



玉越 隆史

国土交通省 国土技術政策総合研究所
道路構造物機能復旧研究官
京都大学経営管理研究部特命教授

インフラのデジタルアセットマネジメント

— 道路と道路構造物を例として —

1. はじめに

土木施設の計画的で合理的な維持管理を実現しようとする、いわゆるアセットマネジメントの実践について、過去より様々な形で検討がなされてきた。w

しかし、実務では管理者それぞれが道路橋など構造物種類毎に点検結果を用いた単純な方法でライフサイクルコストの概算を行うなどの限定的な取り組みがなされるにとどまっているのが実態である。その理由の一つには、費用などの推計結果が事業費ベースのものとは時として大きく乖離し、試算結果の実務への反映方法も十分に確立していないことが挙げられる。また、各土木施設はそれが組み込まれているインフラの一部を構成するものに過ぎず、個々の構造物や特定の構造物種類のみに着目した将来予測やコスト評価結果を得ても、それだけではインフラ全体のマネジメントの改善に結びつけられないという問題も影響していると考えられる。

日本では、過去より、道路というインフラの役割からみると、それぞれが一部を担うにすぎない道路橋やトンネル、カルバート、盛土などの道路構造物の設計基準が別々に整備されてきた。そのため、各構造物が遭遇する地震や豪雨などに際して道路機能に及ぼす支障の観点からどのような性能を発揮できるのかの相対比較が難しいという課題がある。さらに道路は、様々な時代に作られた構造物からなるが、維持管理では重要となる、建設年代や構造物種類に関係なくそれぞれの役割に照らして、今求められる正確な現在の性能についての診断技術も十分に確立しているとは言えないのが実状である。

このような問題認識から、国土交通省国土技術政策総合研究所の道路構造物研究部と京都大学経営管理研究部の道路アセットマネジメント政策寄附講座が中心となって、土木施設のアセットマネジ

メントを、それが支えるインフラ機能に着目して最適化させるための方法論の研究を進め、「性能保証型インフラアセットマネジメント」という概念の提案を行った¹⁾。検討を進める中で明らかになってきたのは、それぞれ構造形態や特性などが大きく異なる構造物群に、同じインフラ機能からの要求を満足する相互に調和した物理的性能を過不足なく発揮させようとするアセットマネジメントの実践における、デジタル化情報とデジタル技術による高度な意思決定支援の有効性および重要性である。

2. 性能保証型インフラアセットマネジメント

人の健康は身体を構成する臓器や血管、骨などの様々な器官等の状態の組合せで決まる。同じように、道路の状態もそれを構成する橋やトンネル、土工構造物などの荷重支持能力や空間保持機能の組合せで決まり、そのどれかが破壊や機能不全を生じるだけで区間全体の道路機能に大きな支障が生じることも起こりうる。そのため、同じ道路機能を担う全ての構造物が、その道路に想定する地震や風などに対してそれぞれに期待される耐荷性能などの物理的性能を確実に有している必要がある。

時間軸に着目すると、インフラの多くは一旦供用されると長期にわたって機能しつづけなければならない。道路も時間をかけてネットワークとして完成されていくため、使われた技術や材料、適用基準なども異なる様々な時代の構造物で構成されることになる。そしてそれぞれの自然環境などの供用条件も千差万別であるため劣化傾向もそれぞれ大きく異なっている。

道路のアセットマネジメントでは、このような、それぞれ大きく異なる事情をもつ構造物群に対して、時々の性能が道

路という機能に照らして相互に整合的で調和のとれた状態の合理的な実現を目指すしなければならない。その一つの方法論として、インフラに求められる機能・役割から逆算して、①構造物種類に依存しない普遍的構造物の物理的性能（耐荷性能や耐久性能）の評価、②それらに照らした既存構造物の性能診断、というこの2つを拠り所として、インフラ単位でその機能を決定づけるすべての構造物で調和した性能を合理的に実現しようというのが性能保証型インフラアセットマネジメントの概念である。

3. デジタル化とインフラマネジメントの関係

(1) 性能保証水準の明確化（目標）

インフラへの要求性能の水準は、その整備や維持に要する費用や被災リスクなどの社会影響とも密接に関係し、公共財としての性格からも、要求水準の妥当性に対する説明性や基準適合性の判断基準の明解さが求められる。そのため、多様な条件に対して新しい技術も柔軟に取り入れて合理的なインフラを経済的に整備していくためには、定性的評価や経験的な仕様に過度に依存せず、適否の線引きが明解なデジタル評価が可能な性能照査基準による性能規定型基準の充実が重要となってくる。

例えば、道路橋の有すべき性能は、道路というインフラの性能の拠り所として法令や技術基準に規定されている。そして、設計基準である道路橋示方書は、想定状況に対してどの程度の確からしさで橋がどのような状態となると見込まれるのかを耐荷性能と定義して、その具体的な水準は設計荷重や応答の制限値などを定量的に定めて保証している。なお、現在の道路橋示方書は性能規定型の規定方法を採用しており、構造仕様や部材形式、材料など性能達成手段には自由度を認め

ているが、インフラとして達成すべき性能水準は、基準に規定される安全余裕代や構造仕様等を採用した場合と少なくとも同等以上でなければならない。

(2) 現状認識のための評価(性能診断)

構造物の状態は、供用後に劣化や損傷など様々な原因で変化するため、性能維持のために補修や補強などが適時に行われなければならない。そのためには、現在及び今後想定する状況に対して、どのような状態となる可能性があるのかを最新の状態に基づいて具体的に推測し、措置内容や時期を判断しなければならない。道路の場合には想定外の被災や工事による通行規制が莫大な社会的影響を伴う可能性もあり、そのマネジメントにおける意思決定が機械的に行えるようなことはなく、社会的影響など様々な要素を考慮した判断が行われなければならない。そのため、そこに持ち込まれる判断支援情報には、かえって信頼性や根拠が明確であることが重要となるはずである。例えば、診断時の構造物の現有性能(残存耐荷力など)の評価や補修補強効果の見積りなども、前提条件を明確にした上で、設計時と同様にできるだけ定量的で客観的な評価として提供されることが望ましいと考えられる。

(3) 価値と費用の評価

道路のようなインフラの機能を経済的かつ合理的に所要の水準に保つには、それを構成する多くの構造物を俯瞰して、いつどの構造物にどのような対策を行うのかを決定しなければならない。そのためには、考えられる対策シナリオについて、劣化予測や費用推計を行って見込まれる効果(許容荷重などの耐荷性能の水準、想定される被災等の状態、耐久性能など)と要する費用の両方を具体的に見積もった比較検討を行い、根拠をもって最適案を選定することが求められる。将来予測や費用の見積もり精度には限界があり、様々な仮定や前提条件に起因する実態との乖離も避けられないが、それでも、客観的で定量的な推計結果を具体的に吟味することが、よりよい意思決定ができる可能性の観点で有効であることは間違いないはずである。

(4) マネジメントの継続的改善

道路のようなインフラが持つ価値には

様々な側面があるが、それらの社会的ニーズをアウトカム項目などのような形で過不足なく特定することは難しい。例えば、道路へのニーズの達成は、道路や道路構造物の物理的性能の充足として具現化されるが、アウトカムである社会ニーズと物理的性能というアウトプットを厳密に対応づけることは困難である。その一方で、貴重な公費が投じられるインフラでは、それらの整備や維持管理のマネジメントの結果の社会ニーズへの適合性についての説明性確保は重要である。近年では、行政評価の一環として、インフラに関わる行政業務に関しても、社会ニーズと関係づけて様々なアウトカム指標をアウトプットを用いて定量評価できる指標(アウトカム指標)として設定して、その達成度や充足度を評価しようとする試みも多く見られる。

なお、このようなマネジメントの成果や稼働状態の継続的な計測は、マネジメントの見える化を果たすことに加えて、定量的な情報がマネジメントサイクルの具体的かつ合理的な改善にフィードバックできることに大きな意味がある。例えば、ロジックモデルの活用もマネジメントサイクルの安定的な実践に有効な手段と考えられる。なぜならマネジメントの各プロセスおよびプロセス相互受け渡しにおいて、アウトカムとアウトプットの整合性や目標達成度の確認あるいは業務内容の調整などが定量化指標などの支援情報を参考にして行われることが約束される。また、意思決定において参照される情報の質や量が過度に属人的要素に左右されることを防止するという効果も期待できる²⁾。

インフラマネジメントにおける意思決定は、対象が公物であるために、その根拠あるいは参考とされた情報などについてもできるだけステークホルダーである公に示せるものであることが望ましい。意思決定に際しては膨大な情報が参照され、それらの解釈には時として高度な専門的知見が必要となることも避けられない。そのため、公共とのコミュニケーションにおいては様々な観点や切り口で行われた対象に関するプロファイリング結果などの情報をできるだけ定量化したり可視化して説明性確保に努めることが重要

であり、その実践において情報のデジタル化は重要な要素となってくる。

以上見てきたように、性能保証型インフラセットマネジメントの実現には情報のデジタル化やデジタル化技術の支援が大きな鍵を握っている。すなわち、性能保証型マネジメントは、可視型マネジメントとデータ駆動型のマネジメント支援ツールがセットで稼働して初めて実効性のあるものとして社会実装が可能となる。なお当然のことながら、デジタル技術を駆使して利用可能なデータを自在に活用できるデータプラットフォームの存在は不可欠である。

4. インフラマネジメントにおけるデジタル化の進展への期待と課題

(1) デジタル化の進展への期待

① 悉皆的モニタリングとビッグデータ分析

インフラを常時監視することには、損傷や不具合の発生の早期検知によるリスク低減や、最新情報を反映した維持管理計画の最適化、設計基準の最適化への反映などの多くのメリットが期待できる。一方で、インフラの性能に関係する自然外力、利用実態、構造物の各部位で同時に進行する劣化等の状態変化などの膨大な情報を観測しつづけてたり収集することはハード的な制約や経済的な問題から限界があった。例えば、これまでは実環境の中で構造物が実際にどういう作用を受け、供用期間中どのように挙動しているのかについて十分なデータの蓄積がないこともあって、限られたデータと大胆なモデル化・仮定から導き出された知見をもとに、設計基準における要求性能の設定、性能照査基準、設計計算手法などが構築されてきた。特定の事象などに着目してデータ収集が行われてきたケースもゼロではないが、そのような場合には、着目する事象や応答に関係が深いと考えられたデータだけが取得されており、着目事象の関係性が疑われなかった情報までも計測が行われることはないのが通常であった。

しかし、今やデジタル技術の進化が、計測可能な情報の量や頻度、項目などについての制約を急速に取り払いつつある。

そして、膨大なデータの常時取得も可能となってきた。その傾向は今後も確実に進展が予想され、もはや先入観や経験に基づいて取得情報を絞り込むことの必要性は急速になくなっていくはずである。

このような悉皆的モニタリングとも言うべき情報把握体制の実現には、これまで認識しうがなかった「風が吹いたら桶屋が儲かる」といった隠れた関係性の発見が期待できる。さらに、様々な目的で取得される膨大なデータを自由自在に組み合わせて分析するいわゆるビッグデータ分析も一般的になりつつあり、これまでは知り得なかったバタフライエフェクトが次々と明らかにされれば、それだけ無知によって将来に禍根を残す愚が削減できるだけでなく、よりよい未来を効果的に生み出す対策が実施できるようになることは間違いない。

さらに、AI技術の発展は、膨大な情報のあらゆる角度からの分析により人間では検出不可能なパターンや法則性を見いだしてくれることに期待がある。その処理量の膨大さと処理内容の複雑さというAI技術の能力の裏返しとして「ブラックボックス」の出現も避けられないため結果の利用には注意すべき点もある。し

かし、インフラマネジメントの最大の目的である、「リスクの抑制」「致命的な人身被害の回避」が所詮は確率論であることを考えると、「膨大なデータに裏打ちされた蓋然性」のもつ高い説得力を活用しない理屈はない。

すなわち、蓋然性の説明性さえあれば、理論的裏付けなどがなくとも「とりあえずのリスク回避・抑制策」を行うことでアセットマネジメントの質は実態として大いに改善される。その妥当性の評価や蓋然性の裏にある因果関係の解明は追って進め、その中で獲得される知見を技術基準などのマネジメントルールにフィードバックすればよいだけのことである。因みに、「因果関係の解明」を怠るという態度は、少なくともインフラマネジメントにおいてはあり得ない。なぜならば公共財としてその有り様は、設計基準や点検制度における診断体系などの法令や技術基準などの社会的に合意されたルールを拠り所に実現しなければならず、得られた蓋然性の裏にある「因果関係や物理的根拠」を明らかにして、法令や基準類の改善や改良に反映させないという選択肢はないからである。

②強度と時間のデジタルツイン

インフラの物理的性能の解明や基準化には、理論的根拠以外に、観測、実験、模擬解析の3つが大きな役割を果たしてきた。しかし、道路橋のような大規模な土木施設では、「実大再現の限界」、「状況再現の限界」、「状態再現の限界」の3つが常に課題となってきた。例えば、つくばの（国研）土木研究所には世界的にも最大級の30MN（3,000ton）級の載荷実験装置があるが、道路橋の場合、実寸

では一部分しか載荷できない（写真1）。また重力の影響が支配的となる土工構造物で相似則を満足させるために行われる遠心載荷試験では、実験できる模型は非常に小さいものとせざるを得ず、構造の再現性には限界がある（写真2）。

インフラがおかれる状況の模擬にも様々な限界があり、複雑な風や温度の状況やその組合せなどを忠実に出現させることは難しい。例えば、全長が4kmにもなる明石海峡大橋の耐風設計では、状況と応答を模擬するために世界最大級の風洞実験施設が建設されたが、それでも橋は1/100にまで縮小した模型（それでも40mにもなるが）とせざるを得ず、風の条件も建屋や装置の制約もあり、実際の風環境とは様々な点で異なったものとならざるを得なかった（写真3）。

しかし、デジタル化技術の発達、細部構造の忠実な再現や材料や地盤の特性を詳細に反映させた精細な解析モデルの構築、あるいは風等の気象条件の高精度な数値シミュレーションをも可能としつつある。将来的には、サイバー空間に実大で相似則も含めて高精度に再現された数値解析モデルを作り、現地では計測できないような特殊な環境や複雑な作用の条件を自由自在に生成し、信頼性の高い実大シミュレーションが必要なだけ行えるようになるはずである。

インフラの劣化は、化学的作用などによる材料特性の経年変化や応答履歴の影響による亀裂等の物理的変化の発生によってもたらされるが、過去より、疲労や腐食といった道路橋のような構造物の主な耐久性喪失現象に対する対策は経験的で仕様のものに過度に依存してきた。



写真1 大型載荷試験機
（（国研）土木研究所所有、筆者撮影）



写真2 明石海峡大橋の全橋風洞模型（本州四国連絡高速道路株式会社 提供）

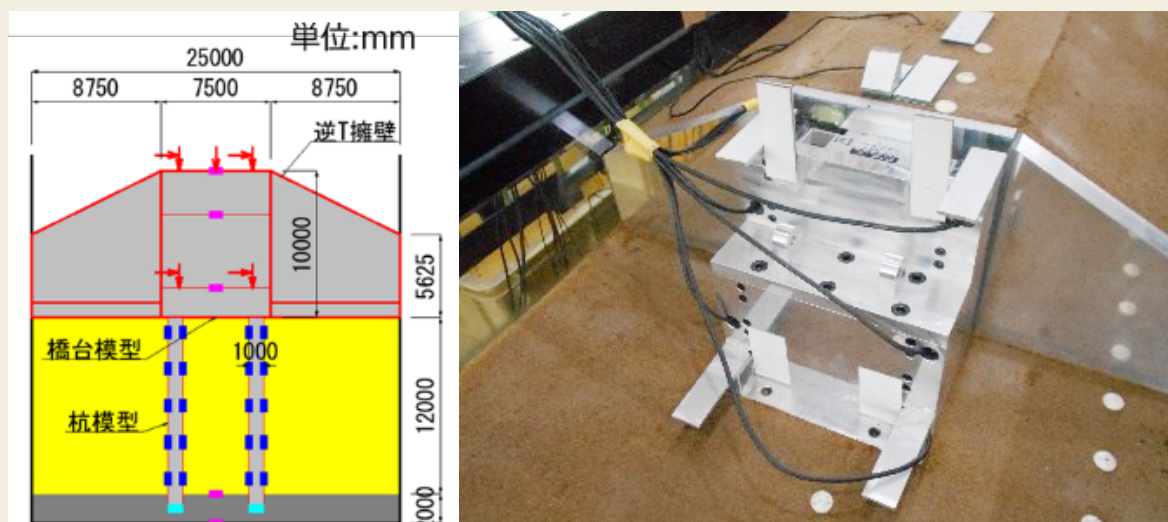


写真3 遠心载荷実験の例（盛土の1/50模型、図は実寸）（国土技術政策総合研究所提供）

さらに、現在でも、その多くは劣化メカニズムの詳細な解明ができていない。そのため、既設インフラの現状の正確な評価はもとより、今後どのような経過をたどる可能性が高いのかの予測のためにも、劣化現象に支配的な影響を及ぼす使用材料の物性や物理的・化学的作用との関係など劣化メカニズムの正確な理解に基づく、定量的で信頼性の高い劣化予測技術の確立が喫緊の課題となっている。

劣化メカニズムの解明には、制御された条件下で劣化現象を実際に生じさせてその過程の詳細に観察する必要があるが、極めて多くの要因が複雑にかかわる環境等の作用条件を再現したり、特定の要因だけを操作した実験環境をつくることは難しく、実時間を経過させての検証も現実的でない。その結果、これまでは特定のパラメータに着目した促進試験や要素試験による模擬による知見が主に用いられてきたが、促進試験でどれだけ実際の劣化の模擬できているのかには不明な点も多い。しかし、近年では、理化学研究所がもつ放射光施設（SPring-8, SACLA³⁾）に代表されるような高性能な物性等分析・可視化技術や、土木材料の内部構造の精緻な観察や細粒子や分子レベルでの材料変化や応答の観察技術、得られた画像データから高解像度の数値解析モデルを自動生成するといった高度なデジタル技術なども実用化され、進化し続けている。近い将来、材料の内部構造の変化や化学的性質の変化なども再現できる数値モデルに対して、それに見合

う精緻な作用等の状況を再現して、サイバー空間で自由に過去や未来の姿をシミュレートできるようになることが期待できる。特に現象の正確な理解に基づいて解析的に時間短縮が行えれば、サイバー空間の中で現象の再現性を損なうことなく過去から現状までの経緯のトレースを踏まえた信頼性の高い将来予測が可能となると考えられる。また、そのような正確な劣化現象の理解は、耐久性に優れる画期的な材料開発やそれらを用いた良質な資産形成などインフラアセットマネジメントの合理化に資することは間違いない。

（2）デジタル化の課題

急速に進展を続ける情報のデジタル化とそれらを扱うデジタル技術のインフラアセットマネジメントへの活用に関して課題がないわけではない。

道路橋のような自然環境に晒される大規模構造物では、上述の期待と矛盾するが、おそらく将来的にも状況や状態を完全に再現することは難しいであろう。なぜならば、施工品質のばらつきや残留応力、溶接ひずみなど人為的な影響などのパターンや程度も不確定で予測不能な要素がゼロにはならないからである。また、地盤条件などは土粒子までもモデル化しても間隙水や雨水の浸透や地下水の状況、植生の影響などの模擬には自ずと限界があるであろう。さらに、社会全体としてのリソースには限界があり、公費を投じての本質的でない過度なデジタル化や費用対効果を無視した精度の追求には社会

の理解が得られないであろう。

デジタル化は、基本的に膨大な情報を捨てる行為でもある。そして、時として情報に再帰不能な不可逆変化を生じさせてしまう。例えば、過去にレコードのようなアナログ音源に代わるものとして、CDが登場した際には、人の可聴能力も考慮して16bit/44.1kHzのデジタル化規格が採用されて普及した。しかし近年、人の可聴能力に対する音源再現性の観点で必要解像度が見直され、より高解像度の規格（ハイレゾ音源（High-Resolution Audio））も一般化しつつある。このように、時々の理解や技術による精一杯の高解像度、高品質のデジタル化を行っても、将来のニーズがそれ以上を求めないという保証はないし、将来のニーズを今知ることもしない。そして、デジタル化された後のデータしか残されていないと基本的には元データへの復元はできないのである。例えば、道路橋のコンクリート部材では0.2mm程度未満の幅のひび割れは性能に及ぼす影響は少ないと理解されることが多く、過去から微細なひび割れのデータはほとんど残されていないし、現在の点検時にもそれらは記録されないことが多い。しかし将来、無視されてきた微細なひびわれが重大な現象の前触れやその診断に重要な意味をもつことが明らかにされる可能性は決してゼロではない。

このように、デジタル化にあたっては、それが取り返しのつかない形で膨大な情報を捨てる作業でもあることを認識して

行わねばならず、その決断の是非はインフラマネジメントの性質からはやはり社会合意としてのものでなければならないであろう。そして、その実現にはデジタル化の意義や効果を社会と共有できるデジタルリテラシーの確立が大きな鍵を握っている。

5. おわりに

社会ニーズであるアウトカムの多様性、多義性、アウトカムとアウトプットの整合の限界、社会や個人の理解や要望の一致の限界などから、科学的最適が必ずしも意思決定の最適とはならない。そのため、社会と個人のリスクに直結するインフラマネジメントの意思決定では、それが最適なものであるように努めることが重要となり、「手を尽くして最良の判断を行う努力をしたかどうか」のレベルが問われることになる。そのような、インフラセットマネジメントの実践では、意思決定の質の向上のために、利用可能な情報を駆使した統計分析などのプロファイリング結果や高度な数値シミュレーションによる予測や推計結果などの支援情報ができるだけ豊富に提供され、参考

にされることには大きな意味があるはずである。また、構造物や管理者の枠を超えた「性能保証型インフラマネジメント」を実現するための総合マネジメント体系では、関係者や関係機関がそれぞれに場当たり的で無戦略なデジタル化を行ったり、継続的改善が約束されない形でのデジタル技術の無秩序な導入を行ったりすることに、巨大な負の遺産を生む危険性が潜む。DX (Digital-Transformation) の必要性の議論でも指摘されたデータやデータシステムの「陳腐化」「負の遺産化」のように、多方面で同時に様々な速度と熟度で発展を続けるデジタル化の導入がかえってマネジメントシステムに大きな不合理を持ち込まないように気をつける必要があるであろう。

本稿では、道路と道路橋を念頭にインフラセットマネジメントにおけるデジタル化の意義と課題について筆者の現状認識にそって紹介させていただいた。日進月歩の技術の進展や広範な関連分野に対する筆者の理解不足や認識違いもあるはずであり、ご指摘いただければ幸いです。現在、デジタル時代のインフラセットマネジメントのあり方について、京都

大学経営管理研究部とともに産官学連携の研究プロジェクトなどで検討を続けている。インフラアセットを対象とした新しいマネジメント体系の社会実装では、関連技術の開発など競争領域のビジネス創出効果も期待される。検討への連携や協力の申し出も期待したい。

【参考文献】

- 1) 玉越隆史:性能保証型インフラアセットマネジメント—道路と道路橋のリスクアセスメント—, コロナ社, 2022.11
- 2) 竹末直樹、玉越隆史、小林潔司:アセットマネジメントにおけるインフラの資産価値評価に関する一考察、土木学会論文集F4 (建設マネジメント), Vol.78, No.2, I_95-I_112, 2022
- 3) (国研) 理化学研究所大型放射光施設ウェブサイト http://www.spring8.or.jp/ja/about_us/whats_sp8/

たまこし たかし/1991年本州四国連絡橋公団、1999年建設省土木研究所、2001年国土交通省国土技術政策総合研究所、2017年大阪大学博士(工学)、2019年-2021年京都大学経営管理大学院特定教授、2022年4月より現職