

地下構造物の性能設計に関する考察 PERFORMANCE-BASED DESIGN OF UNDERGROUND STRUCTURES

蔣 宇 静¹・棚 橋 由 彦²・吉 田 直 昭³・松 井 謙 二⁴

Yujing JIANG, Yoshihiko TANABASHI, Naotsugu YOSIDA, and Kenji MATSUI

Performance-based design is becoming a key word for structure design in architectural and civil engineering spheres. In this paper, the concept and connotation of the performance-based design, especially for underground structures, were expressed by the application of a neural network method. Some considerations for design in the early stage, maintenance and renewal from the viewpoint of life-cycle-cost were presented and discussed. Modeling of damage behavior of underground structures with the service year-time has also been proposed for defining the appropriate period of maintenance and renewal based on the statistic investigations of road tunnels that have been taken the maintenance previously.

Key words : underground structure, road tunnel, performance-based design, maintenance, life-cycle-cost

1. はじめに

日本では経済高度成長期において急速に整備されてきた社会資本は、老朽化による構造的機能の低下や利用形態および環境変化による社会的機能の低下に伴い、健全性を診断して、的確な補修・補強を必要とするものが年々生じている。ここでは、トンネルや下水道などの地下構造物を例にとると、供用開始からすでに20年以上経たものが多く存在し、関門海底トンネルの漏水事故(1998年)や新幹線トンネル内のコンクリート塊落下事故(1999年6月)などが物語ったように、安全への信頼性を確保するために危険箇所を確実に見出す地下構造物の点検と補修補強を余儀なくされる事例が増えている。しかし一方、地下構造物の維持管理・更新には多大の費用と期間がかかる。建設省の統計分析によれば、延長1,200mのトンネルを建設した場合、建設後40年程度で維持管理費は初期投資の建設費と同程度の金額に達することが分かる¹⁾。また、地下構造物は公共性が高いため補修・補強・更新を実施するには供用しながら施工しなければならない。したがって、如何に補修・補強・更新時に生じた技術的課題や計画、設計あるいは建設段階で考慮すべき事項を抽出し、評価を行うことは²⁾、ライフサイクルコストをも考慮した地下構造物の設計と維持管理を進めるに当たって重要な課題であると思われる。

キーワード：地下構造物，トンネル，性能設計，維持管理，ライフサイクルコスト

¹ 正会員 長崎大学 工学部社会開発工学科 助教授

² 正会員 長崎大学 工学部社会開発工学科 教授

³ 正会員 建設技術研究所 福岡支社技術第2部

⁴ 正会員 建設技術研究所 福岡支社技術本部 技師長

さて、地下構造物の設計と維持管理の関係について、本来ならば、設計者は維持管理段階でのあらゆる事態を想定して設計し、一方維持管理者は設計者が寄付した構造物の性能を理解してその保持にあたるべきであろうが、現状では両者の間で「構造物に付与すべき性能」の内包について認識の違いがあると思われる。最近では建築基準法改訂に当たって、性能設計（Performance-based Design）という用語が広く知られるようになり、いままでの建築・土木構造の仕様書技術体系を、性能に基づく技術体系へ脱皮・展開させる必要性が指摘されている³⁾。国際化・情報化の時代といわれる今日では、構造物設計の分野においても設計基準の国際整合性が問われ、性能設計が一つのキーワードになっている。このような背景を受けて、本研究は、道路・鉄道トンネルや下水道、地下鉄などを対象とする地下構造物の性能に着目して、合理的な維持管理のあり方と評価手法について考察を行うものである。

2. 地下構造物の性能設計とは

最近では構造物の性能設計について述べた論文と資料が少なくないようである^{4)・6)}。性能設計法は、性能規定型および性能明示型設計法と同じ意味で、土木構造物であるか、建築物であるかによってその性能の種類に差があると思われる。現在でこそ土木構造物において美観や環境に及ぼす影響もその構造物の性能の一部と認識されるようになってきたが、従来から建築物は耐震・安全・耐火のほか Human-friendly 的性能など多くの要素を有している。

従来からの構造物設計法も性能設計法であったと、R.O.Hamburger は述べている⁷⁾。従来の許容応力度設計法は単一レベルパフォーマンス、限界状態設計法（または荷重抵抗係数設計法）は2つのレベルのパフォーマンスであり、これからは階層的パフォーマンス目標の時代であると彼は見解を示している^{8)・9)}。構造物の構造的性能を表現するにはマルチレベルが必要になり、また「地震の影響」の考慮により構造物に要求される性能の内容が異なると、著者らも考えている。たとえば、カリフォルニア州構造技術者協会（SEAOC）が基準化を急いでいる Vision2000^{8)・10)}では、構造物に要求される性能として、図-1に示すパフォーマンスマトリックスを与えている。ここで、横軸がパフォーマンスレベル、縦軸はハザードレベルと呼ばれるもので、前者が限界状態に相当する。この図からも分かるように、構造設計において地震の影響を考慮する場合には、性能の表現がより複雑になりかねない。

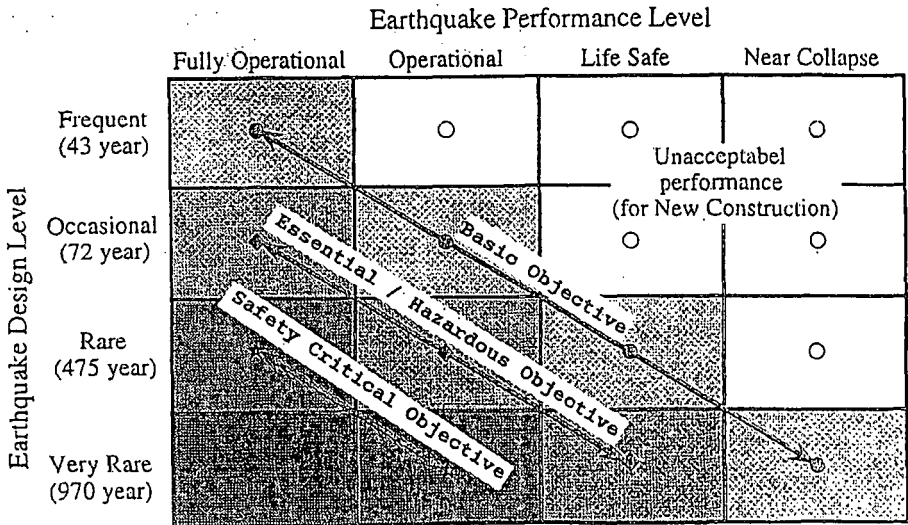
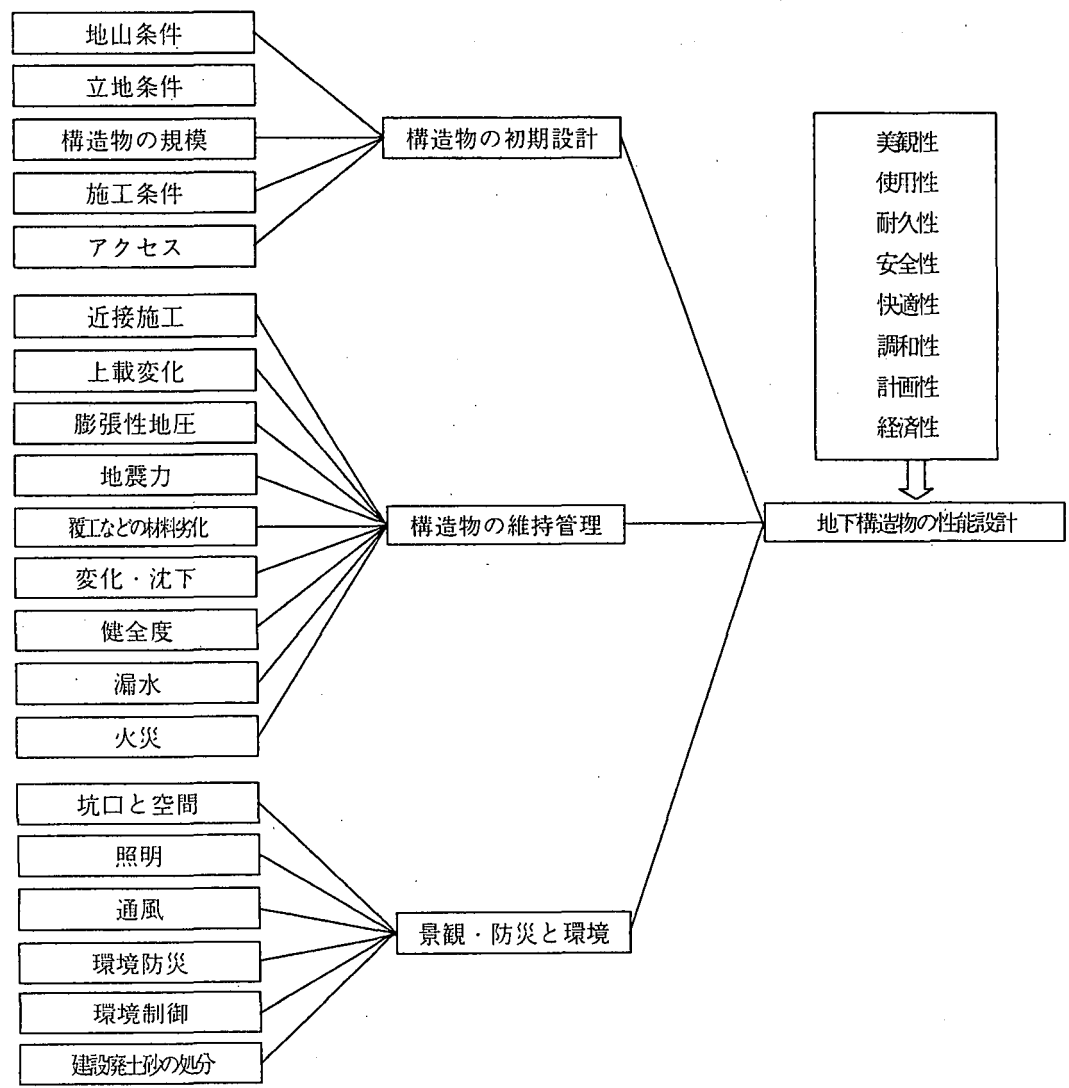


図-1 構造設計のパフォーマンスマトリックス

地下構造物の設計において要求される性能とは一体何であろうか。本研究では、地下構造物の性能を、構造的、社会要請および環境心理的側面から分けられると考えている。構造的な性能から見れば、使用性、耐久性と安全性（耐震含む）が大別されるが、環境心理的には構造物の美観性、快適性と調和性が求められる。さらに、環境負荷、社会的要請に関する要件（計画性・経済性など）をも満足するものでなければならない。

使用性については、使用期間中に作用する確率の高い常時荷重・環境作用の下で、交通などを安全に通過させる性能を使用期間にわたって満たさなければならない。耐久性とは、材料強度の経時的劣化による欠陥など使用性能の低下に対して構造物に所定レベルの修復補強を行うことにより使用性が確保されなければならないことを指す。ところで、ライフサイクルコスト的に既存構造物の維持管理にかかるコストが初期投資に比べて同程度またはそれ以上になる場合は、むしろ更新を行うべきであろう。一方、安全性とは使用期間中に稀に作用する荷重や材料劣化、環境変化が使用期間内のいかなる時期に発生したとしても、地下構造物が破壊崩壊して人命が損なわれることのない、許容レベル以内に留まる安全性を有することを指す。美観性と快適性に関しては、使用期間中の構造物表面の状態（たとえば、使用性と安全性を損なわない表面ひび割れや亀裂の発生状態）をもって美観に関する性能などを規定し、それに周辺環境と構造物とを一体として調



図－２ 地下構造物の性能設計の構想

和性を規定する。

これらを初期設計、維持管理、景観・防災・環境という3つの側面から整理すると図-2のようになり、システム分析手法を適用すれば左側に列挙した入力層（不確定要素も含めて）より、中間層の処理を経て、出力層側から性能設計の最適解が得られることになる。中間層の処理ではいくつか高度なモデルが構築される。

構造的性能の設計に対して上述したマルチレベル限界状態が用いられ、地下構造物の力学的安定に関する静的および地震力による動的解析モデル、地下水浸透流解析モデルなどが取り込まれる。景観・環境といったソフト的性能に関しては、SD法（Semantic Differential Method）によるイメージ評価^{13), 14)}が有力な計量手段として考えられる。一方、維持管理の定量的評価に関して後節にも述べるが、維持管理実例を統括したデータベース、社会的要請および環境変化予測モデル、地震災などの復旧・更新モデル、材料損傷劣化モデルなどが設計される。その中、とくに構造物の損傷限界および終局（安全）限界に対しての補修・補強・更新に必要とする維持管理コストは構造物の使用開始後経過年数とともに増加し、ある年数以上経つと新規建設費用と同等またはそれ以上になるため、初期の建設コストだけでなく維持管理コストも含めて地下構造物の設計の妥当性をトータルで考えるべきである。言い替えれば、設計者が地下構造物を設計する際、その性能を考えて、初期投資型（メンテナンスフリー型）の構造物にするか、それとも維持管理に重点を置く維持管理型（メンテナンス型）とするかを最初に決める必要がある。そこには構造物の性能の劣化を考えねばならず、かつ設計段階でも構造物（構成材料）の寿命または耐用期間を明らかにしておく必要があるので、以下はこれについて考察する。

3. トンネルを対象とする地下構造物の損傷劣化モデル

3.1 覆工コンクリートの変状の調査分析

統計によれば、1995年4月現在全国の道路トンネルは約7500ヶ所で使用総延長が約2,200kmに及び、特に高速道路と一般国道における延長の伸びが目立つ。全体で見ると、1970年代以降に供用されたトンネルが約半数を占めるが、1950年代以前に供用された古いトンネルも約20%ある。変状があるトンネルは全体の7%近くを占め、覆工のひび割れが最も多く、次いで覆工剥離、施工継ぎ目の開き、石灰などの析出が多い。また、湧水についても軽微なものも含めると全体の6割を占める。

表-1 トンネル変状の原因と特徴一覧

原因		概要
材質劣化による変状	鋼材腐食	坑門等の鉄筋コンクリート構造物では、鋼材の腐食・体積膨張により、鉄筋に沿ったひび割れの助長および鋼材断面の減少・耐力低下を生じる可能性がある。
	アルカリ骨材反応	トンネル覆工ではこれまでのところアルカリ骨材反応による変状事例は少ない。
	火災	通行車両の事故による火災時には、コンクリートは高温条件にさらされる。火災による覆工の劣化としては、強度、弾性係数等の力学的性質の低下、コンクリート表面および内部での爆裂現象、はく落、ひび割れ等が考えられる。
	その他	通行車両の排気ガスや煤に含まれる窒素酸化物などが漏水中の水分と化合して強い酸性水を生成する可能性がある。これまでのところ煙害による直接的変状の例は少ない。
漏水		漏水は、外力による変状の原因にもなるが、それ以外にも漏水自体が問題となる場合がある。
その他	背面の空げき	覆工背面の空げきは、地山を緩め、土圧を増加させる原因となるばかりではなく、受動土圧の発生を阻害して、覆工の構造的な強度低下の原因となる。
	巻厚	設計巻厚が小さいことにより、想定される土圧が作用しても変状が発生する場合がある。
	インバートなし	施工時には大きな土圧の作用がなくインバートを設置しなくとも地山の安定が得られたトンネルにおいて、施工後になんらかの要因により土圧が増大し、インバートを設置していないことにより変状が発生することがある。

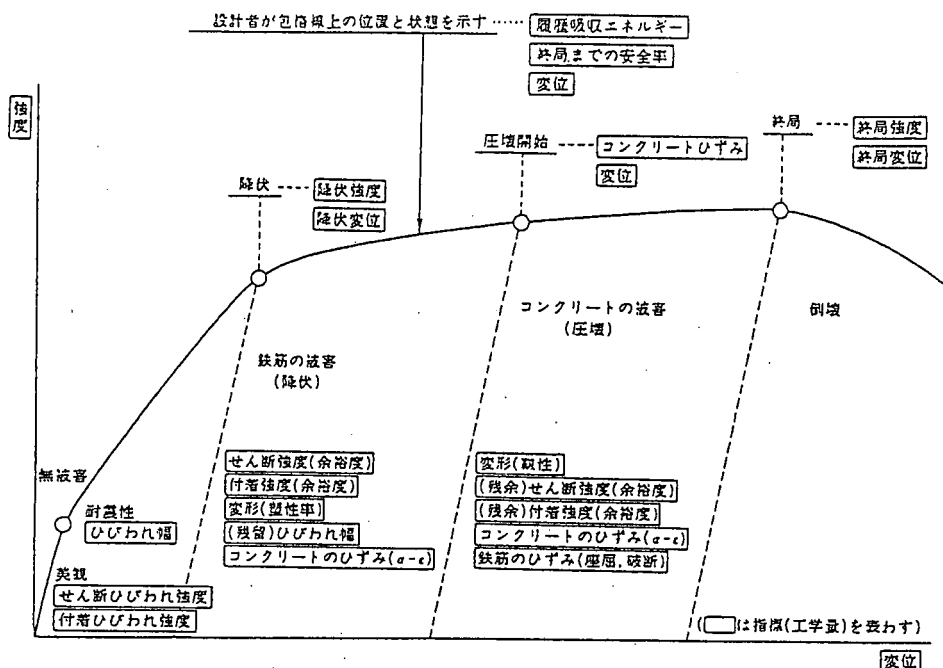


図-3 RC 構造体の状態変化

著者らは、地盤工学会研究委員会活動の一環として、九州管内の道路および鉄道トンネル(66 本程度、山岳工法)における過去 5 年間に実施した補修状況についてアンケート調査を実施した⁹⁾。補修したトンネルのうちほとんどが矢板工法によって施工されており、NATM 工法はわずかに 1 本であった。補修の要因としては、表-1 に示したように、覆工の老朽化、ひび割れ、はく離、剥落、漏水によるものであり、偏土圧等の地圧による変状により対策を講じたものは 1 例のみであった。このうち、特に漏水に関しては、昭和 54 年の国鉄による鉄道トンネルの実態調査や平成 2 年度に建設省で実施された道路トンネルの変状実態調査においても約半数以上のトンネルで漏水が確認されており、その傾向は実態調査からもうかがえる。覆工の材料劣化に関しては、近年の NATM 工法の導入により覆工施工の技術向上と防水シート施工により覆工の材質低下問題や漏水問題はかなり改善されているものの、支保の構造的性能の経時低下が予想される。とくに覆工コンクリートの場合、通常点検では表面の変状しか判らないため、漏水があったとしても、覆工コンクリートが丈夫であり背面の劣化が進んでから漏水する場合、逆に背面部はほとんど劣化していないのに覆工コンクリートの劣化によって漏水している場合があり、変状の兆候としては簡単に発見できても対策を講じるのは非常に難しいのが現状である。

3.2 地下構造物の損傷劣化モデル

地下構造物の維持管理の最適化を検討するためには、構造物の劣化損傷と維持管理負担の関係をモデル化する必要がある。以上にも考察したように、トンネルの耐久性に寄与している支保部材は、覆工に被覆されていることもあり、それに変状の多さや対策の難易を考慮すると、トンネルの維持管理の主役は覆工コンクリートの経年的変状に集約されるのではないと思われる。覆工などの構造物の状態変化をイメージ的に表す手段として、荷重～変位関係を用いることができ、ここでは RC 構造体の例を挙げると図-3 のようになる^{3), 11)}。0～ σ_c 間は美観性に、 σ_c ～ σ_y 間 (σ_y : 使用限界) は使用性に、 σ_u は終局限界 (安全性) に対応している。

構造物に対する要求性能と状態の変化 (例えば、材料の損傷と劣化による構造物の安定状態の変化)、および状態変化の推定精度などとの関係を適切に判断して設計することが、構造物の性能設計の意図するところである。ここでは、まず構造的性能に関して地下構造物の損傷劣化モデルを考えてみる。

図-4に示した道路トンネルの建設費および維持管理費の累計(延長1,200mを想定)¹⁾を考察してみると、経過年数とともに維持管理費が指数的に増加することが分かる。それで、地下構造物の損傷劣化モデルとしては、図-5に示したように、縦軸に表示される性能は構造物の存続に関わる基本的性能、たとえば耐荷性能でなければならないが、曲線は地下構造物(たとえば、コンクリート覆工)が構築されてから経過年数とともに、ほぼ維持管理コストの経年の曲線と同じ傾向で下降を始めると考えられ、ある年数を超えたら下降が加速される。そして維持管理行為によって構造的な性能が回復される。過去の統計データに基づけば、維持管理コスト(M)が初期投資(E_i)と同程度となる構造物の供用経過年数 t_m が以下のように求められる。

$$t_m = \frac{1}{a} \ln(E_i - 1)$$

ただし、 t_m は維持管理コストが初期投資と同程度となる供用経過年数、 a は統計分析定数、 E_i は初期投資である。

最近では、高強度コンクリート材料の開発や地山補強、防水シートなどの使用により、コンクリート覆工の劣化速度がかなり改善されている。現時点ではそれに関する経過年数20年以上の維持管理コストの統計データがまだ揃えていないので、統計分析定数 a を室内実験的レベルの構造的な性能の経時変化分析に基づけば予測することが可能であると思われる。

4. 地下構造物の性能設計におけるライフサイクルコスト(LCC)

地下構造物の性能設計においても特徴づけられるのは、最適な更新時期を設定して初期投資や維持管理費を最小とするライフサイクルコスト(LCC)という概念を導入することである。この概念の適用は、寿命と初期投

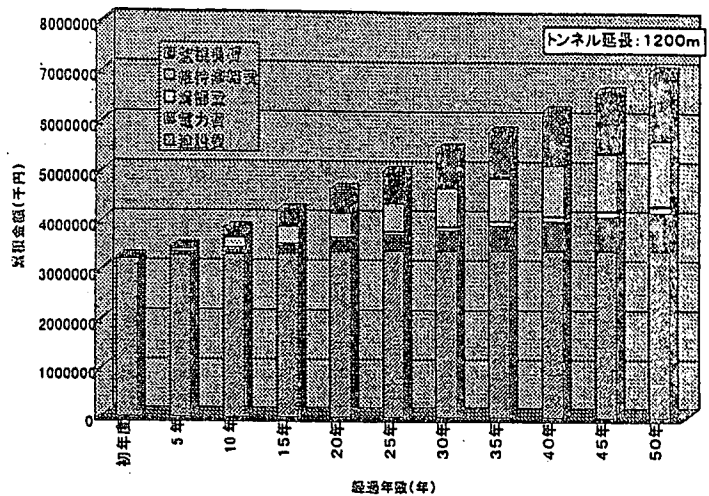


図-4 道路トンネルの建設費および維持管理費の累計
(延長1,200mを想定)

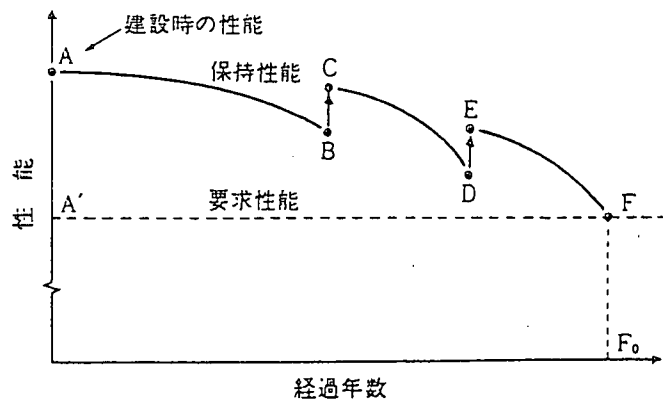


図-5 構造物の寿命の概念図

資の関係がある程度定量的に把握できること、更新が現実的に可能であることを前提としている。ライフサイクルを考える場合、構造物の寿命には、物理的寿命、経済的寿命、社会的寿命があるが、トンネルなどの地下構造物はいったん建設されたら簡単に取り壊すことができない永久構造物として考えるべきであるので、これらの寿命に対して最適な更新時期を設定して初期投資や維持管理費を節約することが大切である。十分に長い期間（ T ）を想定し、一年あたりの経費を最小とするように検討すればよいと考える。一年あたりの LCC を LCC/T とし、初期投資（ E_i ）、維持管理（ M ）および更新費用（ R ）の3項の和として表す提案があるが¹¹⁾、計画・設計段階で寿命と M および R を定量的に把握するには、維持管理の実例を統括したデータベースの構築とシステムデザインが必要となってくると考えられる。

トンネルの維持管理の現状考察から分かるように、トンネルのような地下構造物の維持管理は設計も含め、建設工費も大きい調査費も膨大であり、維持管理については異常の発生が予測不可能な場合がありかつ対策費もかさむ。これらを踏まえ、地下構造物の場合のライフサイクルコストと最適な更新時期の評価として図-6のようなモデルを考案する。

図中には一般構造物の初期投資型とメンテナンス投資型も併せて示してある。 T_2 は全体の供用期間（例えば、100年）で長く取っておく。どのレベルの安全性を求めるかを議論し、それを定量的に評価できた許容レベルを達成するように維持管理（損傷部位の補修・補強など）上の工夫を行うことにより、更新せずに LCC を大幅に改善させることが可能であると推測されよう。研究の対象が異なるが、道路橋のライフサイクルコストの複数モデルに関する試算では¹¹⁾、更新を回避するために初期投資をかなり増加させても維持管理費の低減により結果的に負担が小さくなる、つまり初期投資型（メンテナンスフリー型）の構造物にすべくといった知見が、今後の地下構造物の性能設計においても大いに参考になろう。

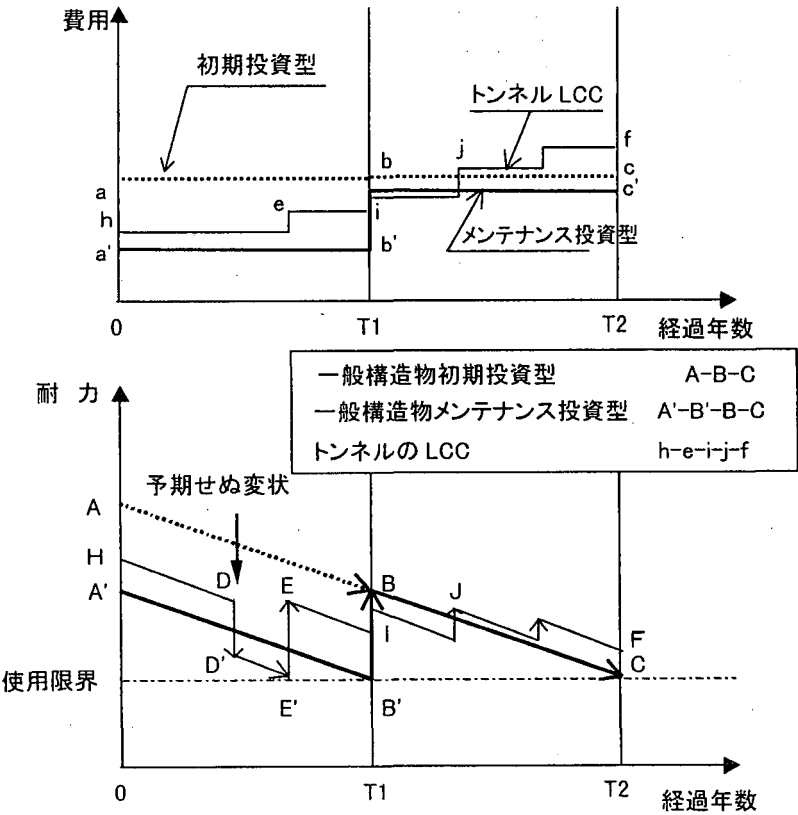


図-6 地下構造物に対するライフサイクルコストの概念⁹⁾

5. おわりに

地下構造物の性能設計の目的は、構造的側面、社会要請的側面ならびに環境的側面から見た設計の自由度を高めて多様な設計法を受けやすくすること、初期投資コストと維持管理コストを含めたライフサイクルコストが低小になることであると考えている。これを実現するには、優れた設計法なり信頼できる設計法の確立と精度よく評価するシステムの構築が必要である。また、時代の進歩と社会的認識の更新に伴い、地下構造物の性能の内包を具体化させ、種々の影響要因を包括したシステムの評価により性能設計の最適解を求めるべきであると考えられる。本論文は、まずは「地下構造物の性能」の概念、内容と評価について、道路・鉄道トンネルを対象に考察しただけであり、今後は LCC の概算を含めて、地下構造物の性能設計の定量的評価法についてさらに詳細な検討を進める予定である。

最後に、本論文は、地盤工学会九州支部「地盤・基礎・土構造物の維持管理技術に関する研究委員会」(松井謙二委員長)における活動成果報告書の一部を参考した。ここに記して謝意を表する。

参考文献

1. 水野敏実他：ライフサイクルを考慮したトンネルの設計，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 4 巻，pp.159-166, 1999.
2. 平井光之他：地下構造物の維持管理上の要件とライフサイクル設計，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 4 巻，pp.175-182, 1999.
3. 田村昌仁：性能規定へ向けて－行政から見た基礎設計の将来，基礎工，pp.9-15, 1996.
4. 日本コンクリート工学協会：特集＊仕様規定から性能規定へ，コンクリート工学，Vol.35, No.11, 1997.
5. 小林勝己，基礎構造設計における要求性能，建築技術，pp.108-119, 1997.
6. 堺 孝司：性能照査型設計法のゆくえ，橋梁と基礎，97-8, pp.73-83, 1997.
7. Ronald O. Hamburger：The development of performance-based building structural design in the United States of America, Proc. Of Int. Workshop on Harmonization in Performance-Based Structural Design in Countries Surrounding Pacific Ocean, pp.149-168, 1997.
8. 松井謙二：性能設計法の現状と今後に関する一考察，AJCE 会報，Vol.23, No.3, 1998.
9. 地盤工学会九州支部編：「地盤・基礎・土構造物の維持管理技術に関する研究委員会」報告書，第 4 章トンネル，1999.
10. 篠塚正宣：性能設計の概念と耐震設計，第 7 回都市防災に関する講演・討論会テキスト，pp.1-13, 1997.
11. 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No.501/I-29, pp.1-10, 1994.
12. JTA 国際委員会国内広報ワーキンググループ：大深度地下施設に関する建設技術の進歩(アメリカ岩盤力学委員会)，トンネルと地下，第 20 巻 2 号，pp.49-59, 1989.
13. 例えば，棚橋由彦他：ドライバー・同乗者の視点から見た道路トンネル坑口・坑内および周辺景観の動的デザイン評価，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 5 巻，2000.
14. 加藤義明：地下空間と人間の心理，都市地下空間活用研究(都市地下空間活用研究)，No.30, pp.2-6, 1996.
15. 平井光之：地下構造物の補修・再生事例と設計・施工へのフィードバック，地質と調査，1999 年第 2 号，pp.27-32, 1999.