

岩盤構造物の性能評価における課題について

亀村勝美

深田地質研究所

Some Considerations on the Performance Evaluation of Underground structures

KAMEMURA Katsumi

Fukada Geological Institute

要旨：一般的に、同じ機能を持つ構造物であれば、地上構造物に比較して地下構造物の建設費は高いとされている。したがって、地下のエネルギー貯蔵用岩盤地下空洞などにおいては、岩盤構造物の長期耐久性やメンテナンスフリーなど、長期間の供用期間を通してのトータルコストの優位性に基づいて建設してきた。しかしながら合理的な構造物の建設と維持管理が求められる今、岩盤構造物においても、当初設定された機能や性能を維持するためには、それらの時間的变化を念頭に置いた検討とその結果に基づく事前の対応が必要であり、これまでのような漠然とした長期耐久性やメンテナンスフリーの議論だけでは地下空間の優位性を明示することは困難となった。ここでは、ライフサイクルコストの概念に基づいて地下構造物の性能やコストの評価方法の現状を概括し、課題について述べる。

キーワード：岩盤構造物、性能評価、LCC

Abstract: In general, the construction cost of underground structures is more expensive than that constructed on the ground if they have same functions. In spite of this fact, the underground caverns for energy storage facilities, powerhouse and others have been constructed, because they may have advantages in total cost of long term maintenance and operation. However, today, rational design, construction and maintenance are common requirements for all structures, so the preliminary measures based on the theoretical, not vague, discussions about how to maintain the initial functions and performance which may change in time, are also required for underground structures. In this paper, based on the concept of life cycle cost, the present situation in the evaluation of performance and cost of underground structures is summarized and problems are discussed.

Keywords: underground structure, performance evaluation, life cycle cost

1. はじめに

人類は、その誕生当初から猛獣や暑さ寒さから身を守る、あるいは大事なものを安全に保管する、すなわち安全・安心のために様々な創意工夫を行ってきた。

原始時代、人類は火を使い、物を道具として使うことで他の動物と一線を画し、大いなる進化へとその一步を踏み出した。しかし火にしても様々な道具にしてもそれらは自然から与えられたものであった。そのような原始時代にあつて、自然に形作られた岩盤空洞（洞窟）は安

全・安心の意味で最高の生活空間であった。暑さ寒さを軽減できるばかりでなく、外敵からの防御も、また大事な火を燃やし続けることも容易にしてくれたのである。結果として、生き残るために費やしていた時間に余裕が生まれ、安全・安心な空間の中で情報を交換し合い、瞑想し、想像をめぐらすことによって言葉が創られ、歌が作られ、絵が描かれ、人類はより異なった存在へと進化して行ったのではないだろうか。

しかし人類の発展とともに、より多くの安全・安心な空間が求められるようになると、生活空間の構築にあたって自然から得られる草、木、土、岩などの材料だけではその要求を満たすことは出来なくなった。また、より多くの、より大きな空間を得るために様々な構造、工法が必要となった。もちろん、それは様々な機能を備えた道具、機械の発明なくしてはあり得ない。そして金属、コンクリートなどの新しい材料を創り出す能力が得られるまでには長い時間と多くの経験を要したが、いったんそれらが開発されると、それらを用いた構造物の設計法、施工法なども次々と開発され、現在我々が目にすることが出来るような多種多様の構造物が造られるようになった。

今や実に多くの構造物が地上、地下に造られている。しかし地上に造られた構造物と地下に造られた構造物を比較すると、同じ機能、性能を持つ空間であれば岩盤内に作るよりも地表に作る方がコストを要しないとされ、地下空間の利用は限られた条件あるいは用途の構造物に限定されるようになってきた。

鉄道や道路における山岳トンネル工法トンネルは、その計画線形上避け得ないものとして、また、揚水式地下発電所のための大規模地下空洞はその機能から当然地下に作られてきた。一

方、エネルギー貯蔵のための岩盤タンクなどの利用推進に当たっては、長期耐久性やメンテナンスフリーなどを基に供用期間を通してのトータルコストを以って経済的なメリット有りとし、建設してきた(図1)。



図1 エネルギー備蓄用岩盤空洞

しかしながら、これまで設定した供用期間中に大規模な補修、補強を必要としない、あたかも永久構造物であるかのように思われ続けてきたトンネルなどの岩盤構造物も、1999年の新幹線トンネル覆工コンクリート片の落下事故を契機に、

- 構造物の性能は時間の経過とともに低下する。
- 構造物の設計において考慮する荷重は不確実性を持つものであり、長い供用期間中には設計時の予測を越える荷重が作用し、構造物の損傷や崩壊を招くこともある。

という、当たり前のことを再認識させられたのである。すなわちコンクリートや岩盤で構成される岩盤構造物においても、当初設定された機

能、性能を維持するためにはそれらを念頭に置いた計画段階の検討と、設計から施工、維持管理に至る各ステップでの適切な対応が必要であることが明らかとなってきた。

では地下空間利用のメリットはないのか？

本研究の目的は、岩盤構造物に関する性能（安全性や経済性）の評価に関する現状の問題点を概括し、それらに対する新たな取組みを模索することにある。

2. 土木構造物のアセットマネジメント

1956 年の経済白書に「戦後は終わった」と述べられてから以降のいわゆる高度成長期に数多く建設された社会基盤構造物が、50 年近くを経てその機能に様々な支障を来し始め、トンネルや橋梁などの土木構造物の機能維持にかかるコストは、時間の経過と共に上昇の一途を辿り始めた。

一方、社会は、その成熟化と共に経済的には長い低成長時代に入った。即ち、社会資本の増大は緩やかになってきたものの、その中に占める老朽化構造物の割合は、今後時間の経過と共に飛躍的に増加する。方や高齢化・少子化などから社会基盤構造物の機能維持と安全確保は、なんとしてでも成し遂げねばならない。とは言え、税収の増加は見込めないため、公共投資といえども、いや公共投資であるからこそ、何のために、どのように限られた予算を使うのかについての説明責任（アカウンタビリティ）は果たさねばならない。

このようなことから構造物の建設費と供用期間中の維持管理に関する費用の総計（ライフサイクルコスト＝ LCC ）を、安全と機能維持の条件の下に最適化すること、すなわち科学的

手法によるマネジメントの導入が求められている。

国土交通省は、2003 年「道路を資産として捉え、構造物全体の状態を定量的に把握・評価し、中長期的な予測を行うとともに、予算的制約の下で、いつどのような対策をどこに行うのが最適であるかを決定できる総合的なマネジメントの構築が必要」としてアセットマネジメントの重要性を説き、2004 年度以降各地方整備局において具体的な対応を開始している。また各地方自治体においても計画的な維持管理への取り組みを開始したが、その多くはアセットマネジメント導入の前提条件となる構造物や施設の点検に本格的に着手した段階でしかない。しかもこれまできちんとした点検への取り組みを怠ってきた事が災いし、点検作業には膨大な時間と労力を必要とするため、本格的なアセットマネジメントへの道のりは遠いのが現状である。

さて、アセットマネジメントのためには、対象とする資産（構造物）の現在の価値、それを得るために支出した費用、そしてこれから維持管理していくための費用のすべて、すなわちライフサイクルコストを知る必要がある。土木構造物のライフサイクルコスト（以下 LCC と記す）とは、計画・設計－建設－維持管理－解体撤去の各過程に要する費用の総額であり、これを数式で表すと、次式のようになる。

$$LCC = C_i + C_d + C_m + C_f \quad (1)$$

ここに、 C_i ：初期建設費用、 C_d ：運用費用

C_m ：維持管理費用、 C_f ：解体撤去費用である。

式(1)は、計画・設計から解体撤去に至るま

での全コストの合計を示しているが、維持管理費用のみを取出して *LCC* として比較検討している例も多い。

しかし供用年数として 50 年や 100 年を考える土木構造物では、このような運用や維持管理のコストだけではなく、材料の劣化に起因する構造物の損傷が引き起こす事故や地震、台風、集中豪雨などの災害によるコストが無視し得なくなる。こうした事故や災害の発生確率は非常に小さいが、一旦生じると莫大な損失を生じるものであり、工学的に定義されるリスクとして評価することができる。こうしたリスクが万が一一生じると、場合によってはその構造物の運用主体の存続をも脅かす可能性がある。

さらに、最近の社会情勢や経済情勢においては、社会構造や経済構造の急激な変革により、構造物に対するニーズや価値観が変化し、従来の価値観では価値ありと評価されるものも、ある時に無用の長物となるリスクも十分考えられる。すなわちコストだけではなく、社会的便益や社会的信用など様々な観点からのリスク評価によって *LCC* 算定結果の解釈にも大きな違いが出てくることにも十分留意する必要がある。

3. リスクとリスクマネジメント

我々が普段使っているリスクという言葉には 2 つの側面がある。一つは「何かを失う」という側面である。例えば劣化が進行し構造物が壊れるという状況に対してリスクが意識される。

もう一つは、そうした事象が「不確実である」という側面である。まだ大きな変状は生じていないが、ひょっとしたら壊れるかもしれないというときにリスクが意識される。リスクを考慮

して何か判断を下す場合には、リスクの持つこの二つの側面を評価する必要がある。そこでここでは JIS Q 2001 での定義に基づき、損失の発生確率 (probability) と損失 (consequence) の積 (これを損失期待値という) をリスクと定義する。式で示すと次のようになる。

$$R = P \text{ (発生確率)} \times C \text{ (損失)} \quad (2)$$

例えば山岳工法トンネルの施工では、切羽の進行とともに新たな不良岩盤が出現したり、それまでに予測しなかった大量湧水が発生したりする可能性がある。この場合、これらの事象が発生する可能性 (確率) と具体的な事象が発生した場合の損失 (岩盤補強対策費用、高透水帯対策費用、工期遅延による費用増、第三者被害が発生した場合の損害、安全性に対する社会的信頼の損失など) の積がリスクとして評価される。

したがって岩盤構造物の建設から供用、供用後の廃棄までのトータルコスト (*LCC*) は、初期建設費用、運用費用、維持管理費用などと予期しない損失の和として次式のように定義することができる。

$$LCC = C_i + C_d + C_m + C_f + \sum_n P_j \times C_j^R \quad (3)$$

ここに ; P_j ; j 番目のリスク事象の発生確率

C_j^R ; j 番目のリスク事象発生時の損失

n ; リスク事象の数

である。

このリスクには、構造物の経時変化に伴う材料劣化や荷重条件の変化により生じる可能性のある構造物の機能損傷を原因とする事故や、非常に稀ではあるが確率的には必ず発生する

ことが予想される巨大災害（地震、台風、豪雨など）による被害が含まれる。

一般に構造物の施工や維持管理にお金を掛ければ掛けるほど、何らかの損失が生じる可能性（リスク）は小さくなる。したがって複数の施工、維持管理計画案毎にコストとリスクを算定すると、例えば図2のような関係が得られる。

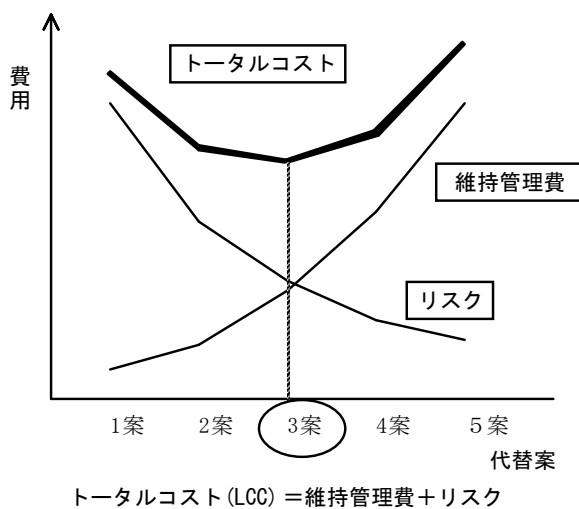


図2 LCCを用いた代替案の評価の概念

図において、維持管理計画第1案は最小限の建設投資と維持管理しか行わず、その代わりに大きなリスクを覚悟しようとするものである。これに対し第5案は、莫大な（過剰な）初期投資と維持管理費を投入し、リスクをできる限り排除しようとするものである。コスト最小化の意味では、このどちらの案も好ましいものではなく、第3案が最も合理的な維持管理計画として選定されることになる。また、回避すべきリスクレベルが設定できる場合には、そのリスクレベル以下の案が選定されることになる。

リスクは、それを算定しただけでは意味がない。求められたものを基に様々な対策を講じる、すなわちマネジメントすることに意義がある。

リスクマネジメントとは、重大な災害や事故に関わる現状のリスクを知り、分析し、それを効率的に低減する方策（回避、転嫁という方策もある）を選定し、実行することである。マネジメントにおいて重要なことは、リスクへの対策案に要する費用とその効果の評価であり、費用というマイナス要因と効果というプラス要因の比較検討の中から意思決定がなされる。すなわちリスクを考慮したマネジメントとは、利益と不利益というトレードオフの関係にある二つの要素に対して意思決定者の基準（効率、安全性など）に基づき妥協点を見出すことである。

そして公共性が高く、長い供用期間と高い安全性を求められる土木構造物では、(3) 式のように定義される *LCC* を評価することによって はじめて合理的、経済的な建設計画（調査、設計、施工）と維持管理計画（運用、保守）を立てることができるのである。

では岩盤構造物についてもこのような *LCC* の評価は可能なのであろうか？

この *LCC* 算定のためには、性能の評価が重要となる。しかし岩盤構造物では、その評価が非常に難しいのである。

4. 岩盤構造物の *LCC* 評価における課題

4.1 岩盤構造物の維持管理の難しさ

LCC 評価に基づくアセットマネジメント手法を岩盤構造物へ適用するにあたって大きな問題がある。図3は、地上構造物の代表としての橋梁と岩盤構造物の代表としての山岳工法トンネルとの維持管理における状況を比較したものである。

橋梁などの構造物は、設計時の荷重条件（交

通量、風、地震など)や使用する構造材料(鋼、コンクリートなど)が明確であり、構造解析により具体的な安全性を設定した上で設計される。また供用中の状態や荷重の変化(実際にどんな車両がどれだけ走っているのか、過積載の車両はないのかなど)や構造材の劣化などは目視によっても、また計測によってもはっきりと捉えることができる。

したがって設計図書が保存され、定期的な点検が行われていれば、現状の健全度を評価することが可能であり、その橋梁をどのような状態で維持したいのか(要求性能)が明確であれば、その評価結果に基づいて適切な対策を講ずることができる。ちなみに近年、橋梁の崩落や破損などの事例が報じられているが、これらは適切な点検が実施されていなかったり、点検で問題ありとされていても予算がなかったりなどの理由で適切な対策が採られていなかったことが原因と考えられる。

橋梁に対しトンネルに代表される岩盤構造物では、設計に用いられる荷重はトンネルが施工される岩盤の力学特性や水理特性に依存するものであり、設定は難しい。

加えて、その岩盤の特性は非線形性、不均質性を示し、問題をより困難にしている。また、トンネルの構造部材に当たるものはコンクリートなどの覆工だけでなく、岩盤そのものも含まれる。すなわち、設計にあたって設定する荷重も、それを受ける構造物も、その力学特性の評価は、橋梁などに比較すると格段に難しい。更にトンネルでは、掘削により構造物を造るわけであるが、この掘削方法には様々なものがあり、その方法によってトンネル周辺の岩盤に与える影響が異なってくる。従ってトンネルが現在どのような状態にあるのか?その健全度はどの程度なのかを知ることは非常に困難な作業となる。

岩盤構造物の維持管理における問題点についてももう少し詳細に見てみよう。

4.2 性能評価における課題

図4は様々な構造物の維持補修の概念を示したものである。建設時点で所用の性能を有していた構造物は、時間の経過とともにその性能を低下させる。この性能の低下状況を示すのが劣化曲線である。

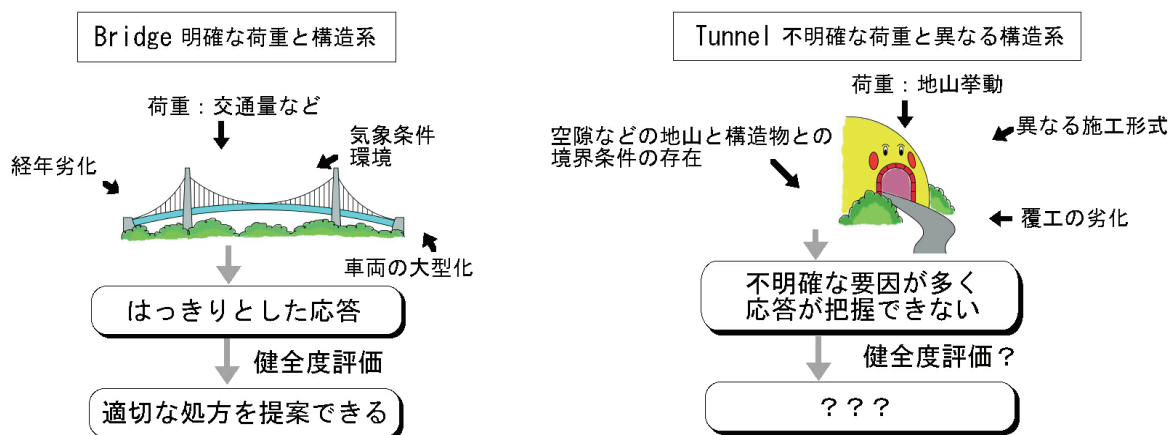


図3 どうしてトンネルの維持管理は難しいのか?

劣化曲線は構造物を構成する部材の性能や、使用条件に支配され、耐久性に富んだ部材を用いた場合には劣化速度は遅くなり、使用条件が厳しい場合には劣化速度は速くなる。

一方、構造物には計画時点で設定された要求性能あるいは使用限界があり（これが必ずしも明確にされていない場合がある）、何ら維持管理を行わない場合、劣化曲線はいつしかこの限界状態に至り、様々な問題をもたらすことになる。そしてこの限界状態に到るまでの時間が、構造物の機能に基づいた本来の耐用年数といえる。

このような劣化曲線が設定できたとして実際に構造物が、現在どのような状態にあるのかを把握するのが点検作業である。そして点検の結果、現状が明らかになり限界状態に到る可能性が高いと判断された場合には、補強、補修あるいは再生が行われ、新たな寿命が与えられることになる。このような性能の経時変化が明らかになって初めて *LCC* が具体的に評価される。

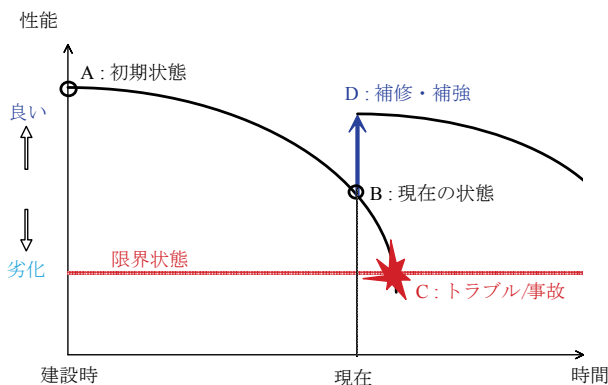


図4 構造物の性能変化と維持管理

しかし岩盤構造物については、以下のような問題点があり、具体的な *LCC* 評価を困難なものにしている。

1) 建設時の性能の把握（図4 A点）

多くの岩盤構造物では、建設終了時点での性能が明確になっていない。

力学的な観点からの性能は、安全率などにより表される場合が多い。安全率は、構造物に作用する荷重と構造物に与えた耐力の比によって定義されるが、岩盤構造物の場合、この荷重と耐力が必ずしも明確になっていないため、性能が曖昧なものになっている。

設計においては、構造物周辺の地盤・岩盤の力学特性を調査試験結果や過去の類似データに基づいて設定し、荷重を算定する。算定する方法については様々なものが提案されているが、橋梁の設計における荷重（構造部材自重、車両・人荷重、風・地震荷重など）と比較するとそれ程明確なものではなく、多分に経験則的な部分を含んだものとなっている。

また有限要素法などの数値解析手法では、地盤・岩盤の自重から岩盤構造物が掘削される岩盤の初期応力を計算し、これより掘削解放力を算定して支保工と岩盤に作用させる荷重とする方法もある。この場合も実際に支保工に作用する応力は、支保工と周辺岩盤の力学的相互作用によって決まるものであり、岩盤の力学特性に含まれる不確実性、支保工の岩盤との接触状態が影響することになる。

一方、最新の岩盤構造物の考え方では構造物周辺の岩盤も力学的安定性を検討すべき構造物の一部として評価している。しかし岩盤の応力状態は、覆工や躯体との相互作用によって変化し、その応力状態によって岩盤の力学特性も変化する。これらが実際にどのようなになっているのか把握することは非常に難しい。そもそも岩盤の初期応力を詳細に評価することが非常に難しい。結果として、トンネルを含めた岩盤

構造物が完成時にどのような状態にあり、その安全率はいくつなのかは解っていないのが現状といえる。

更に、設計結果に基づいて建設が行われるが、岩盤構造物における主たる構造部材であるコンクリートの材料強度などは設計通りでなく、ばらつきを考慮して安全側に設定されることが多く、実際の構造物の材料の変形特性や強度特性はどうなっているのか詳細は不明な場合が多く、結果として建設完了時の構造物の安全率も明確ではない。また建設時や建設完了後に、設計において設定した荷重は実際に作用しているのか？また施工時の誤差等により構造物側に不具合は生じていないか？など、性能劣化を考える前の初期条件を明確にすることは難しい。

定期的な点検などにより劣化に関するデータを取得することは重要であるが、同時に建設完了時の初期状態の評価手法について検討する必要がある。

2) 劣化特性の評価（図4 B点）

各機関に置いて既に整備され、あるいは現在整備されつつある点検マニュアルなどに従って点検作業を実施すれば、構造物に生じているクラックや中性化の状況などが明らかになる。しかしある時点のデータだけでは劣化特性を評価することはできない。すなわち定められた点検調査間隔とその方法により、対象とするデータを計画的に収集蓄積する必要がある。そしてその経時変化を追跡するとともに、不具合の進行している部位を把握することで、その系全体の耐久性あるいは健全性に及ぼす影響の評価が可能となり、具体的な劣化曲線を設定することができる。

劣化曲線は、補修補強による性能回復の程度を明確にして、対策の費用対効果を算定する基礎となるものである。しかし岩盤構造物の場合、岩盤という特異な環境下に置かれるため、橋梁などとは異なり外観の目視ができないなど点検作業そのものが難しい面もあり、材料特性の変化や構造物の変状などの十分なデータが蓄積されていないという問題がある。

また、劣化特性は図4に示したように一本の曲線や直線で表されることは少ない。すなわち、同時期に同じように施工された構造物（構造部材）であっても、あるものは早く劣化し、あるものはいつまでも健全性を保つというように、性能は時間とともにばらつきを生じていく。このようなばらつきをどのように評価するのも重要な問題である。

3) 要求性能の明示（図4 C点）

性能の劣化曲線を設定するに当たっても、また具体的なリスクコストを評価した上で最適な維持補修策を検討するに当たっても、まずその構造物に要求される性能、あるいは機能を明確にしておく必要がある。そして、その性能がどの位低下した時（図4に示す限界状態）にリスク事象が生じるのかを評価しなければならない。

単一の機能を要求される道具や機械などの性能は簡単に提示することができるが、多くの機能が複合している岩盤構造物の性能を示すことは難しい。土木構造物の性能設計へ向けた検討の中で性能に関する多くの議論が成されているが、一般論はともかく性能明示のための手法はまだ確立されていない。

岩盤構造物についても性能に関する集中的な議論を行い、評価手法とそのためのデータの

取得方法を明らかにする必要がある。

4) 補修, 補強工の効果の定量的評価 (図 4 D 点)

多くの点検, 調査データから劣化のメカニズムが明らかになれば, 的確な補修, 補強が可能になる。その際には, 用いられる工法の性能維持あるいは回復に対する効果が定量的に評価されている必要がある。

また, その効果を確認するためにモニタリング手法が開発される必要がある。しかし既に述べたように岩盤空間の閉鎖性, 遮蔽性などの特性がモニタリングの障害となっており, 新たな技術の開発が求められる。

4.3 課題への対応

4.2 に示した項目の内, 1), 3), 4) は, 図 4 のグラフの縦軸である性能を具体的にどのような指標でどのように評価するのかという問題である。また 2) の劣化特性評価の問題は, 性能の時間依存性の問題であり, 実は岩盤構造物では一番難しい問題である。

岩盤構造物の性能評価に係わる工学的性質は, 一般の建設工事などの短期間の挙動評価では, 要求される精度もそれほど高いものではなく, 既存の試験法などで設定される変形特性, 強度特性などで評価することができる。しかし, トンネルや地下空洞などの岩盤構造物の長期の供用期間中の性能評価や高レベル放射性廃棄物処分技術に特有の超長期間にわたる安定性, 安全性評価の問題では, 現行の工学的性質の評価だけでは必ずしも十分ではない。

例えば, 仮に岩盤の破壊特性が C, ϕ で評価できるとして, これらの物性値の時間依存性については, クリープ試験などにより現象面から

の評価が試みられているだけであり, 本質的な知見がほとんどない状況である。

一方で, 岩盤中に存在する大小様々な不連続面は, 掘削による応力状態の変化, 水理条件の変化などを誘因として, 時間の経過とともに劣化を生じ, 岩盤としての特性が変化し, 構造物の性能に様々な影響を与える。

このようなことから, 岩盤構造物の時間依存性を含めた性能評価の問題を解決するためには性能に関する実データを出来るだけ多く収集し, それらを総合的に分析する必要がある。既に多くの機関によって点検が行われ, 多くのデータが実在している。しかしその多くは性能として, 例えば健全性というような定性的かつその評価が観察者の主観に大きく依存するような指標を用いている。

実際, 数ある点検データには, 前の点検までは問題ないとされていた箇所が, 次の点検では急に要補修となったり, 反対に要注意とされていたものが健全と評価されたりした例が見受けられる。勿論こうしたことは健全性の評価方法をより厳密にし主観的なものから客観的なものへ, また定性的なものから定量的なものへとしていく事である程度改善することが可能と考えられる。しかしその一方でそうすることによる点検作業の煩雑化, 作業時間増, コスト増は不可避であり, この点でも要求する精度とそれを達成するためのコストのバランスをどこで取るかの議論が必要となろう。

いま最も大事なことは, まず現状に関する共通認識を関係者が持つことであろう。そのためには, 各機関がこれまでに実施してきた保守点検により得られた劣化に関するデータを公表した上で, それらを整理, 再評価する必要がある。

現在の山岳工法トンネルの標準工法は、指針化された計測管理手法によって得られた膨大なデータによってその妥当性が検証され認められるようになった。劣化に関する議論にも、それに匹敵する量のデータが必要とされるであろう。ともすれば好ましくないデータということで公表を控えようとすることも考えられる。しかしコンプライアンスと情報公開が求められるこれからの社会では、たとえネガティブな情報であろうとも積極的に公表し、一般の人々にもステークホルダーの一人としてのリスク認識を持ってもらうことも重要である。

5. 岩盤構造物の安全性評価における災害危険度評価の適用について

岩盤構造物の性能評価におけるもう一つの課題に耐震性評価がある。一般に、岩盤構造物は地震に対し；

- 岩盤中の地震動は、表層の軟弱地盤での増幅がないため小さい
- 岩盤内の構造物は、地表構造物のように固有の振動をするのではなく、周辺岩盤と同一の動きをする

などから強いとされてきた。

実際最近の大きな被害地震での山岳工法トンネルの被災事例を見ると、震源に近く地震動が大きい上に、

- 坑口部、小土被りなどの地形
- 破碎帯、断層などの地質
- 構造的弱部（劣化進行、背面空洞など）

などの悪条件が重なったものに限られており、建物の地震被害で言うところの全壊に当たるトンネル構造の崩壊被害はほとんど生じていない。

朝倉らの研究（土木学会，2009）によれば、山岳トンネルの地震被害のレベルを、

- ◆ 大被害：大規模な補強・補修を必要とするもの
- ◆ 中被害：補強・補修を必要とするもの
- ◆ 小被害：補強・補修を必要としない軽微なもの
- ◆ 無被害：被害なし

と分類すると、大規模地震での山岳工法トンネルの被害は表1のようになっている。

表1 大地震による山岳トンネルの被害率

被害レベル	大	中	小	無
関東	19%	6%	38%	37%
兵庫県南部	11%	0%	16%	73%
中越沖	20%	5%	5%	70%

これらの値は一見大きいように思われるが、例えば神戸市によって実施された灘区の兵庫県南部地震による建物被害（村尾、山崎、2001）は、最も被害率の小さいRC造でも全壊が7%、半壊が16%、木造に至っては全壊が52%、半壊が21%となっている。また中越沖地震による新潟県刈羽村の建物（住家＋非住家）の被害率は、全壊17%、大規模半壊5%、半壊17%、一部損壊45%、無被害16%となっている。参照した各々の被害率はその定義も異なり、また個々の構造物の耐震性は、その構造物へ入射した地震動の大きさと対比して議論されなければならないが、概略の指標としてみても山岳工法トンネルの耐震性が高いことが判る。

このように岩盤構造物は、高い耐震性を持っているが、建物とは異なりそれを具体的に性能として評価することは行われていない。ここでは岩盤構造物の耐震性を建物と同様に評価す

ることにより、岩盤構造物の *LCC* 的な観点からのメリットを具体的に示すことを試みる。

5.1 不動産価値評価における地震危険度評価

バブル崩壊前の不動産価値評価は、近傍の不動産取引事例を参考にしたり、対象とする不動産の再調達価格に基づいたりして行われていた。しかしバブル経済の崩壊により、土地さえ所有していれば物価上昇率を上回る値上がりで利益が確保できるという土地神話は完全に崩壊した。そして土地神話が覆い隠していた様々なリスクが顕在化するとともに、不動産市場は構造的に変化せざるを得ず、それまでの不動産価値は有名無実のものとなった。結果として企業の保有する不動産資産の含み損、不動産投資に融資した金融機関の不良債権化など、社会構造に影響を及ぼすような大きな被害が次々と明らかとなった。

こうしたことから不動産価値評価も変化せざるを得ず、対象とする不動産が将来生み出すであろう利益の現在価値によってその価格とする方法が主流となってきた。また、1998 年 9 月に *SPC(Special Purpose Company)* 法が施行され不動産の証券化が可能となると、不動産の運用益を投資家に還元することを目的とするファンドにおいては、不動産価値を評価するに当たって不動産運用上のリスクを評価することが不可欠となった。

不動産が将来生み出すであろう収益を予測するには、将来にわたる不動産市場の動向や賃貸料の変動など様々なリスクを考慮しなければならない。当然、地震国日本においては地震リスクが必須の検討項目となる。それは次の理由による。不動産からの収益は、その土地に建

設された建物や施設を運用することによって得られるものである。したがって収益率の高い物件であっても地震によって建物や施設に甚大な被害を生じる可能性が高い場合、あるいはそのような被害によって建物や施設の利用者の事業継続に重大な支障が生じる可能性が高いような場合には、その不動産価値は少なく評価されることになる。

このような地震により生じる可能性のある損失の大きさを判断する指標として用いられているのが *PML(Probable Maximum Loss)* で、「再現期間 475 年の地震動の大きさにおける 90% 引超過確率に相当する物的損失額の再調達価格に対する割合」と定義される。再現期間 475 年は、50 年間に 10% の確率で起こる事象の年確率 0.21% に相当し、この 50 年間は建物の耐用年数に対応している。

不動産業界のこうした動きを受けて、建設業界においても施主から設計者に対して建物の耐震性を評価する指標として *PML* を示すことを要求されることが多くなってきた。

5.2 *PML* 算定法

さて将来、いつの日か発生する巨大地震による損失を予測する方法には、様々な方法がある。例えば原子力発電所のような重要施設を対象とする場合、地震により重大事故が発生すると施設の被害だけではなく、周辺の住民や環境にも深刻な影響を及ぼすことが考えられるので、非常に高い信頼性が要求される。したがって最新の知見と技術を駆使した高度な分析技術とそれに用いる多くの情報が必要であり、情報収集から始まる一連の分析には多くの時間と費用を要する。

一方、不動産取引や証券化のための地震リス

ク評価では、不動産の収益性に対して地震リスクがどれ位の比重を持つかが検討される。したがって原子力発電所のような高い信頼性は必要とされず、また分析に要する時間にも費用にも限りがあるため、比較的簡便な手法が用いられる。ここでは様々な分析手法の内、実務で用いられている図 5 に示すような簡便な手法の概要を紹介する。

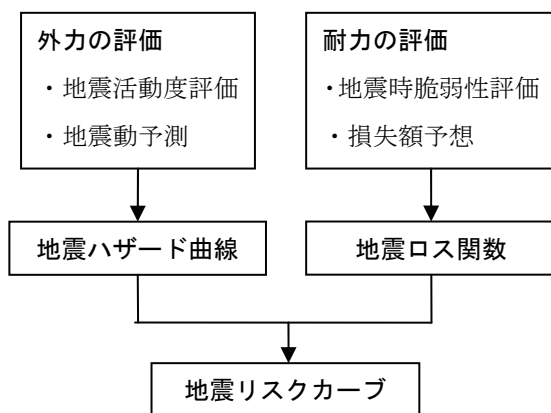


図 5 地震リスク評価フロー

1) 確率論的な損傷の評価

構造物の設計では、外力（地震、風、荷重、自重など）により構造物に生じる応答が構造物の持つ耐力を上回らないように計画される。ここでは、安全余裕（安全率、安全裕度）が考慮されており、実際の応答よりかなり余裕のある設計を行う。しかし算出された応答も耐力も本来確定的に設定できるものではなく、必ずある分布を持ってばらついている。すなわち不確実なものとして扱う必要がある。信頼性理論では、確率・統計的な方法を用いることで、この不確実性を構造物の安全性評価に積極的に取り入れている。

図 6 に、応答と耐力の分布の概念図を示す。例えば地震を考える場合、構造物の応答は構造

物が建っている地表面での加速度を確率変数とする確率密度（図では中央値Aを持つ分布）である。一方、構造物の耐力も、用いられている材料の特性ばらつき、施工時の誤差、劣化などによりばらつくことが考えられ、やはり確率密度（図では中央値Bを持つ分布）として表せるとする。応答が耐力を上回る状態を損傷と定義すると、図 6 において応答と耐力の重なり合う部分を積分することによって損傷の確率が評価される。

ここで構造物の損傷に伴って生じる損失は、直接的な損失（Direct Loss）と間接的な損失（Indirect Loss）とに大別される。直接的な損失は、補修・再構築費用等の物的損失と機能停止による機能損失などから構成され、間接的な損失は、直接的な損失に関連して生じる人命、周辺環境への影響などである。前者はコストとしての評価が比較的容易であるが、後者は人命の場合人命を貨幣価値に評価することに対する感情的な抵抗感があったり、環境影響の場合リスクを評価する意思決定者の主観価値に依存する部分が多かったりなど、数値化は一般に難しい。

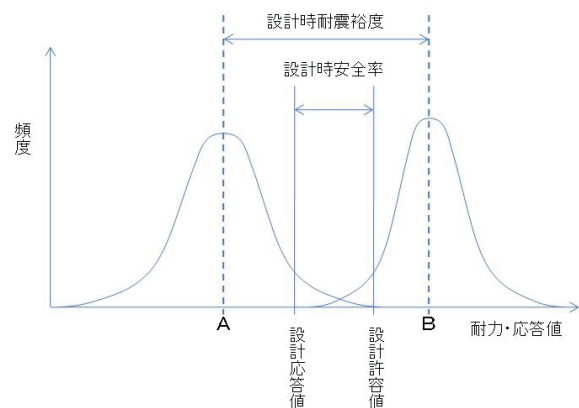


図 6 模式的に示した耐力と応答値の関係

2) 外力の評価

地震は、いつ、どこで、どれくらいの規模で発生するかは不明であり、地震リスクの検討対象とする構造物の立地、サイトに影響を及ぼす可能性のある過去の地震データ、活断層資料、地質構造、地球物理学の知見から確率論的手法を用いてモデル化される。

地震活動度評価は、日本全国に存在する被害を生じる可能性のある大小様々な地震を想定して行う。地震規模が小さい場合でもリスク検討対象が震源に近ければ検討対象に大きな被害を生じる可能性があるため、最大規模の地震だけでなく、小規模の地震まで想定する必要がある。それぞれの想定地震には、マグニチュード、震源位置および発生確率が設定されている。

想定地震の震源としては、線震源モデル（活断層に適用）、面震源モデル（プレート境界で発生する巨大地震に適用）およびランダム地震域モデル（活断層やプレート境界地震以外の地震活動に適用）などがある。

地震動予測は、図7に示したような地震動の伝播過程を念頭に置いて行われる。

震源断層で発生した地震は、地殻を減衰しながら伝播し、地震基盤に到達する。その後、表層の比較的柔らかい地盤を反射しつつ、地表面に伝達する。震源から地震基盤までの伝播による地震動の減衰は、経験的に評価された距離減衰式によって評価するのが一般的である。

ところで、地震基盤はせん断波速度 $V_s=3000$ m/s 程度の極めて硬い地層であり、深層域の地盤に対応している。一方、ボーリングに基づく地盤の層構成や物性値情報は $V_s=300\sim400$ m/s 程度のごく表層の地盤に限られており、地震基盤までの地盤情報はほとんどない。そこで、実用的な観点から工学的基盤（ $V_s=300\sim700$ m/s

程度）を設定し、この層に伝播する地震動を評価する距離減衰式が様々な研究者によって研究され、用いられている。

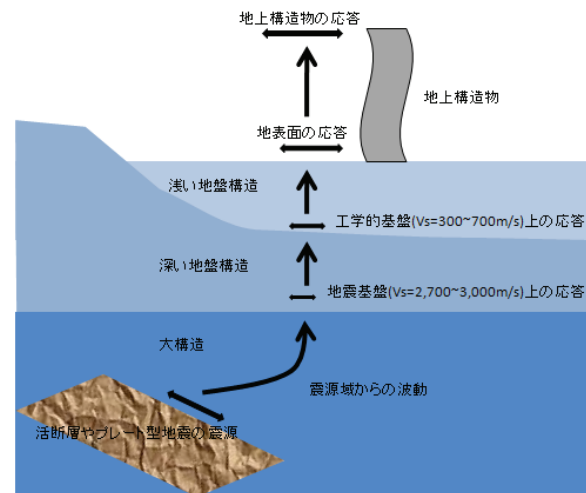


図7 地震動伝播の概念

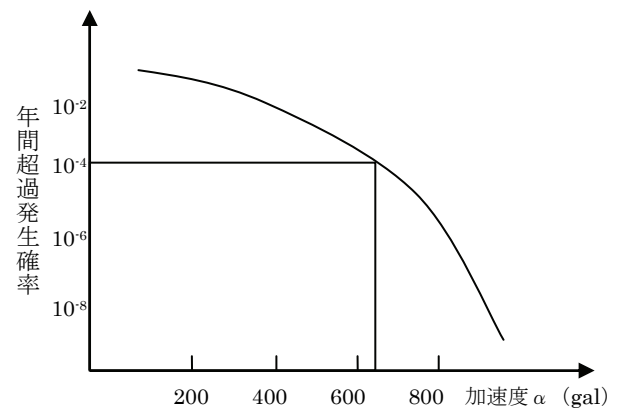


図8 地震ハザード曲線の例

これらの解析の詳細はここでは述べないが、最終的には図8に例示するような地震ハザード曲線が得られる。図は、このサイトで640gal以上の加速度を生じる地震が発生する年確率が 10^{-4} であることを示している。地震ハザード曲線は、すべての可能性のある地震を総合して求めたものであり、地震動がどこの震源で発生

したか直接には示していないものの、サイトでの地震動の大きさと発生の可能性を知ることができる。すなわち地震ハザード曲線は、サイトを中心として地震活動域での地震危険度の状況を反映した危険度を示している。

さて、表層地盤の地震動増幅特性を考慮して予測した工学的基盤面での地震動から地表面での地震動を予測する方法としては、重複反射理論に基づく等価線形手法が用いられている。しかしこの手法は、対象とする表層地盤のS波速度構造とその動特性に関するデータを必要とするためより簡便な手法も用いられている。

3) 耐力の評価

地震リスク評価における地震被害損失は、建物などの検討対象資産が地震被害を受けた場合に、現時点で再購入あるいは建設するために必要な価格（これを再調達価格という）を基に算定する。予想損失額の算定に際しては、検討対象資産の地震に対する弱さ（これを脆弱性という）を評価し、この結果を損失率曲線として表示する（図9）。図は工学的基盤面で400galの地震が発生すると、対象とする構造物の価値のおよそ24%が平均値として失われることを示している。その損失率もバラつきを持っており、そのバラつきを考慮した上でこれ以上の損失はないだろうという損失がPML(90%非超過値)で、この図の場合その値は60%になっている。

損失予測の方法には解析的手法と統計的手法があるが、簡便なリスク評価では基本的に過去の地震被害データを利用した統計的な手法が用いられることが多い。

このように様々な想定地震における地震動の大きさに対して検討対象の損失率が得られる

と、その損失率に再調達価格を乗じることにより予想損失額が求められる。

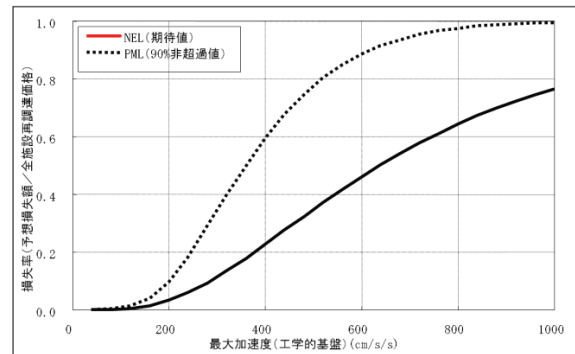


図9 損失率曲線の例

4) 地震リスクカーブ

地震損失率曲線は、ある地震動（大きさ） α が発生したときの対象施設の損失の大きさを示すものである。一方で図8の地震ハザード曲線は、ある地震動 α が発生する確率を示している。そこで地震ハザード曲線と地震損失率曲線から共通の地震動の大きさ α を消去して、年超過確率を縦軸に、損失を横軸にして表すと図10のような地震リスク曲線が求められる。

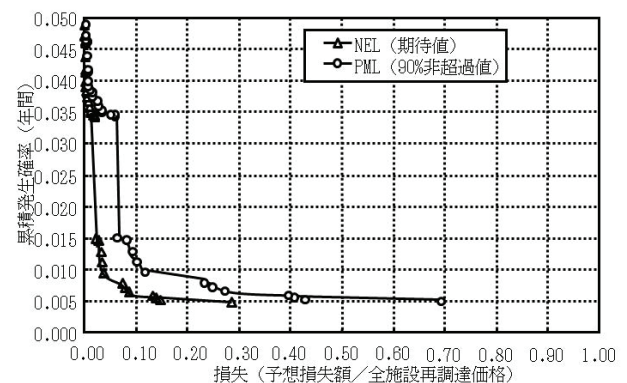


図10 地震リスク曲線の例

地震リスク曲線の右最先端は、予測される最大の損失を表す。図10の例では最大の損失は、

全再調達価格を100億円とするとその29%、29億円となる。しかしこのような損失予測には様々な不確実性に起因する誤差が含まれている。一般に損失予測は期待値（平均値）に基づいて行われるが、安全側を考える場合、損失予測のばらつきを確率的に評価し、90パーセンタイル値を用いることがある。図において *PMI* として表示したものがそれである。この場合、損失額は70億円と予測される。

5.3 岩盤構造物への適用の試み

以上に示した方法により構造物の *PMI* の算定が可能になる。ここでは、岩盤地価空洞に対して同じように *PMI* 評価した場合に、どのような情報が得られるのかを示し、岩盤構造物の性能評価として耐震性を用いることの可否を検討する。

今、様々な重要な電子データを保管管理するデータセンターの建設を考える。重要な施設であり当然高い耐震性が求められる。では、このデータセンターは、どこに建設するのが最も合理的なのだろうか？ここでは立地候補地として東京、名古屋、大阪そして岩盤内すなわち地下を考える。施設のスペックは表2のように仮定する。

表2 データセンター仕様

		費用
建物 (RC6 階建)	地上	10 億円
	地下	20 億円
設備		40 億円

東京、名古屋、大阪の任意地点における地震ハザード曲線が先に述べたような手法により

求め、その年超過確率 1/475 に対応する地表面の最大加速度を求めた結果、各々380gal、360gal、320gal であったとする。一方、地下深部では地震動の増幅が小さいことから岩盤空洞位置での最大化速度は 200gal であると仮定する。

同一の耐震性を持つ建屋と設備が地表と地下それぞれに造られるとすると、例えば表3に示すような地震被害が計算される。

建物の *PMI* について見ると、東京、名古屋では15%以上の値となっており、大阪の11%とは明らかな差がある。したがって地表に建設するというのであれば、大阪が最適立地点であることになる。地表に立地する場合と地下に立地する場合を比較すると、地下は地震動がかなり小さいため当然のことであるが *PMI* は小さくなる。

しかし地震リスクと建設初期コストを合わせたトータルコストを見ると、地下立地は地表立地の倍になっており、耐震性が高いというだけではメリットは見出せない。ここで、このデータセンター建物内部に設置される設備の価値も併せて考えてみる。

この設備およびその中に保管されているデータそのものも含めて40億円の価値があるとすると、建物の地震被害に伴い発生する設備の被害が建物被害を求めるのと同様の手順で算定することが出来る。

表では建物に重大な構造被害が生じた時に設備にも大きな被害が生じ、復旧のために東京の場合で12億円を必要とすると仮定している。こうすると *PMI* の対象とする年超過確率 1/475 の地震に対するデータセンター事業者の被害は13.6億円となり、建物と設備への初期投資額50億円に対する割合は27%となる。

表3 地震危険度評価結果 (PML とトータルコスト)

立地点	初期コスト		地震被害(億円)		PML (%)		トータルコスト(億円)	
	建物	設備	建物	設備	建物	建物+設備	建物	建物+設備
東京	10	40	1.6	12	16	27	11.6	63.6
名古屋	10	40	1.5	10	15	23	11.5	61.5
大阪	10	40	1.1	4	11	10.0	11.1	55.1
地下空洞	20	40	0.2	0	1	0.33	20.2	60.2

こうして建物だけではなく、その内部の設備も含めて地震被害を考えるとトータルコストにおいて地下立地がそれなりのメリットを有することが判る。

勿論ここで示した様々な数値は仮想のものであり、必ずしもここで述べたような結果が得られるとは限らない。しかし地震リスクを地下構造物に対しても具体的に評価することにより、地下空間利用のメリットを他の構造物と同じ土俵で議論することが出来ることは確かである。今後、地下空間利用を推進するためには、地下の岩盤構造物の耐震性能あるいは地震危険度評価などにとどまらず、様々なリスクコストの評価に対してもより積極的に取り組むべきであろう。

6. おわりに

以上様々な観点から岩盤構造物の性能評価にける問題点、取り組むべき課題について述べてきた。

これらはいずれも難しい課題であり、データの収集から始まる一連の研究が不可欠である。とはいえ様々な社会基盤構造物の合理的、経済的な建設と維持管理はこれからの社会においても不可欠であり、既存の研究分野を超えた取り組みが必要である。

参考文献

- 土木学会, 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セミナー, 2009.3
 村尾修, 山崎文雄: 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, 第527号, pp189-196, 2001.1
 損害保険料率算出機構: 地震危険度指標に関する調査研究, 2002.12