットが（当然比較検討の中で）予測されるのかを十分認識する必要がある。地質調査、事前解析のウェイトを減らし、情報化施工に重きを置くこともあろうし、逆に事前設計に重点を置き、計測管理は行なうものの逆解析は設計の妥当性を確認するために低頻度で実施することも考えられる。「逆解析というものがあるから、とりあえず掘削管理フローに入れておこう」では、情報化施工の効率的な運用は望めない。今回の分析で、どの地点においても当初の目的は概ね達成された、または支保設計の検証ができたとのコメントが多く報告された。しかし、逆解析の絶対的必要性を各種文献から抽出するまでには至っていない。これは当然で、逆解析を用いることによる建設コスト上の効用を算定している報告は無く、またそれは極めて困難な作業だからである。

地下空洞掘削に直面している現場技術者は、 m^3 当りの掘削単価（支保工込み）を可能な限り低減し、かつ安全な作業環境を確保しようと努力している筈である。これらの逆解析の効用は、逆解析の役割を明確化すると同時に、それを意識した情報化施工の設計および運用を行うことによって初めて算定することが可能になると思われる。

４．２ 掘削時の挙動評価における適用事例

逆解析の地下空洞掘削時の挙動評価への適用事例として、葛野川発電所（許認可最大出力 160 万 KW）における適用事例（工藤 他：大規模地下空洞掘削への情報化設計施工技術の適用研究、土木学会論文報告集, No.623, pp.69-83, 1999）を紹介する。この逆解析適用の特徴は、大きく 2 つある。

- ①先行して実施した模擬空洞掘削時の挙動を逆解析し、掘削による応力解放時の変形特性を把握し、本空洞挙動予測並びに支保設計へ反映したこと
- ②初期の調査では予測が難しい密着した節理群の滑りや異方性に起因する不連続、不均質な変形挙動に対し、情報化施工の予測手法として、逆解析を積極的に導入し支保の設計修正を図ったことである。

以下、一連の逆解析の適用状況について述べる。

（１）地下発電所の概要と地質

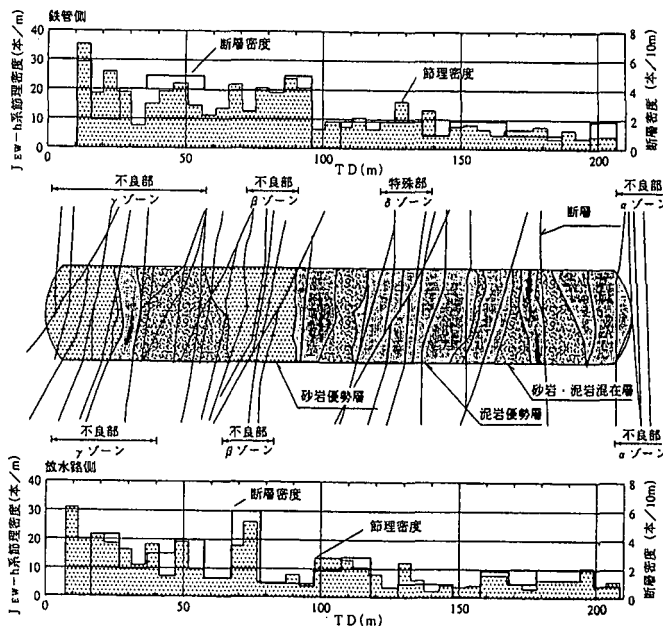
葛野川発電所は、山梨県東部に位置する純揚水式発電所であり、平成 11 年に 40 万 KW、翌 12 年に 40 万 KW での営業運転を開始している。発電所並びに空洞の諸元は、表－2 に示す通りである。

発電所の空洞形状は、初期地圧が 12 MPa と高地圧であることから、たまご型形状を採用し、空洞掘削を平成 6 年から平成 8 年の間に実施した。

発電所サイトを構成する地質は、砂岩・泥岩の互層が主体であり、地層の一般走向は、ほぼ東西方向、傾斜は北

表－2 地下発電所空洞諸元

発電諸元	最大出力 (MW)	1,600
	使用水量 (m ³ /s)	280
	有効落差 (m)	714
空洞諸元	高さ (m)	54.0
	幅 (m)	34.0
	長さ (m)	210.0
	掘削量 (m ³)	250,800
	断面形状	たまご型
	断面積 (m ²)	1,510
	土被り (m)	500



図－3 地質水平断面図

傾斜の同斜構造を呈している。断層の走向・傾斜は、発電所の長軸と直交する東西方向北傾斜のものが大半を占めており、節理については、同じく長軸と直交する東西方向北傾斜のものが87%、長軸方向とほぼ平行な南北走向急傾斜のものが9%、長軸方向とほぼ平行な南北方向東緩傾斜のものが4%である。

節理の大半を占める東西方向北傾斜の節理群は、断層とほぼ同じ走向・傾斜であり、泥岩中に砂岩が薄層状に分布する箇所、しかも断層集中部において節理間隔が小さくなっているところで弱層部が形成されている(図-3)。

(2) 模擬空洞掘削時挙動評価への逆解析適用による岩盤変形特性、初期地圧の推定

サイトの地質は、前述のように節理が著しく発達し、また、発電所本体空洞掘削に至るアプローチトンネル掘削において節理群に起因する変形の異方性が確認された。このため、実空洞掘削に先立ち1/5スケールの模擬空洞を掘削し、実測挙動を逆解析することで、掘削による応力解放時の岩盤変形特性の把握と初期地圧の概略的な照査を行った。

模擬空洞掘削時の計測結果は、図-4に示す通りであり、土被り圧相当を鉛直地圧と仮定した逆解析から得られた初期地圧は、 $\sigma_1=12.5\text{MPa}$ 、 $\sigma_2=9.0\text{MPa}$ 、 $\theta=13.1^\circ$ であり、事前調査での応力解放法による初期地圧測定結果とほぼ同等な結果であった。また、等価弾性係数は $E=12,900\text{MPa}$ (卓越する節理とは平行方向)であり、平板載荷試験の地質一般部の除荷時接線弾性係数 $E_t=12,600\text{MPa}$ とほぼ等しい値となった。ただし、卓越する節理と直交する方向で計測された空洞妻壁部の変位は、側壁部に比べて大きく、逆解析から想定される等価弾性係数(卓越する節理とは直交方向)は、平行方向の1/4～1/7程度と顕著な異方性を示す結果となった。

(3) 予測解析並びに空洞挙動の実績

空洞挙動の予測解析並びに支保設計は、岩盤のひずみ軟化特性を考慮したFEM逐次掘削解析により実施したが、岩盤の変形特性については、模擬空洞掘削時の計測結果から逆解析により求めた等価弾性係数が、節理の状況並びに地質の不均一性など局所的な要因に左右されず実空洞の挙動を正確に予測できると判断し、これらを解析条件として採用した。空洞掘削時の計測管理は、前述のサイト地質特性に基づき、空洞全域を地質一般部、地質不良部、キープロック形成部にゾーニングし、支保の増強並びに重点監視を行う管理区域(α 、 β 、 γ ゾーン)を設定し、施工を進めた。

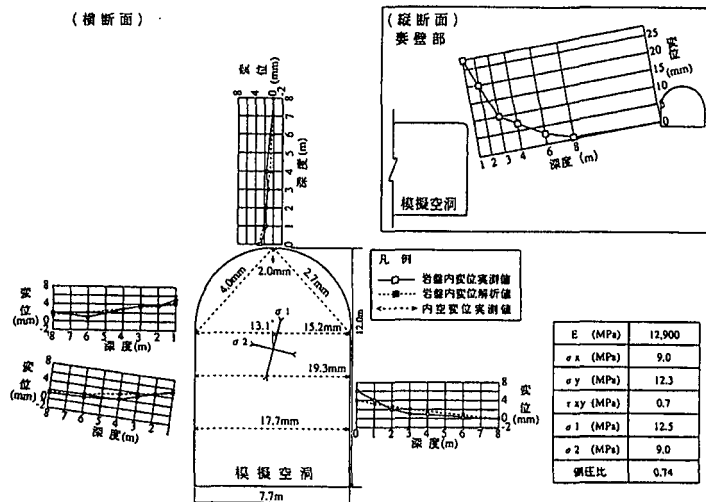


図-4 模擬空洞設計及び逆解析結果

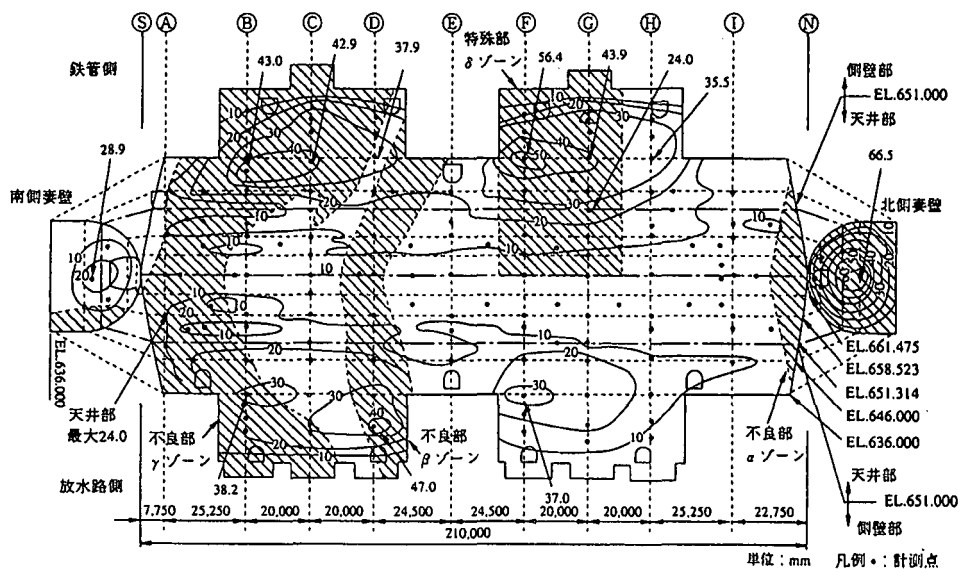


図-5 空洞全体挙動(掘削完了時)

掘削完了時点の空洞の全体挙動は、図-5に示す通りであり、地質不良部が一般部に対して相対的に変形量が大きく空洞中部では、一般部の12~37mmに対して不良部36~43mmであった。また、北側妻壁部で空洞最大となる67mmの変位が発生した。

これら不良部並びに妻壁部は、当初設計より卓越する節理の密集、走向の影響により、相対的に大きな変位の発生が予想され支保を増強した設計となっており、発生した変位も概ね予測値程度であった。

ただし、当初一般部と推定したF~G断面鉄管側については、1ベンチ掘削完了時で予測を超える変位が発生したため、以降、重点管理区域 δ ゾーンとして管理を行った。

(4) δ ゾーンの挙動予測、支保設計への逆解析の適用

δ ゾーンについては、天井部2次切上げ並びに1ベンチ掘削時に掘削当たり最大となる壁面変位が発生した。

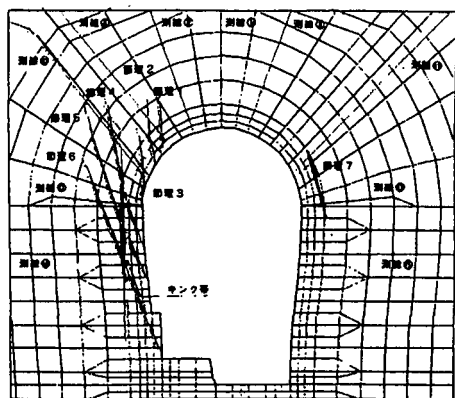


図-6 逆解析モデル (不均質・異方性)

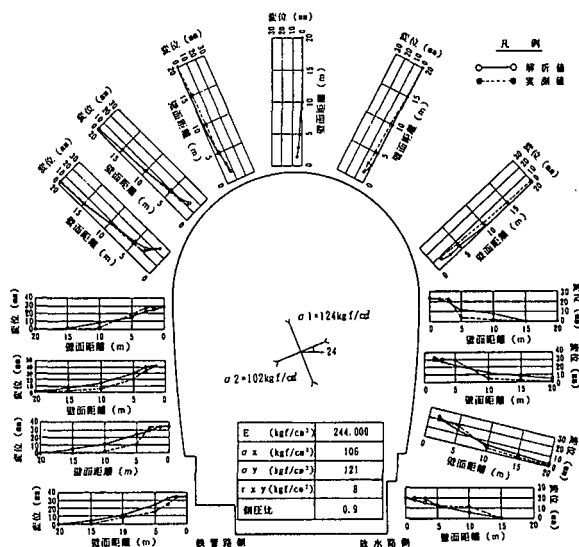


図-7 逆解析結果 (掘削完了時)

また、3ベンチ掘削完了時の壁面変位は鉄管側で 21mm、放水路側で 4mmと岩盤変位は顕著な非対称性を示した。この鉄管側と放水路側での変形の非対称性については、切羽観察による節理群の出現状況、岩盤内変位測定結果から、鉄管側の空洞壁面に流れ目となる東傾斜の節理群の滑り挙動によるものと推定された。

当ゾーンでの非対称な挙動については、岩盤を連続体と考える順解析モデルでは予測が困難なことから、不均質で異方性を考慮できる逆解析モデル (図-6) を適用し、その後の挙動予測並びに支保設計の修正検討を行うことで無事に工事を完了した (図-7)。

(5) まとめ

本事例において地下空洞掘削時の挙動評価へ逆解析を適用することにより得られた知見は次の通りである。

- ・ 模擬空洞の挙動評価への適用から、大規模な空洞掘削時の挙動評価に用いる岩盤の変形特性、初期地圧設定手段として、現位置試験が有する測定個所の地質特性などのローカルな影響を受けない逆解析を用いた調査・検討手法が有効であることを確認した。
- ・ 岩盤の不均一性や節理群の存在による不連続な挙動が予測される地下空洞の挙動評価においては、掘削時の岩盤挙動を的確に把握しながら、モデルや物性値の見直しが行うことが重要である。

本事例では、事前調査で想定が困難な不連続な変形挙動が観測されたが、不連続な変形挙動の原因究明、その後の挙動予測並びに支保設計修正にいたる情報化施工の一手法として、逆解析の適用による検討が有効であることが確認された。

5. 斜面における逆解析

斜面の逆解析あるいは現場計測による安定評価を行うものとして、

- 1) 現状を安全率 1 として、すべり面を仮定し c , ϕ を求める (逆解析),
- 2) 計測した変位, あるいは, 変位速度を, あらかじめ定めておいた管理基準値と比較して安全管理をする (計測評価),

が挙げられる。いずれの方法も、1980 年代以降の逆解析の発展時期より以前から適用されてきた。さらに、

3) 2)の方法によって斜面の安定限界を推定し、次いで、1)の方法で c 、 ϕ を求め補強工などの設計を行う、つまり、1)と2)を組み合わせたケースが見られる。

また、上記の方法とは異なり、先に述べたトンネルや地下空洞の逆解析と同じ流れに立つ

4) 計測変位から直接 c 、 ϕ を求める逆解析、
が考えられている。4)には次のような利点がある。

斜面の実用的な設計は極限平衡法に基づいて行われる。極限平衡法では、力のつりあいだけを考え、変位は無視している(図-8(a)設計の流れ)。その際、岩盤の c 、 ϕ 、すなわち、強度定数が重要なパラメータである。一方、斜面における現場計測においても、経済性と信頼性の観点から主に変位が計測される。つまり、現場では斜面の安定性は変位で評価する(図-8(b)計測評価の流れ)。これでは、変位を無視し力のつりあいのみで安定評価を行う設計と、現場計測との間に整合性がないことになる。しかし、もし、現場計測変位から逆解析によって c 、 ϕ が求められたなら、設計時に用いた解析法を使って、計測時点の安全率を評価することができる(図-8(c)逆解析の役割)。すなわち、逆解析によって設計と現場計測がリンクし整合性を持つことになる。

地盤(土質)工学分野に目を転じて、逆解析は、盛土、開削・土留め工を主に対象とし、斜面に関する逆解析は上記の1)の方法を除いてほとんどない。情報化設計・施工に関連した斜面の逆解析は今なおオープンな領域である。

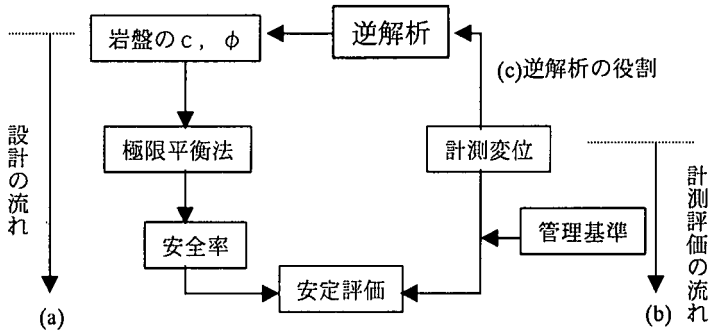


図-8 斜面における逆解析の意義

6. 委員会での議論

委員会では具体的な事例をあげながら活発な議論を行っている。以下に、議論の様子を一部紹介する。委員会の熱っぽい雰囲気を感じていただきたい。

B: 地下空洞グループでは限界ひずみが適用できるかという議論があったが、トンネルグループではどうか?

A: 対象が膨張性の地山の場合、限界ひずみで評価するにはあまりにも大きな変形であった。また、限界ひずみが大断面で適用できるかという議論はなかった。3車線トンネルで実績はないのだろうか?

C: 掘削幅が3車線トンネル程度のある空洞では、逆解析や限界ひずみを適用したのは事実だが、発注者を含め工事関係者が書かれたレポートには、逆解析や限界ひずみという言葉は出てこないようだ。空洞は内空変位で施工管理をしているが、それは限界ひずみから算定している値ではない。

A: 限界ひずみは安全側の管理基準値として定義される一つの量である。

B: 逆解析は、その結果から支保を減らしたりしてコストダウンしたり、ぎりぎり安全側をめざすことが目的ではないか?

C: 逆解析に限らず、解析の力学モデルには多くの仮定が含まれている。現実の岩盤には不確定な要素が多い中、

解析結果において安全率が想定より大きくなったからといって、支保を減ずる決断をするのは難しいと思う。後続する掘削段階で困ることがないように、増し支保やかせ割の判断に逆解析を行うのがこれまでの使い方ようだ。

B：重厚な支保を軽くするか、軽い支保を重厚にするかという設計思想の違いにより（逆解析の目的が）異なるのではないか。

D：順解析モデルと逆解析モデルとがうまくリンクできれば、限界ひずみから離れて評価できるのではないか。そうすれば支保を減らす筋道が生まれると考える。

E：トンネルでチャレンジ的なものを何か提言できないか

F：トンネルでは荷重が課題となっており、それが解決されていないため議論はそこで止まっている。一方、逆解析では、結果の一つとして得られる地山のひずみ分布ばかり注目してきた。このあたりが、実際の課題と逆解析でできることが一致していない。逆解析結果だけから、チャレンジな提言をするのは難しいかもしれない。また、トンネルの安全率は1という考え方をする人がいる。つまり、変位しているのはつり合っていないからであり、動いているときはたとえば0.99、止まれば1となる。

G：トンネルで時間依存性が問題となるところは、変形が大きかったり崩れやすかったりで、「限界ひずみ」という壊れる前の状態に対する指標を用いるのは適切でないかもしれない。もっとも、限界ひずみで管理するのが適切なトンネルの方が、限界ひずみが使えない特殊地山トンネルと比べて、件数は多く事実、限界ひずみはよく使われているようだ。

H：変位が大きすぎると逆解析を使っている余裕はなく、逆に小さすぎると逆解析の必要はなく、逆解析を適用するのに適切な変位（地山）の範囲がありそうだ。

F：計測においてあまり多くを測らなくても、的を絞ってうまく料理すれば、地山がどのような状態にあるかを知り得る。全部を知るのではなく、急所をおさえるということがあっていいのではないか。

H：湧水など水に関しては、水で困ったトンネルはいくらでもあるが、逆解析は行われていない。あるトンネルでロックボルトの削孔中、削孔水で地山がゆるみ、動いた例は興味深い。

I：事例分析において、逆解析の結果をどのように使っているか、また、具体的な項目は示されているのか。

J：N トンネルの例では導坑で変形係数を推定し、本坑の予測解析に使用している。また、導坑がある方がいいのか否かの検討も行っている。

K：分析作業では、逆解析結果の使われ方をできるだけ明確にするのがよい。分析内容は、逆解析の視点から取りまとめ、一覧できるようにするとわかりやすい。そして、逆解析の必要性、逆解析によってできることとできないこと、今はできないが今後すべきこと、どうするばうまく活用できるか、などが示せばよい。

.....

L：以上のようなことが、岩盤力学シンポジウム場で参加者とともに議論できればよいと思いませんか？

委員会における上記のような議論、委員によるプレゼンテーション、活動内容などについては、ホームページ <http://www.ssce.eng.kagawa-u.ac.jp/~backrock/>（あるいは、学会のホームページ <http://www.jsce.or.jp/>）から“委員会活動”を経てたどっていける）で常時公開しているので、一度ご覧いただきご意見をいただければ幸いです。

7. むすび

本研究小委員会では、ここに紹介したような観点から、逆解析の事例分析に基づく検証を行っている。今後は、検証結果を踏まえ、実務における逆解析適用の際のガイドラインとなるような「逆解析のよりよい利用法」をとりまとめ、さらに、各委員の考える「理想の逆解析」を示し、課題と展望を与えることを考えている。

本文は、芥川真一（神戸大学）、木村 宏（日本鉄道建設公団）、瀬岡正彦（関西電力株式会社）、日比野悦久（東京電力株式会社）、清水則一（山口大学）によって、委員会における議論や調査・分析結果を踏まえて執筆された。

岩盤力学における逆解析に関する研究小委員会メンバー

委員

清水則一（委員長、山口大学）	山地宏志（幹事、三井建設）
芥川真一（神戸大学）	磯 高之（川崎地質）
岩野政浩（大成建設）	呉 旭（応用地質）
奥野哲夫（清水建設）	木村 宏（日本鉄道建設公団）
京谷孝史（東北大学大学院）	桜沢雅志（福田組）
篠川俊夫（佐藤工業）	清水 博（戸田建設）
瀬岡 正彦（関西電力）	日比野悦久（東京電力）
森川誠司（鹿島建設）	森田 篤（前田建設工業）
山下 亮（間組）	山辺 正（埼玉大学）
吉田郁政（東電設計）	吉田秀典（香川大学）

オブザーバー

豊田耕一（東電設計）

前委員

袋井 肇（関西電力）	南部茂義（東京電力）
------------	------------