

岩盤構造物の性能評価における課題について

ー 東日本大震災から学ぶこと ー

亀村勝美

深田地質研究所

On the Performance Evaluation of Tunnel and Underground Cavern

KAMEMURA Katsumi

Fukada Geological Institute

要旨：これまで数多くのトンネルや地下空洞の設計，施工に携わってきた経験を基に，岩盤構造物の性能評価の重要性を指摘するとともに，具体的な性能評価を実施するに当たって何が問題なのかについて議論してきた．そしてリスクを考慮した維持管理手法や地下構造物の耐震性評価が有用であること，耐震性評価については手法論の確立に関する更なる議論が必要であることを示してきた．しかし今回，東日本大震災という未曾有の災害（自然災害と人為的災害）を経験し，ただ漠然とした問題点を唱えるだけでは不十分であり，性能の観点からの具体的な議論を展開していくことの重要性を痛感した．ここでは，再度トンネル・地下空洞の性能評価の現状を振り返り，今後の課題について検討した．

キーワード：地下構造物，耐震性評価，トンネル，地下空洞，高レベル処分

Abstract: Author has been engaged in a lot of project constructing tunnels and underground caverns. Based on those experiences, the importance to evaluate the performance of underground structures was pointed out and the problems to be solved for the performance evaluation were discussed. Then it was suggested that asset management considering risk and aseismicity evaluation were useful and important. Also in order to do these, more discussions about aseismic design methodology were required. However, the Higashi-Nihon Great Disaster is an unprecedented disaster and showed that it is not enough to urge the problems vaguely. Here, the current state of the performance evaluation in the underground structures was reviewed, and the problems and future tasks were examined.

Keywords: underground structure, aseismic design, tunnel, underground cavern, high level radioactive waste disposal

1. はじめに

2011年3月11日午後，筆者は深田地質研究所2階の研究室でPCに向かっていて，14:47頃，初期微動としては大きな震動があり「おっ，結構大きい地震だな！」と感じ，S波を待つて

いた．ところがS波が中々来ない．数10秒経過し，「アレッ，どうしたのかな？」と思っっているうちに大きく揺れ始めた．阪神大震災以来の初期微動からの時間と揺れの大きさから「これはかなり遠方の大地震だ！」と判断した．

その後，揺れは収まるどころか大きくなる一

方で、ついには机上の PC とモニターを手で押さえないとイケない状態となった。2〜3 分は続いた随分と長いゆっくりとした揺れが収まったところで周りの安全を確認し、TV を点けると東北地方でマグニチュード 7.9 の地震が発生したことが報道されていた。このマグニチュードは見ている間に 8.4 に修正され、18 時頃には 8.8 となった。（これは 3/13 に 9.0 と再修正された。）

深田地質研究所と同じ文京区にある東京大学地震研究所のこの時の地震動（図-1）を見てみると、上述の経験が裏付けられる。地震研究所の HP には、この地震動の速度応答スペクトルを計算した結果も示されており「強い速度応答が 0.5〜20 秒の広い周期帯で発生しており、超高層ビルだけでなく、木造家屋（0.5 秒以下）〜低層建築（1 秒前後）〜超高層（数秒）ビルなど全て大きく揺れたと考えられる」としている。

震源から遠く離れた関東地方での広域の地盤液状化、構造物の損傷などの被害が生じたの

も無理はないと思われる。

大津波警報が地震と同時に出されていたので TV の中継を見続けていると、2004 年 12 月 26 日のスマトラ沖地震によるインドネシア・バンダアチェの津波と同じような画面が目の前に再現された。まるでパニック映画のように津波が次々と来襲し、街を飲み込んでいった。本当に信じられない思いで中継を見続けた。できることなら見たくない光景でもあった。しかし工学者である我々は、この厳しい現実を目をそむけることなく各自の立場で何かを学ぶ必要がある。

7/31 付朝日新聞の「ザ・コラム」は、“災害と専門家「敗北」に立ちすくまずに”として、イタリアでの地震予知に関する刑事裁判について論じている。

これはイタリア中部で 2009 年、小規模な地震が数か月にわたって続いたあと、4 月にマグニチュード 6.3 の地震が起き 300 人余りが犠牲になった地震を巡って、イタリアの裁判所が、リスクを評価する国の委員会が適切に警戒を呼びかけなかったとして、委員会の専門家 7 人を過失致死の罪で起訴したもので、そこでは、専門家の在り方が問われているとしている。

すなわち、政府は一刻も早く安全宣言を出して不安を払拭したいがために、専門家からの「安心である」という言葉を引き出そうとする。これに対して専門家は、安易に「安心してよい」という宣言を出す。現代の科学技術では大地震の予兆なのか単なる群発地震なのか判断できないと言うべきところを。またコラムの筆者は、この構図が関東大震災の時にも見られたことを指摘している。その上で、ありのままに語ると素人がパニックを起こすという考えは専門家の思い上がりではないか。そしてこれは、我

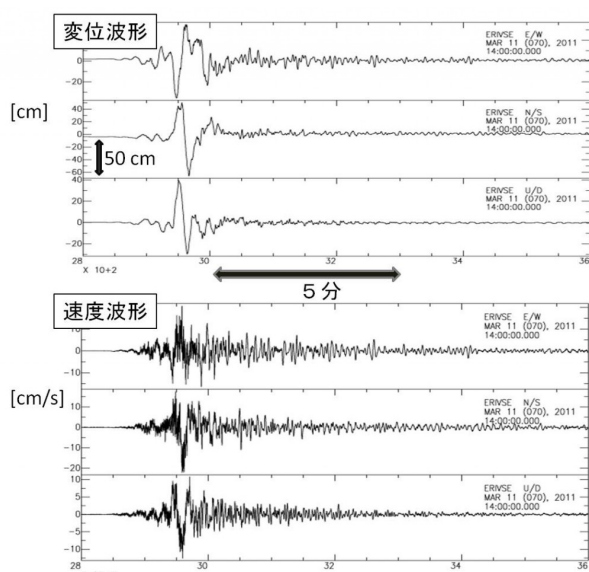


図-1 東大地震研での地震動
(東大地震研 HP 古村・武村による)

が国において原子力の専門家に対し問われていることでもあるとしている。

このコラムで我々が襟を正して聞くべきは、「専門家の仕事は『解明できたこと』を語ることに尽きた。しかし東日本大震災を境に、期待されている仕事は・・専門知識をもってしても解明できないことを率直に語る誠実さだろう。」との結論である。

翻って筆者が専門としてきた岩盤工学やトンネル工学の分野を見てみると、これまでの様々な研究は、やはり解明できたことを、いや解明できたと思い込んでいることを述べてきただけのように思えて仕方ない。実は筆者以外にも多くの技術者が、頭の片隅に何か腑に落ちないものが残っている、あるいは十分に説明したつもりであるが正しく理解されていないのではないかという思いを経験しているのではないだろうか？

何が今もって判らないのか？どこに不確実なものがあり、どんなリスクがあるのか？など、本当に重要な情報をともしれば、素人には理解できないだろうからと公にしてこなかったのではないだろうか。今、その難しいことを如何に素人に理解してもらえるように平易に語れるかが、専門家に求められている。

本報告ではこのような観点から筆者の研究テーマである岩盤構造物の性能評価に関する様々な技術の現況と問題点について議論したい。

2. 岩盤構造物の設計・施工に関わる問題点

トンネルや地下空洞の標準的な施工法である NATM (New Austrian Tunneling Method : 新

オーストリアトンネル工法。ただしこう呼んでいるのはオーストリアと日本だけという話もある) 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-2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。

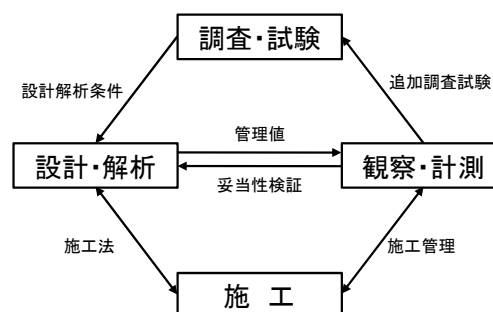


図-2 情報化施工の概念

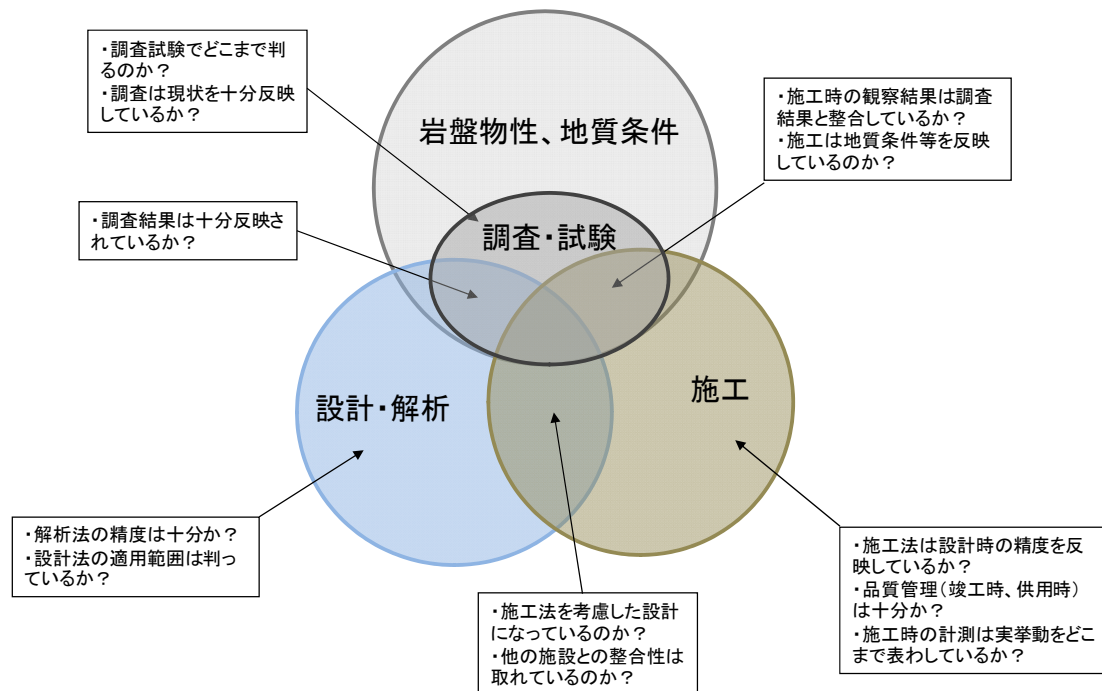


図-3 各検討項目における問題点

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考えてみると図-3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かなり明らかにすることが出来る。これに対し岩盤では、地質構成、初期地圧、岩盤物性、不連続面のいずれもが非常に複雑であり、一連の

調査試験によって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、情報をまとめ地山特性を評価する技術、それらの情報に基づいて

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。

このような事は、これまでも地質担当者からも設計担当者からも指摘されてきたが、未だに実施されているようには思われない。

(2) 設計・解析における問題点：逐次掘削解析

例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。

3次元の弾性連続体中に直径 D の円形トンネルが掘削された場合、初期応力が等方的であったとするとトンネル坑壁のトンネル内側への変位（内空変位）は図-4に示すような変化をする。図において縦軸は、トンネル切羽の影響が無くなる切羽から十分離れた位置（ $3D$ ）での内空変位で正規化されている。また横軸は、切羽からの距離を示している。

これを見るとトンネルの変位は、切羽が到達する前、 $-1.0D$ 位から顕著になり切羽到達時に

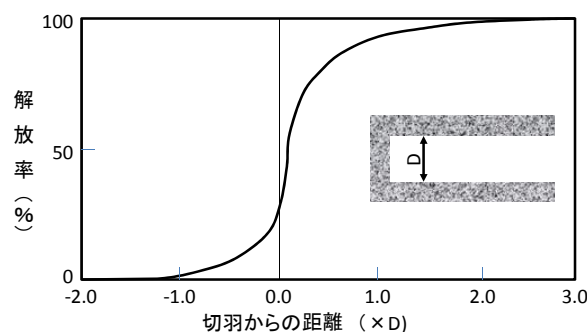


図-4 掘削応力解放曲線（特性曲線）

は既に全変位量の30%程度が生じていることが判る。

2次元解析で切羽進行の影響を評価する場合、2次元解析での掘削による解放力に図-4の縦軸の割合（掘削応力解放率）を乗じて解析対象とする断面の変位を再現する。例えば切羽位置でのトンネルと周辺の地山の変位は、全掘削解放力の30%を作用させることで得られる。

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ッ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、古くは亀村らが、最近では熊坂、木山ら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。）

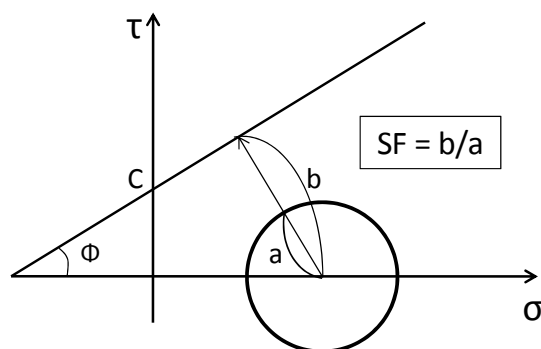


図-5 局所安全率の定義

この場合、局所安全率 ≤ 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、設計に当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基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、例えば工期（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の広がりなどが特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。例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。この時、図-6に示すように地山強度に対しほんの少しで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。

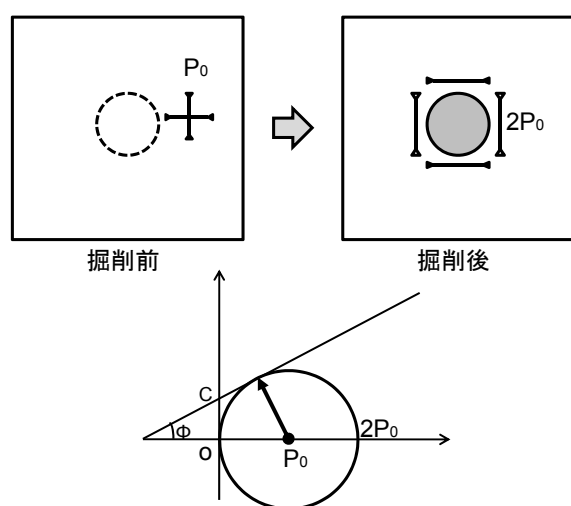


図-6 掘削による地山応力変化

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勿論、掘削ラインの凹凸によって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く、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。しかしこのままでは周辺地山も含めたトンネル・地下空洞の性能を議論することは難しい。

(5) 設計と施工間における問題点：他の構造物との整合性

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。この時問題なのは、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。例えば、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勿論、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。

何よりこうした違いがあることは、様々な構造物により構成されている道路のシステムとしての性能を明確にできないことを示している。すなわち、どこか一部の構造物が他より先に機能を失うことによって、全体の通行させるという機能が止まってしまうのである。

この場合、すべての構造物に対する設計を数値解析手法によるものにすることも考えられるが、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

東日本大震災では、莫大な被害が生じ、今もなおその収束、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。

ではトンネルの地震被害はどのようなのだろうか。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・ひび割れを最多（約 540 か所）として合計約 1200 か所で被害が生じている。この内トンネルに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、覆工コンクリートの剥落などの大きな被害は生じていない。一方在来線では、約 2200 か所の軌道変位を最多として合計 4400 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、市の HP を見る限り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。

一方今回の地震被害として、岩手県久慈の石油地下備蓄基地の地上設備の津波による被害が報道されていた。その映像は、まさに全滅と言ふべきものであった。写真-1 は、津波被害を受ける前の地上施設の状況である。タンク、配管、建屋などが配置されていることが判る。これらの施設が 4/5 時点での映像では写真-2 のようになっており、被害の凄まじさは歴然としている。

もしここが地上タンクによる備蓄基地であったら一体どうなっていたのであろうかと背筋が凍る思いがした。岩盤地下タンクが本当に被害を受けていないのか、多少の被害があるのかなど詳細な情報は知る由もないが、少なくとも原油の備蓄機能に問題はないことは確かなようである。今回の地震による気仙沼や千葉県



写真-1 久慈地下備蓄基地地上施設状況
(Google Earth より)



写真-2 久慈地下備蓄基地被災状況
(Google Earth より)

の製油所での火災の映像を見るにつけ、地下構造物の底力を感じた。

他にも数多くある地下構造物がどのような被害を被っているかは、津波被害と原子力発電所事故のニュースが情報のほとんどを占めている現時点では判らないが、これまでの情報では地下構造物には重大な被害は生じておらず、やはり地下構造物が地震に強いということを示している。

我々は、今回のような未曾有の災害に対しても出来るだけ被害を小さくするべく様々な対策を講じる必要がある。この意味において地下空間のもっと積極的な利用を考えるべきである。しかし、災害に対して地上構造物にない優位性をもっている地下構造物の性能を定量的に、かつ判り易く示していかない限り、専門家だけの机上の空論になってしまうことも確かである。

筆者は、昨年の深田地質研究所年報において各種地下構造物に関する既存の設計法を耐震性検討の観点から概括し、問題点の抽出を試み

た。その結果、地下構造物の高い耐震性のメリットを具体的に示すためには、以下の項目について検討を加え、具体的な形で取りまとめ、提示する必要があることを示した。

- ① 山岳トンネルの耐震検討の考え方、手法の明確化
- ② 地下構造物間の耐震性評価基準の統一

①については、朝倉らの研究で明らかにされた山岳トンネルの耐震性評価の考え方、手法についてより多岐にわたる検討を行い、耐震検討を行うべき山岳トンネルの条件を明示する必要がある。また合わせて既設トンネルの耐震診断法、耐震補強法などについて検討する必要がある。

②については、監督省庁あるいは事業主体の違いという大きな問題もあるが、まずわれわれ技術者が現状の技術を正しく認識し、構造物間の整合性を念頭に問題点を探り、具体的に検討していくことが必要である。

4. 地下空間の活用における問題点

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出来るのであろうか？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、既に供用されている。またガスについては、現在倉敷（岡山県）、波方（愛媛県）において建設が進められている。

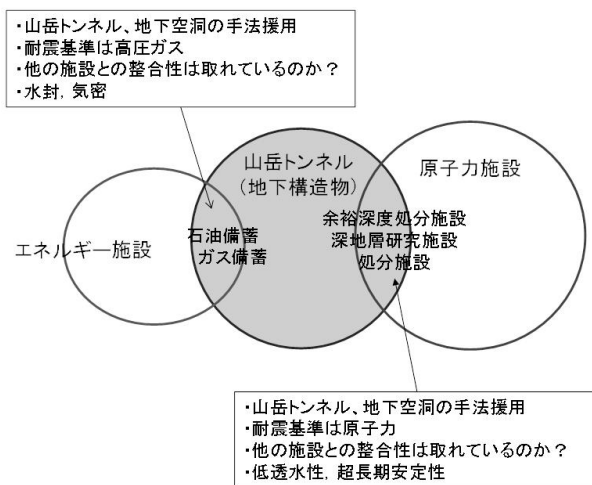


図-7 これからの地下構造物における課題

ガスの貯蔵方式には、地上・地中・地下タンク方式の3方式があり、それぞれの特徴は以下のとおりである。

地上タンク方式

最も採用されている備蓄方式。一般的な貯蔵タンクとしての操業実績が豊富で、建設コスト

が安く、タンクの安全性及び安定性において優れている。

地中タンク方式

タンクの貯蔵部分を地中に埋める備蓄方式。漏液、拡散の危険性が少なく、耐震性に優れている。またタンク間距離が小さく、土地の有効利用が可能（地上タンクの約3倍の容量を持つ）で、地上への露出が少ないので景観への影響を抑えることができる。

地下タンク方式

地下の岩盤内にタンクを造り、中にガスを貯蔵する備蓄方式。漏液、拡散の危険性が少なく、地震、落雷などの自然災害に強いことが特長。タンクは地下にあるので、必要な土地面積が少なく、景観への影響も抑えることができる。

今回の大震災では、図らずも地下タンク方式の自然災害に対する強さが示されることになった。

さて岩盤タンクの設計に当たっては、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当たっては、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解析手法が完成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、それらを全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山積である。

特に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大変な作業となる。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当たっては、解析による検討の目的を吟味した上で、部分毎に等価な連続体としてモデル化することも行われる。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。

しかし現実はいくまでの岩盤構造物の建設において竣工までに蓄積された膨大な量の調査・設計、設計・施工、施工管理に関する情報を最終的に総括し、出来あがった構造物がどんな性能を持っているのかを評価した上で公表するということはほとんど行われてこなかった。これでは性能を中心とした構造物の評価手法の完成は見込めない。

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基本的考えを示した。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。

1) 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

2) 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

3) 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（EDZ）の評価が出来ていない。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

いず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。

筆者はこれまでのトンネルや地下空洞の設計施工に関わる多くの経験に基づいて、残されている問題点の指摘することをテーマとして研究を行ってきた。

しかし今回の東日本大震災を経験して、単にやり残したことをまとめるだけでは不十分であり、これから求められるであろう新たな技術についてより具体的な貢献をすべきと考えている。

本報告にまとめたことはまだほんの序章に過ぎない。本当に多くの困難な課題が残されており、これからやるべきことは多い。

参考文献

亀村勝美（2009）：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.

亀村勝美（2010）：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.

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）：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.

亀村勝美，平野逸雄，竹田直樹，里優（1982）：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.

熊坂博夫（2007）：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.

木山英郎，西村強，畑浩二，中岡健一（2008）：トンネル用ソフトで通常的设计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.

亀村勝美（2010）：トンネル・地下空洞の耐震設計について，深田地質研究所年報，第11号，pp155-166.

朝倉俊弘，小島芳之，野々村政一（2009）：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.