

新たな指標による地下構造物の 性能評価について

ON THE PERFORMANCE EVALUATION OF UNDERGROUND STRUCTURES USING NEW INDEX

亀村 勝美^{1*}・副島 紀代²・吉澤 一雄³

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 advantages are 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, new index evaluating the performance of underground structures is discussed and problems and future task are examined.

Key Words : performance, underground structure, business continuity, life cycle cost

1. はじめに

これまで地下空間の利用推進に当たって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優位性を示してきた。しかしながらコンクリートや岩盤で構成される地下構造物においても、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事前の検討と対応が必要であることが明らかとなってきた。

一方で、同じ機能を持つ構造物であれば、地上立地の方が地下立地よりもコストが掛からないとされ、地下空間利用は限られた用途、目的を持ったものとなっている現状がある。では地下空間利用のメリットはないのか？

昨今、不動産の資産価値を評価する際に災害危険度を考慮することが一般化しつつある。そこでは、様々な不動産の大地震における想定被害額が損失期待値（＝リスク）として算定され、不動産の価値の一部として評価されている。

一般に、地下構造物は地上構造物に比べ地震に対する安全性は高いとされているが、それが具体的にどれほどの価値を持つかについては議論されていない。例えば、不動産と同様に災害危険度評価によって地下構造物の価値評価が具体的に提示できれば、地下空間利用の推進に繋がる可能性がある。本研究の目的は、地下構造物に関

する安全性の評価を概念的、定性的なものではなく、具体的、定量的な指標、できれば経済的な価値判断を可能とするコストに換算し、建設コストと合わせて評価することにより地下空間の優位性を示すことができないかを模索することにある。

2. 地下空間利用における課題

人類の英知とともに発展してきた地下構造物の建設技術は、様々な形で地下空間利用を可能としてきた。これからも社会のニーズに応え、新たな技術が開発され、その新たな技術開発が更に新たなニーズを生んでいくであろう。

一方で、低成長経済、少子高齢化時代にあつては、地下空間の利用に当たっても、より高い安全性と合理性が求められる。また今後は施工の安全性や合理性ばかりでなく、周辺環境への影響の低減や供用後の維持管理コストの最適化も求められる。

様々な地下構造物は、その時々々の社会のニーズによって造られ、その度に技術的に発展を遂げてきた。そして成熟期をいち早く迎えた欧米諸国やわが国では、単に地下空間を如何に活用するだけでなく、地下空間のあり方そのものが問われるようになってきている。すなわち、

キーワード：性能評価、地下構造物、事業継続性、ライフサイクルコスト

¹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 2-13-12）、E-mail: kame@fqi.or.jp

²正会員 株式会社 大林組技術研究所、³一般財団法人 エンジニアリング協会

その地下構造物は自然に優しいのか？無駄な社会資本は投じられていないか？社会の発展、価値観の変化に対応できるのか？など、地下空間利用においても新たな視点からの取り組みが求められている。すなわち「もの造り」から「もの使い」への発想の転換が求められているのである。

このような現状認識の下、地下空間利用技術を顧みると、「作ることによって、こう便利になる」、「こんなに素晴らしいものが作れる」などの「もの造り」からの発想が多く、必ずしも「もの使い」にシフトした今の社会のニーズには応えられていないように見受けられる。社会のニーズに的確に応えられる地下空間利用を可能にするためには、地下構造物の持つ様々な性能、機能を具体的に判りやすく評価することが不可欠である。

2.1 地下空間利用はやるべきなのか？

バブル経済華やかかなりし頃、我々の豊かな未来のためには宇宙開発、海洋開発とともに新たなフロンティアとしての地下空間開発が不可欠であると喧伝され、官民を問わず多くの夢のような計画が公表された。また、こうした夢を現実のものとするべく、法の整備も行われた。

そしてバブル崩壊、夢破れ、新たな地下空間利用は過去のものとなった。法の整備も期を逸した形となった。実際、現在実施されている地下空間にかかわる大規模プロジェクトは、鉄道や道路のトンネル、エネルギーの地下備蓄施設、揚水発電のための地下発電所、都市再開発に伴う地下通路、地下街の整備など、従来の利用形態の域を出ていない。では、新たな地下空間利用は必要ないのか？

この問いに対する答えは、「地下に造ることが合理的な構造物は作るべきである。」である。しかし問題は、何を以って合理的というのか？また、その合理性は誰にとってのものか？を説明できるかどうかにある。ただしこれまでのように、事業者とその関係者だけの論理で合理性を議論し、説明するだけでは十分ではない。より広い範囲の利害関係者（ステークホルダー）に対し、地下空間利用に関わる建設コスト、維持コスト、用地問題、環境問題、耐震問題などについて、その合理性を説明する必要がある。では環境問題や地球温暖化などにおける地下空間利用のメリットを具体的に＝数値指標で示すことはできるのであろうか？また、出来ないとしたら具体的に何が問題なのであろうか？

地下空間利用のメリットには、恒温・湿性、隔離・遮断性、環境保全性、セキュリティなど様々なものがある。しかしこれらを具体的に説明するのは難しい。それは地下構造物の性能が、

- ・同様の利用例が少なく、経験から判断できない
- ・建設期間が長くコスト変動要因も多い
- ・維持管理手法が確立していない

などの地下構造物ならでは理由による。

地下空間は貴重なフロンティア空間であるが、構造物を造ることも、また使うことも難しい空間である。何よりも一度作ると改変、撤去は非常に困難である。地下空間利用を議論するに当たっては、こうしたことを念頭に置いた上で検討を行う必要がある。また、議論の中で地下空間開発の必要性があり、利便性があるとして合意形成がなされ、作ることになったとしても、その必要性和利便性の評価結果が時間の経過とともに変化することも考えておく必要がある。地上構造物に比較し長い供用期間が期待される地下構造物では、その長い供用期間に価値観が変わる可能性があることも忘れてはならない。

2.2 計画や合意形成で役立つ指標とは？

それでは、新たな地下空間利用を計画するに当たって、その安全性や合理性、経済性を具体的に、かつ判り易く評価し、必ずしも専門家ではない利害関係者との合意形成に役立つものとは何なのであろうか？

具体的な建設計画を比較する指標として、一番理解し易いコストを用いるとする。まず、用地取得や建設にどれくらいのコストが掛かるかを算定する。そして次に、地下を使うことのメリット、裏を返せば地上を使うことの損失を景観、騒音、災害、利便性、隔離性などの項目について具体的にコストとして評価する。更に、地震などの災害によりその施設が供用停止となった場合の損失、すなわち停止期間中の営業損、復旧コスト、社会的信頼性などもコストに換算して評価する。

維持管理についても、その方法、期間を想定し、コストを出す。また、建設から施設完成後の長い供用期間中の維持管理におけるコストの変動リスクも計算する必要もある。

この時に留意しなければいけないことは、コスト換算に当たって、その精度にこだわり過ぎると作業が進まなくなることである。「地震被害の復旧に本当にそれだけの費用が掛かるのか？」といった疑問がすぐに出される。確かに様々なコストの評価に当たって、その精度は高ければ高いほど、あるいは実績があればある程、説明はし易い。しかし、今行おうとしていることは、地上立地と地下立地、あるいは地下立地のA案とB案の比較である。絶対値としての経済性、安全性を示す指標（コスト）が重要なのではなく、様々な計画の優劣が比較できる相対的な指標で十分なのである。

- ・立地地点の地盤、地下水条件などに依存する

2.3 指標によって利用推進は出来るのか？

次にこうした指標が設定できたとして、地下空間利用を推進するのに本当に役立つのであろうか？

鉄道や道路のトンネル、エネルギー備蓄のための地下空洞、都市再開発で設けられる地下街・通路、都市型洪水対策としての雨水貯留施設などは利便性、生産性あるいは災害を未然に防ぐことによる経済的な面からの評価は可能である。この場合、それぞれの施設を地下に立地する必要性の説明は容易であろう。何故ならば、こうした施設は地下でなければ果たせない機能が明確であり、環境問題などの特別のマイナス要因がない限り、合意形成に問題が生じることは少ない。

地下でなければならないもの、例えば高レベル放射性廃棄物処分施設などは、地上立地がそもそも在りえないため、経済的メリットをいくら評価しても利用推進には役立たない。この場合、安全性との対比の中で社会が受容出来るリスクにより計画への合意形成がなされることになる。他の原子力発電所やごみ処理場などについては、同等の機能を持つ地上構造物の方が経済性で勝っており、安全性は勿論、地元への経済的なメリットなど余程のことがない限り、立地への合意を得ることは難しい。

こうしてみると安全性の評価、言い換えるならば万が一のリスクの評価が重要であることが判る。

様々な計画案の選択に当たって、それらの案に内在する不確実要素に起因する損失、すなわちリスクをコストとして評価することは、非常に有用である。例えば地震被害を考えると、重要な機能を果たすことを期待されている構造物や施設を計画する場合、それは単に既定の耐震基準を満足するだけでなく、万が一の場合にあってもどれだけの機能を維持できるかが問題となる。しかし、そのために必要な耐震性を設定することは難しい問題である。コストを掛ければ掛けるほど高い耐震性が得られるが、本当にそこまでの耐震性が必要かどうかは判らない。大地震は起こることは確実だが、いつ起こるか、またどれだけ大きいかは推定の域を出ない。この場合、地震の持つ不確実性と構造物に期待する機能の両方を評価するリスクは有用な指標となる。

同じことは地下構造物の長期間の維持管理コストについても言える。維持管理にコストを掛ければ掛けるほど、その構造物はいい状態を維持し、快適で安全な使用環境が得られる。しかし、それだけのコストが掛けられない場合、どこまでコストを落とせるかは、コストを落としたことによって将来生じるかもしれない損傷や事故による経済損失を勘案して検討する必要がある。この場合、将来の損失の持つ不確実性とその大きさを評価したリスクコストと維持管理コストを合計したものが、計画を立案するに当たっての有用な指標となる。

このように、地下空間の利用推進に当たっては地下空

間の持つ様々な特性を具体的な性能、機能として評価し、建設コストと併せて比較検討することが必要となる。ただ、地下構造物については、先に述べたような評価に当たって解決すべき課題があり、その評価は容易ではない。しかし、もの作りからもの使いへの変化は時代の要請であり、判らないからと言って挑戦しなければ地下空間利用の進展は望めない。

3. 構造物や施設に求められる新たな価値観と地下構造物

1956年から以降のいわゆる高度成長期には、社会基盤構造物が数多く建設された。その当時は、新たな施設、構造物によってもたらされる利便性、より良い環境、高い生産性などを如何に実現するかが第一義であり、高度経済成長の追い風の下「必要なものはコストを掛けて造る」ことが優先された。

しかし、それから50年近くを経て様々な社会基盤構造物の機能に支障を生じる事例が出始めた。その結果、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。また地震被害について見ると、アジアにおけるハブ港として機能してきた神戸港は、1995年の阪神大震災によって壊滅的な被害を受け、復旧に長い時間を要した。この間にアジアにおける海運物流界は大きく変化し、その変化の流れについていくことのできなかつた神戸港は、もはやハブ港としての面影はない。

一方、図-1に示すように社会は、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。一方で東日本大震災を経験し、これまでの科学技術の在り方に疑問が投げ掛けられている中、巨大自然災害への備えも求められている。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。

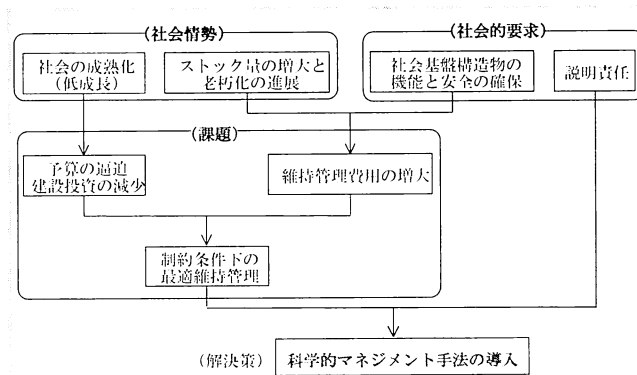


図-1 これからの時代に求められるもの

とは言え高齢化・少子化などの社会構造の変化、グローバル化による経済構造の変化により、税収の増加は見込めない。このため、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。

このような状況の下、社会基盤構造物についても新たな価値観に基づく機能や性能が求められるようになってきた。例えば、道路、鉄道、ライフライン施設などは常時は勿論、地震や風水害時にあってもなおのこと、その機能を十分に果たすことが求められる。特に、こうした複数の構造物から構成されるシステムでは、たとえ一カ所の機能障害が生じたとしても、システム全体の機能が失われることになり、損傷による直接被害（物損、復旧費）よりも多くの波及被害（営業損、第三者被害など）を生じ、最終的に莫大な社会的損失を招くことになる。東日本大震災における福島第一原子力発電所の事故は、こうしたシステム被害の最悪の例と言える。

すでに国では、基幹組織・企業にあっては、災害や事故で被害を受けてもその重要業務が中断しないこと、中断しても可能な限り短い期間で再開することが重要であるとし、この事業継続を追求する計画BCP：Business Continuity Planの策定を公官庁や企業に求めている。その内容としては、バックアップのシステムやオフィスの確保、即応した要員の確保、迅速な安否確認などがある。それらは、各々の組織の事業内容や規模に応じた取組みでよく、多額の出費を伴わずとも一定の対応は可能なことから、すべての組織に相応した取組みが望まれている。

一方、先に述べたようにすでに整備された多量の社会基盤構造物の維持管理においては、経年による性能、機能の劣化が問題となってきており、低成長下の財政的制約条件と相俟って、如何に合理的に安全を保ちつつ維持管理していくかが問題となっている。こうした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。

ここでは地下構造物の有用性の評価を行うにあたり、従来の用地取得費、建設費などの建設コストに加える新たな評価指標として事業継続性（BCM＝事業継続マネジメント）と維持管理（LCC＝ライフサイクルコスト）を考える。

3.1 事業継続性に基づく評価

事業継続性とは、災害等の予期しない出来事が発生した場合に、ビジネスへの影響をできるだけ小さくして、平常時と同等のレベルで業務を継続させる能力を指し、レジリエンシー（復元力）と表現されることもある。最近では、事業者が自らのビジネス・サービスに対するレジ

リエンシーを高めるために、BCMの導入やBCPの策定に取り組む事例が増えている。

(1) 事業継続とは

事業継続とは、「企業が災害や事故などで被害を受けても重要業務を中断させず、万が一、重要業務が中断した場合にはできるだけ早急に復旧させること」と定義されている¹⁾。BCMは、上記のような事業継続を実現するためのマネジメント手法を指し、ISO9000などのマネジメントシステムと同様に、PDCA(P=Plan:計画, D=Do:実施および運用, C=Check:点検および是正, A=Act:見直し)を繰り返して行っていく点が特徴である。BCMでは、目的が「事業継続の実現」という簡潔な形で示されているため、対策の効果を業務稼働率や復旧時間（図-2）という指標で比較・評価しやすいというメリットがある。

一方で、目標とする事業継続を実現するためには、その具体的な行動計画であるBCP(事業継続計画)の策定が不可欠である。事業継続の実現に結びつく効果的な対策を行うには、策定されたBCPの元での事業継続性を適切に評価し、目標達成のために必要な対策箇所やその効果を示すことが必要である。

(2) 事業継続を脅かすリスク

事業者の事業継続を脅かすリスク要因として、表-1に示すような様々な事象が挙げられる。

表に挙げた各種リスク要因の内、地下構造物の方が地上構造物に対して明らかに事業継続上のメリット（あるいはデメリット）があると考えられるものは、地震や水害などの自然災害に分類される事象である。

例えば、地震に対しては、一般的に地下の方が地上部よりも地震による外力が小さくなるため、構造的に有利である。（ただし、被害を受けてしまった場合は、復旧性＝復旧のしやすさという点でやや不利となる。）また、竜巻や突風、積雪などに対しても、直接影響を受けないという点で有利である。外気温の変動にも作用されにくいという利点がある。一方、豪雨や津波などの水害に対しては、低いところに流れ込む水の性質から、地下は不利であると言える。

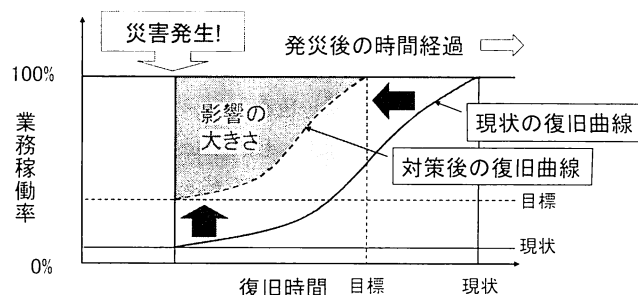


図-2 BCMにおける復旧時間と業務稼働率の概念図

表-1 事業継続に影響するリスク要因

	自然災害	人為的災害		その他
		(過失)	(故意)	
事業停止リスク要因	・地震 ・津波 ・噴火 ・豪雨 ・洪水 ・台風 ・高潮 ・突風 ・竜巻 ・落雷 ・積雪 ・気温変動 等	・事故 ・爆発 ・火災 ・システムバグ ・故障 ・停電 ・断水 ・ガス停止 ・通信障害 等	・放火 ・テロ ・情報流出 ・戦争 ・ハッキング ・ウイルス感染 等	・感染症 ・雪使紛争 ・倒産 等

その他のリスク要因である火災や事故、停電などについては、地上／地下というよりも、その業態や構造物の種類など、個別の条件に左右されるところが大きいと考えられる。

(3) 事業継続性と復旧時間

事業継続性は、災害等に対する抵抗力（＝外力に対する強さ、ex.耐震性など）と復旧力（＝被害を受けた後になるべく早く平常時の状態に戻す力）の相乗効果として評価することができる。そして、その相乗効果を表す有効な指標として、復旧時間が挙げられる。なぜならば、抵抗力が高ければ被害を少なくすることができ、一般的にはその結果、復旧時間の短縮につながるであろうし、復旧力が高ければやはり復旧時間を短くすることができるからである。

復旧時間とは、言い換えれば事業が停止している期間である。つまり、復旧時間が長ければ長いほど、その間に事業を継続していれば得られるはずだったビジネス・サービスの対価をたくさん失うこととなる。それを機会損失費用と呼ぶこととする。

ここで、ある新設構造物を地上構造物にするか地下構造物にするか、事業継続性の面から検討する場合を考える。ただし、一般的な仮定として、①地下構造物の建設費は地上構造物より高い、②災害に対する抵抗力は地下構造物の方が高い、③災害時の被害が小さいために復旧力も地下構造物の方が高い、とする。

想定する災害（例えば地震）に対する地上構造物の被災後の復旧費用を C_{R0} 、復旧時間を RT_0 とすると、

機会損失費用

$C_{L0} = \alpha \cdot RT_0$

(α は単位時間当たりの損失額)

全体の損失額

$C_{T0} = C_{R0} + C_{L0}$

と表すことができる。

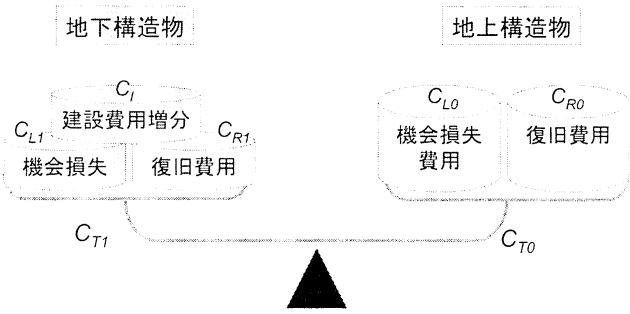


図-3 事業継続性の比較（地上・地下）

同様に地下構造物に対する全体の損失額を計算する場合、地下構造物の被災後の復旧費用を C_{RI} 、復旧時間を RT_I とすると、

機会損失費用

$C_{LI} = \alpha \cdot RT_I$

(α は単位時間当たりの損失額)

建設費の増分

ΔC_I

全体の損失額

$C_{TI} = C_{RI} + C_{LI} + \Delta C_I$

となり、図-3に示すように両者を比較することで、事業継続性をコストとして比較することができる。

さらに ΔC_I は、初期建設費だけではなく維持管理費等も含めたライフサイクルコストの増分として考えてもよい。

なお、ここでは話をわかりやすくするために上記のように仮定したが、実際には地下空間の制約条件から、被災程度の割に復旧に時間がかかってしまう場合もある。構造物の特性や要求される機能を的確に把握した上で、それぞれのコストを見積り、比較評価する必要がある。

(4) 復旧時間の予測手法

前節で述べたような比較評価をおこなうためには、災害時の復旧時間の見積もりが重要となる。ここでは復旧時間予測手法の一つとして、PERT/CPMを利用した方法について述べる。

PERT (Program Evaluation and Review Technique) は1958年にアメリカで開発されたプロジェクト管理手法である。結合点 (eventまたはnode) と矢印 (作業, jobまたはactivity) でプロジェクトの作業順序を表現し、各作業の時間的な前後関係や所要時間を考慮して工程計画・管理を行うもので、ある一連の作業工程を結合点と矢印で表した図をアローダイアグラムと呼ぶ。一方、CPM (Critical Path Method) は同じ頃に米国デュポン社によって開発された手法であり、全体の所要時間をどれくらい短縮することが可能か、また短縮に要する費用を考慮した場合にどの作業をどの程度短縮するのが最適か、という最適化問題を解くことができる手法である³⁾。

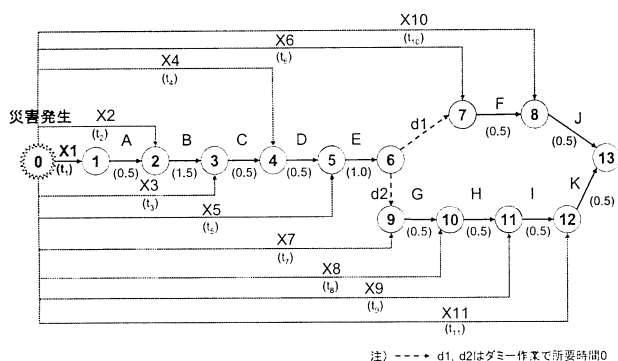


図-4 災害時のアローダイアグラム

通常の重要業務の作業工程に、災害時の復旧工程を追加したアローダイアグラムを図-4に示す。

この場合、通常作業の開始点（結合点番号1）の前に、災害発生というevent（結合点番号0）が追加され、そこから各作業の作業開始点（結合点番号1～13）にX1～X11という復旧工程を表す矢印が追加されることになる。各復旧作業に要する所要時間（ $t_1 \sim t_{11}$ ）は、想定する災害の規模により変化する。なぜなら、想定する災害の規模に応じて、構造物の被害状況が変化するためである。

この手法では、サプライチェーンの影響を取り入れた検討³⁾や、復旧時間を短縮するために必要な対策箇所の特定もできる⁴⁾。

3.2 ライフサイクルコストに基づく評価⁵⁾

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地下構造物も、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地下構造物においても、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。

(1) 土木構造物のアセットマネジメント

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。また各地方自治体や公共事業主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。

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可能である。こうしたリスクが万が一発生すると、場合によってはその構造物を運用している事業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。

(2) 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。

したがって地下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-5のような関係が得られる。

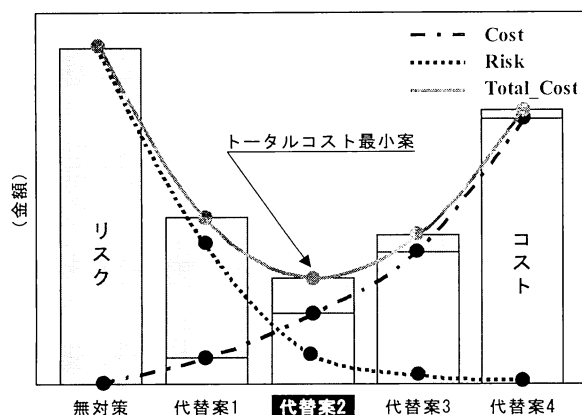


図-5 最適維持管理案

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。

では地下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。しかし地下構造物では、その評価が非常に難しいのである。

(3) 地下構造物の維持管理の難しさ

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) や構造物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。

橋梁に対しトンネルに代表される地下構造物では、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。

このようなことから、地下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。今後は、こうした性能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必要がある。しかし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、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。

維持管理の合理化のために今最も大事なことは、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。

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。

4. 今後の課題

地下構造物の性能を評価するための指標として、災害により中断を余儀なくされた場合の復旧時間（これに時間当たりの営業損を掛けることによりコストとして評価可）と維持管理におけるリスクコストを用いることが可能であり、これにより地下構造物のメリット・デメリットをより具体的に示すことが出来ることを示した。

この他にも図-6に示すような安全や経済性など様々な事象に対して性能評価を行うことが可能と考えられる。

地震に対しては、地下構造物では高い耐震性が期待でき、大地震時の被害を地上構造物に比べ大幅に低減することができる。

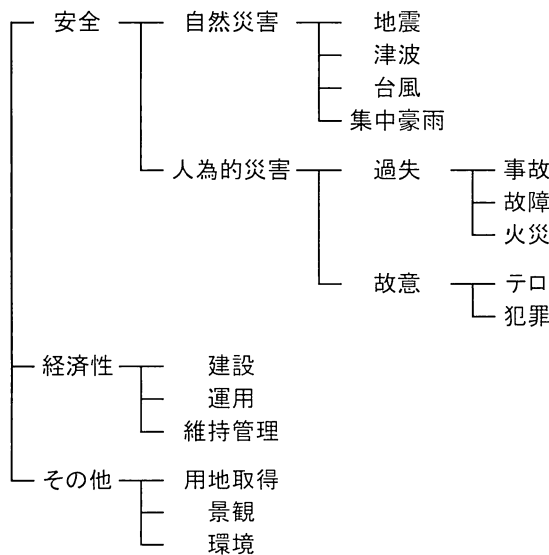


図-6 地下構造物の性能評価に関わる事象

維持管理についてみると、地下構造物は照明や換気、地下水の排水などが必要であり、一般に地上構造物より維持管理コストは高い。また、地下構造物の特徴である遮蔽性や隔離性が災いし、構造物のヘルスマonitoringが難しく、多くの労力とコストを必要とする。

耐用年数の長い地下構造物では、こうした維持管理コストが非常に大きなものとなり、地震リスクにおける優位性を打ち消すことも考えられる。

性能評価を行う場合、特定の項目だけを選択すると判断を誤る可能性があり注意を要する。例えば耐震性向上のため導入した機器が、保守に多くの費用を要する。あるいは耐用年数が短いなどの特徴を持っている場合、性能評価の対象とする期間の設定を慎重に行うとともに運用コスト、維持管理コストなども合わせて評価する必要がある。

一方、その他の項目で掲げた景観や環境は、これからの社会にとっては重要なキーワードであり、地下空間の利活用のメリットとして挙げられるものである。しかし、その具体的な評価手法は、これからの課題である。

謝辞：本研究は、一般財団法人エンジニアリング協会地下開発利用研究センター「地下構造物に関する安全性評価の経済指標への換算に関する検討サブワーキンググループ」において成されたものです。ここに記してワーキングメンバー各位に感謝いたします。

参考文献

1) 内閣府：事業継続ガイドライン 第一版，2005 年。
2) 関根智明：PERT・CPM，OR ライブラリー11，日科技連，1973 年。
3) 副島紀代，目黒公郎：サプライチェーンを考慮した地震時の復旧時間推定手法，土木学会第 64 回年次学術講演会，2009 年。
4) 副島紀代，目黒公郎：事業継続性の評価に基づく効果的な地震対策の選定手法，土木学会地震工学論文集 第 30 巻，2009 年，pp.629 - 636
5) 亀村勝美：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，58-4，2010 年，pp8-11