

不連続性岩盤の変形挙動評価と逆解析の問題点について

ROLES AND PROBLEMS OF BACK ANALYSIS IN EVALUATION OF DEFORMATIONAL MECHANISM OF DISCONTINUOUS ROCK MASSES

芥川 真一

Shinichi AKUTAGAWA

1. はじめに

地盤工学問題における情報化施工では、自然（地盤）のと人間の知恵比べが勝負どころである。地盤は複雑であるが、われわれはその一部を見、触り、調べることが出来るのみである。我々は、そこから得る限られた情報に基づき、地盤中に空間を設け、構造物を建設する過程が安全に行えることを知る必要がある。本稿では、不連続性岩盤内に大空洞を掘削するケースを取り上げ、調査から現場計測結果の評価に至る各々の段階において、どのような情報戦が繰り広げられ、少しずつその性格を見せてくる岩盤の本質に、どの程度迫ることが出来るようになったのか、あるいはどのような難題が残されているのかについて、逆解析と言うキーワードを通して考えてみたい。

2. 調査、モデル設定の段階

調査段階で我々が手にする情報は主に3つのグループに分けられる。まず、「①そこに何があるのか」を知る必要がある。これは、主に地質構造、亀裂の分布など幾何学的情報に関する事項を把握することに関係する。次に、「②それらはどのような力学的特性を有しているのか」を知らなければならない。岩石、不連続面などの力学的特性、構成式、変形係数、強度定数などがこれに当たる。最後に、そのような特性を有する地盤・岩盤が「③どのような状態にあるのか」をつかまなければならない。この中で最も重要な事項は地盤の初期応力状態を知ることであろう。

それぞれのグループについて調査段階で得られる情報は限られている。第一の理由は予算の関係から情報をサンプリングする場所の数が限られることである。第二の理由は、特に力学特性と初期応力に関連するが、実際にデータをサンプリングしてもそれがローカルデータ（データを採取したその場所だけのピンポイント的な情報）であり、大規模空洞の挙動を支配するグローバルデータと簡単には同一視できないことである。どちらにしても、調査段階においては有限の情報から経験、理論、仮定、外挿、内挿などの知識・技法を用いて、「これから掘削を行おうとしているサイトの岩盤は○○○のようなものである。」というモデルを設定することになる。この段階で立ち上げたモデルが十分なものでないことは誰もが知るところであるが、施工が始まる前に行う設計計算ではこの初期モデルを用いることになる。

3. 設計の段階

設計の段階では主に2つの事項を確認する。まず、掘削が最終段階まで安全に行えること、すなわち大規模な岩盤の崩落を生じさせないための必要な支保量の確認をする。次に、崩落などは生じないことを一応の前提として、掘削の各段階で応力、ひずみ、変位などの量が管理基準値を超えないために必要な支保量を確認する。前者にはすべり線法などを用いた極限解析法が用いられることが多いが、この解析には変形の概念が関わっていないことが多い。後者には、様々な考え方に基づく岩盤の変形解析手法¹⁾⁴⁾が用いられる。本来、変形解析の延長線上に最終の極限状態が捕らえられるべきであるが、この分野は研究途上であり、現在のところは極限解析と変形解析が別々に行われているのが現状で

ある。

どちらにしても、この設計計算の段階で、「○○○の程度の支保を導入し掘削を進行して行けば、各々の段階での変形量などは△△△程度となり、管理基準値を超えることはなく、また最終段階に至るまで岩盤の崩落は生じないはずである。」という予測を得る。しかし、これは限られた情報から導いた初期モデルを用いての予測であることから、実際の地盤からの新たな情報が入ってくるにつれて、これを洗練する作業が始まることになる。

4. 計測結果の評価とモデル修正の段階

掘削が進行し、実際の挙動に関する計測結果が入ってくるようになる。まれなケースを除き、予測と実測には「ずれ」がある事が分かる。ここで、まず行われるのは「設計時に用いた初期モデルの大枠はそのままにして、それらの属性（パラメータ）の値だけを変更してモデルを修正する」方法である。例えば、「岩盤は弾性挙動をする」ことをモデルの核に据えている場合、計測結果とのずれを「弾性係数を変更すること」で修正しようとする場合がこれに当たる。次に、属性だけを変更したのでは、ずれを修正できないことが判明した時、「モデルの本質的事項を修正する」方法がとられる。「均質と考えていた岩盤に、実は断層破砕帯が存在した。」、あるいは「等方性と考えられていた部分が異方性を有していた。」、などがその例である。

この2種類の方法により、初期モデルおよびその属性を修正する訳であるが、その作業はさほど簡単ではない。モデルの修正により計算結果と計測結果のずれは減少することが期待されるが、それを完全に消去することは難しい。また、自分が採用したモデルの修正方法で、ある程度の向上は見られたものの、「もっとよい方法があったのではないか？」との疑問が残る。

掘削が進行し、さらに新しい計測結果が得られると修正したモデルの「再修正」を迫られることになる。そのために必要な思考、意思決定作業は少しずつ複雑化してくるのは避けられない。

5. 安全かどうかの判断

複雑な岩盤が見せる挙動の一部と、それを真似るように創られたモデルの挙動の一部を近づけることによって、我々は、「自分達に与えられた情報を用いてできる最大限の努力を払った結果、実際の岩盤の変形挙動を最もよく表していると思われるモデル」を手にする。このモデルは、それを定義することが最終目的ではなく、そのようにして得られたモデルが有する情報から、現在の岩盤が安定しているか、将来の掘削に対しても安定性が確保できるか、設計で採用した支保の導入量が妥当であったか、以後の掘削に対して支保量の変更は必要かどうか、などの判断を下すために用いられるべきものである。応力、ひずみ、変形量などの値、分布がどの程度正確に把握できているかによって、これらの判断結果の良否が決まる。また、特に岩盤の安定性を評価する点においては、評価した強度定数の正確さ、また不穏動き（例えば、不連続面が滑り、開口をしている部分）を見せている領域の場所やその広がり、つながり、などが正確につかめていることが必要である。この段階で調整されているモデルから計算された変位分布と実測値はかなり近いものであろう。ただ、グラフにした時の微妙な差を残していることが、岩盤の不安定挙動の重要な予兆を見逃すことにつながっていないことを期待している、という現実があるのも事実である。

どのような段階であるにしても、その時点で入手できている事実に基づき、現実を最もよく表現していると思われるモデルを構築し、その結果得られた情報から現在の岩盤の安定性などを評価する手法は、自然を読みながら進まなければならない地盤工学において採用される中心的方法である。この手法を用いる限り、苦勞は伴うが、処理するデータの量が増加するに従い、モデルの質は向上し、残された掘削過程の予測解析にも真実味が出てくる。しかし、現在の岩盤の安定性を評価することが最重要課題であることを思い出すと、この正統的手法に、やや不足している点がある。それは、多数の考え方の中から最も妥当であろうと思われる考え方を選び出し、最終的に満足のできるモデルを構築する作業が、簡単ではなく、意外に時間がかかり、その結果たどり着いた最終状態でさえ、未だに現実の計測結果と比較すると、いくらかの差を残していることである。

6. 非弾性ひずみの逆解析が持つ意味

すべてが順調に運んでいると思われる場合には、そのようなことは気にならないだろう。しかし、地下発電所空洞

などのような重要構造物においては、わずかな心のすきも許されない。どのような不穏な動きが岩盤内で生じているのか、もしそうなら、それはどの場所で、どの程度進行しているのか、前段階までに満足のいくモデルとして構築してきたものと異なる現象が発生してはいないか、などの疑問は常に持ち続け、それらに対する回答は計測データが記録されて、ほとんど間髪を入れずに求めなければならない。より堅実な情報化施工を実現するためには、正統的方法で精度の高いモデルを時間をかけて作り上げることが重要であると同様に、失敗の許されない大規模空洞の建設において、少しでも怪しいと思われる動きがあるのなら、粗削りでもよいからその場所や程度をほとんどリアルタイムで掴み、現状の把握と緊急時の意思決定作業に資することが重要である、と言うことである。

さて、筆者らが試行している非弾性ひずみの概念を導入した逆解析⁵⁾はどうやら後者の役割を果たすものようである。この方法を不連続性岩盤の掘削問題に適用した場合⁶⁾の基本的考え方は次のようである。まず、「現時点で持ち合わせた情報から岩盤の挙動を最もよく表現する初期モデル」として、「岩盤の挙動を基本的には岩質部と不連続面の弾性挙動の重ねあわせで表現するモデル」を選ぶ。ところが、実際の変形挙動には、不連続面のすべり、初期の段階では予期できなかった弱面の存在、弾性挙動の仮定そのものに含まれる誤差などが原因となり、このモデルから得られる変形挙動と実際の計測結果には大きな差が出てくる。そこで、本手法では不連続面が破壊し、弾性挙動を越えた非弾性なすべり挙動が生じたためにそのような差が生じたものと仮定し、どの程度のすべり変位が生じれば計算値と計測値の誤差が小さくなるかという関係から、場所ごとに異なるすべり変位量をノルム最小化という技法の助けを借りて求める。結果として、空洞周辺のそれぞれの場所に、「どちらの方向の不連続面において、どの程度すべり変位が生じているか」という情報が得られ、変位計測場所における計算値と計測値の差がゼロになる。

この手法では非線形問題を線形化して解いているため、現在のコンピュータ処理速度を考えると、計測データを入力すれば、結果はほとんどリアルタイムに得られると考えてよい。即ち、欲しかった現状の即時把握が実現したと言うわけである。実際の大大空洞掘削事例を分析したケースでは、当現場の関連資料などの記録と照査したところ、岩盤不連続面のすべりが顕著であった部分の挙動は、ある程度適切に表現することが出来たようである。従って、今後同様な適用ケースが現れた場合には本手法の適用により、すべりが卓越している箇所の特定、その広がりなどを即時に判定することは十分可能であると思われる。

しかし、それですべてが解決したわけではない。前述したように、本手法では、初期モデルと現実の差を埋める手段として、不連続面のすべり変位量を算出している。その場合、初期モデル自体が適切でない場合は、本来実在しない不連続面のすべり変位が計算されることになる。例えば、初期モデルの設定において岩質部の弾性係数を実際より小さく設定してしまったとする。そうすると、計算の方ではある程度の変位が生じるのに、計測値は小さいので、その差をなくするために「幻のすべり変位」が登場し、変位を逆戻しするようなことが起こる。その他にも、例えば不連続面の方向を入力する際、それが現実と異なっている場合は、それが原因で生じる変位の差を「幻のすべり変位」が解決することになってしまう。計測された場所においては変位場を完全に再現する本手法は、ひずみ分布を安全管理の拠り所にする場合においては力強い見方となるが、変形メカニズムの詳細を確認し、「真の変形挙動」に迫るにはまだ多くの課題が残されている。

7. 岩盤の動きを見抜くことの難しさ

大規模な岩盤構造物の建設では、安全率の確保がまず第一である。それが確保されていることが確認できて、初めて設計が妥当であったか、支保の量は適当か、等の議論を始めることが出来る。岩盤空洞が安全であるかどうかについては、情報入手後、即時に判定できる体制を整えておかなければならない。そのためには、結果の解釈には注意を要することを承知の上でも上に述べたような「計測変位即時解釈システム」(線形化された逆解析手法のこと)を用意しておくことは賢明であろう。

一方、安全であることが、ある程度確保できそうだという認識を得られれば、掘削完成までの残りの工程を滞りなく完結するために、十分な議論を尽くして「最良モデル」の構築に励むことができる。実際の変形挙動も理に適った収束状況を示しており、また、最良モデルで再現した「もう一つの現実」から、十分な安全性が確認されればそれに越したことはない。

このように、岩盤構造物建設における情報化施工では、「安全確認」と「岩盤の真の像に迫る」という2つの作業が各段階ごとに繰り返されて行くものだという見方が出来る。ここで紹介した逆解析の手法は、特に即時的な安全確認のためのツールとしての側面を持つためこのような表現をとったが、本来、この2つの作業は同一の目的から発したもので

ある。それは即ち、「入手できる情報から、経験、理論、仮定、外挿、内挿などを用いて、出来るだけ早く、出来るだけ正確に岩盤の真の変形挙動メカニズムを捕らえ、現状と将来にわたる施工の安全性を確認し、岩盤構造物の変形挙動が管理基準値以内に収まることを確認すること」である。その意味からすると、両手法が相互の結果を共有して互いに発展すれば、やがてそれらは融合する統一的手法となるか？と言われると、そうでもないような気がする。理由は、自然材料としての岩盤の複雑さである。対象となる物体を周りからスキャンできるような分野と異なり、岩盤内での空洞建設では対象とする岩盤のボリュームが大きすぎるため、その性質をすべての場所において知ることはできない。この限界がある限り、常に「何が起こるか分からない」、つまり、ある時点までの情報から最も現状をよく説明できるモデルを構築したとしても、それが将来に渡って岩盤の変形挙動を説明できる保証はないのが現実である。したがって、常に「岩盤を見る」ことは必要であり、「さらにモデルを改善する」ことも続けていかなければならない。

8. おわりに

超えることの難しい、岩盤の複雑さから来る限界はどのように克服できるのであろうか？もちろん、計測技術の発展を期すことは言うまでもない。点、線の計測から面、空間への計測と、技術は確実に進歩している。ただ、それに比べて、ある方向からの検討が十分でないような気がする。「与えられた岩盤が複雑で広大であるにも関わらず、計測は限られているので十分なデータが取れない。」と考えると、その限界を超えるのは難しいように思える。しかし、「なぜ、このような岩盤が出来上がったのか？」、「どのような応力履歴を与えるとこのような岩盤を作り上げることが出来るか？」という角度から検討を加えることが出来れば、そこから得られる情報が、現在の直接調査から得られる情報の谷間をある程度補填するのではないかという期待がある。これは、2. で述べた、調査段階で手にする3つのグループの情報を考慮すると、同時期に入手すべき第4グループの情報と位置付けることが出来る。それには、異なる分野間での情報交換が必要となろう。また、もしそれが実現すれば、7. で述べた両手法はそれぞれ発展し、またその距離は更に縮まることになる。

最後に、我々は様々な数値解析手法などを用いて計測結果を分析し、安全性、設計の妥当性などを検討するが、事、岩盤の安定性評価ということになると、何を一番の拠り所としているであろうか？最良モデルで計算して得られた応力・ひずみの値、あるいは逆解析の結果得られたひずみ分布と、候補には事欠かない。しかし、実際に我々が最も信頼している情報とは、ある段階において「岩盤の変位が収束している」という事実ではないだろうか？様々な要因が複雑に絡み合って生じる岩盤の変形挙動が、取り敢えず収束しているという事実ほど確実に、「安全率 >1.0 」を保証しているものはない。しかし、その中身に少しでも確実に迫れるよう、上に述べた別角度からの検討も加えて、情報化施工のレベルアップを計りたいものである。

参考文献

- 1) Kyoya, T., Ichikawa, Y. and Kawamoto, T.: A damage mechanics theory for discontinuous rock masses, Proc. 5th Int. Conf. Num. Meth. Geomech., A. A. Balkema, Rotterdam, Vol.1, pp.469-480, 1985.
- 2) 山辺正、原夏生、小田匡寛：クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性解析と入力パラメータの決定に関する研究、土木学会論文集、No.382, III-7, pp.121-130, 1987.
- 3) 吉田秀典、堀井秀之、打田靖夫：マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルによる大河内発電所地下発電所空間掘削の解析と計測値との比較、土木学会論文集、No.547/III-36, pp.39-56, 1996.9.
- 4) 北條明、中村真、打田靖夫、桜井春輔：不連続性岩盤におけるロックボルトの設置手法について、土木学会論文集、No.553/VI-33, pp.143-1523, 1996.12.
- 5) 桜井春輔、芥川真一、徳留修：ノルム最小化法に基づく非弾性ひずみの逆解析、土木学会論文集、No.517/III-31, pp.197-202, 1995.
- 6) 芥川真一、柿原満、武山真樹、桜井春輔：岩盤不連続面のすべりを考慮した逆解析手法の開発と現場への適用例、土木学会論文集、No.589/III-42, pp.335-348, 1998.3.