

トンネル工学における解析技術の変化・変遷

Developments of the Numerical and Analytical Methods in Tunneling

清 水 則 一 (しみず のりかず)

山口大学大学院教授 理工学研究科

1. はじめに

過去10年あまりのトンネル工学における解析技術の変遷を振り返ると、「新しい理論や方法の開発」から「実務で利用する技術の開発」へ重心が移動してきたように思われる。いわゆる、「シーズ駆動型」の研究開発から「ニーズ駆動型」への転換である。

これは、パーソナルコンピュータの高性能化や普及が一層進むとともに、実務において必要とする機能を備えた汎用解析コードが比較的安価に手に入り、誰もが手軽に高度な解析技術を利用できるようになってきたことが、その背景として挙げられる。すなわち、多くの技術者が解析の適否を判断する機会が増え、実務に役立つ解析技術を要求する声が高まってきたからである。

本文では、成熟しつつあるトンネルの解析技術の変化と変遷を俯瞰し、トンネル工学における解析の役割、および、取り巻く社会の環境を踏まえて、今後の課題について私見を述べる。

2. 解析技術の変遷

有限要素法の出現が工学分野の解析技術を一変させ、トンネル工学においても解析技術が飛躍的に発展した。有限要素法がトンネルに適用される1960年代以前は、トンネルの解析といえば、古典的な構造力学解析と弾力学等に基づき厳密解を導く理論解析が主であった。前者は、覆工や構造躯体に外力として土圧を与え、構造体の断面設計などの実務で用いられ、後者は実務への適用というよりはトンネル周辺の応力分布などの基礎知識を得ることが目的であった。

任意形状、非均質地山などの解析が可能となる有限要素法はトンネル分野に大きなインパクトを与えた。それに触発された研究者たちは、1970年代前後から、地山の非線形特性や不連続性を直接解析できる手法を次々と提案した。現在も、実際の複雑な地山挙動をより忠実に再現できるように、地山や構造材料のモデル化と解析技術の高度化が継続的に研究されている。

1980年代になって、トンネル施工において計測が重要視され、設計・施工へ反映させる技術として、いわゆる「逆解析」手法が開発された。それは、トンネル施工の事前、あるいは、事後の現場が動いていない（あるいは終わった）状況における解析とは異なり、施工中のまさに「動いている」現場に対応する技術として、解析を実

務に活用する上で一つのエポックであった。

1990年代以降は、さらに、新しい解析技術の提案とともに、これまでの技術を誰もが利用できるようにコード化が促進された。いまや、掘削順序や支保・補強工の施工過程を考慮した3次元非線形解析が日常的にしかも卓上で実施できる環境にあり、力学解析は解析の専門家でなくても誰もが利用できる状況になっている。

解析技術の個々の研究成果のレビューについては多くの文献があるので^{1)~7)}、ここではそれらを参考にして、構造解析、厳密解析、数値解析、逆解析のそれぞれの手法別に変遷を俯瞰する。

2.1 構造解析手法

古くから覆工やカルバートなどの構造体の設計には、古典的なアーチ、リング、はりなどの構造力学の理論が用いられた。シールド工法の覆工セグメント、開削工法のカルバート等の設計では、このような構造解析は現在も標準的な手法となっている。山岳工法では、標準化はされていないものの、土被りが浅いトンネルの一次支保や覆工、また、パイプルーフや長尺フォアパイリングなどの先行補強工等、構造体の設計に用いられる。

数値解析の出現により、骨組構造解析が開発され、地山（地盤）パネの導入により地山との相互挙動が考慮され、さらに、構造材料の非線形特性、構造継ぎ手の性質など、複雑な構造計算が容易に実施できるようになった。最近では覆工の限界状態設計が検討されている⁸⁾。

構造解析手法においては、外力としての土圧と地盤パネ係数の適切な設定が課題である⁹⁾。

2.2 弾塑性論等に基づく厳密解法

弾性理論や弾塑性理論に基づく厳密解法（理論解析）は、古くからトンネル周辺の地山（岩盤）の応力解析、また、岩盤の初期応力を計測する基礎式として用いられた⁶⁾。1960年代に NATM (New Austrian Tunneling Methods) の提唱に関連し、円形トンネルの弾塑性解を活用して支保の設計法が提示され、その後、支保や覆工と地山の相互作用に基づく支保工（覆工厚、ボルト本数など）の設計、地山の塑性化のメカニズムの理解などについて実用的な研究がなされた。

厳密解を用いたトンネルの解析は、トンネルの断面形状や地山特性などの境界条件や地山条件に制約はあるが、支保の概略設計やトンネルの挙動の基本的なメカニズムの理解に有効である。

2.3 数値解析手法

有限要素法は、1950年代に航空機の構造解析手法として世に出て以来、トンネルの分野の数値解析手法としても大きく発展してきた。特に、トンネルの解析手法として必要な各種モデル化（例えば、地山の複雑な力学的性質、支保部材、覆工、補助工などの構造部材、掘削および施工過程、地下水等）が可能のため、それまでのトンネルの解析に対する考え方を一変させ、1960～70年代には解析理論の研究や技術の開発について数多くのチャレンジがなされた。

地山の弾塑性をはじめとする非線形特性や時間依存特性、また、地盤材料固有の引張り抵抗力が小さいという特性、さらには、不連続的特性など、当時においては画期的な理論や技術がわずか10年前後のうちに次々と提案された。当初は、掘削や施工過程に関わる込み入った入力データの作成や膨大な数値（解析結果）の整理は手作業で行われていたが、次第に解析のプレ／ポストとインターフェース機能が充実され、3次元解析においても入出力データ整理にける技術者の労力は著しく省力化されている。冒頭に述べたように、パーソナルコンピュータの高性能化と解析コードの充実により、解析は研究者や特別の専門家のみが扱うものではなく、実務において一般的な技術となっている。

しかし、有限要素法では、地山のゆるみや破壊などの挙動を再現することは難しく、例えば、支保の効果を解析しうまく再現・評価することが困難な場合もある。そのため、さらに高度な有限変形／ひずみ局所化理論などにに基づき、破壊時あるいは破壊後の地山の挙動を明らかにしようとする研究の方向がある。

一方、地山のゆるみや破壊をより簡単な解析で取り扱いたいという要望がある。そのような要望に応える方法として、1970年代初頭に提案された個別要素法が活用されている。個別要素法は、もともととは不連続性岩盤を対象に地山を有限なブロックの集合体とし、質点系の運動方程式（差分方程式）を逐次解析する方法として提案された。その後、同じ解析原理に基づき、連続体を質点の集合体に離散化し、質点間の運動を地山材料の構成式で結びつけ、連続体力学の解析を可能とする方法が考案されている。これら個別要素法に基づく解析は、大変形問題の解析が容易に実施でき、有限要素法では再現しにくい地山のゆるみや破壊現象が比較的うまく表現されるようである。

このほかにも、粒状体解析法、剛体バネモデル解析、不連続変形法、剛塑性有限要素法などの手法^{1),2)}が提案され、基本的な地山挙動のメカニズムの解明などに適用されている。また、境界要素法（積分方程式法）の研究は有限要素法とほぼ同時代から取り組まれ、切羽周辺やトンネル交差部などの3次元解析に適用されている。

いずれの方法においても、実際の挙動を忠実に再現しようとするほど、解析に必要なパラメータが多くなる。実務においては、対象とする地山に対していかに適切な入力データ（材料物性値、境界条件など）を設定

するかが課題である。また、複雑な解析が誰にでも容易に実施できるようになった反面、利用する技術者の解析手法に対する深い理解と活用する力量がより一層要求されている。

2.4 逆解析法

上に述べたように、トンネルの解析においては解析手法もさることながら、解析に必要なデータをいかに適切に定めるかがポイントとなる。不確実な入力データを用いては、いかなる手法であってもその結果は信頼性が低いものとなる。そのような背景から、実際のトンネルの挙動に基づいて材料物性値などを求める考え方が生まれてきた。当初は有限要素法などの通常の解析手法を繰り返し利用し、試行錯誤的にそれらを求めている。

1980年前後になって、計測値と計算値の差が小さくなるよう、最小二乗法や最適化手法が用いられるようになった。このような計算プロセスが、通常の解析の逆となるので「逆解析（Back Analysis）」という名称が定着した。当時我が国ではNATMが導入され、盛んに実施された計測結果をいかに施工にフィードバックするかが課題となっていた。その解決策の一つとして現場計測結果の逆解析法が提案され、情報化施工実現の一手段として位置づけられるようになった⁹⁾。なお、逆解析を情報化施工と関連させて適用したのは我が国の研究の特徴である。

逆解析は、設計施工の事前検討や事後分析に用いる解析とは異なり、解析結果を直ちに施工に反映させるために現場において迅速な対応ができる技術であることが要求される。さらに、物性の評価、地山の安定評価、挙動の予測に留まらず、逆解析結果を支保や補強工などの設計変更や施工法に直接結び付けることが課題である。

3. 解析の役割

トンネルの解析の目的、対象、手法について活用実態を、1982年～2003年の間に公表されたトンネル関連の130論文・報文に対して調査された資料がある⁷⁾。それによれば、解析の目的は、①現象説明30%、②実務への反映30%、③解析手法の研究・検証40%であり、解析対象事象としては、①トンネルの安定性33%、②地山変形26%、③覆工の安定性10%、④近接施工の影響7%、⑤地下水問題5%、⑥トンネル作用荷重4%、という分析結果が示された。また、解析手法としては、主に有限要素法が用いられ、覆工の安定性やトンネル荷重に対しては慣用法（構造解析）と骨組構造解析が適用されている。最近では個別要素法とその関連手法の利用が目立ってきている。

この調査結果やこれまでの適用実績を踏まえ、実務上のトンネルにおける解析の役割（目的）をまとめると、次のようになる。

- ① 支保・覆工の設計
- ② 補助工法や特殊工法の設計
- ③ 地山挙動の予測（地山・切羽の安定、変形挙動、地下水問題、近接構造物への影響など）

論 説

- ④ 計測結果の評価と設計・施工への反映（情報化設計施工の支援）
- ⑤ 設計・施工結果の分析
- ⑥ 維持管理を目的としたトンネルの評価と予測
- ⑦ 現象・メカニズムの解明と理解

上記に示すような役割を明らかにして解析を実施することによって、解析手法の適否の判断が明確になり、それが解析技術の改善や新しい手法の提案に結びつくことになる。

4. 今後の課題

トンネル工学の解析では、次々と新しい技術が提案され技術革新が生まれる時代はひと段落して、実務でいかに活用するか（されたか）が問われる時代となっているように思える。解析技術をよりいっそう実務に活かす観点からの課題を以下に示す。

① 設計における解析の標準化

シールド工法、開削工法の覆工の設計においては、慣用解析法が与えられている。しかし、山岳工法においては、これまで数多くの方法の提案や実務適用の実績はあるものの、個別対応となっているのが実情である。すでになされている地山分類による支保設計の標準化と並んで、たとえば、3.に示した役割に対して解析のガイドライン等を取りまとめ標準化すれば、解析の適用範囲が明確になり、解析がより使いやすいものとなろう。同時に、日本のトンネル技術を国際展開するためにも、明文化された解析ガイドラインを持つておくことは重要である。

② 解析に関わる人材の育成

優れた手法であっても誤った使い方や結果の解釈を取り違えてはかえってマイナスとなる。解析の重要性が増し普及が進むなか、解析に関する正しい知識、ならびに、手法の特徴や限界を熟知する人材を育成することが重要である。特に、昨今、解析理論について時間をかけて学び、また、自らプログラムを作成する機会が少なくなってきたことから、トンネル工学の分野としても解析に関わる人材の育成を考えることは必要と思われる。

③ 新たな活用分野の創出

解析は、設計、施工、計測評価といったトンネルの建設に直接関わる技術としてだけでなく、リスク・マネジメント、トンネルの資産評価、建設優先順位策定などの政策支援において、定量的な説明や評価を与える技術として活用されることが期待される。

将来にわたって解析に関する新理論、新技術の研究開発が必要であることはいうまでもないが、実務の要望にあわせたニーズ駆動型の研究の必要性は今後ますます増すものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 桜井春輔・清水則一：不連続性岩盤の解析手法の現状、土と基礎、Vol. 40, No. 11 pp. 39～44, 1992.
- 2) 大西有三：不連続性を有する岩盤の解析手法の変遷、電力土木、270号、pp. 3～12, 1997.
- 3) G. Gioda and G. Swoboda: Developments and applications of the numerical analysis of tunnels continuous media, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 23, pp. 1393～1404, 1999.
- 4) T. Kawamoto and A. Omer: A review of numerical analysis of tunnels in discontinuous rock mass, Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech., 23, pp. 1377～1391, 1999.
- 5) S. Sakurai, S. Akutagawa, K. Takeuchi, M. Shinji and N. Shimizu: Back analysis for tunnel engineering as a modern observational method, Tunnelling and Underground Space Technology, 18, pp. 185～196, 2003.
- 6) 土木学会トンネル工学委員会・技術小委員会編：都市 NATM とシールド工法との境界領域一荷重評価の現状と過大、トンネルライブラリー、13号、土木学会、2003.
- 7) 土木学会トンネル工学委員会・技術小委員会編：山岳トンネルにおける模型実験と数値解析の実務、トンネルライブラリー、16号、土木学会、2006.
- 8) 土木学会トンネル工学委員会・技術小委員会編：トンネルへの限界状態設計法の適用、トンネルライブラリー、11号、土木学会、2001.
- 9) 土木学会岩盤力学委員会・岩盤力学における逆解析に関する研究小委員会編：岩盤工学の実務における逆解析、<http://www.jsce.or.jp/committee/rm/gyaku/gyaku-index.html>, 2001.

(原稿受理 2006.6.1)