

令和5年度「重点研究課題」調査研究報告書

研究課題名：Society5.0に向けた社会インフラの管理システム構築

のための調査研究

研究代表者：牧 剛史（埼玉大学）

（推薦委員会：複合構造委員会）

土木学会

はじめに

本報告書は、土木学会の令和5年度重点研究課題として採択された「Society5.0に向けた社会インフラの管理システム構築のための調査研究」について、複合構造委員会の Society5.0 に向けた社会インフラの管理システム構築のための調査研究小委員会が2023年度に活動して得られた成果をまとめたものである。

内閣府では、Society 5.0 が提唱され、これは、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会を目指すものとなっている。

本研究は、社会インフラに対して、この Society 5.0 を実現するために構造物管理に焦点を当て検討を行ったものである。現状では、社会インフラ構造物は、人の目で見える点検を基本として状態把握を行い、補修・補強（構造形式を変えない措置）あるいは改築・改良（構造形式変更を伴う措置）などの判断を人的資源に頼って実施している。しかしながら、少子高齢化による生産人口の減少を抱えている日本の社会背景を踏まえると、人的資源に頼ったストックマネジメントでは、やがて限界が訪れ、膨大な社会インフラの維持管理水準の保持が難しくなる。そこで、フィジカル空間に現存する社会インフラ構造物をサイバー空間に構築し、フィジカル空間の応答を任意の時間で忠実に再現できるデジタルツイン技術の活用によって、現在あるいは将来取るべき適切な措置を高度な判断により選択が可能となることが期待される。また、限られた人員でもストックマネジメントを飛躍的に改善、あるいは向上させることが期待され、有益であると考えられる。

本報告書では、デジタルツインとして社会インフラ構造物のありのままの振る舞いをコンピューター上に再現することによって得られる、さまざまな価値について改めて発信するとともに、現状では実装に対してまだ多くの技術的課題を有すること、および、その課題の一部について検討した事項について報告する。また、現在の社会インフラ構造物に一部取り入れられているデジタルツイン技術および他分野で取り組まれている人の行動をデジタルツイン上に再現する技術について調査した結果についても取りまとめを行った。

2024年3月

土木学会 複合構造委員会
Society5.0 に向けた社会インフラの管理システム構築のための調査研究小委員会
委員長 牧剛史

土木学会 複合構造委員会

Society5.0 に向けた社会インフラの管理システム構築のための調査研究小委員会

委員構成

委員長	牧 剛史	埼玉大学
幹事長	塩畑 英俊	東日本高速道路
幹 事	内藤 英樹	東北大学
	山本 将士	日本ファブテック
委 員	大久保宣人	高田機工
	大山 理	大阪工業大学
	川端雄一郎	港湾空港技術研究所
	北根 安雄	京都大学
	斉藤 成彦	山梨大学
	齋藤 隆	大林組
	櫻庭 浩樹	土木研究所
	平 陽兵	鹿島建設
	中村 一史	東京都立大学
	仁平 達也	鉄道総合技術研究所
	橋本国太郎	神戸大学
	松本 高志	北海道大学
	藤林 博明	川田工業
	皆田 龍一	三井住友建設鉄構エンジニアリング

目次

第1章 研究の背景と目的	1
参考文献	2
第2章 Society5.0に向けた社会インフラ管理システムの将来像	3
2.1 将来像に関する検討	3
2.2 設計段階で考えられる将来像/例	7
2.3 建設(含改築/更新)段階で考えられる将来像/例	10
2.4 維持管理段階で考えられる将来像/例	13
参考文献	14
第3章 デジタルツインに関する現状調査	16
3.1 はじめに	16
3.2 トンネル工事	18
3.2.1 調査概要	18
3.2.2 試行技術の内容	18
3.2.3 試行技術による効果	21
3.2.4 調査のまとめ	21
3.3 橋梁架設工事	22
3.3.1 調査概要	22
3.3.2 橋梁概要	22
3.3.3 架設工法	22
3.3.4 MR技術を用いた架設シミュレーション	23
3.3.5 架設シミュレーションの効果	25
3.4 他分野でのデジタルツイン	25
3.4.1 津波シミュレーション	25
3.4.2 Mobility Digital Twin	26
3.4.3 考察	26
参考文献	26
第4章 デジタルツインを活用した社会インフラ管理システムに向けた課題	28
4.1 はじめに	28
4.2 Society4.0で見られる課題	29
4.3 デジタルツインを活用した社会インフラ管理システムに向けた課題	30
4.3.1 サイバー空間(モデル化)の課題	30
4.3.2 フィジカル空間での作用取得の現状と課題	33
4.3.3 シミュレーションをフィジカル空間にフィードバックするための課題	34
参考文献	37
第5章 まとめ	38

第1章 研究の背景と目的

内閣府では、狩猟社会（Society 1.0）、農耕社会（Society 2.0）、工業社会（Society 3.0）、情報社会（Society 4.0）に続く、新たな社会を指す Society 5.0^{1,1)} が提唱されている。これは、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会を目指すものとなっている。

その中、社会インフラに目を向けると、例えば、道路橋では2013年6月に道路法が改正^{1,2)}され、点検基準が法定化し、これにもとづく定期点検によって、高度経済成長期に建設された鋼とコンクリートを中核とした従来形式の構造物の補修・補強（構造形式を変えない措置）あるいは改築・改良（構造形式変更を伴う措置）などの措置を実施するサイクルが定着し始めたところであり、社会インフラの維持管理水準向上に一定の成果が得られつつある状況にある。

しかしながら、今後は、これら定期点検結果から適切な措置に結び付けることが課題となっていく恐れがあると思われる。すなわち、適切な措置を行うためには適切な診断が不可欠であるものの、マクロ的なグレーディングに依存して、あたかも適切な診断が行われているかのように振る舞われたり、性能を踏まえた適切な診断が行われていたりしても、将来の性能変化まで考慮した診断が行われているものは少ないと思われる。また、個々の構造物に対する離散的な措置では、構造物群として捉えた場合、あるいは社会インフラを管理する組織が保有する構造物単位として捉えた場合、現状では判断力を有する人員によって、一定の水準が保たれているかも知れないが、少子高齢化による生産人口の減少などといった日本の社会背景を踏まえると、人的資源に頼ったストックマネジメントでは、やがて限界が訪れ、膨大な社会インフラの維持管理水準の保持が難しくなると思われる。

これらに対し、フィジカル空間に現に存在する社会インフラ構造物を、サイバー空間に構築し、忠実にフィジカル空間での応答を任意の時間で再現することができるようになれば、すなわち、現実世界から収集した社会インフラのさまざまなデータをコンピューター上で表現する技術であるデジタルツインを活用することができるようになれば、現在あるいは将来取るべき適切な措置を高度な判断のもとに選択できるようになることが期待されるとともに、限られた人員でもストックマネジメントを飛躍的に改善、あるいは向上させることが期待され、有益であると考えられる。

現状では、インフラ構造物のありのままの振る舞いをサイバー空間で再現することは一部可能とはなっている^{1,3)}。しかしながら、環境条件や荷重作用、あるいは異なる材料で構築された構造物のありのままの振る舞いを再現するには、多くの課題を有するのが実情である。また、フィジカル空間においても構造物を構成する部材やそれを構成する材料の中には耐久性などの性能が明らかとなっていないものも多数存在するのが実情である。そこで、本研究では、複合構造物におけるデジタルツインを実現するための現状の課題について検討を行うことを目的とするものである。なお、課題の一つとして考えられる構造物を構成する部材やその材料の耐久性については、複合構造委員会では、2021年度重点研究課題「300年の超長期暴露を目指した土木構造物の持続性に関する研究」にて耐久性を把握するための研究^{1,4)}をスタートさせている。

参考文献

- 1.1) 内閣府 ホームページ（内閣府ホーム＞内閣府の政策＞科学技術政策＞Society5.0）
https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/index.html（2024/04/11 アクセス）
- 1.2) 国土交通省 ホームページ（国土交通省ホーム＞報道・広報＞報道発表資料＞「道路法等の一部を改正する法律の施行期日を定める政令」及び「道路法等の一部を改正する法律の施行に伴う関係政令の整備に関する政令」について）
https://www.mlit.go.jp/report/press/road02_hh_000008.html（2024/04/11 アクセス）
- 1.3) (公社) 土木学会コンクリート委員会：コンクリート構造物の設計と連成型性能評価法，コンクリート技術シリーズ 125，pp.75-80，令和 2 年 10 月
- 1.4) (公社) 土木学会調査研究部門 重点研究課題の成果，令和 3 年度重点研究課題，研究題目名：300 年の超長期暴露を目指した土木構造物の持続性に関する研究
https://committees.jsce.or.jp/s_research/system/files/300年の超長期暴露を目指した土木構造物の持続性に関する研究_報告書_20220614.pdf（2024/04/11 アクセス）

（執筆者：塩畑英俊）

第2章 Society5.0に向けた社会インフラ管理システムの将来像

2.1 将来像に関する検討

ここでは、Society5.0に向けた社会インフラ管理システムの将来像を考える上で、まず Society5.0 が目指す未来像から求められる社会インフラとは何かをバックキャスト的に考えてみたい。

平成28年1月に閣議決定された第5期科学技術基本計画によれば、『ICTを最大限に活用し、サイバー空間とフィジカル空間（現実空間）とを融合させた取組により、人々に豊かさをもたらす「超スマート社会」を未来社会の姿として共有し、その実現に向けた一連の取組を更に進化させつつ「Society5.0」として強気に推進し、世界に先駆けて超スマート社会を実現していく』とある。この超スマート社会とは、『必要なもの・サービスを、必要な人に、必要な時に、必要なだけ提供し、社会のさまざまなニーズにきめ細かく対応でき、あらゆる人が質の高いサービスを受けられ、年齢、性別、地域、言語といったさまざまな違いを乗り越え、生き活きと快適に暮らすことのできる社会』である。また、『超スマート社会に向けた取組の進展に伴い、エネルギー、交通、製造、サービスなど、個々のシステムが組み合わされるだけにとどまらず、将来的には、人事、経理、法務のような組織のマネジメント機能や、労働力の提供およびアイデアの創出など人が実施する作業の価値までもが組み合わされ、更なる価値の創出が期待できる』とされている。

令和3年3月に閣議決定された第6期科学技術・イノベーション基本計画では、第5期科学技術基本計画の Society5.0 を『サイバー空間とフィジカル空間を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会』とし、第5期科学技術基本計画以降の国内外の情勢変化、例えば世界秩序の変化や気候変動および生物多様性の劣化、パンデミックリスクなどを踏まえ、わが国が目指す社会（Society5.0）を『直面する脅威や先の見えない不確実な状況に対し、持続可能性と強靭性を備え、国民の安全と安心を確保するとともに、一人ひとりが多様な幸せ（well-being）を実現できる社会』と再提示している。また、Society5.0の実現に必要なものとして、①サイバー空間とフィジカル空間の融合による持続可能で強靭な社会の変革、②新たな社会を設計し、価値創造の源泉となる「知」の創造、③新たな社会を支える人材の育成、を挙げている。

第6期科学技術・イノベーション基本計画には、Society5.0の実現に必要な上記3点について、それぞれ以下のような記述がある。「サイバー空間とフィジカル空間の融合による持続可能で強靭な社会の変革」については、Society5.0の前提となる「サイバー空間とフィジカル空間の融合」という手段と「人間中心の社会」という価値観が鍵であるとしている。次に、「新たな社会を設計し、価値創造の源泉となる「知」の創造」については、新たな社会を設計し、その社会で新たな価値創造を進めていくためには、多様な「知」が必要であり、特に、自然科学のみならず、人文・社会科学も含めた「総合知」を活用できる仕組みの構築が求められている。また、「新たな社会を支える人材の育成」については、自ら課題を発見し解決手法を模索する、探求的な活動を通じて身につく能力・資質が重要であり、世界に新たな価値を生み出す人材の輩出と、それを実現する教育・人材育成システムの実現が求められる、とある。これらの記述から、Society5.0では、サイバー空間とフィジカル空間の融合はあくまでも手段であり、そこに新たな「人間中心の社会」という新たな価値観が組み込まれるべきであること、またそれらによって得られる多様な「知」を包含した「総合知」により新たな価値が創造されること、さらにはそのようなことが可能となる人材を育成する

こと、が求められていると解釈できる。

これらを鑑みた上で社会インフラに目を向けると、Society5.0 が実現する未来社会が求めることは、従来の社会インフラの管理システムを合理化するだけでなく、さまざまな分野と高度に融合することで新たな価値を創造できるようなシステムへの変革を求めるものである。

例えば、「人間中心の社会」という価値観を組み込むためには、社会の変化に能動的に適應できるような社会インフラの使い方というのもあり得るかもしれない。道路を例にとると、道路が整備された後、構造物のかたちは大きく変わることなく供用期間運用される。一方で、科学技術の進展に伴って人間の行動や社会は大きく変化するため、数十年後には当該インフラは需要と一部ミスマッチするかもしれない。このような社会の変化に適應した社会インフラを提供するため、人間の行動が自動的にモニタリングされ、そのデータを基に最適な交通ネットワークが新たに構築されるような社会インフラはどうだろうか。すなわち、これまでのように建設後の社会インフラをそのままに維持管理するのではなく、社会の変化に適應してインフラを作り変えるシステムである。最近では、生産性向上の観点でプレファブ・プレキャスト部材の活用が期待されているが、部材を容易に接合・取外しができるようなになれば、このような社会の潜在的ニーズに応えられるかもしれない。また、生産性向上だけでなく、部材を循環利用できるようになれば、カーボンニュートラルやサーキュラーエコノミーなどの社会課題にもメリットがあるかもしれない。また、道路インフラの損傷度が何かしらモニタリングされ、仮想空間でそれを基にシミュレーションがなされ、耐力低下がしきい値を超えた場合には、当該道路の交通量を減らしながら他の交通ネットワークが最適化されるよう車両のナビゲーションシステムに伝達されることでインフラ老朽化等による事故を未然に防ぐようなシステムも可能ではないか。また、地震直後に発生地震動を直接入力したインフラネットワーク（常時の損傷もモニタリングで考慮済）のシミュレーションを行い、それに基づいた避難経路を車両や関係機関に配信されるようなシステムもあり得るかもしれない。例えば、第6期科学技術・イノベーション基本計画の中においても、Society5.0の実現に向けた科学技術・イノベーション政策のうち「レジリエントで安全・安心な社会の構築」において、『頻発化・激甚化する自然災害に対し、先端ICTに加え、人文・社会科学の知見も活用した総合的な防災力の発揮により、適切な避難行動等による逃げ遅れ被害の最小化、市民生活や経済の早期の復旧・復興が図られるレジリエントな社会を構築する。これに加えて、必要なインフラの建設・維持管理・更新改良等を効率的に実施することにより、機能や健全性を確保し、事故や災害のリスクを低減するなど、国土強靱化に科学技術・イノベーションを活用した総合的な取組を推進する。』とある。上述の妄想はさておき、いずれにしても「サイバー空間とフィジカル空間の融合」という手段を駆使し、従来の社会インフラの機能を高めるだけでなく、well-being を実現するようなインフラが Society5.0 にふさわしいインフラではないか。

そもそも well-being とは何であろうか。さまざまな定義があるようであるが、世界保健機関 WHO (World Health Organization) の定義^{2.1)}によれば、well-being とは個人や社会が感じる良い状態のことで、健康と同様、日常生活の一要素で、社会的、経済的、環境的条件で決定されるものである。また、生活の質 (Quality of Life) だけでなく、人々や社会が意味や目的の感覚に従って世界に貢献できる能力も包含している。また、社会の well-being は、社会がどの程度強靱性を持ち、行動力を向上させ、困難を克服する準備があるかで決定される。経済協力開発機構 OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development) では、well-being は (1)所得と富、(2)雇用と仕事の質、(3)住宅、(4)健康、(5)教育と技能、(6)環境の質、(7)主観的 well-being、(8)安全、(9)ワークライフバランス、(10)社会とのつながり、(11)市民参加、の11分野で構成され (図 2.1.1)、それによって生じた不平等の程度なども評価されている^{2.2)}。また、将来の well-being の

ための資源として、「自然資本」、「経済資本」、「人的資本」、「社会資本」の4分野で構成される。参考として、図 2.1.2 は OECD が公開している日本の現在の well-being のチャートである^{2.3)}。

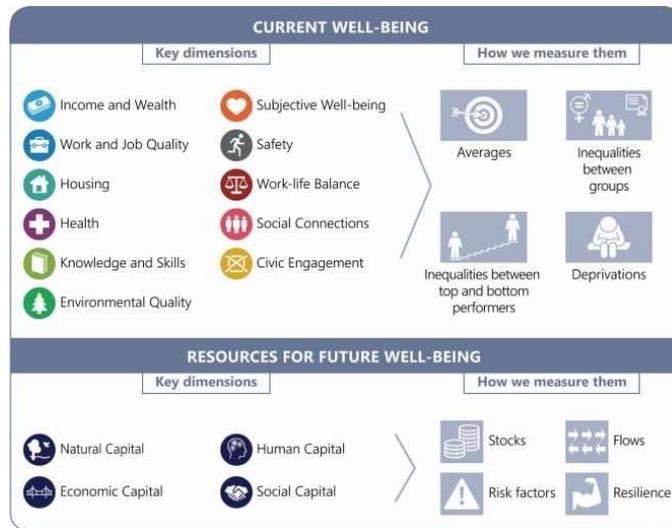
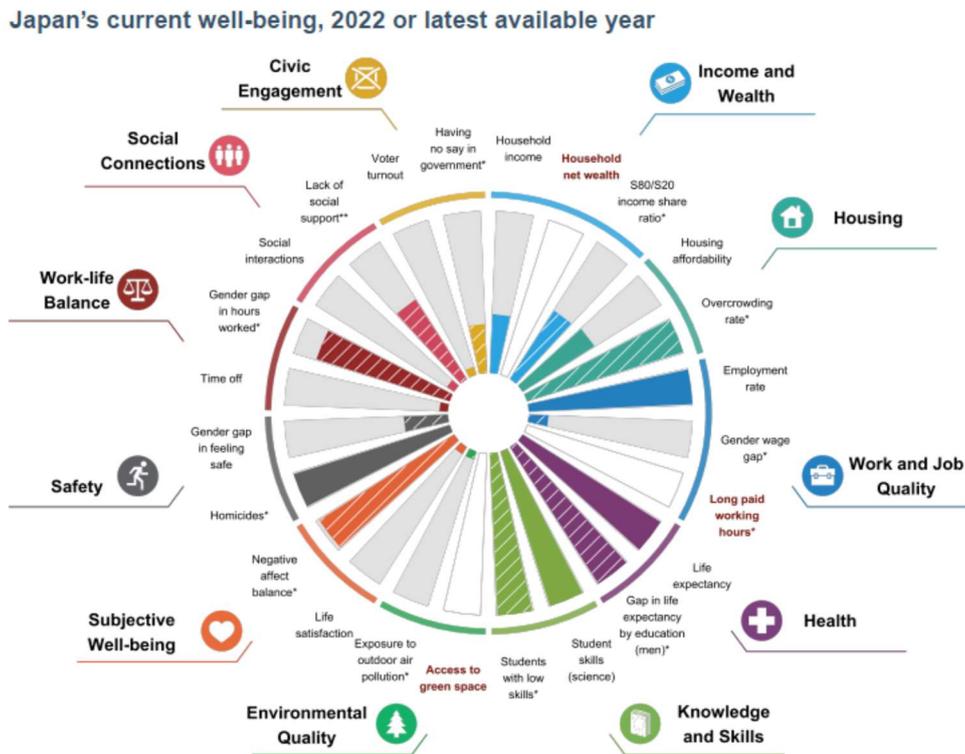


図 2.1.1 OECD の well-being の枠組み^{2.2)}

(現在の well-being の状況，現在の well-being の結果生じた不平等，将来の well-being のための資源として分類されている)



This chart shows Japan's relative strengths and weaknesses in well-being compared to other OECD countries. Longer bars always indicate better outcomes (i.e. higher well-being), whereas shorter bars always indicate worse outcomes (lower well-being) – including for negative indicators, marked with an *, which have been reverse-scored. Inequalities (gaps between top and bottom, differences between groups, people falling under a deprivation threshold) are shaded with stripes. Indicators in dark red refer to missing data for the indicator for the country, but are indicators otherwise available in the How's Life database.

図 2.1.2 OECD による日本の well-being の状況 (OECD 加盟国に対する比で表現)^{2.3)}

社会インフラに well-being に関する新たな価値を付与できるとしても、それらが事業に関する意思決定に反映される必要がある。社会インフラ等の公共事業を進める上では、費用対効果分析を基に実施の可否等が検討され、そのマニュアル類は総務省の HP にて公開されている^{2.4)}。例えば、道路事業・街路事業に関する費用便益分析マニュアル^{2.5)}によれば、道路の整備に伴う効果として、渋滞の緩和や交通事故の減少の他、走行快適性の向上、沿岸環境の改善、災害時の代替路確保、交流機会の拡大、新規立地に伴う生産増加や雇用・所得の増大等、多岐に渡る効果が存在するとされている。一方、これらの効果のうち、当該マニュアルにおいては、十分な精度で計測が可能でかつ金銭表現が可能である「走行時間短縮」、「走行経費減少」、「交通事故減少」の項目が道路投資の判断項目となっている。例えば、鉄道プロジェクト^{2.6)}では CO₂ 排出量の削減による地球環境改善便益も計測対象となっているが、CO₂ 排出量の削減量に対して、原単位 10,600 円/t-C (2006 年価格) を乗じて貨幣換算することとなっている。このように、現状の事業評価においては、「計測可能」で「金銭表現が可能」であることが前提となっている。

一方、OECD の well-being の指標にも示されている 11 分野には貨幣換算が難しいものも多い。しかしながら、国内総生産 GDP (Gross Domestic Products) が well-being を評価する上で不十分な指標であることは多く指摘されている^(例えば 2.7)。さまざまな情報やデータがシームレスにつながれば、well-being に関する項目も容易に計測・評価できるようになることが期待される。このような時代に向けて、あらゆる社会経済活動の根幹を担う社会インフラであるからこそ、土木工学という分野に留まることなく、学際的に分野融合を進めることで社会インフラとしての新たな価値や魅力を生み出すことが必要である。また、土木工学という成熟期に至った学問体系の本質を改めて考える機会になるかもしれない。例えば、2014 年制定複合構造標準示方書 [原則編]^{2.8)}には、使用性が要求性能として設定されている。この使用性は、快適に構造物を使用できるための性能と通常の状態での諸機能に対する性能と定義されている。このうち、使用上の快適性には、一般に乗り心地、歩き心地、外観、騒音、振動等を、通常の状態での諸機能に対する性能には水密性、透水性、防音性、防湿性、防寒性、防熱性等の物質遮蔽性・透過性等や、変動作用や環境作用等の各種要因による損傷が生じ、使用するのが不適當にならない性能を設定するのがよいとされている。一方、同示方書 [標準編] では、これらの照査を適切な方法で行うこととする、とされている。例えば外観や乗り心地、歩き心地などは利用者によっても感じ方も異なり、また構造物の種類等でも大きく変わることが想定されるが、これらの知見は十分蓄積されておらず、経験的・感覚的判断によって定められているものが多い。社会インフラを利用する人の感覚やモノの応答が数値として明確化されれば、「快適に社会インフラを使用できる条件とは何か」という使用性の本質そのものが明確なエビデンスの下で設定できるかもしれない。

Society5.0 を実現するためには、分野横断的な知の共有がなされるよう、社会インフラに携わる土木技術者として既存の枠内で思考するのではなく、設計・建設・維持管理 (運用) のあらゆる段階での人間中心の社会との関わりの可能性を模索することが期待される。そのためには、土木工学の枠内で通じる専門言語を他分野との共通言語化させ、土木学会内の横断研究や他学会などとの連携がなされ、Society5.0 に貢献できる社会インフラ像の議論を加速させる必要がある。

本節では、Society5.0 の実現に向けた社会インフラのあるべき姿をバックキャスト的に思考し、人間中心の社会という新しい価値観に社会インフラがどのような貢献ができるのかを検討した。社会インフラに新しい価値観を組み込むための議論は本調査研究小委員会の対象範囲を超える部分もあるため、十分な成果を提示できてはいないが、次世代の社会インフラ像に向けて更なる分野横断的議論が必要であることはよ

り明確になった。以降では、特に「サイバー空間とフィジカル空間の融合」の核となるデジタルツインに着眼し、設計・建設・維持管理段階における将来像について整理した。

2.2 設計段階で考えられる将来像/例

内閣府が提唱する Society5.0 の社会を実現するベースとなる概念は、IoT や DX であり、社会のさまざまな場面でデジタル化を推進するものである。建設分野では国土交通省が i-Construction と命名し、建設のあらゆるプロセスにおいて ICT を活用し、建設業界の生産性を向上させる取り組みを進めている。2024 年 4 月には、国土交通省の新たな建設現場の生産性向上（省人化）の取り組みとして「i-Construction 2.0」を策定し、「施工のオートメーション化」「データ連携のオートメーション化」「施工管理のオートメーション化」の 3 本の柱によって、2023 年度比で 2040 年度までに少なくとも生産性を 1.5 倍向上することを目指している。

i-Construction 2.0^{2,8)} において設計段階に関するものは、「データ連携のオートメーション化」が該当する。この内容は、調査・測量、設計、施工、維持管理といった建設生産プロセス全体をデジタル化および 3 次元化し、必要な情報を必要な時に加工できる形式で容易に取得できる環境を構築するもので、現在、BIM/CIM を活用することにより推進されている。また、デジタル化されたデータの活用にあたっては、設計データを施工データとして直接活用することや、デジタルツインの構築による施工計画の効率化など、現場作業に関わる部分の効率化に加え、BI (Business Intelligence) 等の活用により、紙での書類は作成せずにデータを可視化し、分析や判断ができるよう真の意味でのペーパーレス化などバックオフィスの効率化の面でも進めていくものである。

データ連携のオートメーション化に向けた具体的な取り組みは以下の通りである。

- ・ 3 次元モデルの標準化
- ・ BIM/CIM をデータプラットフォームとしたデジタルデータの後工程での利用促進
- ・ デジタルツインの活用による現場作業の効率化（事前シミュレーション）
- ・ 施工データの活用の効率化
- ・ データ活用による書類の削減

以上のように、インフラ管理システムにおいては BIM/CIM がキーとなり、BIM/CIM を活用してサイバー空間が構築される。BIM/CIM については国土交通省で BIM/CIM 推進委員会が立ち上げられ、活用が促進されている（図 2.2.1）。また、BIM/CIM モデルの活用の現状は、国土技術政策総合研究所のホームページに BIM/CIM ポータルサイト (<https://www.nilim.go.jp/lab/qbg/bimcim/bimcimsummary.html>) が開設され、事例集なども掲載されている。それによれば、BIM/CIM の活用事例として以下の事項が挙げられている。

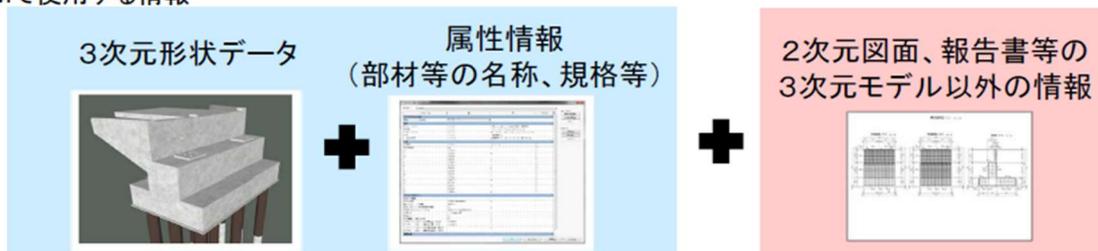
- ・ 関係者間での情報連携（地元説明や工事説明）
- ・ 景観検討
- ・ 数量、工事費、工期の自動算出
- ・ 効率的な照査（例えば、鉄筋干渉の確認）
- ・ 隣接構造物や周辺状況との取り合い確認
- ・ 施工状況の可視化、施工シミュレーション
- ・ 維持管理点検ルートの検討

デジタルツインの一部と言えるこれら BIM/CIM の取り組みによって、従来の建設システムにない価値が創造され、建設生産・管理システム全体の最適化が図られると考えられる。

BIM/CIM : Building/Construction Information Modeling, Management の略。
 建設事業で取扱う情報をデジタル化することにより、受発注者のデータ活用・共有を容易にし、建設事業全体における一連の建設生産・管理システムの効率化を図ること。
 情報共有の手段として3次元モデルや参照資料を使用する。

BIM/CIMの意義 : データの活用・共有による受発注者双方の生産性向上

BIM/CIMで使用する情報



BIM/CIM適用の流れ (情報の連続性が重要)

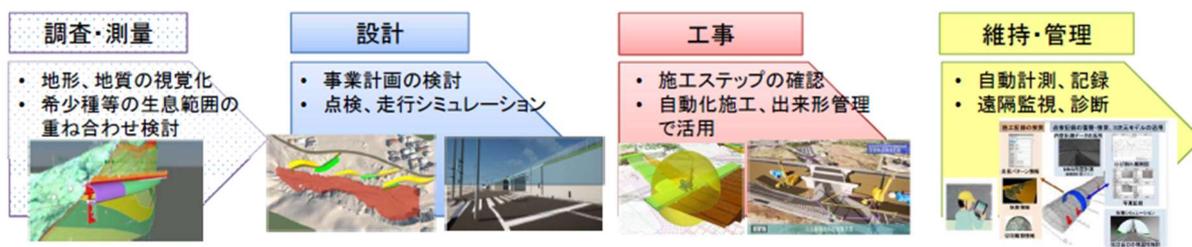


図 2.2.1 BIM/CIM について ^{2.9)}

以上、設計段階での BIM/CIM によるサイバー空間の構築に加え、フィジカル空間とデータのやり取りなどによる高度な融合により、サイバー空間のモデルの精緻化や各種シミュレーションが可能となるものである。以下に、設計段階での将来像について記す。

設計支援

各種土木構造物は、構造物を構築する場所の地形や地盤情報をもとに、各種基準に従い設計される。これら設計基準や設計条件、並びに過去の図面や設計計算書などをデジタル化してデータベース化することで、必要な情報を容易に取り出すことが可能となる。設計条件となる地形データは、3D スキャナーやドローンなどの活用により無人で点群データを取得し、画像から自動的に材料や部位を判定し、サイバー空間を作成する。また、AI 技術の進展により、将来的には設計条件を与えることで AI から設計結果が提供されることが考えられる。これにより、設計ミスや不具合の防止につながり、設計に要するコスト縮減や工程短縮が可能となる。

設計の最適化

シミュレーションモデルの高度化により、多くの設計パターン (シナリオ) によるシミュレーションが自動で実施可能となり、最適な材料や形状寸法が自動出力される。特に環境作用を含めたシミュレーションにより、構造物供用後の任意の時間による設計結果を容易に得ることができるようになる。また、設計条件としては、現状の基準で定められる作用に対する設計結果だけでなく、低炭素化を考慮した材料選定

や施工法も含めた設計の最適化を図ることが可能となる。

設計結果の可視化

フィジカル空間を正確に再現したサイバー空間に、設計した出来形を再現することで、設計段階での問題や改善点を即座に特定することができる。また、高精度な施工時のシミュレーションが可能となり、施工法の検証やその結果をもとにさらなる設計の最適化を図ることができる。これら設計に関する各種情報はすべてデジタル化され、それがサイバー空間の3次元モデルに組み込まれることで、施工、検査および維持管理で使えるデジタルデータがいつでもサイバー空間から取り出せるようになる。

2.3 建設（含改築/更新）段階で考えられる将来像/例

内閣府が示す Society5.0 では、フィジカル空間からセンサーと IoT を通じてあらゆる情報が集積され、人工知能（AI）がビックデータを解析し、付加価値を現実空間にフィードバックすることで、製造業（工場）では最適なバリューチェーンや自動生産により、持続可能な産業化の推進・人手不足を解消させる将来像が描かれている。一方で、建設産業における土木工事は、異なる現場ごとの「一品受注生産」、「現地屋外生産」、「労働集約型生産」という特性があり、製造業で進められてきたライン生産や自動化・ロボット化等の生産性向上対策に取り組むことが困難とされてきた。しかしながら、少子高齢化社会により生産年齢人口が減少し、今後、明らかに労働力が不足すること考えれば、建設産業においても生産性向上は避けられない課題となっている。このような状況の中、各機関から Society5.0 に向けた建設段階における課題、取組み、ロードマップ等が示されており、本項で取りまとめた将来像の参考とした。

国土交通省は、i-Construction 2.0 として「建設現場のオートメーション化」に取り組むことが 2024 年 4 月に発表している^{2.10)}。図 2.3.1 に建設現場のオートメーション化のイメージ図を示す。i-Construction 2.0 では、抜本的な省人化対策に取り組むためには、一人で複数台の機械を操作することや、設計・施工の自動化など、これまで人が手作業で実施している内容を人工知能（AI）やシステムを活用して自動化し、人はマネジメント業務に特化していくよう変革していく必要があり、目指す目標（将来像）として、2040 年度までに建設現場の省人化 3 割（生産性 1.5 倍向上）を目指し、建設産業が賃金や休暇などの就労環境の観点からも魅力ある産業となり、国民生活や経済活動の基盤となるインフラを守り続けるとされている。

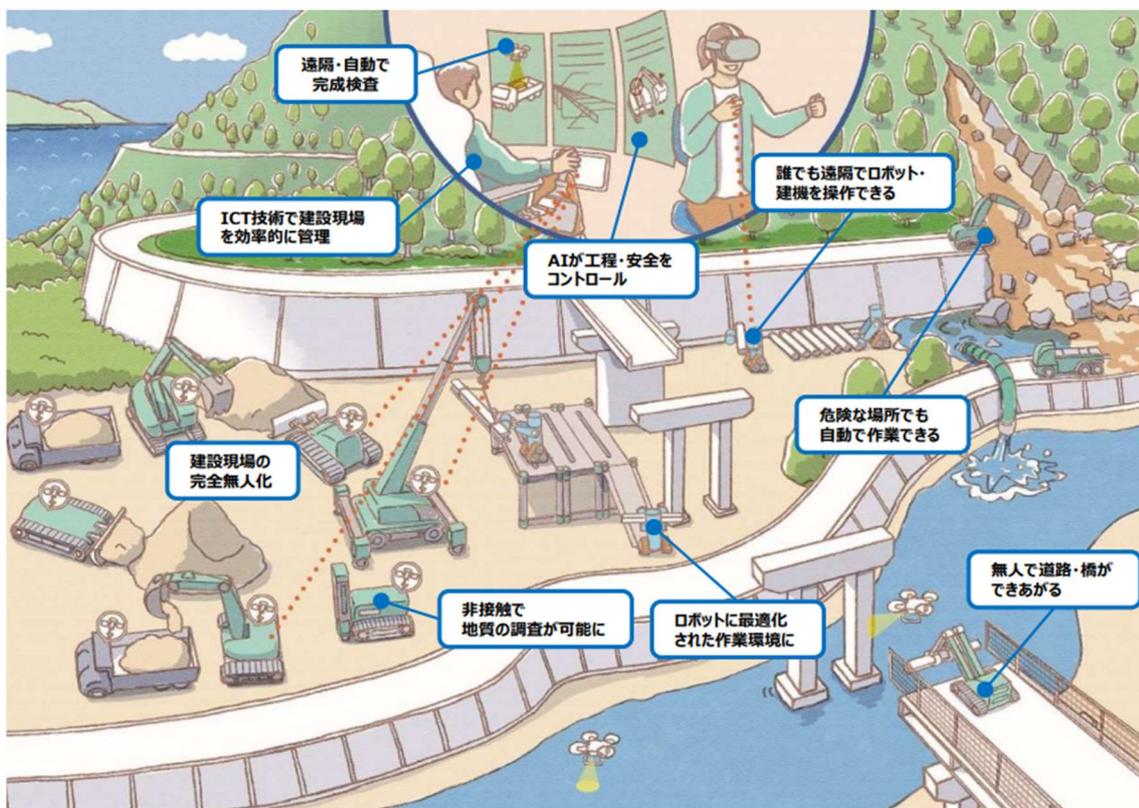


図 2.3.1 建設現場のオートメーション化のイメージ図^{2.10)}

（独）鉄道建設・運輸施設整備支援機構は、鉄道建設における DX 等の技術開発を計画的に進めるため、20 年～30 年後に達成を目指すべき目標を取りまとめた「建設 DX ビジョン」を 2023 年 10 月に発表して

いる^{2.11)}。鉄道建設に関する技術について設定された「DX ビジョン・ロードマップ」を図 2.3.2 に示す。これらは、第 5 期国土交通省技術基本計画（2022 年 4 月策定）や JR、建設会社も含めた技術開発動向を考慮して作成されている。



図 2.3.2 建設 DX ビジョン・ロードマップ^{2.11)}

戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 3 期 (令和 5 年～, 内閣府) の課題では、目指す将来像として、新たな社会「Society 5.0」を支える「未来のインフラ (スマートなインフラ)」が実現 (構築) された「未来のまち (スマートシティ)」が挙げられている^{2.12)}。「未来のインフラ」を実現していくためには、インフラの整備や維持管理においてデジタルツインと連携した諸々の新技術 (「未来の建設技術^{2.13)}」) を研究開発し、最大限に実装していくとされている。未来の建設技術のイメージ図を図 2.3.3 に示す。なお、研究開発目標としては、「デジタル技術等を活用した革新的な調査・設計～施工～維持管理に関する技術(省人化, 自動化・自律化, ユニット化等)を開発し, 建設生産プロセスの DX を進め, 省人化・自動化・自律化により, 建設現場作業の効率化・生産性向上, 技術者不足の解消, 死傷事故の低減等を図るとともに, 環境的にも優れた高品質なインフラを提供できるようにする。」と設定されている。



図 2.3.3 未来の建設技術のイメージ^{2,13)}

以上の取組みを参考に、Society5.0に向けた建設現場（含改築/更新）で考えられる将来像について記す。

AI（人工知能）やロボット技術等の高度な活用

- ・建設機械の自動運転：ブルドーザー、ショベルカー、クレーンなどの建設機械を自動運転化することで、作業員の負担軽減や安全性が向上。
- ・AIによる施工品質の検査：AIを活用して、構造物の施工品質を自動的に検査することで、検査の効率化と精度向上を実現。
- ・施工シミュレーション：3Dモデルに時間軸を加えた4D施工シミュレーション、デジタルツインおよびAIの活用により、改築/更新も含めた施工計画の立案や施工中の問題点抽出を自動化。

ビッグデータ分析による最適な施工

- ・過去の建設プロジェクトのデータ：過去の建設プロジェクトの施工実績やコストデータなどを分析することで、より精度の高い施工計画を作成することが可能。
- ・施工リスクの評価：過去の施工事例や現場データなどを分析し、AIが施工中の事故やトラブルのリスクを評価・予測することで、安全対策を強化。
- ・センサーとAIを活用した構造物の状態監視によるデータ：構造物にセンサーを組み込むことで、状態をリアルタイムに監視し、構造物の劣化を事前に予測。これらのデータは改築/更新の施工計画に反映。

2.4 維持管理段階で考えられる将来像/例

東日本高速道路株式会社（以下、「NEXCO 東日本」）では、次世代高速道路の目指す姿（構想）として、変化する社会情勢に対応するため、高速道路会社として目指す高度なモビリティサービス提供の方向性を構想^{2,14)}としてとりまとめている。これは、高速道路の渋滞・事故、高齢化、労働者不足、ユニバーサルデザイン、カーボンニュートラル、DX の推進およびインフラ管理効率化などの高速道路を取り巻く社会情勢の変化に対して、ICT、AI、ロボティクス、センサー、デジタル通信（5G）、ビッグデータ活用などの技術革新が急速に進展するとともに、自動運転車両やコネクテッドカーの普及が現実となりつつある社会情勢の変化に対して、引き続き将来の自動車交通の更なる発展をけん引していくべく、高速道路会社が目指す高度なモビリティサービス提供の方向性を構想としてとりまとめたものとなっている。

NEXCO 東日本では、下記の未来の社会を想定し、これを支える次世代高速道路の目指す姿として 10 項目の目標を設定し、これを実現するための下支えとして、「高速道路管理（維持管理）の高度化」の技術もあわせて整理している。

<NEXCO 東日本が描く未来の社会>

- ・ 誰もが健康で活動的な生活を送るためのシームレスな移動を支える社会
- ・ 年齢やハンディキャップに左右されず、新たな移動手段による圏域間の有機的連結
- ・ 少子高齢化・労働人口減少時代の効率的な物流サービスの実現
- ・ 頻発化・激甚化する自然災害に対し、強くしなやかなレジリエントな社会
- ・ 豊かな自然、地域の文化や歴史および伝統の保護・継承と効率的な経済活動の両立

<次世代高速道路の目指す姿（目標）>

1. 安全性：技術の進化により実現する事故ゼロの道路
2. 高速性：拠点間移動での優位性を発揮できる道路
3. 定時性：予定通りの移動・輸送を当たり前にする道路
4. 代替性・冗長性：災害に強く救援につながる道路
5. 結節性：さまざまな交通手段の組合せで移動の選択肢を広げる道路
6. 快適性：スムーズな移動で車内時間が心地よくなる道路
7. 利便性：使い勝手の良い道路
8. 持続可能性：カーボンニュートラルに貢献する道路
9. 地域融和性：まちに溶け込みまちとともに成長する道路
10. エンターテインメント性：使うたびにわくわくできる道路（UX の追求）

NEXCO 東日本が公表している維持管理の高度化の中には、示されていないが、案として NEXCO 東日本版デジタルツインの構築が維持管理の高度化の一つとして有効であると考えられる。図 2.4.1 に案のイメージを示す。すなわち、高速道路会社が管理する構造物すべてを仮想空間上に「デジタルツイン」として再現し、仮想空間上で高度なシミュレーションにより、取るべき維持管理のアクションをきめ細かに考慮することができるようになると考えられる。これにより、現在あるいは将来取るべき適切な措置を高度な判断のもとに選択できるようになることが期待されるとともに、限られた人的資源でもストックマネジメントを飛躍的に改善、あるいは向上させることが期待され、有益であると考えられる。

NEXCO版デジタルツインのイメージ

NEXCO

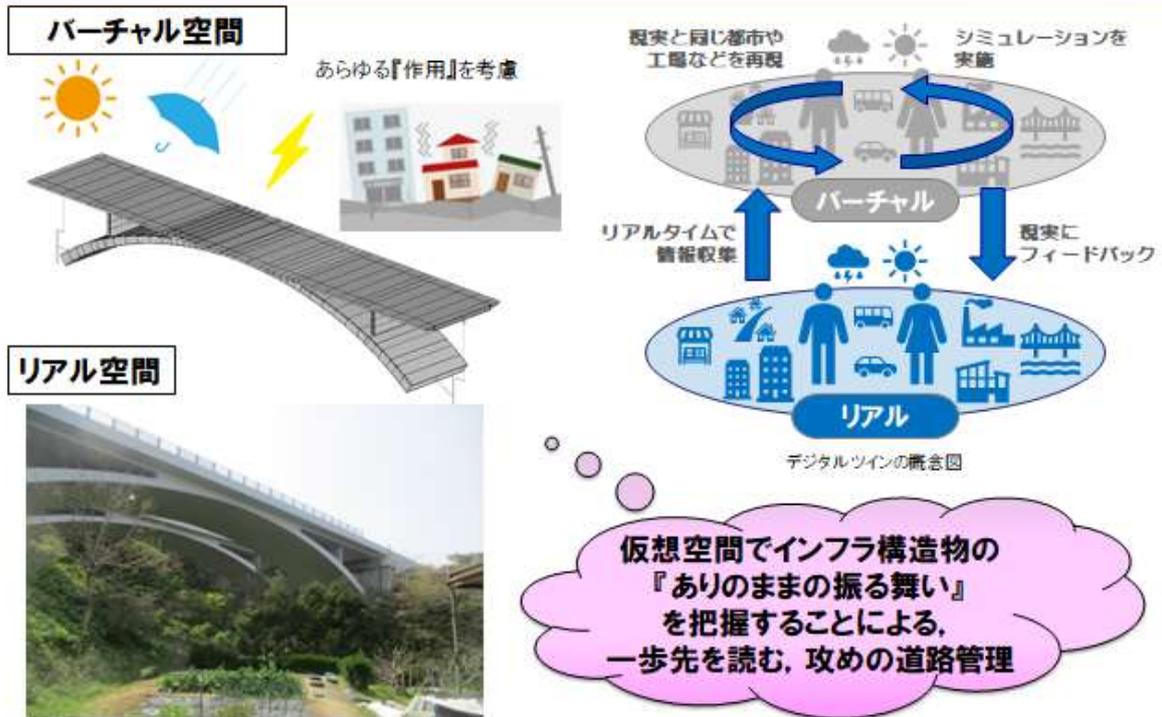


図 2. 4. 1 NEXCO 東日本版デジタルツインのイメージ

参考文献

- 2.1) World Health Organization: Health Promotion Glossary of Terms 2021.
- 2.2) OECD: Measuring Well-being and Progress: Well-being Research (<https://www.oecd.org/wise/measuring-well-being-and-progress.htm>, 2024/05/08 アクセス)
- 2.3) OECD: How's life Country Profiles, 2024 (<https://www.oecd.org/wise/Hows-Life-2024-country-profile-Japan.pdf>, 2024/05/08 アクセス)
- 2.4) https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/hyouka/seisaku_n/koukyou_jigyoku.html (2024/05/08 アクセス)
- 2.5) 国土交通省 道路局 都市局：費用便益分析マニュアル，2023.12.
- 2.6) 国土交通省鉄道局：鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル（2012年改訂版），2012.7.
- 2.7) J. E. Stiglitz, A. Sen and J.-P. Fitoussi: Report by the Commission on the Measurement of Economic Performance and Social Progress, 2009.
- 2.8) 国土交通省：i-Construction 2.0-建設現場のオートメーション化-, 2024年4月
- 2.9) 国土交通省 BIM/CIM 推進委員会，第10回 BIM/CIM 推進委員会資料，p.10，2023年
- 2.10) 国土交通省 ホームページ（報道・広報>報道発表資料>「i-Construction 2.0」を策定しました）
https://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_001085.html (2024/05/13 アクセス)
- 2.11) (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 ホームページ（鉄道建設>建設技術>建設DX）
<https://www.jrtt.go.jp/construction/technology/dx.html> (2024/05/13 アクセス)
- 2.12) 内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局：スマートインフラマネジメントシステムの構築 社会実装に向けた戦略及び研究開発計画，令和5年12月7日

2.13) 国土交通省：技術により実現を目指す将来の社会イメージについて，令和3年9月22日

2.14) 東日本高速道路株式会社 ホームページ（企業情報サイト＞事業案内＞道路管理運営事業＞次世代高速道路の目指す姿（構想））<https://www.e-nexco.co.jp/activity/safety/future/>（2024/03/25 アクセス）

（執筆者：川端雄一郎，塩畑英俊，平陽兵，皆田龍一）

第3章 デジタルツインに関する現状調査

3.1 はじめに

デジタルツインの活用によって、社会的課題の解決や新たな価値創造が進むことが期待される。デジタルツインでは、物体やプロセスの挙動をシミュレーションし、将来の予測を行うことが可能である。今後は、より高度なシミュレーション技術が開発され、リアルタイムでの予測精度が向上することが期待される。さらに、AI技術と組み合わせることで、自動化や最適化の領域でさらなる進展が期待される。AIがデジタルツインのデータ解析の更なる予測精度向上や処理速度向上によって、インフラに関わる人間のさまざまな意思決定をサポートすることで効率性や精度が向上するからである。少子高齢化による生産人口の減少という社会的課題を有するわが国において、社会インフラにデジタルツインを適用し、活用することによって、効率化が進むとともに、その延長に Society5.0 がある。

このような中、国土交通省では、社会経済状況の激しい変化に対応し、社会インフラ分野におけるデータとデジタル技術を活用するインフラ分野の DX を進めることを発表^{3.1)}している。図 3.1.1 にその概要を示す。

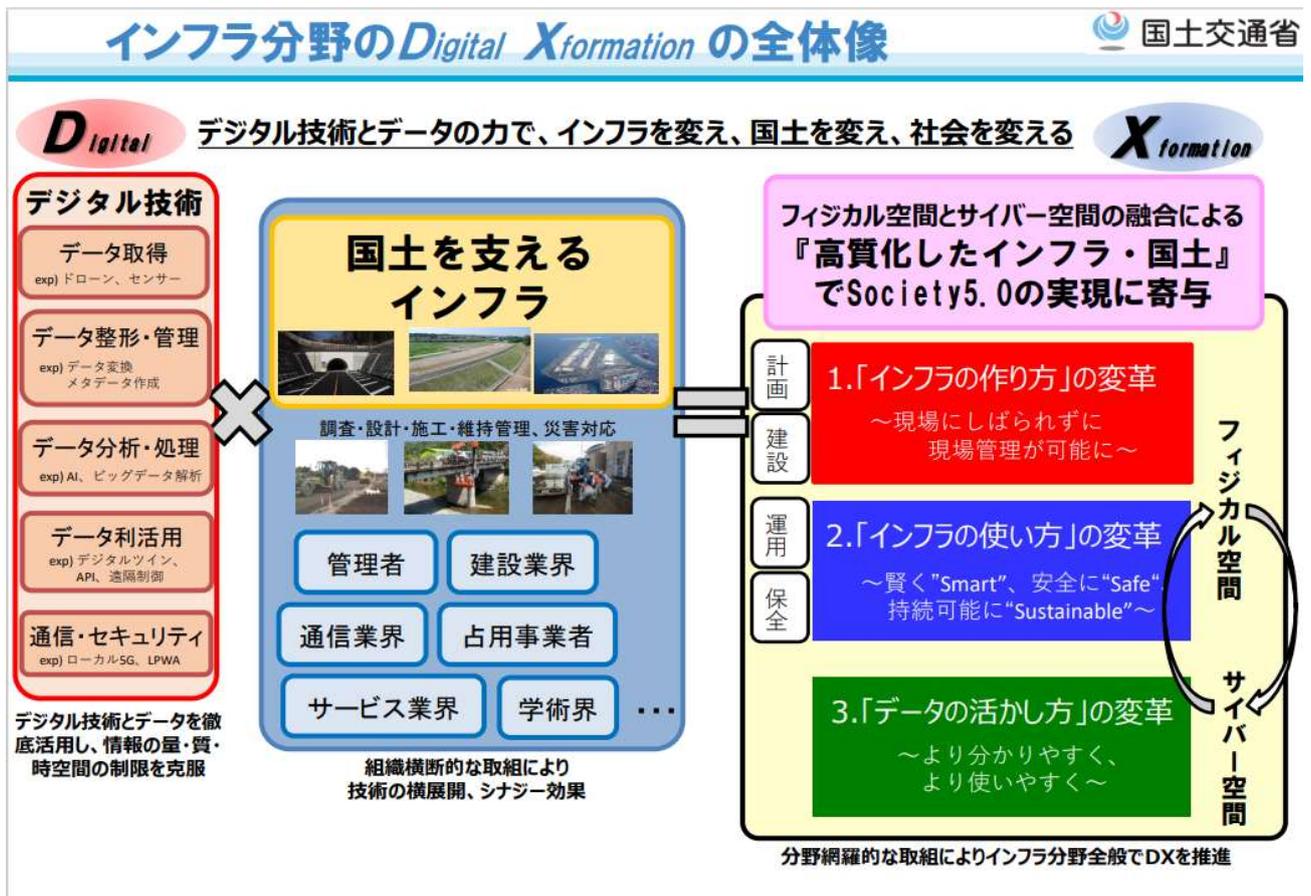


図 3.1.1 インフラ分野の DX 全体像^{3.1)}

インフラ分野の DX は、社会インフラのつくり方（すなわち、「建設段階」）、社会インフラの使い方（すなわち、「管理段階」）、現状では散在してインフラ周辺のさまざまな情報（例えば、地形・地図データ、気象データ、交通（人流）データ、施設、構造物データ、エネルギーデータ、防災データなど）のサイバー空間での活かし方の変革をすることで、将来的にはフィジカル空間とサイバー空間の融合によって、Society5.0 の実現に寄与させるとしているものである。

デジタルツインと AI を組み合わせたデータ解析による意思決定のサポートなどといった使い方は、将来的な創造的活用方法と思われるが、現状における社会インフラ分野におけるデジタルツインの活用状況について、1 年間という短い活動期間ではあったが、本小委員会に所属する各委員の協力を得て、現場調査を行った。次節以降にその概要について示す。

3.2 トンネル工事

3.2.1 調査概要

調査対象としたトンネル工事は高速道路の4車線化による機能強化工事であり、主体となる山岳トンネルの掘削だけでなく、橋梁部の構築（上部工および下部工・基礎）および盛土区間の土工事も含まれており、多くの工種を対象としたICT技術の試行が可能なことから、道路管理者および施工者が協力して、デジタルツインを初めとするDX技術の試行を進めていた現場である。

トンネル工事としては、設計・施工情報を3次元モデルに集約したトンネルCIMシステムや、鋼製支保工の遠隔組立ておよびロックボルトの自動引抜試験などの遠隔・省人化施工技術などが試行されていた。また、最近は多くの現場で採用されている常時監視WEBカメラの設置だけでなく、作業員のトンネル内への入坑や作業位置を監視するシステムにより安全性の向上や作業効率化を図っていた。

3.2.2 試行技術の内容

(1) トンネルCIMシステム

国土省により適用が進められている土木工事現場のCIMは3次元モデルに属性情報や参照資料を紐づけたシステムの総称であるが、実際の適用状況においては設計完了もしくは施工開始段階で3次元モデルの作成を行ってVR的な確認ツールとして使うことがほとんどである。

これに対して、この現場では施工開始前にトンネルの掘削進行に伴う各断面位置に対応した参照資料を3次元モデルに細かく紐づけし、掘削が進むことによって変化する施工位置の関連情報を迅速に参照できるシステムを採用していた（図3.2.1）。

これにより地盤や断面が変化していても、それに対応する資料をデータ保管場所から自分で探す必要はなく、現場に持参したタブレット端末などから該当断面箇所をクリックするだけで、さまざまなデータが参照・管理可能となる。



図 3.2.1 トンネル CIM システム

(2) 鋼製支保工の遠隔組立て／ロックボルトの自動引抜試験

トンネルの切羽付近では、掘削、吹付けや支保工組立てなどのさまざまな作業において人力作業と機械作業が輻輳して行われるため効率化が難しいとされてきた。最近では、リアルハプティクス技術による掘削の遠隔化や自動吹付け機による自動化の検討が進んでいたが、これに合わせる形で支保工の部材接合を遠隔で実施する検証が行われていた（図 3.2.2）。

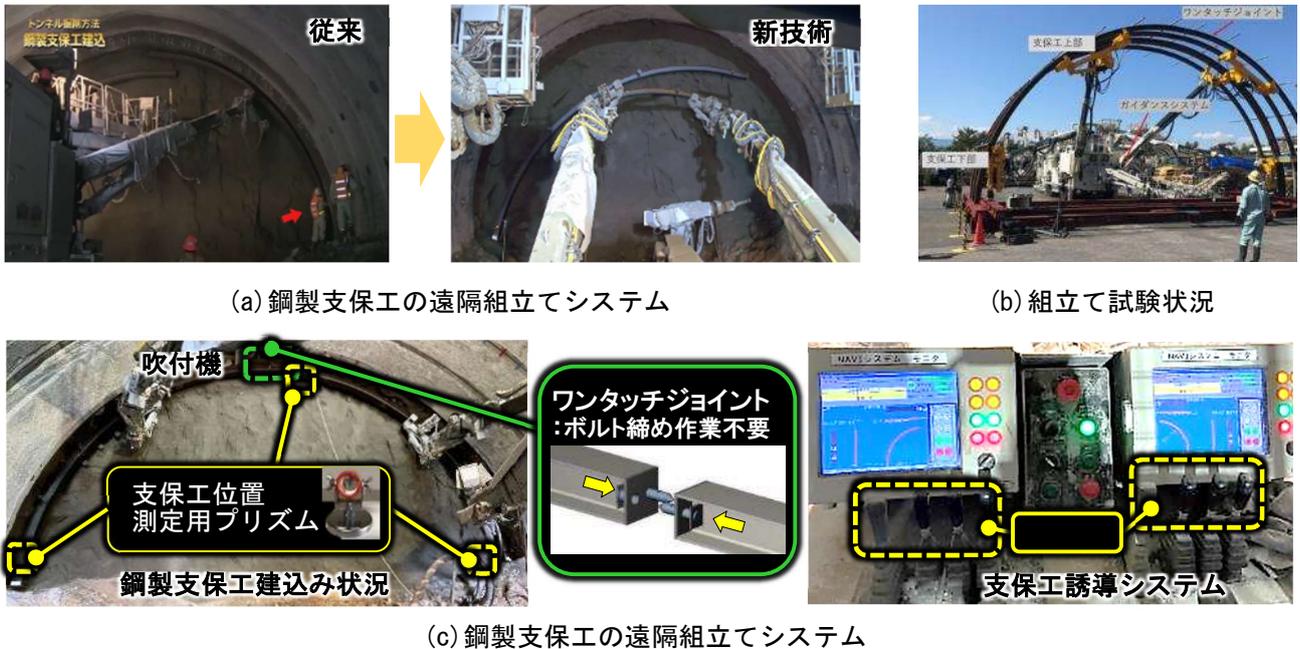


図 3.2.2 鋼製支保工の遠隔組立て

また、切羽の後方では、ロックボルトの引き抜き試験により施工の品質を確認する作業が行われているが、これも油圧ポンプなどの人力作業を必要としない自動引抜試験機が採用されていた（図 3.2.3）。

軽量化されて持ち運びが容易となった自動引抜試験機による試験結果はタブレット端末で記録され、前述のトンネル CIM システムに容易に取り込むことが可能であった。



図 3.2.3 ロックボルト自動引抜試験機

(3) トンネル坑内作業管理システム

トンネル作業は安全性の観点から坑内への立ち入り管理を行うことが必要であるが、これまでは入坑時に本人が自分の名札を裏返す立ち入り標示板によって管理することが一般的である。これに対してヘルメット内に測位センサーを取り付けて入坑および作業位置を管理（ビーコンを 20m 間隔で設置してどの範囲で作業をしているかの管理）するシステムを構築していた（図 3.2.4）。

また、ヘルメット内に、測位センサーだけでなく体温や心拍数を測定するセンサーを内蔵したスマートヘルメットの検証も進んでおり、将来的には作業員の体調管理も含めた作業管理システムにより安全性の向上効果が期待されている。



(a) 入坑標示板



(b) 作業管理システム（作業員の作業エリア検知システム）



(c) スマートヘルメット

図 3.2.4 トンネル坑内作業管理システム

3.2.3 試行技術による効果

試行技術によって期待される効果については、施工者側は主に生産性向上を目標しており 40～75%の人員削減効果が見込まれるとしている（表 3.2.1）。

表 3.2.1 試行技術による削減度および達成度

試行技術	期待する効果	削減度	達成度
トンネル CIM システム	情報収集 2 時間→1 時間	▲50%	50%
鋼製支保工遠隔組立て	組立作業 5 人→3 人	▲40%	50%
ロックボルト自動引抜試験	試験時間 40 分→10 分	▲75%	75%
トンネル坑内作業管理システム	(安全性向上)	---	10%

3.2.4 調査のまとめ

調査を実施した現場では、施工者が DX 技術による生産性向上（作業員の省人化、施工管理の省力化）の検証を実施していただけでなく、道路管理者がその施工時のデータを維持管理にどのように引き継いでいくか、次世代のトンネル工事の在り方について実データを用いて積極的に施工者と議論しているという印象であった。さらに、道路管理者は現場内に DX センター（図 3.2.5）を設置して、工事関係者や多方面の見学者に積極的に情報公開を行っていた。

今回、調査対象とした試行技術に共通している点は、省人化・省力化を図りながら将来的にサイバー空間を利用した自動化・自律化施工への移行を進め、維持管理までのシームレスな情報管理体系の構築を目指していたことであり、これらの成果が広く普及するによってデジタルツインを軸とした次世代のシステムへの移行が進んでいくものと考えられる。



(d-1) 遠隔管理実証ルーム

(d-2) 遠隔立会実証状況

図 3.2.5 見学対象現場に設置されていた DX センター

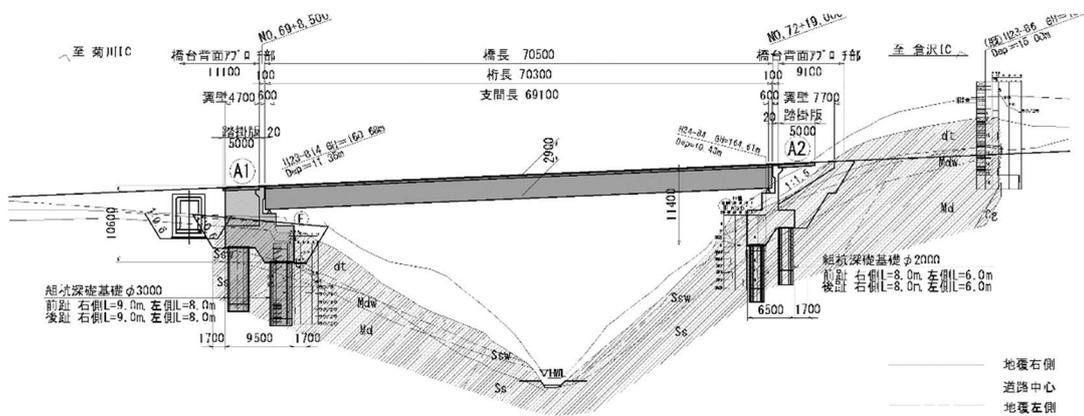
3.3 橋梁架設工事

3.3.1 調査概要

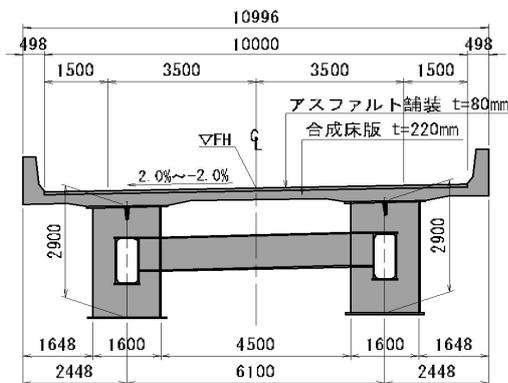
デジタルツインに関する現状調査の一環として、橋梁上部工の架設シミュレーションによる検討を行っている現場に出向いた。この現場は鋼桁を送り出し架設する現場であり、実際の現場の映像を取り込んだMR（複合現実 Mixed Reality）技術を利用して、架設工法の事前確認や安全性の確認を行っている。

3.3.2 橋梁概要

対象とする橋梁は、単純非合成細幅箱桁橋で、橋長 70.5m、有効幅員 10.1m である。橋梁一般図を図 3.3.1 に示す。平面線形は橋梁上で R=1000~R=1200 と緩い S 字曲線である。鋼桁の製作は前述の線形に合わせて床版張出し長を一定とした鋼コンクリート合成床版を採用している。



(a) 側面図



(b) 断面図

図 3.3.1 橋梁一般図

3.3.3 架設工法

本橋の架設工法は手延べ機を用いた送り出し工法による架設であった。本橋は A1 橋台から A2 橋台に向かって完成時に 4.3% の上り勾配である。通常、送り出しは勾配の低い方から高い方へと施工することが多いが、本橋では搬入路や用地の関係で A2 から A1 へ向けて下り勾配による送り出し架設を行う必要があった。図 3.3.2 に示すように、送り出し架設時には 3.0% の下り勾配として A2 橋台側より架設を行った。また、平面線形が S 字にカーブしていることから、送り出し方向としては、各橋台中心を結ぶライン

で直線方向に送り出しを行った。送り出し速度は1m/7分であり、完成時勾配4.3%への調整はジャッキダウン時に調整した。この影響を事前に確認するため、MRによる架設シミュレーションにより作業の効率や安全性の確認を行った。

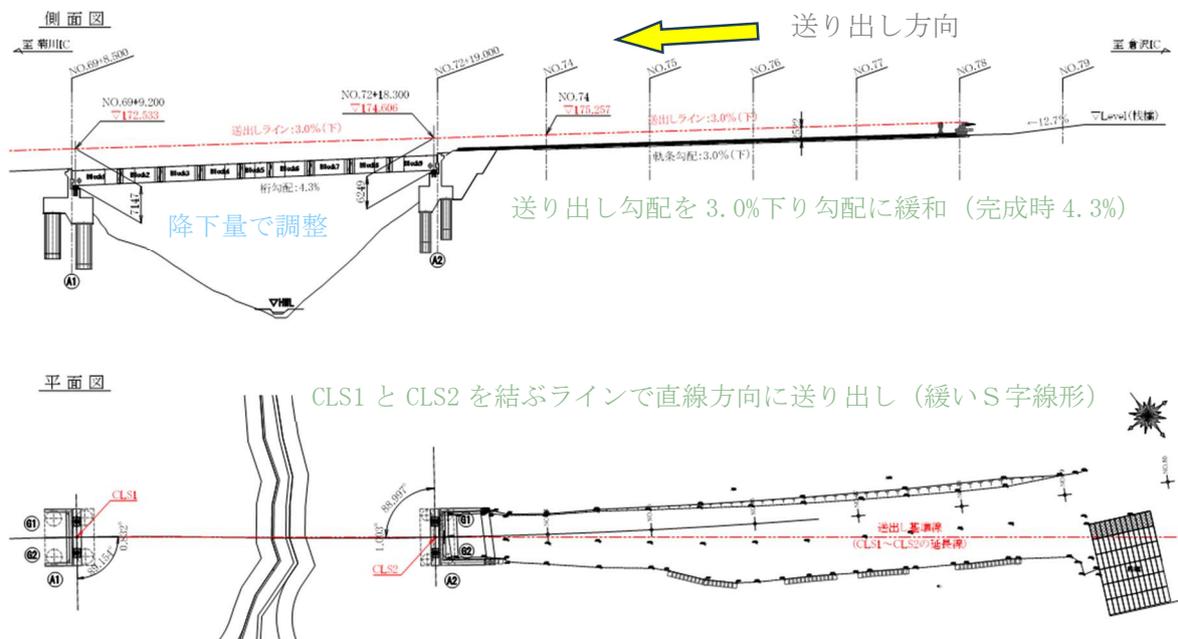


図 3.3.2 送り出し基準線

3.3.4 MR 技術を用いた架設シミュレーション

架設シミュレーションは、AR（拡張現実）とVR（仮想現実）を合わせたMRにより行った。MRは現実世界の特徴をデバイスが把握し、それらにデジタル映像をぴったりと合わせることができる技術である。したがって、工事現場や会議室等、あらゆる場所や空間で、あたかもそこに存在するかのような映像を見ることが可能となる。MR デバイスは、図 3.3.3 に示すようなヘルメットとホローレンズが一体となった現場用のデバイス（Trimble XR10）を用い、図 3.3.4 に示すようなタブレット型端末（iPad Pro）により画像を確認できるシステムとなっている。



図 3.3.3 Trimble XR10 ヘルメット



図 3.3.4 iPad Pro による画像確認

これらのデバイスを用いて、架設前における現場架設シミュレーションを行うことができる。シミュレーションの状況を図 3.3.5 に示す。また、送り出し架設アニメーションを図 3.3.6 に示す。

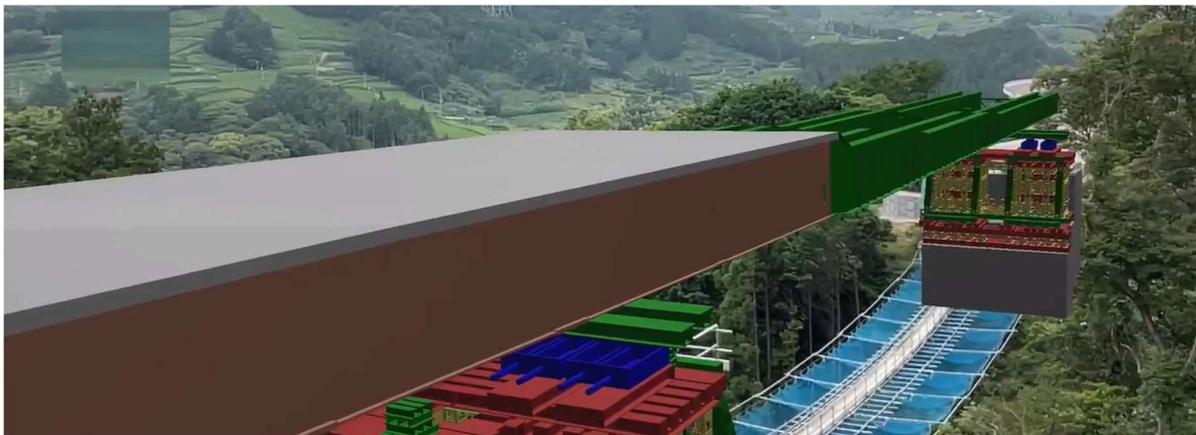


図 3.3.5 現場架設シミュレーション状況



図 3.3.6 送り出し架設アニメーション

現場視察では、iPad Pro で基準となる QR コード（1 か所）を読み込んで、架設ステップの 4D モデルを確認した。現場での状況を図 3.3.7 に QR コードを図 3.3.8 に示す。



図 3.3.7 現場での確認状況



図 3.3.8 基準 QR コード

3.3.5 架設シミュレーションの効果

架設シミュレーションをすることで、作業手順が現地に合わせたリアル映像で視覚的に確認ができるため、作業中の問題を明確化することができ、作業の遅れや手戻りを最小限に抑えることができる。また、危険予知の精度が高まるため、事故やトラブルの発生を防止でき安全性が高まる。このような技術を使うことで、架設状況を視覚的にイメージできるとともに、例えば、地域住民の方々へ工事に関することが具体的に伝えることができ理解を深めることも可能となる。

3.4 他分野でのデジタルツイン

土木分野とは異なる業界の企業で取り組まれているデジタルツインについて、国内の総合エレクトロニクスメーカーである富士通株式会社にヒアリング調査を行った。同社では、人々の行動をデジタルツイン上に再現することで、人の行動の変化を予測し、施策の効果や影響を事前に検証するソーシャルデジタルツイン^{3.2)}と呼ぶ技術を開発しており、今回、この技術を活用した津波シミュレーションと Mobility Digital Twin について調査を行った。以下にその概要を示す。

3.4.1 津波シミュレーション

スーパーコンピュータ富岳^{3.3)}を用いて高解像度の津波シミュレーションを AI に学習させ、モデル化した海岸沿いの都市の地域特性に応じた津波被害予測を実施している。この津波被害予測は、津波の発生から到達までの過程を数値モデルで再現することによって、津波の影響を評価し、避難計画の改善や避難経路の最適化に役立てられている。これにより、災害時の被害を最小限に抑えることに活かされている。図 3.4.1 にそのイメージ^{3.4)}を示す。人々の行動をデジタルツイン上に再現することによって行動の変化を予測し、避難計画の改善に役立てられている。また、リアル空間では回数を重ねることが難しい津波に対する避難訓練についても、バーチャル空間を活用して実施することによって、各自が適切な避難経路を考えることについても貢献している。

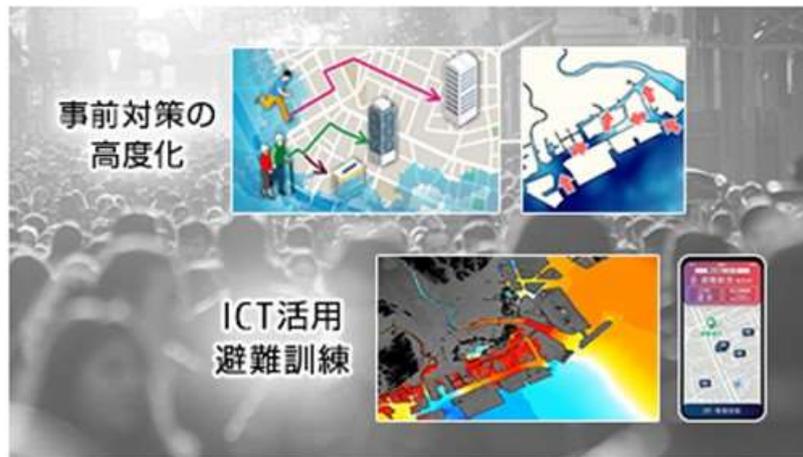


図 3.4.1 災害に強い街づくり津波シミュレーション^{3.4)}

3.4.2 Mobility Digital Twin

Mobility Digital Twin^{3.5)} は、車両や人の挙動、街の変化など交通に特化して現実世界のデータをサイバー空間上に再現することによって、リアルタイムに人と車の行動の変化を再現/分析/予測し、自動車、保険、交通などのさまざまなサービスを高度化して提供する技術である。この技術によって、下記が期待される。

- ・ 交通安全性の向上：車両挙動のリアルタイムモニタリングと事故予測により、運転者に対するアラートや自動ブレーキなどの機能をサポートし、交通事故を減少させることに期待
- ・ 運転行動の最適化：運転者の行動を分析し、燃費改善や運転スキル向上をサポートするなど、運転者に対するリアルタイムのフィードバックを提供
- ・ 保険のサービス向上：保険プロバイダーのリスク評価を向上させ、適切な保険料の設定に貢献するなど、車両の運転履歴や挙動データを活用して保険プラン最適化が期待
- ・ 交通インフラの最適化：信号制御など道路構造の最適化とともに渋滞などの軽減に期待

この技術を活用して海外ではロードプライシングによる人や車両の動きの変化について、実際にサービスの提供を行っている。現実世界のデータをサイバー空間に取り入れるにあたり、管理者から情報を取得し易いということもあり、海外での事例が先行している。

3.4.3 考察

津波シミュレーションや海外では都市をモデル化したロードプライシングなど、人や車両の移動について、サービスとして提供可能な段階にあることがわかった。これに、構造物の挙動を再現できるモデルを組み入れることで社会インフラも組み込んだ真のデジタルツインが実現できる可能性が考えられる。

参考文献

- 3.1) インフラ分野の DX, 国土交通省 ホームページ (ホーム>政策・仕事>技術調査>インフラ分野の DX), https://www.mlit.go.jp/tec/tec_tk_000073.html (2024/04/17 アクセス)
- 3.2) ソーシャルデジタルツイン, 富士通 (株) ホームページ (ホーム>プレスリリース) <https://pr.fujitsu.com/jp/news/2022/02/8.html#footnote4> (2024/04/17 アクセス)
- 3.3) スーパーコンピュータ富岳, 理化学研究所 計算科学研究センター ホームページ (トップページ>富岳について), <https://www.r-ccs.riken.jp/fugaku/> (2024/04/17 アクセス)

- 3.4) 災害に強い街づくり 津波シミュレーション, 富士通 (株) ホームページ (ホーム>企業情報>会社概要>拠点情報>ショールーム>Fujitsu Technology Hall>フロアガイド)

<https://www.fujitsu.com/jp/about/corporate/facilities/showrooms/technologyhall/floor-guide/index.html>

(2024/04/17 アクセス)

- 3.5) Mobility Digital Twin, 富士通 (株) ホームページ (ホーム>サービス>Future Mobility Accelerator>Mobility Digital Twin) , <https://www.fujitsu.com/jp/solutions/business-technology/future-mobility-accelerator/digital-twin/#anc-mobility> (2024/04/17 アクセス)

(執筆者：大久保宣人, 齋藤 隆, 塩畑英俊)

第4章 デジタルツインを活用した社会インフラ管理システムに向けた課題

4.1 はじめに

近年では、経済発展と社会的課題の解決を両立する人間中心の社会「Society5.0」の実現のためにデジタルツインが期待されている。例えば、東京都では、デジタルツインの社会実装に向けたロードマップ第3版が作成され、都市のデジタルツインとしての取組範囲を明確化し、都市のデジタルツインが持つ意義や、実現までの段階、取組の柱となる要素、実施事項について整理を行い、当面の事業方針やデジタルツイン実現に向けた今後のステップを明らかにしている^{4.1)}。

土木分野の複合構造物におけるデジタルツインは、仮想モデルに対してビッグデータを利用したシミュレーションとしての活用があり、例えば、設計シミュレーションの最適化や維持補修計画の精度向上と効率化、施工プロセスの仮想モデル上での検証などが挙げられる。また、構造物の設計図、施工記録、点検データ等をクラウドで統合管理することにより関係者間の情報共有をしている。あるいは、点検や補修作業の自動化や利用状況や交通量などのデータを周辺の社会インフラ構造物と連携し、道路全体の効率化を図ることができれば社会的課題の解決に繋がると考えられている。

一方、これまでDX推進が行われているが、物理モデルによる将来劣化の予測や複数のシナリオシミュレーションを行うまでには至っておらず、多くはSociety4.0(情報社会)のレベルのものに留まっているのが現状である。デジタルツインは実用化が進みつつある技術の集合体であり、単純な構成であれば技術的な問題は大きくないが、実用的に活用する上では多くの課題がある。クラウドサービス、IoT、AI、4G/5G、AR/VRなどの周辺技術が大きく発展し、デジタルツインを現実のものと捉える動きが加速しているが、デジタルツインを実現するためには、現実世界をサイバー空間上にモデル化する技術やサイバー空間に構築したモデルを利用して作成された情報をフィジカル空間にフィードバックするための基盤が必要となる。

土木分野の複合構造物を想定した場合、喫緊の社会的課題のひとつとして、担い手不足や予算不足の中で多くの構造物を維持管理していかなければならないことである。維持管理に着目した場合、フィジカル空間では点検や補修補強が行われ、サイバー空間では寿命予測が行われることで効率的な維持管理がなされるイメージである。これらを高度に効率よく実現されるのであれば、サイバー空間だけでもよいのかもしれないが、現実的には今ある状態を知るためにフィジカル空間での状態・行為があり、現在はこれらを融合するデジタルツインの活用が有効となる。今後、どれだけデータを収集し、サイバー空間に反映できるのか、サイバー空間からフィジカル空間へ効果的にフィードバックできるのかが課題となる。

デジタルツイン活用における課題として、①高い予測・シミュレーション精度の実現、②既存システム・データとの連携、③テクノロジー人材の育成・確保、④導入・運用コストの大きさや分担、⑤セキュリティ・プライバシーリスクの発生が挙げられる。また、デジタルツインを導入するために、①データ収集、②モデル作成、③システム構築、④シミュレーション・最適化が必要となる。

文献4.2)では、デジタルツインに求められる機能について考察するとともに、現状デジタルツインの活用が期待されているユースケースを整理し、今後よりデジタルツインを社会に実装していく上で解決すべき課題が整理されている。また、文献4.3)では、デジタルツインを活用した橋梁維持管理に向けて、既設の長大橋全体を3次元シェル要素およびソリッド要素で精緻にモデル化し、実測可能な車両荷重による橋梁のたわみ、温度日変動による橋梁の熱伸縮を対象に線形静解析を実施して、得られた解析値と実測値の

比較により、モデルの妥当性を検証している。

本章では、複合構造物における Society5.0 の実現に向けた Society 4.0 における課題やデジタルツインを活用した社会インフラ管理システムに向けた課題について整理する。

4.2 Society4.0 で見られる課題

Society4.0 の情報社会においては、インターネットやセンサーなどの新技術の活用により、フィジカル空間における、さまざまなデータをデジタル化して収集することが可能となり、そのデータを解析し、活用することで、業務の効率化や生産性の向上を実現させる取り組みが行われている。また、将来的には AI などの技術の進化によって、自動化や予測能力の向上など、さまざまな領域において革新的な変化が期待されている。

建設分野においても、BIM/CIM や 3D 計測によるデジタル空間の活用により、プロジェクトの計画、設計、施工、管理における業務の効率化と生産性の向上が図られている。現場施工においては、センサーや IoT デバイスの導入により、リアルタイムでデータを収集し、作業の進行状況や設備状態をモニタリングすることが可能となり、品質管理や安全性の向上につながっている。また、ロボティクス技術の活用による現場での自動運搬やリモート操作型建設機械の導入、ドローンを活用した 3D 計測などにより、省力化や安全性の向上が図られている。

しかし、現在の社会インフラ管理に向けた建設分野におけるビックデータの収集・活用には、まだ以下の多くの問題点や課題がある。

必要な情報の抽出

Society4.0 においては、多くの情報が収集される一方で、情報量が多すぎて必要なものを見つけるのが困難となることがある。また、社会インフラ管理における構造解析や評価判定に必要なデータ項目や計測箇所の選定において、統一的な情報抽出技術やツールの整備が不十分であり、必要な情報を効率的に抽出・選別するための方法を定める必要がある。

情報の共有化、連携体制

現在、収集されている情報は、単一の独立したデータ体系に存在し、蓄積された知識や情報の共有化が不十分となっている。情報連携やデータ蓄積体制の整備が不可欠であり、社会インフラ管理においては、部材や構造物単体でなく、インフラ全体としてデータを連携させることが必要となる。

このためには、データ保護や活用に関する法的・規制的な枠組みを整備し、大量のデータを処理・保管するための環境整備や管理体制を整える必要がある。その構築と維持にはコストが発生するとともに、異なるシステムやプラットフォーム間でのデータ共有の際に互換性を確保するための対応も必要となる。

情報の精度・信頼性の確保

収集されるデータが不完全や不正確であると、分析結果に悪影響を与える可能性がある。計測方法による測定結果のバラつきや、生データに含まれるノイズや欠損・重複データなどのデータクレンジング作業が必要であり、このプロセス手法の確立が必要となる。また、構造物の維持管理においては、不可視部分の計測方法の確立や評価方法に対する信頼性の確保が必要である。

4.3 デジタルツインを活用した社会インフラ管理システムに向けた課題

4.3.1 サイバー空間（モデル化）の課題

(1) サイバー空間の構築とその活用形態

デジタルツインに基づくインフラ管理を考えた場合、まずはリアルと対になるサイバー空間を構築する必要がある。2章で述べたように、インフラ管理に対するデジタルツインの活用形態としては、設計段階、施工段階、維持管理段階の各々で考えられるものの、それらの有機的な連携を実現することが理想である。例えば、設計段階ではまだリアル空間にインフラが存在しないことから、完全にサイバー空間でのシミュレーションとなる。構造物を仮想的にモデル化し、設計作用を与え、構造物の応答を確認するという行為は、その精度や程度はさまざまであるが、現状のインフラ設計においても常に実施されているものである。したがって、インフラの新設設計段階では、デジタルツインは存在しない。これに対して、施工段階および維持管理段階では、建設途中あるいは完成形のインフラが、すでにリアル空間に存在しているため、リアル空間とサイバー空間のツイン状態となる。したがって、デジタルツインをインフラ管理に活用する意義は、設計段階に比べて施工段階や維持管理段階の方が大きい。ただし、施工段階や維持管理段階でデジタルツインを活用しようとするならば、それに応じたサイバー空間の構築（モデル化）が設計段階から行われていることが望ましい。しかも、そのモデル化の規模や精度は、その後の施工段階や維持管理段階で求められるレベルを確保することが必要条件となる。

なお、上記のようなデジタルツインの実装に向けた検討が実際に行われている例として、内閣府の戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第3期「スマートインフラマネジメントシステムの構築」^{4.4)}が挙げられる。このプログラムのミッションは、「未来のインフラ（スマートなインフラ）」として、「インフラ・建築物の老朽化が進む中で、デジタルデータにより設計から施工、点検、補修まで一体的な管理を行い、持続可能で魅力ある国土・都市・地域づくりを推進するシステムを構築する」こととしており、その中でデジタルツインを構築し、これを活用した一体的管理を目指すプロジェクトである。本プロジェクトの中には、以下のA～Eのサブテーマが設定されており、特にA、B、Dは正に本重点研究課題とも密接に関係する課題である。

- A. 革新的な建設生産プロセスの構築
- B. 先進的なインフラメンテナンスサイクルの構築
- C. 地方自治体のヒューマンリソースの戦略的活用
- D. サイバー・フィジカル空間を融合するインフラデータベースの共通基盤の構築と活用
- E. スマートインフラによる魅力的な国土・都市・地域づくり

(2) モデル規模と解像度および時間軸

従来の解析技術では、解析対象の細部までを再現する高解像度・高精細度のモデルを構築する場合、それに相反して、モデル化する規模や範囲は狭くなるのが一般的である（図4.3.1参照）。これは主として、モデル化に要する労力の問題とモデルを構築する計算機性能や演算の規模に起因していると思われる。また、高解像度のモデルであるほど、その細部挙動を再現するために実装される物理化学モデルも複雑になるとともに、その物理化学モデルを用いて実際に解を得るのに必要なパラメータも多くなる。これらのパラメータは、実際の計測や取得が困難であるものも含まれる可能性がある。サイバー空間の構築（モデル化）が目指す方向は、図4.3.1中にピンクで示したように、大規模・広範囲・高解像度であることは間違

いないが、そこには同時に組み込む物理化学モデルの構築と精緻化・高精度化、ならびにその精度を支える大量のパラメータ設定とその取得技術の開発・発展が必須である。

近年では三次元点群データの取得が相当容易になり、これを利用した三次元モデル構築も実現できている。したがって、設計段階でモデルを構築していなくても、リアル空間に実在するインフラをサイバー空間に構築することは、技術的には可能である。しかし、点群データはあくまでもインフラの外面（皮）のみであるので、シミュレーションを行うためには、この皮の中に骨肉（材料および埋設物）を与える必要があることはいまでもない。すなわち、点群データを用いた三次元モデルは、インフラ構造物の外観形状はそれなりの精度が期待できる反面、内部の材料や鉄筋の配筋状態などは、別の手法によって取得して反映させることが必要となる。電磁波レーダーやX線等の非破壊検査技術の進歩も目覚ましいものの、デジタルツインとしての活用に耐える精度で骨肉の詳細情報を取得可能な技術は、未だ発展途上であると言わざるを得ない。したがって、リアル空間に実在する構造物であっても、その内部情報を取得する情報源は設計図書や竣工図書に頼らざるを得ない。このことは、前述したように高解像度のモデル構築が求められる場合に、一層顕著な問題点として浮上する。

さらに、設計、建設、維持管理のいずれの段階であれ、構築したモデルをデジタルツインとして活用するには、時間軸の概念が不可欠となる。日々進行する構造物の施工過程や、長年に渡って供用されるインフラの維持管理にシミュレーションを活用するためには、時々刻々変化する構造物の状態をサイバー空間上で再現することが必要である。このためには、構造物を構成する材料の時間依存性と、構造物に働く外的作用の時間依存性を同時に考慮するとともに、これらの相互作用を精度よく推定することができる物理化学モデルが必要であることはいまでもない。

なお、モデル自体が高解像度になった場合、それに入力する作用の方も高い解像度が求められることになる。例えば、温湿度や飛来塩分の三次元空間分布の把握等は、現実問題としてかなりマクロ的な計測に頼らざるを得ないのが実態である。インフラ構造物自体の高解像度化に比べて、作用入力の高解像度化はより多くの課題を抱えている。まして、これを時間軸上での精緻なシミュレーションに耐える密度や頻度で取得することは、技術面、コスト面の双方で課題であると考えられる。もちろん、高解像度のモデルに対して、低解像度の作用を入力することは、技術的には可能であるが、その結果として得られる構造物の高解像度の応答情報は精度が必然的に低下することになる。

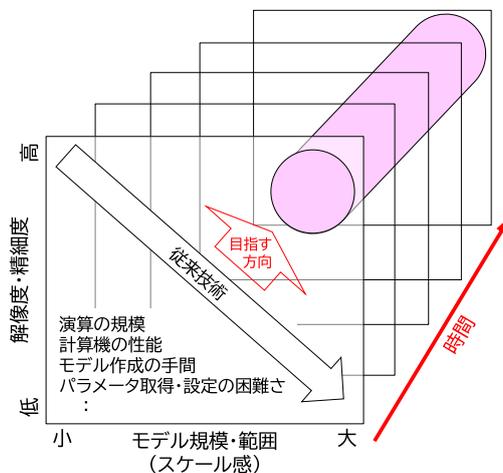


図 4.3.1 シミュレーションのモデル規模と解像度，時間軸との関係

(3) モデルの信頼性確保とモデルアップデート

(1) で述べたように、サイバー空間の構築に際しては、モデル規模や範囲と解像度、そして時間軸上でのモデル化が重要である。また、これに応じて材料・構造の精緻な物理化学モデルが必要であることも述べた。これにより、時々刻々変化するインフラ構造物の応答や状態を精度よく追跡することが可能であるものの、完全に実現象を再現できるわけではなく、リアルとサイバーの間にはかならず差異が生じる。その原因として、そもそもの形状のモデル化の精度、入力パラメータの精度や不確実性、施工品質による影響、外的要因（作用）のモデル化における誤差や不確実性等、さまざまなものが考えられる。特に、作用の不確実性に起因して構造物の状態や応答に生じる誤差は、時間の経過とともに増大することが想定され、シミュレーションの信頼性の観点で問題が生じる。

したがって、サイバー空間に構築したモデルは、そのまま使い続けるのではなく、リアル空間に実在する構造物の継続的な調査結果に応じてアップデートしていくことが不可欠である。モデルアップデートに必要な情報の選定、情報の取得技術や頻度、さらにはその情報取得のためのコストや契約形態等、そこにはさまざまな課題が存在すると言える。最近では、既設構造物の外見上のひび割れ情報を取得して AI に学習させ、これを基にして現在の構造物の性能および余寿命を評価するデータ同化技術の適用も進められている^{4.5)}。このように、リアル空間における状態をサイバー空間に反映して、モデルを迅速に補正・アップデートしていく技術を整えることで、シミュレーションの信頼性向上を図ることが可能である。

(4) シミュレーションのリアルタイム性

例えば、10 秒間の地震動入力に対する構造物応答を計算する地震応答解析を行うとする。このとき、構造物を 1 自由度の質点系でモデル化したならば、その解析に要する時間は、地震動の 10 秒よりも短いかもしれない。しかし、FEM を用いた地震応答解析となると、10 秒間の地震入力に対して、少なくともその 10 倍や 100 倍、モデル規模によっては 1000 倍以上の時間を必要とする。サイバー空間上でシミュレーションを実施するにあたり、例えば複数の地震動を対象とした解析によって予測を行うことを考えると、計算速度の問題はデジタルツインの活用の際に際しての大きなハードルとなる。実時間速度を上回る計算速度が実現するのが理想であるが、最低でも実時間と同等の計算速度のリアルタイム性が欲しいところである。この点は、(2) で述べたモデル規模との兼ね合いもあるが、広域・大規模・高解像度を実現しようとするのであれば、スーパーコンピュータの適用が不可欠である。リアルタイム性の実現は、リアル空間の四次元性をサイバー空間上に複製することであり、まさにパラレルワールドを構築することに相当する。

(5) 理想形に最も近いと考えられる技術例

以上をふまえ、最後に、現時点でデジタルツインの理想形の実現に最も近いと考えられる事例を二つ挙げておきたい。これまでに実施してきた各種調査結果をふまえると、この二つの技術を統合し、かつ実環境下における作用情報を高解像度で取得した上で、これらをスーパーコンピュータ上に展開することが、現時点で最も精度の高いデジタルツインの実現への最短距離かもしれない。

都市丸ごとシミュレーション^{4.6)}

東京大学地震研究所が中心となって開発された統合地震シミュレーション(IES)^{4.7)}のプラットフォームを基に、理化学研究所がこれを進化させたシステムである。スーパーコンピュータの適用により、広域を高解像度でモデル化し、全体挙動をシミュレーションすることが可能であり、神戸の街を丸ごとモデル化した地震シミュレーションが実現した。地震のみならず、津波や風水害、避難シミュレーションに展開さ

れている。この技術を広く一般化して社会実装すべく、「都市丸ごとのシミュレーション」技術研究組合が神戸大学を本部として設立された^{4.8)}。このプロジェクトの肝は、工学的な地震や津波シミュレーション技術だけでなく、その前段としての都市モデル構築技術にある。資産台帳や二次元 CAD などの各種データを共通プラットフォームに載せ、必要な情報を読み取って必要な形に再構築するデータ変換技術がその核を成している。

マルチスケール統合解析システム DuCOM-COM3^{4.9)}

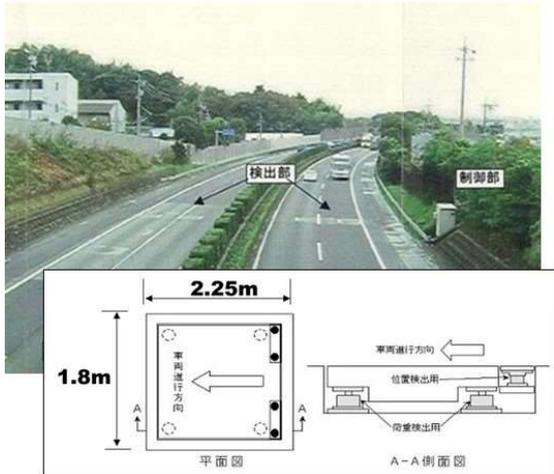
東京大学が開発したコンクリート構造物の時間軸上での力学・熱力学・物理化学シミュレーションシステムである。コンクリート構造物の供用期間を通じたライフスパンシミュレーションの実現を目指すとの一貫した戦略の下で開発されたシステムであり、鉄筋コンクリート構造の変形と損傷を追跡する非線形構造解析 (COM3) と、セメントの水和反応に基づく物質生成と空隙構造の形成、コンクリート中の水分や各種物質の移動と平衡等を追跡する熱力学連成解析システム (DuCOM) を統合することによって構築された^{4.10)}。詳細な適用事例は文献に譲るが、例えば LNG タンクの長期挙動と地震応答解析、既設栈橋上部工の塩害予測と補修効果、補強盛土一体橋梁の長期変形予測など、従来の解析手法では評価が困難な問題に対して、高い予測精度を有していることが示されている^{4.11)}。

4.3.2 フィジカル空間での作用取得の現状と課題

デジタルツインとは、センサーなどから取得したデータをもとに、さまざまなフィジカル空間の要素をサイバー空間上に「双子」のように再現したものと説明される。一般的なコンピューターシミュレーションと異なるのは、このサイバー空間上のデータを現実世界と連動したデータを用いてシミュレーションを行う点や、リアルタイム性が高いこと、現実世界の変化へ向けたフィードバックを行えること等が挙げられる。では、上記の観点で土木インフラ分野でのデジタルツインを考察してみる。既に、ドローンなどに搭載したカメラによって撮影された測量データを用いてデジタルツインを構築し、測量プロセスを効率化する活用が実務でも取り入れられている。これによって、3D 地形データを活用して建造物や樹木を除去し、ICT 建設機械からの進捗データと結び付けることで施工計画のシミュレーションが可能となっている。これは、フィジカル空間の地形や構造物などの要素を撮影したある時間断面においては、サイバー空間上に「双子」のように再現したものであり、寸法や位置関係を空間的に把握することが可能となっている。しかしながら、これらについては、残念ながら現実世界と連動した連続した時間軸のリアルタイムのデータを再現しているかと言われると、そうではない。さまざまなフィジカル空間の要素をサイバー空間上に再現するにあたり、その中の重要な要素の一つである、作用について考えてみる。

道路では、**図 4.3.2** に示すように軸重計を用いた直接的な計測や Bridge Weigh-in-Motion を用いた計測^{4.12)}によって、車両荷重である活荷重を把握する手法がある。活荷重については、設計で考えている値に対して、実際の値がどのレベルかを把握することが、構造物の耐久性に影響を及ぼすため、比較的古くから把握する試み^{4.13)}が行われてきた。また、近年においては、高速道路で軸重超過が法令違反であり、このことが道路を傷めたり、横転事故などの重大事故につながる危険性が高まるという観点から自動軸重計を活用した指導取締りが開始^{4.14)}されている。

軸重計を用いた直接的な把握



間接的な把握

Bride Weigh-in-Motionを用いた計測

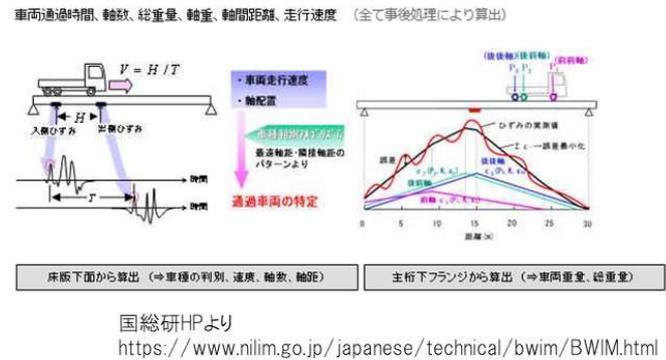


図 4.3.2 活荷重の計測

これらの活荷重の計測については、目的に応じた場所および時間軸で計測が行われているものの、現状では、デジタルツインを想定してサイバー空間上に取り込まれる前提とはなっていない。Society5.0を想像し、デジタルツインを活用した社会インフラ管理システムを考えた場合、時間的・空間的にシームレスに情報をバーチャル空間に取得できるようにする必要があると思われ、そのためには、センサー類の空間的な設置密度や計測したデータの保管方法、保管したデータからの情報の取得方法などの課題解決が必要と考えられる。

また、その他の作用として、コンクリート中の鋼材に対する劣化因子の一つである塩分についても、コンクリート中への浸透状況を把握する手段が開発^{4.15)}されている。これらは、センサー類を用いて、コンクリート中の鋼材の腐食環境を把握することによって、劣化因子である塩分の浸透状況を推定する方法となっている。現状では、これらのセンサー類を活用してコンクリート構造物中の鋼材の腐食環境を箇所的に離散的に把握することは可能となっているが、活荷重と同様に Society5.0 を想像し、デジタルツインを活用した社会インフラ管理システムを考えた場合、時間的・空間的にシームレスに情報をバーチャル空間に取得できるようにする必要があると思われ、そのためには、センサー類の空間的な設置密度や計測したデータの保管方法、保管したデータからの情報の取得方法などの物理的課題解決が必要と考えられる。

4.3.3 シミュレーションをフィジカル空間にフィードバックするための課題

本小委員会を実施したアンケート調査により、シミュレーションをフィジカル空間にフィードバックするための課題として、i) 誰に、何を、何の目的でフィードバックしたいのかを明確にすること、ii) 誰にでも簡単に使えて、サイバー空間とフィジカル空間をストレスなくシームレスにつなぐデジタルツインのシステムを構築すること、iii) シミュレーションと実際の現象とのギャップを埋めることの3つが挙げられた。これらは、システムの目的、効率、精度の課題に対応する。

以降では、身近な社会インフラである道路や鉄道 (e.g. 舗装、軌道、橋、トンネル) を例にして、3つの課題について記載する。ここでは、何かを予測することをシミュレーションと定義し、その手法として理論に基づく FEM などの物理モデルと、データ分析に基づく機械学習も含めた広義の統計モデルを考えた。物理モデルは力学をはじめとする物理法則に基づくため、広範な構造諸元や条件に対して汎用性が高い。

一方の統計モデルは、分析に用いたデータの範囲においては比較的高い精度を有しているが、モデルの適用範囲に注意が必要である。これらのモデルの特色を踏まえて、一般には、物理モデルと統計モデルを組み合わせて、さまざまなシミュレーションが行われている。

(1) シミュレーションの目的

優れたシミュレーションシステムを構築して活用するためには、誰に、何を、何の目的でフィードバックしたいのかを明確にすることが必要である。例えば、道路や鉄道のコンクリート橋に明らかなひび割れが生じたとする。市民や利用者から「この橋、大丈夫ですか？ この先、万が一にも壊れませんか？」と聞かれてしまった。この答えは、材料と構造の劣化特性および劣化進展を考慮しつつ、今後の橋の供用期間にわたる常時荷重と変動荷重、そして地震などの偶発荷重に対して破壊確率が 1/10,000 以下になることを示せばよい。このようなシミュレーションは将来予測であり、市民や利用者に対して将来の橋の姿と安全性を説明するとともに、管理者にとっては補修・補強などの対策の要否や優先度を決定する根拠にもなり得る。しかし、物理モデルのみに頼ると、将来の材料・構造の劣化進展や作用のモデル化に大きな不確定性が含まれる。構造物の劣化状態が比較的軽微であれば、橋のたわみやひずみをセンサーやカメラを使って計測し、現時点で荷重に対して橋が十分な安全性を確保できることを確認し、さらにモニタリングによって異常を監視することで、将来にわたって橋の安全性を保証することができる。また、構造ヘルスマニタリングによって取得されるデータを定期的に統計モデルに入力すれば、将来の橋の安全性を予測することも可能である。

一方で、この橋の劣化状態が著しい場合には、橋の構造性能を回復させるための対策が必要になる。補修・補強を行うためには、橋のどこが、何の原因によって、どのくらい劣化しているかを把握し、さらに、どのような補修・補強が効果的であるかを知りたい。特に、鋼コンクリート複合構造物を対象として、部材の剛性、耐荷力、変形性能を回復させるためには、ひび割れなどの外観変状のみならず、構造物内部の鋼とコンクリートの応力状態を適切に把握することが望ましい。このような構造物内部の状態を把握することが目的であれば、物理モデルによるシミュレーションが有用である。構造物表面に取り付けたセンサーやカメラの情報のみから、構造物内部の応力状態を推定することは難しい。力学に基づく物理モデルは、センサーやカメラなどの計測や統計モデルで把握できない構造物内部の応力状態を推定することができ、最適な補修・補強方法を選定することができる。

以上のように、シミュレーションの目的を明確にして、必要な情報を合理的なモデルによって予測することが重要である。シミュレーションの目的と必要精度が明らかになれば、シミュレーション手法の高度化につながる。デジタルツインの高度化に向けて、コンクリート構造物の点検・診断・対策の体系化が進められている。本小委員会は、複合構造の観点に立ってデジタルツインを議論するものであるが、複合構造物の点検・診断・対策では、依然として、シミュレーションの目的に対して予測手法を試行錯誤しているように思われる。複合構造では、鋼とコンクリートが相互に拘束することによって、複雑な力学挙動と耐荷メカニズムを呈する。さらに複合構造において、鋼とコンクリートの材料劣化や構造劣化特性を反映した標準的な物理モデルは未だに整備されていない。また、複合構造物の施工事例やメンテナンス事例が少ないため、統計モデルの構築に必要なデータも不足している。今後、物理モデルの精緻化と統計モデルに必要なデータの蓄積が求められる。

(2) シミュレーション手法の使いやすさ

誰にでも簡単に使えて、サイバー空間とフィジカル空間をストレスなくシームレスにつなぐデジタルツインのシステムを構築することが課題である。フィジカル空間において取得したセンサーやカメラのデータを糧にして、シミュレーションシステムのアップデートが図られる。アップデートされた最新のシミュレーションシステムは、サイバー空間においてさまざまなシナリオを設定して、構造物の状態を予測することに活用できる。シミュレーション結果は、フィジカル空間における道路や鉄道の運用と保守を効率化するため役立てられる。このようなサイクルを確立するためには、サイバー空間とフィジカル空間をつなぐデータ転送を短時間でスムーズに行い、シミュレーションやデータ処理にかかる時間を大幅に軽減して、ユーザーがストレスなく利用できるシステムが必要である。特に、サイバー空間でのシミュレーション結果をフィジカル空間に即時に反映させる防災・減災システムでは、シミュレーションやシステムの稼働にかかる時間の短縮が強く求められる。

シミュレーションには高い精度が要求されるが、マイクロサイズからの精緻な物理モデルを用いて大規模シミュレーションを行うと、膨大な計算時間が必要となる。この課題解決として、予めさまざまなケースの大規模シミュレーションを実施してデータベースをストックしておき、類似したケースの結果のみを即時に取り出す方法や、データの特徴分析によって次元圧縮した代替モデルなどが活用されている。このような物理モデルと統計モデルを組み合わせた手法は、リアルタイムで精度の高いシミュレーション結果を提供できるが、その一方で、統計モデルに与えたデータ範囲のみ有用であるため、モデルの適用条件には注意する必要がある。

(3) シミュレーションと実際の現象とのギャップ

シミュレーションと実際の現象とのギャップを埋めることが課題である。シミュレーションの予測結果と実際の現象との間には、必ず差異が生じる。その原因として、物理モデルでは、材料や構造のモデル化において、理想化した材料特性や施工精度を条件として与えている。このほかにも、数値解析における初期条件と境界条件の設定にも、実際の現象とのギャップがある。さらに、構造物や作用のモデル化において考慮すべき諸条件を無視したために、シミュレーションの結果と実際の現象との間に差異が生じることもある。統計モデルでは、与えるデータの質と量がシミュレーションの結果に大きく影響する。データが不足している統計モデルでは、実際の現象を精度よく予測できない。

シミュレーションと実際の現象とのギャップを埋める方法として、近年のデータサイエンス分野での成果が期待されている。例えば、複合構造物の内部の応力状態を推定することが目的であれば、物理モデルによるシミュレーションは有用である。しかし、理論による物理モデルのみでは、シミュレーションの結果と実際の現象との間に大きな差異が生じることがある。この差異を埋めるために、リアルなデータをごく少量だけ与えて、シミュレーションを補正することは有効である。

実際の現象に合わせてシミュレーションを補正する方法は、これまでも多く提案されてきた。機械学習のひとつである転移学習は、あるタスクで構築したモデルを別のタスクにも転用するものであり、異なる特徴空間どうしても利用できるモデルが提案されている。例えば、精緻な物理モデルによるシミュレーションの結果をデータベースにして統計モデルを構築し、これを標準モデルとする。個別の構造物ごとの特性は、センサーやカメラによるごく少量のデータを与えて、標準モデルを個別の構造物の特性に合わせて転用することで、シミュレーションの精度を高めることができる。また、転移学習はフィジカル空間において異なる構造物ごとに取得されたデータを横断的に利用することもできる。このような手法を用いて、

フィジカル空間に蓄えられたデータをさまざまなタスクにも活用し、シミュレーションの効率化と精度向上につながることを期待される。

参考文献

- 4.1) デジタルツインの社会実装に向けたロードマップ第3版 2024年3月,
東京都<https://info.tokyo-digitaltwin.metro.tokyo.lg.jp/docs/roadmap/roadmap_docs.pdf> (入手2024.5.20)
- 4.2) 杉崎 光一, 全 邦釘, 阿部 雅人: デジタルツインの概念と土木工学への応用, AI・データサイエンス
論文集 vol.4, No.2, pp.13-20, 2023
- 4.3) 清水 暁央, 久國 陽介, 釘宮 哲也, 渡部 一雄, 久野 勝美, 篠原 聖二, 赤松 伸祐: 大規模解析に
よる鋼斜張橋の車両荷重および温度変化に対する挙動評価, 構造工学論文集 Vol.66A, p.170-180, 2021.
- 4.4) 内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局: 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「スマー
トインフラマネジメントシステムの構築」社会実装に向けた戦略及び研究開発計画, 2023.12
https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sip_3/keikaku/09_smartinfra.pdf (2024/05/20 アクセス)
- 4.5) Tanaka, Y., Takahashi, Y. and Maekawa, K.: Remaining Fatigue Life Assessment of Damaged RC Decks -Data
Assimilation of Multi-scale Model and Site Inspection-, Journal of Advanced Concrete Technology, Volume 15,
pp.328-345, 2017
- 4.6) 飯塚敦: 受身の「受注」から課題解決型の「提案」へ — 都市丸ごとシミュレーション技術の活用 —,
土木学会誌, Vol.105, No.1, pp.36-39, 2020.1
- 4.7) 飯山かほり: 統合地震シミュレーション (IES) 技術の紹介〜システムとしての開発と現状, 将来像〜,
コンクリート工学, Vol.56, No.9, pp.783-788, 2018.9
- 4.8) 都市丸ごとのシミュレーション技術研究組合ホームページ <https://cityscalekobe.jp/> (2024/05/20 アクセ
ス)
- 4.9) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-scale Modeling of Structural Concrete, Taylor and Francis, 2008
- 4.10) 石田哲也: RC 構造のマルチスケール統合解析システムの開発経緯と今後の展望, コンクリート工学,
Vol.56, No.9, pp.809-816, 2018.9
- 4.11) 土屋智史, 石田哲也: 先進的なメンテナンスサイクルの構築に向けたマルチスケール統合解析の活
用, コンクリート工学, Vol.62, No.5, pp.438-444, 2024.5
- 4.12) 国土総合技術研究所 橋梁を用いた車両重量計測システム Bridge Weigh-in-Motion,
<https://www.nilim.go.jp/japanese/technical/bwim/20051121-BWIM.html> (2024/04/17 アクセス)
- 4.13) 石井孝男, 篠原修二: 東名高速道路の交通荷重測定と荷重特性について, 土木学会論文集 No.453/IV-
17, pp.163-170, 1992.9.
- 4.14) (独) 日本高速道路保有・債務返済機構 ホームページ (トップページ>業務・取組>道路管理権限
の代行その他の業務>車両制限令違反車両に対する取組>自動軸重計を活用した指導取締りの開始
について) https://www.jehdra.go.jp/torikumi/sharyouseigenrei_r0503.html (2024/04/17 アクセス)
- 4.15) 国土交通省 新技術情報提供システム 道路橋の塩害モニタリング技術
<https://www.netis.mlit.go.jp/netis/pubtheme/themesettings> (2024/04/17 アクセス)

(執筆者: 塩畑英俊, 内藤英樹, 藤林博明, 牧 剛史, 山本将士)

第5章 まとめ

本小委員会では、平成28年に内閣府による第5期科学技術基本計画において、未来社会のコンセプトとして提唱された Society5.0 という、人間中心の社会という新しい価値観への変革に対し、それを達成する手段の一つである、「サイバー空間とフィジカル空間の融合」の核となるデジタルツインに着眼し、現状のデジタルツインの活用状況について調査を行うとともに、インフラのデジタルツイン実現に向けて、モデルの構築、フィジカル空間での作用の取得、バーチャルからリアルへのフィードバックにおける課題について検討を行った。以下に主な内容についてまとめる。

第1章では、研究の背景と目的として、膨大な社会インフラに対して現状の人的資源に頼ったストックマネジメントには課題があり、デジタルツインを活用することによって解決の糸口が考えられることを述べた。

第2章では、Society5.0に向けた社会インフラ管理システムの将来像を考える上で、まず Society5.0 が目指す未来像から求められる社会インフラとは何かについて検討を行った結果を示した。

- ✓ 第6期科学技術・イノベーション基本計画から考察すると、Society5.0 では、サイバー空間とフィジカル空間の融合はあくまでも手段であり、そこに新たな「人間中心の社会」という新たな価値観が組み込まれるべきであること、またそれらによって得られる多様な「知」を包含した「総合知」により新たな価値が創造されること、さらにはそのようなことが可能となる人材を育成すること、が求められていると解釈される。
- ✓ 社会インフラ管理システムを Society5.0 に適合させるのであれば、従来の社会インフラの管理システムを合理化するだけでなく、さまざまな分野と高度に融合することで新たな価値を創造できるようなシステムに変革させることが必要である。
- ✓ 「サイバー空間とフィジカル空間の融合」という手段を駆使し、従来の社会インフラの機能を高めるだけでなく、well-being を実現するようなインフラが Society5.0 にふさわしいインフラと考えられる。
- ✓ Society5.0 を実現するためには、分野横断的な知の共有がなされるよう、社会インフラに携わる土木技術者として既存の枠内で思考するのではなく、設計・建設・維持管理（運用）のあらゆる段階での人間中心の社会との関わりの可能性を模索することが期待される。そのためには、土木工学の枠内で通じる専門言語を他分野との共通言語化させ、土木学会内の横断研究や他学会などとの連携がなされ、Society5.0 に貢献できる社会インフラ像の議論を加速させる必要がある。

次に、「サイバー空間とフィジカル空間の融合」の核となるデジタルツインに着眼し、デジタルツインにおける設計段階、建設段階、維持管理段階における将来像についてそれぞれ検討を行った結果を示した。

第3章では、国内における現状における社会インフラ分野におけるデジタルツインの活用状況について、本小委員会に所属する各委員の協力を得て、現場調査を行った結果を示した。

- ✓ 設計や建設段階では、ICT技術の活用は進んできており、これをうまく維持管理段階に引き継ぐことによって、インフラのデジタルツインの実現に向けたプロトタイプ構築として期待されると思われる。
- ✓ 都市をモデル化して人や車の移動や津波シミュレーションは、サービスとして提供可能な段階にある。これに、建造物の挙動を再現できるモデルを組み入れることでデジタルツインが実現できる可能性が考えられる。

第4章では、インフラのデジタルツイン実現に向けて、モデル構築、フィジカル空間での作用の取得、バーチャルからリアルへのフィードバックにおける課題などに着目して検討を行った結果を示した。

- ✓ デジタルツイン活用における課題として、①高い予測・シミュレーション精度の実現、②既存システム・データとの連携、③テクノロジー人材の育成・確保、④導入・運用コストの大きさ、⑤セキュリティ・プライバシーリスクの発生が挙げられる。また、デジタルツインを導入するために、①データ収集、②モデル作成、③システム構築、④シミュレーション・最適化が必要である。
- ✓ 作用取得の課題として、デジタルツインは、センサーなどから取得したデータをもとに、さまざまなフィジカル空間の要素をサイバー空間上に「双子」のように再現したものであり、一般的なコンピューターシミュレーションと異なるのは、このサイバー空間上のデータを現実世界と連動したデータを用いてシミュレーションを行う点や、リアルタイム性が高いこと、現実世界の変化へ向けたフィードバックを行えることである。しかしながら、活荷重や塩分浸透の例に見られるように、現状では、時間的・空間的にシームレスにこれらの情報の取得が行えておらず、これらを行うためのセンサー類の設置密度、データの保管方法、保管したデータからの情報の取得方法などが課題である。
- ✓ シミュレーションをフィジカル空間にフィードバックするための課題として、3つの観点「i) 誰に、何を、何の目的でフィードバックしたいのかを明確にすること」、「ii) 誰にでも簡単に使えて、サイバー空間とフィジカル空間をストレスなくシームレスにつなぐデジタルツインのシステムを構築すること」、「iii) シミュレーションと実際の現象とのギャップを埋めること」から検討を行った。
 - ・ シミュレーションの目的を明確にしなければ、必要な情報を合理的なモデルによって予測することができない。シミュレーションの目的と必要度が明らかになれば、シミュレーション手法の高度化につながる。また、複合構造では、鋼とコンクリートが相互に拘束することによって、複雑な力学挙動と耐荷メカニズムであるとともに、鋼とコンクリートの材料劣化や構造劣化特性を反映した標準的な物理モデルは未だに整備されていない。さらに、複合構造物の施工事例やメンテナンス事例が少ないため、統計モデルの構築に必要なデータも不足している。今後、物理モデルの精緻化と統計モデルに必要なデータの蓄積が求められる。
 - ・ シミュレーション手法の使いやすさとして、シミュレーションには高い精度が要求されるが、マイクロサイズからの精緻な物理モデルを用いて大規模シミュレーションを行うと、膨大な計算時間が必要となる。この課題解決として、予めさまざまなケースの大規模シミュレーションを実施してデータベースをストックしておき、類似したケースの結果のみを即時に取り出す方法や、データの特徴分析によって次元圧縮した代替モデルなどが活用されている。

- ・ シミュレーションと実際の現象とのギャップを埋める方法として、近年のデータサイエンス分野での成果を活用する方法や物理モデルにリアルなデータをごく少量だけ与えてシミュレーションを補正する方法がある。

第5章は、第1章から第4章のまとめである。

最後に、本小委員会は、決してデジタルツインの専門家ではない複合構造委員会の産学官のメンバーで委員を構成し、委員会活動を通じて議論を深め、委員それぞれがデジタルツインについて調査を行い、深く考えるきっかけになったことは、学会活動として大きな意義があると考えられる。委員の中には、デジタルツインのコンセプトや現状になじみがなかった者もいるだろうし、デジタルツインの課題や将来展望に触れることで、各々の業務や研究活動に反映させるヒントを得た委員もいるのではなかろうか。今回参加頂いたメンバーを中核として、未来のスマートインフラの実現に向け、分野横断的にさらなる活躍をしていくことが期待される。

(執筆者：塩畑英俊)