

# 来るべき世代を

京都大学名誉教授 宮川 豊章

## 1. フィジカルとサイバー

人間社会は、狩猟社会（Society 1.0）、農耕社会（Society 2.0）、工業社会（Society 3.0）と進んできたとされ、現在は情報社会（Society 4.0）と言われる。情報社会の次には、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、Society 5.0 が到来するとされている。欧米では、Society 5.0 に向けてサイバーフィジカルシステムを導入した第4次産業革命が進んでいると聞く。我が国においても、2016年第5期科学技術基本計画において目指すべき未来社会の姿として Society 5.0 が初めて提唱された。その動きの中で最も重要なキーワードはデジタルトランスフォーメーション（DX）であろう。しかし、我が国の進捗は極めて出遅れている。

DXにおける種々のアプローチそのものは種々の場面で進められている。例えば、最新の“賢すぎる”AIとして大規模言語モデルがある。インターネット上のありとあらゆる文章をAIに覚えさせ、単語同士の繋がり方の法則性を学習させたものであり、社会の常識や、周囲の雰囲気を読む感覚も含まれているそうである。AIの適用可能性をさらに広げるために、転移学習、連合学習、修正技術、品質・性能保証技術、等の研究開発が続けられている。しかし、AIには「意味」を理解することが本質的にできない。人間が介在しなければならない。今こそ人間存在の意義が問われる時なのである。

現在建設産業についてはその生産性の効率の悪さが指摘され、生産性の向上、効率化の必要性が謳われることが多い。それに関連して、DXさらにはAI、BIM/CIM、ビッグデータ、i-Constructionなどが語られることが多いようである。しかし、これらは単なる道具であって、我々あるいは市民が求める土木技術そのものではない。道具を用いて技術を極めることが重要なのである。そのためには財源、人員および基礎技術力が要求される。そのなかで最も重要であるのは人員つまりは人材あるいは人財である。

なお、DXによる技術開発の方法論そのものについては技報30号の大西有三先生の特別論文を参考にしていきたい。

## 2. インフラの今

インフラには今、地球温暖化、人口減少社会という二つの厳しい制約条件のもと、増大する高齢化構造物を含むインフラによって市民社会を支えることが要求されている。地球温暖化による環境変動に対しては、緩和策として排出CO<sub>2</sub>量の削減と同時に廃棄物の減少を要求され、適応策としては国土の強靱化が要求されている。しかも、人手が減少するとともに人口減少に対応して予算も減少する可能性のある条件下において、LCCおよびLCCO<sub>2</sub>を満足させるシナリオのもと、土木技術者が丈夫で美しく長持ちするインフラを提供し、市民社会を丈夫で美しく長持ちさせる必要があるのである。

その場合、必要とされる時空間においてインフラを自由自在に挙動させる技術があるこ

とが要求され、そのためには、作ることと確かめることの2種類の技術が要求される(図-1)。新設構造物を造りこなす場面では、施工した後、竣工検査が必須である。これに対し既設構造物を使いこなす観点からは、診断した後、補修・補強などの対策を施すことになる。いずれにしても、施工、補修・補強などの作る技術と、竣工検査や診断などの確かめる技術の、2本柱から成り立っている。どちらも、DXに通じる技術の重要性が注目されている。

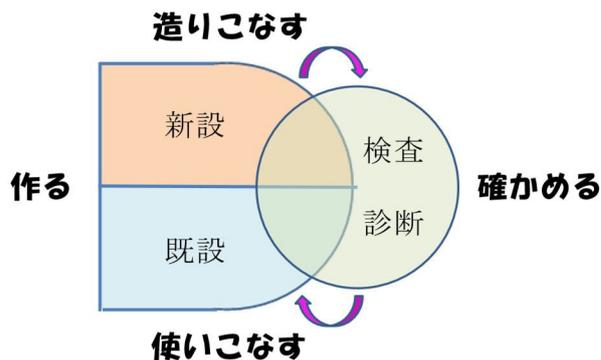


図-1 技術の2本柱

## 2.1 造りこなすから使いこなすへ

20世紀は、第二次世界大戦後が典型的であったが、インフラを建設し充実させることが急務であり、インフラを“造りこなす時代”であった。しかし、大量に整備されたインフラが多量に劣化に向かうのが21世紀であり、我々が目にしている社会である。インフラを“使いこなす時代”になったのである。1999年6月の山陽新幹線福岡トンネル壁面コンクリート塊落下事故は劣化した構造物の点検、診断、補修・補強の重要性を市民にまで周知する結果となった。メンテナンス元年とマスコミでは騒がれた。さらに、2012年12月の笹子トンネル天井板落下事故は維持管理の重要性を再確認させ、種々の対策が講じられ始めた2013年は、再びメンテナンス元年と呼ばれた。

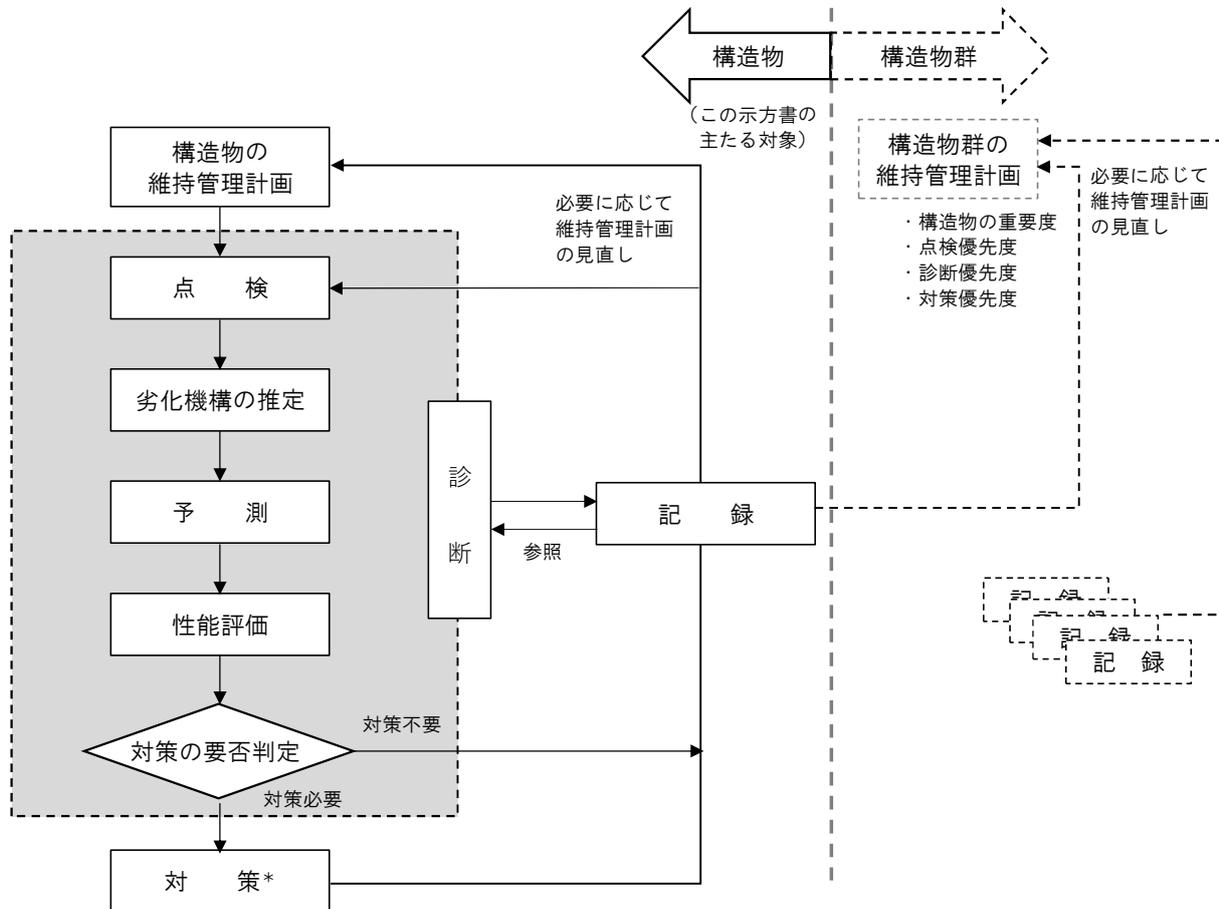
この二つの元年の間、2001年1月には土木学会からコンクリート標準示方書〔維持管理編〕が発刊された。この〔維持管理編〕の特徴的な提案は以下のとおりである。①単なる性能照査型ではなく、性能開示と性能照査をともに含む性能規定型であること。そのためには構造物に要求される性能を明示するとともに、その確保および確認方法を示すことが必要である。また、②劣化機構に基づいて、現在の劣化状態(劣化度(期))とこれからの推移を平衡論と速度論の観点から診断する。③設計規格ではなく維持管理規格を示す。④ライフサイクルを単なる計算結果ではなく技術者の思想に基づいて描くことをLCCやLCCO<sub>2</sub>をもとに提案する(シナリオデザイン)。これらの提案の成果として、それまで、「花の建設、涙の維持管理」と言われ日陰の存在であった維持管理を日の当たる場所に出し、本来のマーケットを成立させたのである。

維持管理のなかでの種々の検討は科学的な原理が基本となるが、現場的に意味のある質および量を得られるかどうかという工学的な検討が極めて重要である。科学的な真理は一つかもしれないが、工学・技術にはいくつもの答え、方法(真実)があり、それらを検討してそれぞれの限界を見つけその時点における最善の手法を提案することが重要である。このことは維持管理において特に重要である。技術には必ず時代の制約がある。例えば、NEXCO3社による定期点検および大規模修繕更新事業において、作業の進展に伴って新しく課題が発見されるといった事実(表-1<sup>2)</sup>)もあるのである。

維持管理は一般に図-2のような流れで行われる。まず必要とされるのは点検であり、次いでその結果による評価および判定と流れる。診断の結果場合によっては補修・補強などの対策が必要となる。非破壊点検手法の開発を含めて、定量的な診断手法の開発が強く望

表-1 定期点検や更新事業の実施等により得られた新たな知見

長期保全メニュー	定期点検や更新事業の実施等により得られた新たな知見	劣化写真
中空床版等の路面陥没等への対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>橋梁舗装補修の影響により、床版上面にひび割れが発生。交通荷重の影響により、ひび割れから床版の陥没に進展。また、ひび割れから水が床版内に浸透し、滞水することで床版下面まで損傷。</li> </ul>	
PC鋼材の腐食及びグラウト充填不足への対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>海岸からの水分・飛来塩分がコンクリート内に浸透しており、特にグラウトの充填不足の範囲ではグラウトによる防食効果が無いため、桁やPC鋼材が著しく劣化。</li> <li>防水塗装、電気防食などの補修を繰り返し実施しているが、架橋から約50年が経過し、これまでの補修方法では劣化が抑制できず、剥離、PC鋼材の著しい腐食が発生。</li> </ul>	
舗装路盤部の疲労破壊への対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>交通荷重の繰返しにより、上層路盤下面からひび割れが発生し表層まで貫通。</li> <li>舗装表面からの水が下層路盤まで浸透した結果、下層路盤の強度が低下し、舗装構成全体にたわみを伴う変形が発生。路盤の変形が戻らないため、表層・基層を補修しても短期間で新たなひび割れが発生。</li> </ul>	
地すべり対策をしても変状が収まらない切土のり面への対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>大規模な断層や地山の亀裂に雨水が浸透することにより、切土のり面のすべり面の風化が進行し、地山の地すべりが長期的に進行。</li> <li>これまでグラウンドアンカー等による補強を繰り返しているが、のり面全体の変状が止まらない状況。</li> </ul>	
火山堆積物地質における路面陥没への対応	<ul style="list-style-type: none"> <li>盛土に浸透した降雨等により、空隙を有する火山堆積地層である原地盤へ、盛土内の細粒分が流出し、路面陥没や沈下が繰り返し発生。</li> <li>空洞の充填、遮水シート等の設置、排水溝の漏水防止対策などの補強、補修を繰り返し実施しているが、建設から約35年が経過し、これまでの補修方法では発生を抑止することが困難。</li> </ul>	



\*) 対策として解体・撤去が選択された場合には、記録を行った後に終了する。

図-2 維持管理の流れ

まれているが、膨大な点検データ群をうまく利用することなど DX アプローチが多く求められている。しかしそのためには適切なフィジカル情報が必須であり、基本条件なのである。AI では理解できない「意味」としての劣化メカニズムの把握が必要なのである。ここでは私の専門領域から、塩害と PC グラウトについての基本的な情報の例を紹介しよう。

## 2.2 塩害

維持管理に当たって、図-3 に示す塩害の劣化過程は主として棒部材の断面あるいは部材レベルでの評価であり、棒部材以外の場合や構造物としての劣化過程ではこれらの情報を参考に評価および判定つまり診断することになる。示方書に示された表-2 はその考え方を示したものであり、表中にある図-3 に基づく指標などを用い、外観上のグレーディングを劣化過程から評価および判定させるものである。このグレーディングの考え方は、落橋のような大事故が生じないように、極めて安全側であるが供用停止を現場の判断でできるようにしようとするものである。中間部での詳細な運用に当たっては、クリティカルな断面あるいは構造物中での部材の位置を念頭に置いての技術的判断が要求される。

補修工法は種々提案されているが、最も確実なものは電気化学的工法であり、脱塩と電気防食がある。脱塩はコンクリート中の塩化物イオンを外部に取り出すもので、脱塩後に塩分の供給がある場合には表面被覆等によってそれを抑制する必要があるが、ない場合はそのまま供用が可能である。これに対して電気防食は一般に陰極防食を指し、腐食速度が極めて小さくなるような電位にして腐食抑制を図るもので、通常は防食電流を流さない状態からの分極量によって管理する。一般には電流を供用期間中供給する必要がある。どちらの工法も効果はあるが、初期費用は少々高価でもある。しかし、

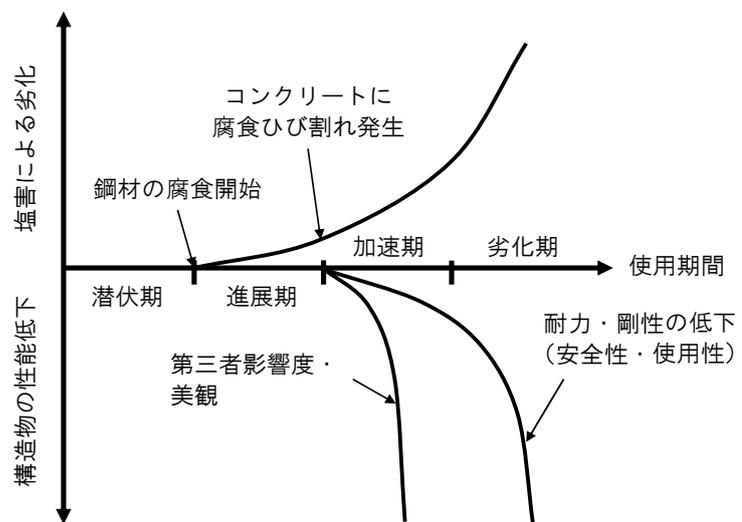


図-3 塩害による劣化進行過程の概念図の一例

表-2 外観上のグレードと性能低下の要因

外観上のグレード	劣化過程	耐力・じん性	変形・振動	剥離・剥落	ひび割れ・汚れ
グレードⅠ	潜伏期	—	—	—	—
グレードⅡ	進展期	—	—	—	—
グレードⅢ-1	加速期前期	—	—	・ひび割れ, 浮き	・ひび割れ, さび汁 ・剥離, 剥落
グレードⅢ-2	加速期後期	耐力やじん性の低下 ・鋼材の断面減少 ・鋼材とコンクリートの付着力低下	剛性の低下 ・鋼材の断面減少 ・鋼材とコンクリートの付着力低下	・剥離, 剥落	・鋼材の露出
グレードⅣ	劣化期	・剥落等によるコンクリート断面の現象	・剥落等によるコンクリート断面の減少		

LCC の観点からは他の補修対策に比べて安価であることが多く、今後の活用が期待されている。

### 2.3 PC グラウト

PC グラウトには PC 鋼材の防食と母体コンクリートとの付着という 2 種類の効果が期待される。付着については多少のグラウト不足があっても問題はないが、局所的なグラウト不足であっても防食は問題となる可能性がある。凍結防止剤使用下における道路橋では、横締め鋼棒や主ケーブルの腐食・破断などが報告されている。破断については、通常の塩害による断面欠損に加えて水素脆性によるものもあり、PC グラウトの充填不足に起因する場合はほとんどである。世界的に種々の劣化状況報告<sup>3)</sup>が発刊されつつある。イタリアにおける高架橋の崩壊(図-4)も PC 鋼材の腐食が大きな原因である。

PC グラウト問題は、プレストレストコンクリート(PC) 構造物のアキレス腱にかかわる問題であり、極めて重要であるにもかかわらずなおざりにされてきていた過去がある。土木技術者の得意分野である力学問題のみでは解決できず逃げてきていたのだ、と言ってよい。土木技術は総合工学であり、力学のみでは成り立たないという良い例だろうと思う。PC グラウト問題については、初めて広く全国的な調査をもとに報告された文献<sup>4)</sup>を参考にされたい。

初期の PC グラウトはブリーディングが極めて多く、多量のレイタンスの発生とともに充填不足個所が生じざるを得ないようなものであった。そのため、ノンブリーディングタイプのグラウトなどが開発された。点検手法にはグラウト充填に関する手法と PC 鋼材劣化に関するものがある。調査項目と方法を表-3<sup>4)</sup>に示す。最も確実な方法は削孔などによって充填や PC 鋼材の状態を直接知ることである。しかし、このような手法は削孔した個



落橋前



落橋後 (2018)

Polcevera(Morandi)viaduct(1964)

図-4 モランディ高架橋の崩落

表-3 調査項目と方法

調査項目	調査方法	評価内容
外観の変状	外観調査	PC鋼材の劣化の程度・範囲の推定をする。
PCグラウトの状態	放射線透過法	調査位置におけるPCグラウトの充填状況を推定する。
	打音振動法	直線配置PC鋼材(横締め等)におけるPCケーブル1本ごとのPCグラウト充填状況を推定する。
	広帯域超音波法	調査位置におけるPCグラウトの充填状況を推定する。
	インパクトエコー法	
	削孔調査	
PC鋼材・プレストレスの状態	放射線透過法	調査位置におけるPC鋼材の破断を特定する。
	漏洩磁束法	
	削孔調査	調査位置におけるPC鋼材の腐食や破断を特定する。
	残存プレストレス量調査 (応力解放法)	調査位置における残存プレストレス量を推定する。

所の情報しか得られないため、種々の非破壊点検法が提案されている。充填については、広帯域超音波法、放射線透過法、インパクトエコー法などがある。しかし充填不足があっても、環境条件によっては、鋼材は腐食しない。PC 鋼材の破断については放射線透過法、漏洩磁束法などがあるが、漏洩磁束法の活用が期待され、実際の破断を検出した実績も増えつつある。

### 3. 次なる世界

新型コロナウイルス禍が市民社会に与えた影響は極めて大きい。2020年4月7日に最初に発令された緊急事態宣言は断続的に発出され、最初の宣言から3年が経過しこの文章を書いている2023年晩春でもまだ完全には収束していない。このような感染症によるパンデミックは人間の意識にも影響を与える。例えば、14世紀半ばにヨーロッパで大流行したペストは、ペストから逃れるためフィレンツェ郊外に引きこもった10人の退屈しのぎの話という枠組みの「デカメロン」を生み、「デカメロン」は「カンタベリー物語」を生んだ。これらの物語はルネサンスの新しい文学を生み新しい意識を広めた。ルネサンスを花開かせたのである。感染症はいろんな分野に影響を与え、現在のコロナ禍はニューノーマルな社会を到来させると言われている。

#### 3.1 コンクリート界のニューノーマル

コンクリート界もまた大きく影響を受けている。しかし、コンクリート構造が社会を支える極めて重要なインフラであることは変わりなくまた再確認されたと言えよう。コロナは現在の市民社会が抱える大小の課題を白日の下にさらした。その中でも最も重要なものは豊かで強い国でなければ市民を救えないということだろう。豊かで強い国でなければ人々を健康な環境で生活させることはできない。感染症と戦うためにも、豊かで強い国を支える良質なインフラ、丈夫で美しく長持ちするコンクリート構造物が必要なのである。

いわゆるコロナ後の社会は種々のものが確実に変わってしまう。現に、非接触・非対面で社会活動を継続させていくために、様々な分野でデジタル技術が活発に使われるように

なった。密閉，密集，密接のいわゆる3密を避ける手段として，テレワーク，オンライン会議など，社会生活の方法が，DXの推進とともに大きく進化し，ウイズ・コロナつまりコロナとの共生として市民社会に浸透し始めた。これがニューノーマルと呼ばれるのである。これらの動きは，新型コロナウイルス対策というよりも本来の進む方向がコロナにより加速されたものだと言ってよい。

様々な分野でデジタル技術，DXが市民社会に浸透し始めた。言い換えれば，サイバー空間での作業が増大したのである。このことは，Society 5.0に向かって大きく動いたと言ってよい。点検にドローンやロボットをはじめとする器具を用い，結果をAIで解釈しARなどで確認し，診断に用いる試みが行われるようになってきている。しかし，その結果を享受するためには，技術者が現場でフィジカルな技能を磨くことが必須であり，今こそ本来の人間の知恵の出番なのである。

### 3.2 2050 カーボンニュートラル

我が国は2050年カーボンニュートラルを達成すると宣言している。ニューノーマルから外すことのできない項目である。カーボンニュートラルは単なる環境対策ではなく，産業・社会構造の変革と考えるのが良い。DXはその道筋の一つである。基本的には，エネルギー消費を減らし，エネルギー当たりのCO<sub>2</sub>排出原単位を小さくすることが要求される。コンクリートにおいては混和材の利用，CCU（Carbon capture and utilization）材料の利用，コンクリート中へのCO<sub>2</sub>吸収などに加えて工期短縮などが図られる。そのためには，SDG'S・脱炭素化：CO<sub>2</sub>排出量の削減，CO<sub>2</sub>吸収・固定量の向上，評価方法の確立とルール化，など適切な価値体系の創出が要求される。

カーボンニュートラルの動きの中でインフラ，特に道路施設は種々の付加的な対応が要求される。EUの方針変更はあるものの，急激に増大するであろう電気自動車（EV）をサポートするためには道路施設の中での太陽光パネルなどによる発電，そのEVへの無線給電システムの開発などが期待されている。加えて，カーボンニュートラルそのものとは若干次元が違うが，車の自動運転化が普及すれば自動運転を可能とする情報供給が可能なスマートな道路の開発も進むだろう。さらに自動運転は，道路施設のアミューズメント施設化も可能であると私は考えている。

その他，自己治癒型材料，補修補強材料，自己診断型材料，ロボット施工用材料，3Dプリント用材料，プレキャスト製品用材料（プレキャスト製品は，地方整備局単位で具体的な検討が進んでいる），鉄筋の結束や溶接，コンクリートの表面仕上げや吹付，資材搬送，清掃などのロボット化，などの利用が期待されている。しかし，インフラとして最も有効な対策は，長持ちすることであり，それを支えるのが，サイバーインフラモデル，DXさらにはSociety 5.0と考えて良い。

### 3.3 サイバーインフラ

サイバーインフラモデル，デジタルツインなどサイバーモデルが種々提案されている。「国土交通データプラットフォーム」ではBIM/CIMと3次元点群データの表示・検索・ダウンロードが可能であり，種々の利用が試みられている。阪神高速道路でもサイバーインフラモデルが作成されつつある。しかし，先進的な計測・点検技術で得られた値と構造物の性能との関係は必ずしも明確ではなく，本来必要な時間軸での評価ができていない場合が多い。しかも，シミュレーション技術がそのまま定量的表現として信じ込まれ，外観は

詳細であるが中身は粗雑な場合が多くみられるのも実態である。評価に対する保障が必要であって、性善説は成り立たない。

しかも、先進的な計測・点検・シミュレーション技術に人間センサ（スマホ）を利用することによって、サイバーモデルさらにはメタバースが可能である時代には、技術者として“どうなるかではなく、どうすべきか”を基本とすることが益々必要である。このモデルは技術者教育にも用いることができるであろう。ここでは、構造物の劣化モデルを把握した、現場（フィジカル）に裏打ちされたサイバー、足が地面についての仮想時空間が必要であり、成立させなければならないのである。

#### 4. 次の世代を

維持管理において現在三つの不足（財源、人材、技術力）が指摘されている。しかし、種々の場面で人間が関わる意義を述べたように、最も重要であるのは人材である。特に土木技術にとっては極めて重要である。いまこそ本当の技術者が要求されているのである。「すべきである」と指示された場合、その理由から議論は始まるが、自分で「したい」あるいは「すべき」と思った時はその理由さらには具体的な方法の道筋が見えている場合がほとんどであると聞く。自分から思うことのできる技術者の養成が要求されているのだ。そのためには、維持管理技術者に、名誉、対価と喜びがともなわなければならないと考えている。これは技術者が育つための最低限の条件である。

インフラは全て重要なものであるが、一様に重要なのではなく、軽重がある。極めて丁寧に計画・設計・施工・維持管理すべき構造物、部材もあれば、それほど丁寧には対応する必要のないものもある。場合によってはトリアージし廃棄することも必要となる。したがって優先度があり、対象とするインフラをどのように扱うかを示す時空間シナリオを設定する必要がある。ライフサイクルマネジメントは維持管理技術者による適切なシナリオがあってこそ始めて意味を持つのである。

コンクリート構造物はインフラを構成する主要施設であり、保有する性能を発揮して要求される機能を果たすことが期待されている。適切に設計・施工・維持管理した場合、コンクリート構造物は市民社会を“丈夫で美しく長持ち”させる。しかも、コンクリートに関わる開発は現在も極めて活発であり、それらを用いた総合システムであるコンクリート構造物が発揮する性能の向上が強く期待されている。そのような今、単に現在手に入れられる示方書に盲目的に従うことは示方書の本来の思想に反している。真の技術力ではない。示方書は単なる基礎の見本であることを知って次の一步を進めることこそ示方書の思想にかなうことなのである。

現在、インフラストックの増大にもかかわらず、ベテラン技術者の高齢化・引退は急であり、若年・初級技術者の早期技量引上げが求められている。しかも、維持管理業務の質的・量的な増大と高度化、業務遂行のスピードアップの社会的要請があるのが現実である。そのため、経験少ない若年・初級技術者に向けて、維持管理業務の支援用に、維持管理の各種シミュレーション用に、また維持管理の自己啓発用に、デジタル参考書を提供しようという試み（図-5）<sup>5)</sup>も実行されている。来るべき時代を担うシナリオデザインを創造しようとする世代の育成が重要なのである。阪神高速グループがそのような野心的な若い技術者を育てているかどうかを自身問いかけて欲しいと思う。

本文が阪神高速道路さらには我が国における良質なコンクリート構造物，豊かな市民社会に寄与することを願っている。



図-5 教育ソフト・橋の匠

#### <参考文献>

- 1) 大西有三：デジタル化，i-Construction，建設DXについての考察，阪神高速グループ技報，Vol.30, 2022.5
- 2) 高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会，第6回（2022年3月3日）資料，<https://corp.w-nexco.co.jp/activity/safety/koushin/conservation.html>
- 3) 例えば，Federal Highway Administration: Corrosion-Induced Durability Issues and Maintenance Strategies for Post-Tensioned Concrete Bridges, FHWA-HRT-22-090, 191p.2022.9
- 4) プレストレストコンクリート工学会：既設ポストテンション橋のPC鋼材調査および補修・補強指針，PC工学会，2016.9
- 5) 国土交通省近畿地方整備局新都市社会技術融合創造研究会 産学官連携プロジェクト「橋梁の延命化シナリオの策定等に関する研究プロジェクト」：橋の匠，<https://bridge-scenario.or.jp/>，2013～