

# トンネル・地下空洞の性能評価について

亀村 勝美

フェロー会員 公益財団法人 深田地質研究所 (〒113-0021 東京都文京区本駒込2丁目13-12)

E-mail:kame@fgi.or.jp

これまで地下空間に構築される様々な構造物は、建設コストは高いものの耐震性や耐久性に優れるというメリットゆえに建設されてきた。しかし、バブル経済崩壊後の社会にあっては漠然としたメリットを唱えるだけではその有用性は評価されず、性能の観点からの具体的な評価が重要となる。ここでは、トンネルや地下空洞の調査・設計から施工に至る一連の作業の現状を調査し、そこに内在する問題を明確にし、今後の課題について検討した。

**Key Words:** tunnel, underground cavern, performance, design method

## 1. はじめに

地下空間の有効利用が叫ばれてから久しいが、現状は活用されているとは言いがたい状況である。こうした現状に至った原因の一つに、地下構造物の建設コストの高さに加えてその性能が明確にされていないことが挙げられる。すなわち、高いコストに見合った価値がどこに、どれだけあるのかを社会に広く認識してもらうことを怠ってきたのである。

筆者は地下構造物の設計にあたって、その静的安定性を検討するだけでなく、地震時の性能についても具体的に提示することにより、地下構造物の優位性が明確になり地下空間の利用の促進に繋がることを指摘してきた<sup>1)</sup>。また、すでに供用されているトンネルや地下空洞の維持管理においても、その構造物に期待されている機能や性能を明確にした上で合理的な維持管理計画を立案することの重要性を指摘してきた<sup>2)</sup>。

しかし、こうした性能や機能の具体的定量的評価は、一朝一夕にできるものではない。それは、地盤・岩盤中に構築されるトンネルや地下空洞などの構造物の挙動を支配する様々な因子に不確実なものが多いという、他の構造物にない特徴を考慮しなければならないからある。

これまで我々技術者は、こうした不確実性に対し、調査設計から施工までの一連の流れの中で様々な想定を行い、工学的な判断の下に十分な安全性を見込んで構造物を造り上げてきた。いや、造り上げてきたと思っていた。

しかし 2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では、地震動とそれに起因する様々な事象に対する工学的な想

定が必ずしも適切ではなく、起こって欲しくないことが、あるいは起こってはいけないことが実際に起きてしまった。

翻って我々が構築してきたトンネル・地下空洞は、どうなのであろうか？設計条件の設定や施工精度に問題はないのだろうか？竣工して長い供用期間を経た構造物は今、どれほどの安全性をもっているのだろうか？かつてのトンネル覆工コンクリートの崩落事故のような「想定外」はもう起きないのであろうか？

ここではこうした観点に立ち、以下の項目について検討を加えた。

- ・ NATM の中で行われている調査から設計、施工までの一連のフローにおける不確実性とそれに起因する問題点
- ・ 様々な地下構造物における設計法、とくに耐震設計法における問題点

本報告は、トンネル・地下空洞の性能評価の観点からこれまでの調査設計から施工までの一連の内容を見直し、問題点を明らかにした上で、今後の課題を提示するものである。

## 2. 情報化施工管理における問題点

トンネルや地下空洞の標準的な施工法である NATM は、施工の進展とともに順次明らかになる地質情報や施工法の妥当性を情報化施工管理によりリアルタイムに把握し、次ステップの施工に反映させることによって安全で合理的な地下構造物の構築を目指すものである。

こうした情報化施工の概念は、図-1のように調査、設計、施工の3者が観察・計測を媒体として有機的に結合されたシステムとして表わされる。ただしこのシステムがその効果を発揮するためには、各々の項目について次に述べる事項が満たされている必要がある。

調査：対象とする地盤岩盤構造物の変形挙動について設計担当者が検討するのに十分な情報を提供できること。また、設計法の持つ精度に十分対応できる信頼性をもっていること。

設計：施工法や地山の力学的特性を評価できる手法であること。

施工：設計・解析や計測の結果と対比できる精度を持っていること。

計測：地山の挙動や支保の状況を十分な精度で把握できること。また、施工へのフィードバックを有効とするための即時性を持っていること。

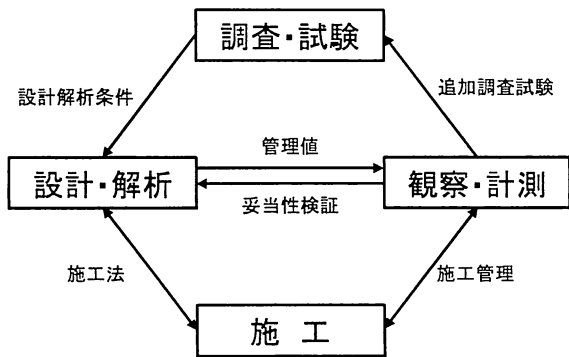


図-1 情報化施工の概念

ここで留意しなければならないことは、情報化施工では各項目が有機的に結合されているため、各々の項目の精度が全体の精度に影響を及ぼすことである。言い換えるならば、各々の実施項目に内在する不確実性の評価に一貫性が求められる。

このような観点から調査、設計、施工の各項目および各項目間における問題点を想定すると図-2のような項目が挙げられる。以下にその内の幾つかについて説明を加える。

(1) 調査・試験における問題点

粘性土や砂を主体とする軟弱地盤では、地層の構成も含めてその特性を事前の調査試験で明らかにすることができる。これに対し岩盤では、地質構成、初期地圧、岩盤物性、不連続面などの各々が非常に複雑であり、一連の調査試験によっても必ずしも全容を明らかにすることが出来ないことが多い。ここで重要なのは、実施した調査試験によって対象としている岩盤の特性のどこまでが把握できているかを正しく認識することである。

地山に関する情報として何が欲しいのか？そのための調査試験法にはどんなものがあり、それらをどう実施することによって何がどこまで判るのか？それらの結果は、知りたいと思っている情報を正しく反映しているのか？などについて十分吟味することが肝要である。

いたずらに精緻な、あるいは多量の調査試験を行う必要もないし、反対にあまりに簡単な、少ない数量の調査試験では明らかにされるべき地山情報の一部しか得られない。得ようとしている情報の内容とレベル、情報をま

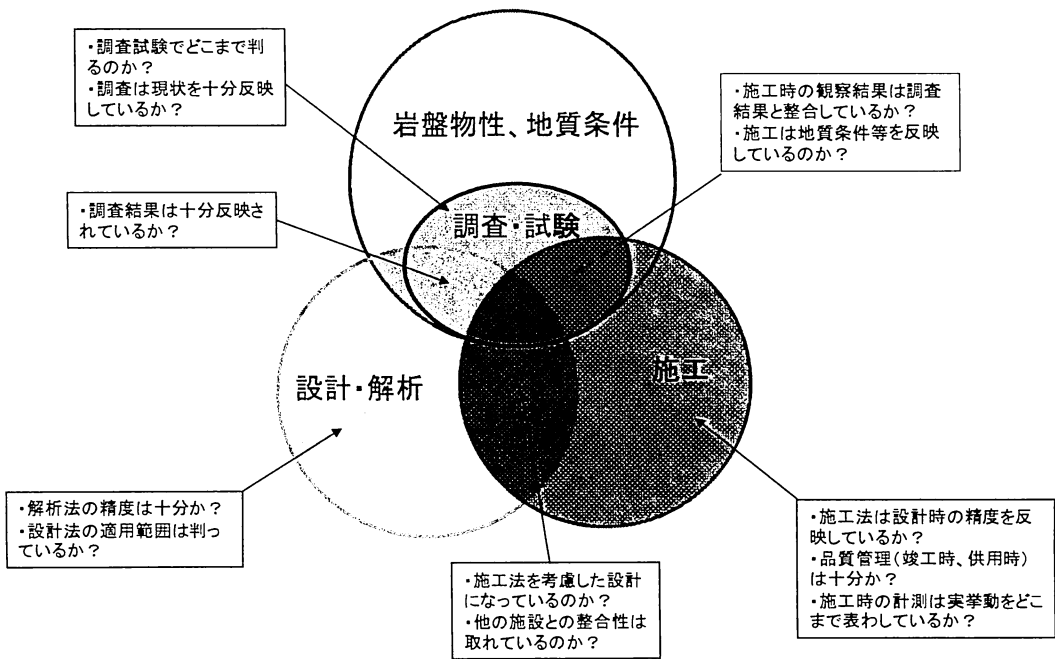


図-2 各検討項目における問題点

とめ地山特性を評価する技術、それらの情報にもとづいて実施する設計解析手法に対する理解の程度などを勘案した上で、方法と数量を決定する必要がある。

この意味において、調査試験の担当者は設計解析手法について、設計解析担当者は調査試験法について基本的な事項を理解している必要がある。また両者で何をしようとしているのか、何が問題なのかなどについて共通認識を持つべく議論の場を設ける必要がある。

## (2) 設計・解析における問題点：逐次掘削解析

たとえばトンネルの掘削解析では、切羽の進行とそれに伴う支保工の施工を考慮した逐次解析を用いることが一般的である。この場合、本来3次元の問題である切羽近傍の状態変化を主に解析上の制約から2次元問題として解析が行われる。これは解析に限らずトンネル掘削を模擬した室内実験においても同様である。

この場合、トンネル切羽進行の効果は、トンネル壁面の変位が3次元解析で得られるそれと対応するように掘削解放力を制御することによって評価している。トンネル設計では、トンネル周辺地山の安定性はもちろん、ロックボルトや吹付けコンクリートの安定性が問題となるため、こうした解析法により近似的にトンネル近傍の地山と支保の変位（応力）を表現している。しかしこれはあくまで便宜的な方法であり、詳細に見れば地山の応力も支保の断面力も3次元のそれとは異なっている。

この点に関し坂井ら<sup>4)</sup>は、詳細な3次元非線形逐次掘削解析を行うことによって初めてショートステップ工法による堅坑の挙動を説明できることを指摘している。一方、2次元解析において用いられる特性曲線（地山応力解放曲線、支保特性曲線）については、古くは亀村ら<sup>3)</sup>が、最近では熊坂<sup>5)</sup>、木山ら<sup>6)</sup>によってその適用性が検討されている。特性曲線を用いた2次元掘削解析は実用面からは非常に有用であるが、所詮簡便法であり、解析の精度には限界があることに留意する必要がある。

## (3) 設計・解析における問題点：安全率

構造解析結果の評価において、安全率の概念が用いられることが多い。トンネルなどの地下構造物についても同様であり、弾性掘削解析の結果得られた地盤・岩盤の応力状態をモールの応力円として描き、その応力円と地山構成材料の強度の近接の度合を局所安全率として評価し、その値をもってトンネル周辺地山の安定性を検討する場合がある。（地山を弾塑性体として解析した場合は、塑性化した領域をもって安定性を評価する。）

この場合、局所安全率 $\leq 1.0$ であればその地山が破壊に至っていることになる。しかし1.0以上である場合、それが実際のところどれだけ破壊=不安定化に対し余裕があるのか判断するのは難しい。ここで必要な情報は、

解析条件で設定した初期応力が実際と違っていたら安全率はどうなるのか、あるいは地山の強度特性がもっと劣っていたらどうなるのかなどである。

先に述べたとおり、設計にあたっては様々な条件、情報を考慮して解析条件を設定するが、その際に不確実性に対してどのような判断を下したかが問題となる。一般的には荷重（初期応力）についても地山の耐力（力学特性）についても調査試験結果にもとづき平均的な値を評価し、それを設計に用いることが多い。

したがって解析によって得られた安全率が1.0に近い領域が広く分布するなど、地山の安定性が問題となる場合には、リスクケースとして平均値から外れた場合を想定した解析を行い、どのような状況となる可能性があるのかを知っておく必要がある。

## (4) 設計・解析における問題点：掘削工法の違い

トンネルの掘削工法は、大きく機械掘削と発破掘削に分けられる。これらは掘削対象とする地山の強度によって使い分けられる。土砂～軟岩地山では機械掘削が、中硬岩～硬岩では発破掘削が一般的であるが、強度以外の制約条件、たとえば工期（施工速度）、環境（地表沈下、騒音・振動、地下水など）、岩盤性能（掘削影響領域=EDZの制御）などを考慮し、硬岩地山においてもTBMなどの機械掘削が選択されることもある。

こうした掘削工法の違いは、設計・解析上どう評価されているのであろうか？地山が堅硬で掘削後の安定性やEDZの広がりなどがとくに問題とならない場合には、掘削工法の違いは考慮されることはない。しかし地山が脆弱で安定性が懸念される場合や、掘削されたトンネルの構造的安定性だけではなく周辺岩盤の健全性や力学的、水理学的特性などが問題となる場合EDZの評価は重要であり、掘削工法の違いを考慮した詳細な検討が求められる。

一般にEDZは、切削・破碎による損傷と掘削解放力による応力再配分の結果としての地山非線形性による損傷とから構成される。

まず地山の切削・破碎による損傷は、機械掘削と発破掘削とで大きく異なる。また機械掘削の場合でも、掘削方法（全断面、自由断面）、機械の能力などによって違いが出てくる。発破掘削の場合では、発破パターン、爆薬の種類、量などによって違いが出てくる。

一方、応力再配分による損傷領域を考える場合、掘削形状の影響を無視することはできない。たとえば円形のトンネルを掘削する場合、地山の初期応力が等方的（ $\sigma_r = \sigma_\theta = P_0$ ）であれば解析上のトンネル形状は真円であるから、掘削されたトンネル周辺の地山応力は等方状態から周方向応力が卓越した状態（ $\sigma_r = 0, \sigma_\theta = 2P_0$ ）となる。このとき、図のように地山強度に対しほんの少しい

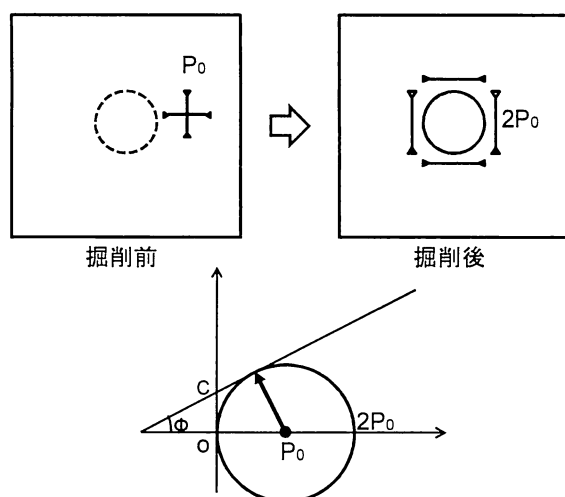


図-3 掘削による地山応力変化

も余裕があれば安全率は1.0を上回り、応力再配分によるEDZは生じないことになる。しかし、これは解析上の理想的条件での話であり、これでは実際の掘削工法を反映したものとはなっていない。

全断面機械掘削の場合は、ここでの解析条件に対応している。一方、ロードヘッダーのような機械掘削では、断面形状は少しずつ変化して行き、最終的に円形になる。したがって掘削途中では円形の掘削断面ではないため、その時々地山応力は形状効果により大なり小なり応力集中することになる。すなわち安全率1.0を下回る部分が生じる。同様のことは発破掘削についても言え、全断面掘削でなく加背割を設定する場合にはもちろん、掘削ラインの凹凸によっても局所的な応力集中が生じ損傷域を生じることになる。

こうしたことは経験的には知られてはいるものの、設計において具体的に評価されることは少ない。仮に掘削損傷領域として評価する場合でも、工学的判断により強度低下を生じた領域として評価されるにとどまる。しかしこのような方法では、周辺地山も含めたトンネル・地下空洞の性能を具体的に議論することは難しい。

#### (5) 設計と施工間における問題点：他との整合性

地下構造物の設計に当たっては、対応する設計基準・指針などに準拠して条件が設定され、計算が行われその結果が評価される。したがって複数の異なった構造物で施設が構成されている場合には、各々の構造物に対応した基準等が用いられる。このとき問題なのは、各々の基準によって条件の設定の考え方、結果の評価方法が異なっている場合があることである。たとえば、道路などで開削部から始まり、開削トンネル、立坑（発進立坑）、シールドトンネル、山岳トンネルと順次構造（掘削工法）が変化して行くとする。この場合、設計に用いる荷重である土圧の考え方はもちろん、耐震性の評価などで

も大きな違いがあり、各々の構造物の境界部分での安全性をどう評価するかは難しい問題である。

この場合、すべての構造物の設計を数値解析手法を用いたものにするとも考えられるが、解析法は統一されたとしても解析条件（解析モデル、物性の評価など）は必ずしも統一された考えに則って設定できる訳ではなく、問題は残る。

### 3. 耐震性評価に関わる問題点

2011年の東日本大震災では、莫大な被害が生じ、今なおその収束、復旧、復興の道筋は見いだせない状況にある。地震被害として津波と原子力発電所事故によるものが余りにも大きく、その他の被害が霞んでしまっているが、関東地方の大規模な地盤液状化、造成地斜面の崩壊などの地盤被害もかなり生じている。

一方、トンネルの地震被害について JR 東日本の報告（4/5 付）を見ると、東北新幹線では電化柱の折損・傾斜・ひびわれを最多（約 540 か所）として合計約 1 200 か所で被害が生じている。この内トンネルの関連するものはトンネル内軌道損傷の 2 か所のみであり、大きな被害は生じていない。一方在来線では、約 2 200 か所の軌道変位を最多として合計 4 000 か所の被害が生じており、内約 30 か所でトンネルの損傷が生じている。

また仙台市の地下鉄については地上構造物の被害は報告されているものの地下構造物については報告が無く、大きな損傷は生じていないものと思われる。

このように今回の大震災においても地下構造物には重大な被害は生じておらず、地下構造物が地震に強いということを示している。では地下構造物の性能評価の観点から問題はないのであろうか？

#### (1) シールド工法トンネル

シールドトンネルの耐震性の検討については、「シールドトンネルの耐震検討」（2007 年土木学会トンネルライブラリー第 19 号）にその詳細が記載されている。それによると、シールドトンネルの耐震性を検討するにあたっての基本は、以下の 2 点にある。

①構造物自身の応答は無く、周辺地盤の地震時挙動に追従する

②剛性が小さい

①は山岳トンネルと同様地下構造物一般について言えることである。

地下構造物の耐震性の評価には、静的解析法と動的解析法がある。それぞれ特徴はあるが、比較的簡便でありかつ具体的な地震動を考慮できるということで、静的解析法の一つである応答変位法が用いられることが多い。

応答変位法では、地震動の設定、地盤の応答解析、地震時外力の算定、トンネルと地盤を考慮した構造解析の順で検討が進められる。シールドの場合、構造解析で用いるはりばねモデルに特徴がある。すなわち②で述べた特徴を考慮し、セグメントをはり要素、セグメント継ぎ手を回転ばね、リング間継ぎ手をせん断ばねとしてモデル化する。

このようにシールドトンネルについては、開削トンネルと同等の耐震性評価手法が規定されていると言える。

(2) 山岳工法トンネル

山岳トンネルの耐震性については、「トンネル標準示方書[山岳工法]・同解説」（2006 年土木学会）において以下のように記述されている。

“第40条 地震、水圧、その他の影響”として「トンネルの設計にあたっては、トンネルの土被り、地形、地質、立地条件、周辺環境、使用目的等に応じ、必要により地震、水圧、その他の影響を考慮しなければならない。」とされている。すなわち一般的な山岳トンネルでは、これまでトンネルを横断する断層のずれによる被害などを除くと、大きな地震被害もなく、耐震性の検討は行われてこなかった。

一方、都市部の山岳トンネルについては、構造上の配慮が必要になる場合もあるとして、第 156 条の解説において「・・・良好な洪積地盤を対象とするトンネルでは、地震時の検討を省略している場合が多いが、坑口部付近の斜面が不安定な場合、土被りが小さく軟弱地山の場合、

おぼれ谷を通過する個所のように地質が急変する場合、開削トンネルおよび立坑との接続部、大断面トンネルの場合等特殊な条件においては地震時の影響を検討する必要がある。」と記されている。そして具体的な覆工の設計については参考文献 4) を参考せよとある。

この都市部山岳工法トンネルの覆工設計に関するライブラリーでは、設計用地震動の設定方法、地震時の構造計算等について詳細に述べられている。しかしこれらは、信頼性設計の考えにもとづく限界状態設計法の議論の中でのトンネル覆工の性能照査の一部であり、今後実用に供するためにはまだ多くの解決すべき課題が多い。また既存の仕様規定にもとづく設計法との対応が明確にされていないことにも留意する必要がある。

(3) 問題点

表-1 は、地下構造物ごとの耐震性評価に関わる特徴を整理したものである。

山岳トンネルでは、開削やシールドと異なり多くの不確実性を含んでいる。こうしたことから山岳トンネルの施工にあたっては「情報化施工」が採用されている。このことは山岳トンネルの耐震性を具体的に評価しようとする場合に、大きな障壁があることを示唆している。すなわち開削トンネルやシールドトンネルと同様に応答変位法や応答震度法により耐震性の検討を行う場合、

- ① トンネル周辺地盤の状況が不明
- ② トンネル周辺地盤の力学特性が不明

表-1 地下構造物における検討条件の違いと耐震設計法

|     |            | 開削トンネル                                         | シールドトンネル                     | 都市部山岳トンネル                                                                              | 山岳トンネル                           | 地下空洞                               | 高レベル                                          |
|-----|------------|------------------------------------------------|------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 地盤  | 地質         | ・地下浅部でありボーリングなどの基本的な調査により推定可                   |                              |                                                                                        | ・事前調査で判ることは限られており、概略の条件しか推定できない  | ・山岳トンネルより詳細な調査が行われる                | ・広域大深度に対し順次詳細な調査が行われる                         |
|     | 物性         | ・土質材料であり、基本的な試験により評価可<br>・類似のデータが豊富であり、推定可     |                              |                                                                                        | ・施工時情報により順次地盤条件の推定精度を上げていく       |                                    | ・概要調査から順次精度を上げる                               |
| 地下水 | 地下水        | ・調査により推定可                                      |                              |                                                                                        | ・調査では推定は困難<br>・予期せぬ湧水により施工が困難となる | ・調査により推定可                          | ・施設の性能に大きく影響するものであり、詳細な調査と評価が行われる             |
|     | 施造物(躯体)    | ・明かりで施工されるため施工管理が容易                            | ・工場で作成されるセグメントのため品質は一定、明確    | ・現場施工のため施工管理が難しい<br>・無筋コンクリートが多い                                                       |                                  | ロックボルト、吹付けコンクリート、PSアンカーなどの支保で安定を図る | ・山岳トンネルと同様であるが、品質管理に特段の注意を求められる。また長期安定性の評価が必要 |
| 工   | 施工時の地盤への影響 | ・構造物周辺の地盤は埋め戻され、その品質は施工管理により明確にされる             | ・周辺地盤に掘削による影響を出来るだけ与えない工法である | ・掘削の影響によりゆるみ領域が形成される<br>・特性の変化領域とされるが具体的な評価は難しい<br>・掘削は新たな水理境界を形成し、湧水など区入り条件に大きな影響を与える |                                  |                                    | ・ゆるみ領域の広がり、特性の時間依存性を含め詳細な評価が必要                |
|     | 耐震検討       | 静的解析      ・簡便法      ・応答変位法<br>動的解析      ・応答震度法 |                              |                                                                                        | ・ほとんど行われていない                     | 静的震度法                              | ・応答震度法<br>・動的解析                               |

という問題がある。トンネル周辺の EDZ は、掘削による応力解放の影響によりその力学(水理)特性が変化した領域と定義されるが、その具体的な特性の評価はまだ十分に行われてはいない。したがってトンネル完成後の地震時の安定性を評価する場合、この領域をどうモデル化するのかは難しい問題である。

#### 4. 今後の課題

ここでは2と3で議論した問題点を念頭に、今後トンネル・地下空洞に何が求められ、それを達成するためにどんな課題があるのかについて述べる。

##### (1) 既存構造物における課題

図4に示すように、これまで山岳工法トンネルでは特殊な条件がない限り、耐震性の検討も計画的な維持管理(対症療法的な事後保全でなく、性能・機能の評価を中心とした予防保全)も行われてこなかった。しかし低成長、少子高齢化時代にあっては、より安全でより合理的な社会基盤構造物が求められ、すでに建設され供用されている多くの山岳工法トンネルについても耐震性の評価と合理的な維持管理を行う必要がある。

山岳工法トンネルの耐震性の評価については、これまで具体的な検討はほとんど行われてこなかったため、基礎となるデータが不足している。たとえばトンネルの地震被害の詳細なデータ、動的解析に用いる物性値、岩盤のモデル化などである。山岳工法トンネルの耐震性については、朝倉ら<sup>9)</sup>が精力的に研究を行っているが、調査試験、設計解析、施工の各分野におけるより多くの研究と活発な議論が必要である。この場合、他の構造物の耐震基準や設計法との整合性に留意する必要がある。

一方、様々な制約条件下での膨大な社会資本の合理的維持管理が要求されている中、社会基盤構造物の中で重要な役割を担っている地下構造物についても合理的に維持管理することが求められている。これまで地下構造物については、あたかも永久構造物であるかのように思われてきた。しかしトンネル覆工コンクリートの崩落事故などを契機にアセットマネジメント手法が適用されつつある。

このアセットマネジメントがどんなもので、それが地下構造物の維持管理にどう適用できるのか、地下構造物の維持管理において目標とする性能とその具体的な評価手法とは何なのか、そして性能の経時的な変化＝劣化の評価手法がどんなものであるかについて、様々な事業者において検討が進められ、すでにその適用が実施されているところもある。

まだまだ多くの課題を抱えているものの、地下構造物

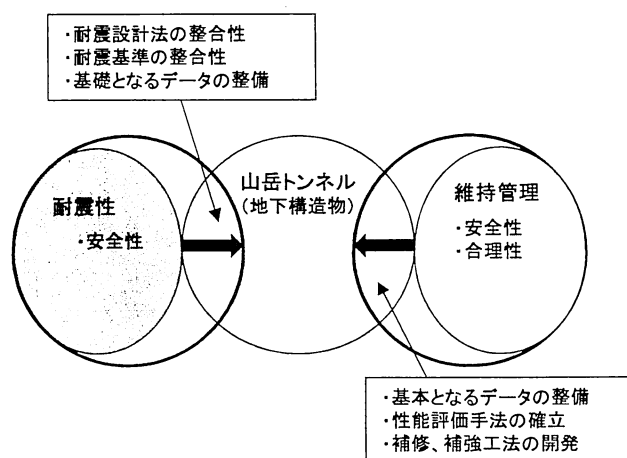


図-4 既存構造物における課題

についてもアセットマネジメント手法の適用は可能であり、アセットマネジメントに正面から取り組み、データを収集し、評価し、具体的な対策を講じていく必要がある。

残る問題は、

- ・ データはあるのか？どう探るのか？
- ・ 評価された性能を保つための補修工法はあるのか？

など、維持管理に関連する具体的なハード技術である。こうした課題についても関連する組織、団体が共通の認識の下にその解決を模索していく必要がある。

##### (2) これからの構造物における課題

トンネルや地下空洞などの岩盤構造物は、石油、ガスなどのエネルギー貯蔵施設や放射性廃棄物の処分施設などにその用途を広げつつある。これらの施設では、鉄道、道路、水路トンネルや地下発電所などの従来の施設とは異なり、力学的に安定した空間を提供するだけでなく、水封機能、気密性、超長期安定性などが求められる。

しかし2で述べたように、岩盤構造物の調査、設計から施工へ至る一連のフローにおいては不確実なものが多く残されており、まだ解明されたとは言えない状況にある。また今や切実な問題となっている重要構造物の耐震性に関連して岩盤構造物が置かれている現状を見てみると、3で示したようにやはり不十分な状況にある。

このような状況下で、新たな重要構造物を岩盤内に構築することができるのであろうか？こうした観点から、今後の地下空間の活用を進めて行く上で取り組むべき課題を示したものが図-7である。

エネルギー施設の内、石油やプロパンガスなどのエネルギーの大量長期貯蔵を目的とした岩盤タンクは、石油については久慈(岩手県)、菊間(愛媛県)、串木野(鹿児島県)の3地点に建設され、すでに供用されている。またガスについては、現在倉敷(岡山県)、波方

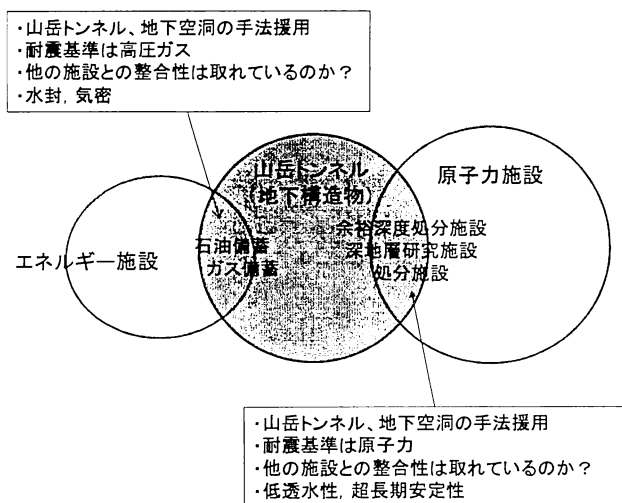


図-5 これからの地下構造物における課題

(愛媛県)において建設が進められている。

さて岩盤タンクの設計にあたっては、揚水式水力発電所などの地下空洞の設計手法を援用し、岩盤の安定性の検討、支保の設計を行っている。しかし岩盤タンクの機能として基も重要なのは力学的安定性ではなく、水封機能である。

現在、我が国の石油、ガスの岩盤備蓄方式として用いられている水封方式は、安定した地下水面下に空洞を掘って、その空洞へ恒常的に流入してくる地下水の圧力によって石油やガスを流れ出させることなく貯蔵しようとするもので、安定した地下水位を維持するため人工の地下水供給システムが設けられている。

ちなみに恒常的に空洞内へ流入した地下水は、石油やガスと混じることなく空洞底盤部に溜まり、一定量以上とならないように汲み上げることにより水封システムが成立する。

こうした水封機能の検討にあたっては、地下水浸透解析が用いられるが、不連続面を含む岩盤の透水性の評価は非常に難しい。それは、第一に不連続面の幾何情報(位置、幅、広がりなど)や水理特性に関する情報が簡単には得られないことによる。

力学的安定性においては、岩盤掘削の影響を受ける範囲が地下空洞の径  $D = (\text{高さ} + \text{幅}) / 2$  の高々2倍程度であるのに対し、水理学的挙動の影響範囲は10倍以上であり、その領域内の不連続面情報を得ることは難しい。また地下空洞は3次元構造物であり、鉄道や道路などの山岳工法トンネルのような線状構造物と比べると、地質状況の理解に必要とする情報量は格段に多くなる。

もう一つ検討を困難にしている原因に、まだ解析手法が確立されていないことがある。

一般的な土質地盤における地下水浸透解析は、地盤を連続体と仮定したモデル化が可能であり、実務設計においても用いられている。

しかし不連続性岩盤については、仮に不連続面に関する情報が調査・試験によって得られたとしても、それらをすべて反映したような解析モデルを作ることは非常に難しい。大小様々な不連続面の内どれをモデル化するのか、その透水性をどう設定するのかなど問題は多い。

とくに3次元問題として検討しなければならない地下空洞では、解析モデルの作成は実に変な作業となる。しかもそのモデルの妥当性を検討することも難しい。

こうしたことから実務にあたっては、解析による検討の目的を吟味した上で、部分ごとに等価な連続体としてモデル化することや2次元の問題として評価することが行われる。しかし空洞への地下水の総流入量が問題となるような場合には、こうした近似的な解析を用いることも可能であるが、貯蔵空洞の全域に亘って設定した範囲の地下水流動特性を確保しなければならない水封式備蓄においては、余りに大胆なモデル化は用を成さない。

このように水封機能の評価においては、未だに多くの解決すべき課題があり、これまでに建設され供用されている石油備蓄施設や現在建設中のガス備蓄施設における情報の収集とその評価を十分に行う必要がある。また、それと並行して不連続面の透水性の評価に関する基礎的な研究も行う必要がある。

一方、放射性廃棄物の処分施設については、その実現を目指してこれまでに精力的に研究が行われ、多くの成果が公表されている。すでに高レベル放射性廃棄物については瑞浪、幌延の深地層研究施設の建設が開始され、建設技術に関する研究と処分技術に関する研究が行われている。また、低レベル放射性廃棄物の内比較的放射能レベルの高い廃棄物については、地表より50~100m程度の深度の岩盤中に地下空洞を建設し、廃棄物を埋設処分する「余裕深度処分」が検討され、六ヶ所村において試験空洞を用いた調査が実施された。

こうした施設におけるトンネルや地下空洞の設計・施工法は、山岳工法トンネルにおける手法を援用したものである。また山岳工法トンネルでは一般的ではない耐震性の評価については、開削工法トンネルやシールド工法トンネル、あるいは地下空洞における検討方法が用いられている。

しかし耐震性評価について見るとそこで用いられている手法は、原子力発電所建屋の後背斜面と基礎岩盤の地震時安定性評価における手法と比較すると明らかにその精緻さにおいて差があり、原子力施設に共通する耐震性の考え方、評価基準を勘案した場合、その整合性に問題がある。深部岩盤内のトンネルや地下空洞の耐震性については、関連する組織、研究者の共通の課題として議論する場が必要である。

また力学的安定性に加えて要求される低透水性や長期安定性についても具体的な性能を評価する段階には至っ

ておらず、早急な対応が必要と思われる。

## 5. おわりに

今後はトンネルや地下空洞などの地下構造物についても性能評価を基本とした設計、施工管理あるいは維持管理が既存構造物についても、またこれからの新しい地下空間利用施設においても求められる。

ここでは性能評価を考えた場合、どのような問題点があるのか？それはどうやれば解決できるのかについて考察を加えた。多くの項目を提示したが、その内の幾つかを再記すると以下ようになる。

- 調査試験でどこまで判るのか？それは設計、施工の結果としての施設の性能にどう影響するのか？などについて調査試験担当者と設計施工担当者間で情報（結果や成果だけでなく、不確実なもの疑問に思うものも含めて）を共有し、共通の問題意識を持つこと
- 数値解析法と現実とのギャップをどこまで埋めることができるのか？（逆に言えば数値解析法の限界はどこにあるのか？）どうやって安全を評価するのか？について数値解析担当者は明確に提示すること
- 耐震性評価に用いる動的解析の前提となる岩盤の物性値、掘削時の評価（EDZ）が出来ていない。どうすればできるのか？どこまでできるのか？を明確にした上で具体的にに取り組むこと

いづれも易しいことではないが、地下空間を本当の意味で有効に使用していくためには、これまでの多くの地下構造物の調査試験、設計解析、施工、施工管理、維持管理に関わってきた技術者に蓄積された経験と知識が失われない内に解決の目途をつける必要があり、残された時間は少ない。

## 参考文献

- 1) 亀村勝美（2009 年）：岩盤構造物の性能評価における課題について、深田地質研究所年報，第 10 号，pp133-148
- 2) 亀村勝美（2010 年）：大深度地下空間開発の可能性を探るライフサイクルコスト評価，地盤工学会誌，58-4，pp8-11
- 3) 亀村勝美，平野逸雄，竹田直樹，里優（1982 年）：切羽進行を考慮したトンネルの解析と実際，土質工学シンポジウム発表論文集，Vol.27，pp.55-60
- 4) 坂井一雄，小池真史，青木智幸，山本卓也，稲垣大介，山崎雅直（2010 年）：三次元解析による立坑掘削時の覆工および周辺岩盤の挙動分析，第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.381-386
- 5) 熊坂博夫（2007 年）：地山の力学特性が支保特性曲線と最終支保反力に及ぼす影響について，トンネル工学論文集，第 17 巻，pp.9-19
- 6) 木山英郎，西村強，畑浩二，中岡健一（2008 年）：トンネル用ソフトで通常の設計解析と同時に描く地山特性曲線と内空変位曲線，第 37 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，pp.119-124
- 7) 亀村勝美（2010 年）：トンネル・地下空洞の耐震設計について，西日本岩盤シンポジウム
- 8) 朝倉俊弘，小島芳之，野々村政一（2009 年）：山岳トンネルの地震被害メカニズムと耐震性向上に関する研究

## ON THE PERFORMANCE EVALUATION OF TUNNEL AND UNDERGROUND CAVERN

Katsumi KAMEMURA

Up to now, various structures have been constructed in the underground space because they have advantages in earthquake resistance and durability, though the construction cost is high. However, that advantage is not accepted only by chanting a vague advantage in the society after the collapse of the bubble economy, and a definite evaluation from the viewpoint of the performance becomes important. Here, the current state of underground structures from geological survey, design to construction has been investigated and problems and future tasks are examined.