

インフラのライフサイクルマネジメントとサステナビリティ

Infrastructure Life-Cycle Management and Sustainability

横田 弘¹

1, 北海道大学大学院工学研究院土木工学部門

Hiroshi Yokota¹

1, Division of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University

Abstract

Social infrastructure has to be thoroughly planned, designed, executed and maintained to keep structural performance over its corresponding requirements throughout the life-cycle. However, those suffering serious damages in structural members have been often found due to various reasons. One of the reasons is lack of total management of the infrastructure. The life-cycle management is an organized system to support engineering-based decision making for ensuring structural performance at the design, execution, maintenance, and all related work during its life-cycle. The life-cycle management is implemented according to the life-cycle management scenario in which balance of several sustainability indicators would be considered with ensuring overall sustainability. This article presents the concept and framework of the life-cycle management of infrastructure to ensure sustainability during the life-cycle.

Key Words: *Infrastructure, life-cycle management, structural performance, sustainability*

キーワード: 社会インフラ, ライフサイクルマネジメント, 構造性能, サステナビリティ

1. はじめに

インフラは、「市民が持続可能で豊かな社会経済活動を営み、生活の安全・安心を確保し、国土の有効活用を可能にするために、社会的に共有されるもの」と定義される。その重要性について改めて稿を起す必要もないが、インフラは市民生活を支え、人々の社会経済活動の発展に不可欠であるとともに、ときには災害から人々を保護し、快適で安全な生活を確保することにも貢献している。インフラには人工的に構築したものと、河川、海岸等の自然由来のものがあるが、本稿では前者をインフラと称する。インフラの整備によって、人々は各種産業の発展や物流、人流を加速化させてきた。特に産業革命以降この傾向は加速度的に顕著になっており、現在でも発展途上国を中心に、インフラ整備の熱は冷めることはない。一方で、膨大なインフラの整備は、資源消費をさらに増大させ、地球環境を激変させてきた。無思慮な資源の消費は人間を含めた生物および地球そのものの存続に大きな脅威であることは明らかである。1972年

にストックホルムで開催された国連人間環境会議において人間環境宣言が採択され、「空気、水、土地、植物、動物を含む地球の資源は、現世代だけでなく将来世代の利益となるように適切にマネジメントされねばならない」とされた。それ以降、すべての活動において環境も含めたサステナビリティ（持続可能性）を実現することが求められつつある。

サステナビリティは、資源消費や地球環境などの環境的側面からの概念のみならず、社会的側面や経済的側面も含めたより幅の広い概念である。環境的側面に注目したとしても、産業革命以前に比べて地球の平均気温上昇を望ましくは 1.5°C 以下に抑える必要があることが強く示唆されている¹⁾。これについては未だインフラの分野では陽的に考慮されるまでには至っていないが、避けて通ることはできない。国際コンクリート構造連盟 (*fib*) では、インフラの構造工学的側面からのサステナビリティの定義として、「現世代と将来世代が、妥協せず、自然、社会、経済、健康に関するニーズを満たすことに資する構造物あるいは構造要素の能力」であるとしている。このように、インフラの分野においてもこれまでとは異なる対応ができるように新たな考えを取り入れていくことが急務となっている。

インフラは、それぞれに固有の目的をもって整備される。目的を確実に達成するために、インフラが保有すべき機能が設定される。そして、この機能を必要な期間（設計供用期間）確保するために、インフラあるいはそれを構成する構造物に要求される性能が設定される。要求性能が設定されれば、設計段階でその性能が保有されているかどうかの照査が行われる。このように、設計には構造計画に係る事項と照査に係る事項があり、両者により性能を保持し続けるように設計が行われる。そして、設計結果に基づいて施工され、使用が開始された後は維持管理を行い、いずれ廃止の段階に至る。このように、インフラの計画から廃棄に至るライフサイクルにおいて、その機能あるいは性能を確保するために行うべき作業の最適解を常に求めていくことになる。これがライフサイクルマネジメント (LCM) の基本である。つまり、LCM は、これらの全作業段階を通して、インフラの目的に応じた機能および性能を要求するレベルに保証するための全体戦略であるとも言える。本稿では、持続可能で多様性と包摂性のある社会実現のためのインフラマネジメントシステムとしての LCM の考え方を紹介する^{2), 3)}。

2. インフラのライフサイクルマネジメント

2-1 ライフサイクルマネジメントの必要性

インフラは、図 1 に示すように、調達（計画、設計、施工の段階）から使用（使用段階）を経て最終的には廃止（廃止段階）に至る。これがインフラのライフサイクルである。そして、各段階において重要な情報を別の段階に効果的に伝達することが必要であるとも言える。実際には、単一の組織あるいは技術者が一貫して全段階に関わることは少ない。そのため、どのように当該インフラに関わる情報を複数の組織や技術者で共有し、かつ一貫した思想の下でインフラのライフサイクルをマネジメントしていくのが重要となる。そのための基本概念と方法に関する適切なシステムが LCM ということになる。

適切な LCM の欠如を示す一つの事例にインフラの早期劣化がある。劣化が生じるのはやむを得ないこともあるが、設計の際に適切な耐久性照査を行ったにも拘わらず、早々に措置が必要なレベルにまで劣化が進む事例が散見される。使用段階において劣化の兆候を見つけた場合にその原因を推測することになるが、設計段階でどのようなモデルを用いて、パラメータを入

力して照査が行われたのか、前提条件はどうだったのかなどについての情報が維持管理者に伝達されていないため、設計あるいは施工に起因する問題があったのか、これまでの維持管理が十分でなかったのかもよくわからない。インフラの調達や使用においては常に不確実な要素が存在するため、それぞれの作業で想定したこれら要素の妥当性を評価し、今後の作業にフィードバックする必要がある。また、使用段階でインフラの要求性能が変更される場合や用途変更される場合があるが、そのような場合にも元の設計に関する基本的な情報が不可欠になるが、それにたどり着くのは容易ではない。つまり、インフラは、計画から設計、施工、使用を通して廃止に至るライフサイクルを通して、これを管理する包括的な戦略の下にマネジメントされるべきものであり、LCMはこの目的のための有用なシステムであると言える。加えて、LCMは計画・設計時に設定されたインフラの機能や要求性能、使用中に変更された要求性能を確保するために行われる措置の最適化にも寄与することとなる。

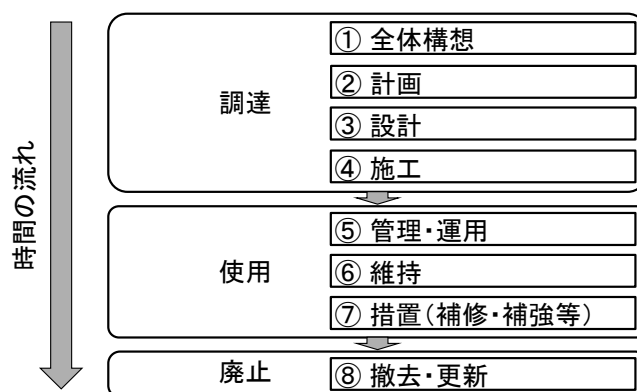


図1 インフラのライフサイクル

2-2 ライフサイクルマネジメントの枠組みと流れ

LCMの枠組みを図2に示す。LCM自体は、前述のように、計画、設計から廃止を経てまた計画に戻るサイクルである。ただし、当該インフラ自体に戻すことはできないが、類似あるいは近接する他のインフラに当該インフラで得た知見をフィードバックしていくことで永遠にサイクルが回り続ける。

図3はLCMの標準的なフローを示すものである。これから新設しようとするインフラでは、シナリオはインフラのライフサイクルを制御するものであるため、できる限り上流側で構築されなければならないためである。シナリオには、大きな改定を施さなくてもできる限りインフラの機能と性能を維持するように構築される必要があるが、計画や設計の段階では限界があるのも事実である。あらかじめその限界が予想できる場合には、是正措置を計画し、シナリオに含めることができる。シナリオは、次の段階に引き継がれることで、インフラのライフサイクルの各段階を有機的につなぐ。

設計段階では、インフラの性能要件が設定され、計画段階で策定したシナリオを満たすように、構造形式、材料、形状・寸法等が指定され、性能が照査される。設計結果がシナリオを満たさない場合、シナリオは設計の考え方と一致するように修正されるか、設計作業が再度実行される。

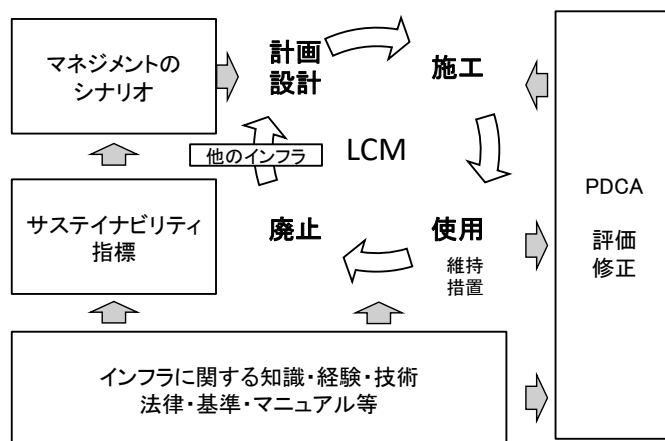


図2 ライフサイクルマネジメントの枠組み

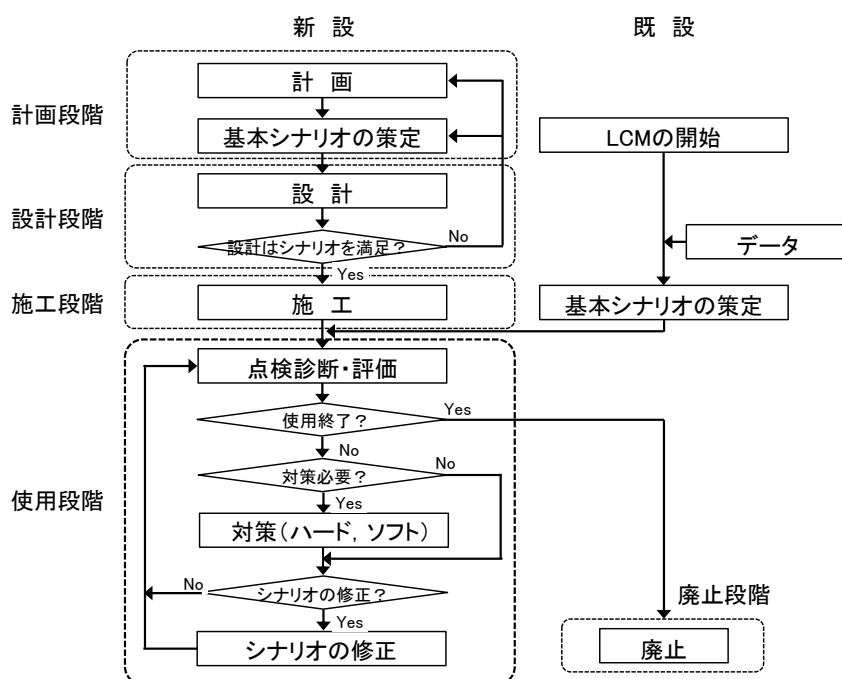


図3 ライフサイクルマネジメントの標準的なフロー

施工段階では、設計段階で設定されたインフラの必要条件を完全に確保するように必要な作業が行われる。施工後には、インフラの状態を確認するために初期診断が実行され、その結果、シナリオどおりに使用できないことが分かれば、シナリオを改定するか、シナリオに合うようにこの段階でインフラに必要な措置（いわゆる補修）を行う必要がある。その後は、インフラの状態と性能が定期点検等によって評価され、常にシナリオと実態との整合性が確認される。インフラの状態がシナリオどおりでない場合には、同様に措置を行うか、シナリオを現状に合うように改定する必要がある。計画段階で策定されたシナリオは、種々の仮定に積み重ねられた虚構の産物であるため、その妥当性を確認していくことが使用段階で求められる。この情報は当該インフラのみならず、類似のインフラの設計等において活用される。最終的に、措置をしてまで使用を続けるのは問題であると判断された場合には廃止段階に移行する。

廃止段階では、インフラの解体またはインフラ全体または部材のリユース、材料のリサイクルの可能性を検討し、廃棄物の量を減らすなどの環境負荷低減を検討する。本来ならばインフラの計画・設計段階において廃棄のシナリオを検討しておくべきであるが、これについてはそのための今後の技術開発が待たれるところである。

既存インフラであって LCM に基づく維持管理を行おうとする場合には、まず点検診断を実行し、その結果を受けてシナリオを構築する。新設インフラと異なり、計画、設計あるいは施工についての情報が十分でないこともあるので、入手できる情報の範囲でシナリオをまず策定し、それ以降は新設インフラと同様に進める。

LCM は、基本的な考えを示すシナリオを構築して、それに基づいて実施する。シナリオは、当該インフラをどうしたいのかをまとめたものである。シナリオを構築する際には、複数の代替案から選定するための評価指標が必要となる。現在検討している LCM では、社会的、環境的、経済的な側面から考えられるサステナビリティの指標のバランスを考慮する。これについては後述する。シナリオはその時点での種々の仮定に基づくものであるため、後述するように、必要に応じて適切に改定される必要がある。

2-3 ライフサイクルマネジメントにおける PDCA

図 4 は、LCM における PDCA (Plan-Do-Check-Act) の概念に基づくフィードバックおよびシナリオ改定のシステムを示している。同図では、インフラの管理者あるいは技術者のレベルに応じて異なる PDCA サイクルが選択できることも示している。インフラ管理者のデータや知識の蓄積の程度、技術的な熟度によって、簡易レベル、詳細レベル、高度レベルにマネジメントのレベルが大別できる⁴⁾。そして、このレベルに応じて、簡易レベルでは使用段階の維持管理の作業においてのみにデータを活用して PDCA サイクルを回す、詳細レベルでは使用段階の情報を元に計画、設計、あるいは施工にデータをフィードバックさせる、さらには、高度レベルではより多くのインフラを対象とした戦略的な管理運営にデータを活用する、といったように PDCA の回し方を選択する。そしてこの作業を繰り返すことで、データや知見の蓄積によるレベルアップの程度に応じて、マネジメントの対象や方法がステップアップされていき、より現実的かつ最適なシナリオを構築することにつながる。

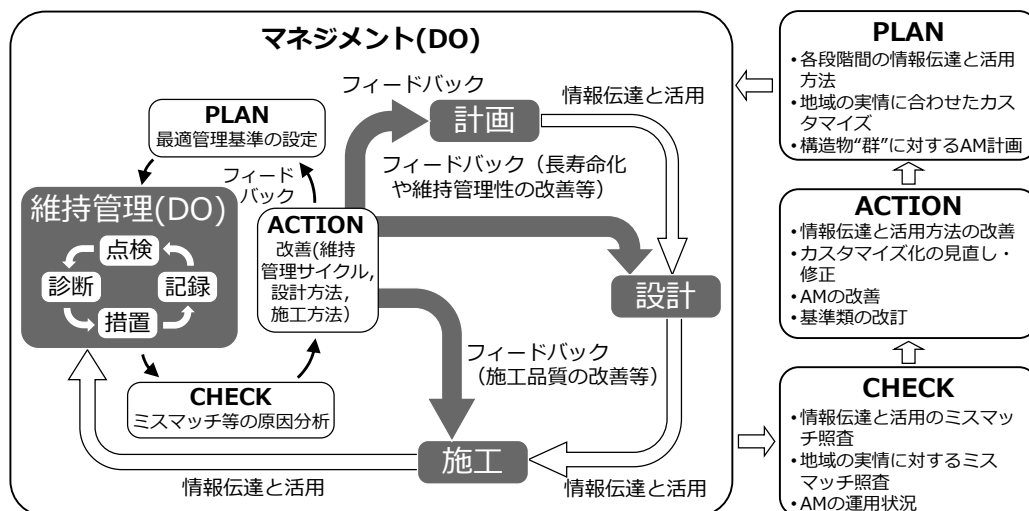


図 4 ライフサイクルマネジメントにおける情報の流れと PDCA サイクル (文献 5 を元に改編)

3. LCM とサステナビリティ

3-1 サステナビリティの評価指標

LCMによってインフラの社会への適合性を確実にすることができると考えている。社会への適合性とは、利用する人々が社会の持続可能性という観点で受け入れることができる状態であることを意味している。インフラの要求性能を広く「社会への適合性」ととらえることによって、これまでとは異なる性能照査の体系が形成される可能性がある。インフラの著しい劣化あるいは自然作用の極端現象等によってインフラが使用制限を受けたり、使用停止あるいは崩壊に至ったりすれば、ユーザや社会に与える影響は甚大である。このことは社会のサステナビリティの喪失に直結する。それによって、人命が損なわれ、雇用および生産拠点は一時的に利用停止になるなど、経済的な観点からも著しい損失を生じる。インフラが顕著な劣化や崩壊によってむやみに更新されれば、大量の廃棄物が発生し、それを処理するには膨大なエネルギーが必要になる。また、再構築には追加の資源とエネルギーが必要になる。そのため、インフラの機能を確実に確保し、その目的をきちんと全うさせることが、サステナビリティには最も重要なこととなる。

LCMにおいて、最適あるいはより最適に近い解を求めるために何らかの数値指標が必要であり、そのためにサステナビリティに基づく指標の設定と数値化、そして評価が必要となる。サステナビリティを考えるには、社会的側面、環境的側面、経済的側面の3つの側面があり、これらの各側面から数値指標を設定することとなる。

3-2 社会的側面

社会的側面には、安全・安心、使い勝手、人口問題、利用者の需要と満足度、文化的価値等さまざまな切り口があり、インフラは、これらに直接あるいは間接に関係することが多い。社会的側面からの指標（社会的指標）としては、安全性、使用性、アクセス性、適応性、健康・快適性、サービスの調達、雇用創出、人口の変化、文化的価値などを定量化して用いることが考えられる。最近、社会指標の一つとして注目されているのは、レジリエンス（resilience、強靱性）である。レジリエンスは、社会インフラが崩壊するような事象が生じた後に復興のための最適化を図るための指標となるものである。レジリエンスは、社会のサステナビリティを表す指標として用いられるようになると考えられるが、インフラの視点からレジリエンスをどのように評価し、それをどのように実現するかが重要となる。

我が国では、1995年兵庫県南部地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震により、社会システムが大きな被害を受け、社会は脆弱であることを改めて認識させられた。インフラの設計基準は、設計の対象とする地震動に対してインフラが崩壊しないための最低限の要求事項を示している。しかし、当時の設計基準では、設計対象を超えるような大規模直下型地震、地震動による損傷後に来襲した大規模な津波、複数回の主要動による損傷蓄積の影響には十分対応できていなかった。つまり、前述のように、設計で保証できる安全性は完璧でなく、そのような事象が生じたときへの備えをしておかねば社会のサステナビリティは確保できないと言える。インフラの力学的挙動のシミュレーション技術は進歩し、その地震時挙動を相当正確に予測できるようになっている。しかし、インフラに自然作用に不確実性が存在する状況ではシミュレーションの精緻化だけでは片手落ちであるため、何らかの余裕度を付与しておくことがサステナビリティの観点から必要であると考えられる。それは、巨大地震や集中豪雨のよ

うな極端現象は社会に重大な影響を及ぼし、社会インフラの機能そのものを喪失させ、それからの社会の復興にも影響を与えるからである。そして、このような復興に係る費用は、変状の生じた構造物の補修や更新の費用に比べて相当大きい。

また、設計基準の最上位の概念を示す ISO 2394 では、2015 年の改定版⁶⁾において、構造物の要求条件が拡張され、社会的機能を支え社会の持続的発展を高めるよう設計され、維持管理され、そして解体されなければならないことが原則とされた。その一環として、リスクやロバストネス (robustness) の概念が導入され、使用性、安全性、ロバストネスを適切な水準のリスクあるいは信頼性でもって満足されるべきものであるとされている。このように、従来設計で考えられてきた照査指標のみならず、新たな事象を社会指標として取り入れるべき必要があり、検討が進められている。

3-3 経済的側面

経済的側面からの指標 (経済指標) としては、インフラの整備や維持・運用に必要な費用がその代表である。費用には直接コストおよび間接コストが含まれる。最近では初期建設費に加えて使用段階で点検診断や措置の費用も含めたライフサイクルコスト (LCC) による評価が行われることも多いが、LCC 自体は多くの仮定の積み上げで計算されたものであり、これのみで意思決定をするには限界があることも広く認識されていることである。一方、LCC だけでなく、インフラが生み出す便益あるいは資産価値を指標として評価する場合もある。一般的なインフラのプロジェクトでは、もしコストが予算を超えていれば、構造形式や使用材料および施工の工夫等で費用低減を図ることで対応され、インフラの機能や要求性能にまで立ち返って見直されることはほとんどない。しかし、LCM によって、これらも含めた対応ができるようになる。

3-4 環境的側面

インフラの整備、使用においては、天然資源やエネルギーの使用が必要であるほか、気候変動、環境汚染や生物多様性への悪影響などがある。また、撤去されたあとの産業廃棄物の処分も必要となる。これらを数値化したものが環境的側面の指標 (環境指標) となる。指標の中には、騒音・振動のように法的規制値が設定されているものや温暖化ガス排出量のように今後の目標値が設けられているものがある。

インフラに一般的に用いられるコンクリートおよび鋼材は、これらの製造時に特に大量の CO₂ を排出することが知られている。ある試算では、世界全体の CO₂ 総排出量の約 14% をセメントと粗鋼の製造で占めているとされ⁷⁾、素材製造を含めた建設産業全体においてもこの削減が求められようとしている。今やインフラ関連産業のみならず全産業で取り組むべき喫緊の課題である。

4. サステナビリティ思考に基づくマネジメント

4-1 サステナビリティの評価

インフラの性能照査においてこれまで構築されてきた設計体系あるいは照査体系は安全性を中心にしてきたと言っても過言ではない。社会インフラに求められる性能として安全性が最も重要であることに疑いはないが、昨今の地震災害や土砂災害を見ても、確保される安全性に「絶対」という保証はない。そもそも、設計においては、設計供用期間中に想定される外的作用を想定しているが、長期的な変動の予測には限界があるので、建設当時の自然条件や社会環境を

前提としている場合が多い。一般のインフラは、 $10^1 \sim 10^2$ 年オーダーの使用を前提として照査がなされることが多い。しかし、限られた範囲のデータの中で再現期間が数百年を超える極端事象をもっともらしく想定するのは不可能であるため、すでに確立されたと考えられている安全性に関する設計体系もまた十分でない。もし安全性が十分でないとすれば、極端事象によってインフラが崩壊する危険性が高まったり、変状の進行によってユーザの不安感が高まったりして、サステナビリティの観点からは極めて重大な問題である。サステナビリティ指標を評価軸とした設計体系にするには、インフラが潜在的に有する安全余裕度をいかに正確に定量化できるかにある。

サステナビリティの考え方を導入した LCM のシナリオ評価の流れを図 6 に示す。この流れは、サステナビリティ設計と称しており、設計および維持管理における補修等の設計において活用できる新しい枠組みである⁷⁾。社会指標としての安全性や使用性に関する照査をパスした後に、経済指標および環境指標を算定して照査する。これらが要求性能を満足しない場合、条件を変更するかどうかの判断を行うか、あるいは照査をパスしなくてもよいとする場合は次の段階に進むことも可能である。最後に全体を総合的に判断して、必要があれば余裕度を変更して手順を繰り返す、最適化を図る。現状では、災害に耐えうる強靱なインフラの整備が最も重要であることの一つと考えられるため、インフラが潜在的に有する安全余裕度を定量化することが必要となる。言い換えれば、余裕度のさじ加減一つで、インフラのサステナビリティは大きく左右されることになる。インフラの設計等においては、作用や抵抗性に関する不確定要因に対する余裕度を多くとりすぎると、例えば安全性は十分に確保できるものの、整備のための費用が上昇し、材料使用量の増大などによって環境指標も悪い方向に動く。

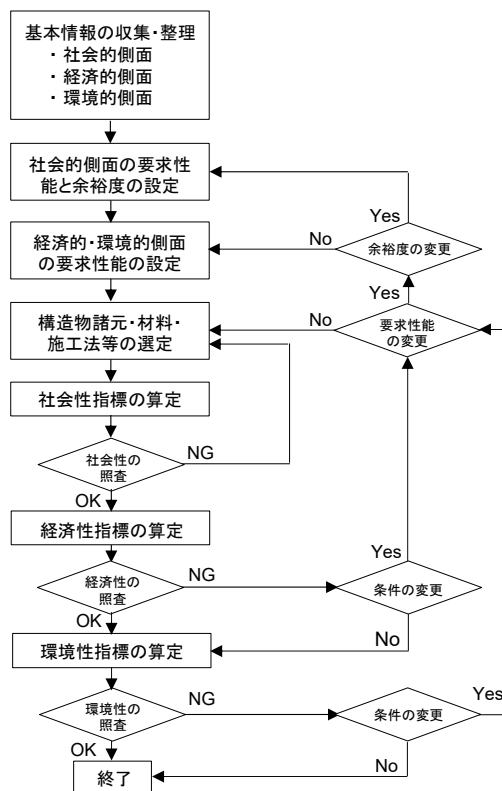


図 6 サステナビリティ評価のフロー

サステナビリティの観点からみると、社会性と経済性、環境性は背反することが多く、これらのバランスをどのように図るのが大きな問題となる。サステナビリティ設計は、サステナビリティを考える側面からインフラへの要求性能を設定し、それらが満足される構造、諸元、材料、施工法、維持管理法等を決定することになる。ただし、必ずしもそれらの各項目が最適であるとは限らず、最終的にはライフサイクルを通しての最適化を目指すものである。インフラの LCM では、代表的な複数の指標を用いてシナリオの評価がなされるが、すべてを包括する単一の評価指標が存在しない現状においては、シナリオの代替案の中から最適な解を見つけることは容易ではない。

4-2 サステナビリティ指標のバランス

インフラの安全性に対する余裕度は経験で決められてきたが、それが経済指標や環境指標に与える影響度あるいは感度については考慮されないことが多い。安全性に対する余裕度の増加は、より多くの資源やエネルギーが施工および維持管理において必要になる可能性があり、その分コストが高くなる。逆に、経済性を最も重要視する現状において、できるだけ余裕度を小さくする（すなわち照査式において 1.0 にできるだけ近づけるように設計する）ようにしがちである。

社会指標（例えば安全性の余裕度）と経済指標、環境指標との間の適切なバランスを考慮して、ライフサイクルの各段階で設定された複数のシナリオの選択肢の中から適切なシナリオを選択するための試みとして、感度分析を行った事例⁸⁾を紹介する。事例は、鉄筋コンクリート矩形断面単純はりを対象として非常に単純化した計算に基づくものである。社会指標は安全性の余裕度 (γ_i)、経済指標は構成材料の直接費、環境指標は CO₂ 排出量のみを考慮している。セメント種類は、普通ポルトランドセメント、水セメント比は 50% である。図 7 に、余裕度を 1.0 ~ 1.5 の範囲で変化させたときの CO₂ 排出量およびコストの増加率を示す、余裕度を 1.1~1.5 に設定すると、CO₂ 排出量が 10% 程度増加し、コストは 16% 程度増加する。その増加の程度は用いるコンクリートの品質によって異なってくる。CO₂ 排出量とコスト増が大きいかわ視できるものかは種々の判断基準により、一概に言えない。例えば、コストが 10% 増加することが許容されるとすると、余裕度を約 1.3 に設定でき、その結果 CO₂ 排出量が 6% 程度増加することになる。このコストの増加分や CO₂ 排出量の増加分が大きいかどうかは、インフラが崩壊した場合の復旧によって発生する分との比較となる。

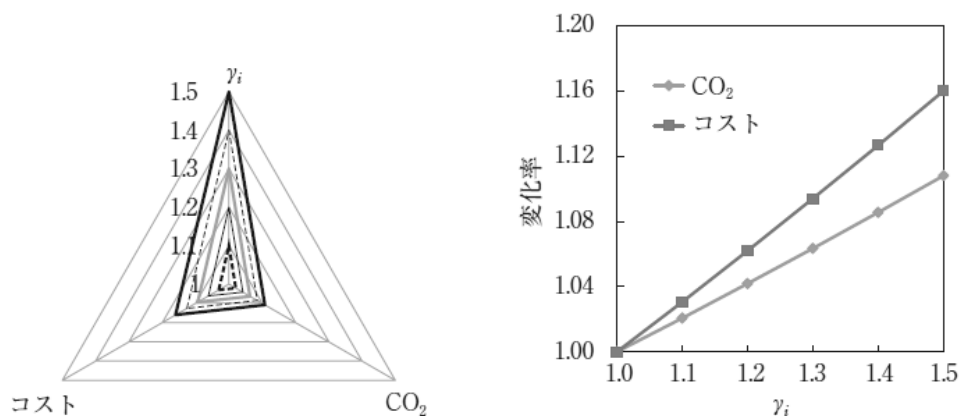


図 7 サステナビリティ指標間のバランス

4-3 LCM シナリオ評価

適切な余裕度が設定できたとして、経済指標と環境指標を試算し、シナリオを評価した事例を紹介する。図 8 は、5 つの栈橋群を対象として、健全度の低下をマルコフモデルにより予測し、便益とそれに対する措置の費用から求めた栈橋群全体の平均 NPV を、措置のために用意できる年間予算に応じて算出したものである⁹⁾。健全度は数字が大きくなるにつれて劣化が進行し力学性能がより低下した状態を表す。また同図で示す μ は、マルコフモデルにおいて劣化進行の速度を表す遷移確率のばらつきを対数正規分布で表した際の平均値を表すパラメータで、 μ が大きいほど遷移確率が大きく、つまり劣化速度が速いことになる。いずれの遷移確率においても、年間予算の増加に伴い平均 NPV が増加するが、これは年間予算が大きいほど補修に要する期間が短くなるため、供用停止に伴う便益の損失が減少したこと、および多くの栈橋において予防措置型のシナリオをとることができ、合計補修費用を低減できたためである。また、 μ が小さい場合は、年間予算がある値を超えると平均 NPV の増加が頭打ちになる。年間予算を増やしても、増加分が補修に使われることはなく、この値以上の予算の増額は必要ないことを示している。また、劣化速度が著しく大きい場合は、同図の範囲で年間予算を増額しても、もはや NPV を維持するためには十分でなく、措置が追い付かないこととなる。このように、対象とする施設群の劣化速度を把握した上で施設群が維持すべき健全度の目標をシナリオ上で設定し、平均 NPV をほぼ最大に維持するための最適な年間措置予算を決定することができる。また、年間予算の枠の中でどのようにインフラを維持していくのが NPV を指標とした場合に最も有効であるかのシナリオも構築することができる。年間予算の範囲ではどうすることもできなければ、設計に立ち返って施設の要求性能などを見直すことも考えられるが、劣化速度自体を点検診断でモニタリングしていくことが不可欠であるので、指標間のバランスを考慮してシナリオをまず構築し、使用段階で随時見直しをしていくのが現実的な対応である。

次に、図 8 と同様の栈橋施設群の鉄筋コンクリート上部工において、NPV および CO₂ 排出量を指標としたシナリオ構築の事例¹⁰⁾を図 9 に示す。同図は、使用段階に着目した維持管理のシナリオとして予防措置 (PM) と事後措置 (CM) の比較を行ったものである。また、使用セメントとして普通ポルトランドセメント (O) および高炉セメント B 種 (B) を比較している。これらのセメントを用いた場合の塩害の予測については、土木学会コンクリート標準示方書で得られる拡散係数をマルコフモデルの遷移確率に反映させることで行っている。

NPV は高いほど望ましいシナリオであるので、この事例では 100 年間の NPV が最大の PM-B が選択されるが、PM-B、CM-B、PM-O はほぼ同じ NPV となっており大差はない。むしろ、CM-O よりは優位なシナリオであると結論づけられる。CO₂ 排出量は、塩害の進行に伴って健全度がある閾値を下回った場合に行う措置 (補修) によって算出されるもので、小さいほど環境的側面からは望ましい。こちらも PM-B が最小で、次いで CM-B と PM-O がほぼ同値、CM-O が相当大きな値を算出している。これらを総括すると、PM-B が経済指標と環境指標の両方を満たすシナリオであると判断され、CM-O は選択される可能性のほとんどないシナリオであると言える。

ここで紹介した事例は問題を単純化したものであり、実際にはさらに多くの要因を考慮して行うことは言うまでもないが、ライフサイクルにおける指標の変化を予測し、それに応じて戦略を立てシナリオを構築すべきである。

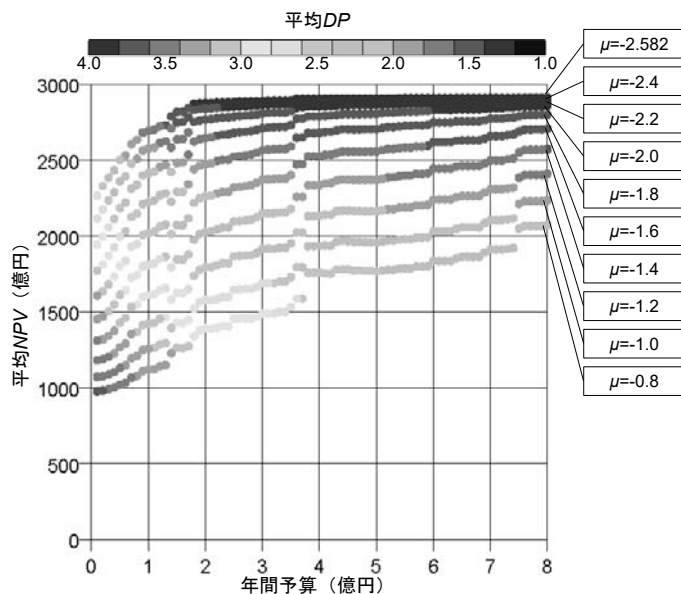


図8 NPVに基づくシナリオ評価

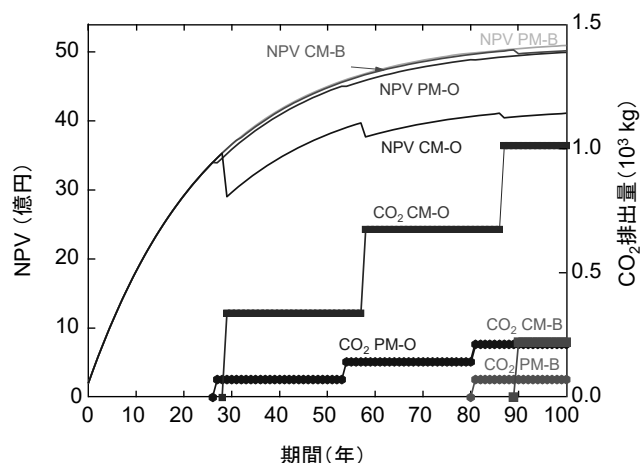


図9 NPVとCO₂排出量に基づくシナリオ評価

4-4 維持管理との関わり

インフラのサステナビリティ評価で重要なもう一つの視点が、使用中の性能低下と低下した性能の回復である。そのようにしてインフラが短期間で使用停止に至ることを防止できれば、サステナビリティのいずれの側面からも有効な選択肢となり得る。

インフラの性能は、種々の外的作用により低下する。代表的な性能低下の要因として鋼の腐食やコンクリートの中酸化等があり、いずれも比較的緩やかに進行する。一方、地震や台風等は突発的に性能を低下させる要因となる。このような性能低下に対して、設計での十分な配慮（耐久設計）と同時的確な維持管理の両者で対応する必要がある。維持管理では、必要に応じて補修、補強といった措置がなされ、設計供用期間中に要求性能が喪失することを防いでいる。この対応に多大の費用を必要とすることもある。そのため、性能低下が顕著で段階で比較的容易に対策が実施できる、いわゆる予防保全による対応をとることが推奨されている。これらについても LCM によって適切に取り扱え、シナリオ評価が可能であると期待している。

5. おわりに

経済社会が成熟し、人口減少・超高齢化社会を迎える我が国においては、インフラでは新規の建設よりも既存ストックの活用に重きが置かれている。一方、発展途上国では、まだインフラの建設に需要があり、膨大な建設投資が続いている。しかし、身の丈を超えた量のストックがもたらす未来の社会がどのようなものになるかは明らかである。それに対応するためには、サステナビリティの思考でインフラに向き合う必要がある。インフラは、適切に設計、実行、および保守されると、きちんと活用され、長寿命化を達成できるものである。

インフラのライフサイクルにおいて、ユーザあるいは社会が期待する機能と性能を確保するために、LCMではシナリオを介して計画、設計、施工、使用および廃棄の各段階において円滑な情報の伝達と共有と十分に行うことを意図している。また、サステナビリティに関連するものは今後最も重要な要求性能として取り扱われることになると考えられる。そのため、LCMでは、シナリオを構築するために、サステナビリティの3側面に基づく複数の指標を用いることを提案している。ただし、これら指標間の最適なバランスを決定するのは現状では容易ではなく、技術者の知恵と想像力がますます重要になってくる。

本稿で述べた LCM の考え方を具現化するものとして 2021 年 1 月にコンクリート構造物を対象として、著書がコンビーナを務めた国際規格が制定された¹¹⁾。また、本稿は既発表の論文¹²⁾をベースとしたものである。

参考文献

- 1) Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *Special Report on Global Warming of 1.5C*.
- 2) Yokota, H. (2017). Practical application of life-cycle management system for shore protection facilities. *Journal of Structure and Infrastructure Engineering*. 13 (1), 34-43.
- 3) Yokota, H. (2018). Considerations for life-cycle of concrete structures. *8th ACF International Conference*, Fuzhou, China, 4-7 November 2018, 1-8.
- 4) 橋本鋼太郎他編 (2015). 社会インフラメンテナンス学, I 総論編, 土木学会.
- 5) Yokota, H., Nagai, K., Matsumoto, K. and Mon, Y.Y. (2017). Prospect for implementation of road infrastructure asset management. *Advanced Engineering Forum*, 21, 366-371.
- 6) International Standardization Organization. (2015). ISO 2394 *General principles on reliability for structures*.
- 7) 堺孝司, 横田弘 (2016). コンクリート構造物のサステナビリティ設計—地球環境と人間社会の不確実性への挑戦—. 技報堂出版
- 8) Yokota, H., Goto, S. and Sakai, K. (2016). Parametric analyses on sustainability indicators for design, execution and maintenance of concrete structures, *ICCS16*, Madrid, 13-15 June 2016, 2016.
- 9) 谷拓歩, 横田弘, 橋本勝文, 古谷宏一, 北里新一郎 (2014). 複数の係留施設の維持管理における最適な補修優先度と年間予算に関する検討. 土木学会論文集 F4, 70 (4), 73-82.
- 10) Bannai, R., Puspitasari, S.D., Yokota, H., Kato, E. and Kawabata, Y. (2020). Evaluation of sustainability indicators in maintenance management of port mooring facilities, *IALCCE 2020*, Shanghai, 27-30 October.
- 11) International Standardization Organization. (2021). ISO 22040 *Life cycle management of concrete structures*.
- 12) 横田弘 (2019). インフラのライフサイクルマネジメント. 土木構造・材料論文集, 35, 1-8.