

# インフラの維持管理更新

## — 道路系，橋梁を中心に —

藤野 陽三\*

わが国の道路橋を中心にインフラの維持管理更新ならびに高速道路の大規模改修・更新の経緯について述べる。これと関連して、平成 26 年度からはじまった内閣府総合科学技術・イノベーション会議の主導のもとで、5 年計画で行われている戦略的イノベーション創造プログラム（以下、SIP）のうち「インフラ維持管理更新マネジメント技術」での研究開発の状況についても述べる。道路橋は 50 年 100 年という長期にわたって使われるものであり、大規模更新・補修が 50 年程度経過すると必要になること、それを怠ると新設コストを大幅に上回る補修費が発生することをアメリカの過去の事例は示している。総額 800 兆円を優に超えているといわれるわが国のインフラも経年 50 年を迎えるものが今後急増することから大規模更新がさまざまなインフラにおいておこなわれることになると思われる。そのとき適切な点検・診断・補修・補強・更新技術が適用できるように、今から技術開発しておくことは社会の経済的負担を大幅に低減するためにきわめて重要にである。SIP インフラはその意味でも重要な研究開発の例になると思われる。

キーワード：インフラ，道路橋，維持管理，更新，戦略的イノベーション創造プログラム（SIP），研究開発

### 1. はじめに

私は、維持管理更新を昔から専門としてきたわけではない。今から 40 年近く前に「橋」の分野に入って、長大橋の建設が当時盛んなこともあり、風による振動とか振動制御の研究をしばらく楽しんだ。1990 年台の中頃、研究室の先輩で、東大生産技術研究所でライフライン地震工学を専門とする片山恒雄先生が書かれた解説論文「建設の時代から保守の時代へ」<sup>1)</sup>を読み、ショックを受け、自分の研究の方向も徐々にウエイトを保守関係にシフトして行った。

白紙の状態から始まる新規建設では設計などに際しさまざまな検討が行われるが、基本的にはパラメトリックを変えて変化を見る、いわゆる正解析が主流である。それに対し、維持管理となると、すでに現実におかれた構造物があるので、さまざまな情報から既存構造物の状態を評価する逆解析が重要となる。技術的には、逆解析の方が格段に難しく、それだけに面白いこともいろいろな場面であらうことができた。モニタリングの研究にこの 20 年ほどかなり力を入れてきたところ、3 年前に、内閣府総合科学技術・イノベーション会議で、後述の SIP インフラ維持管理更新マネジメント技術というプログラムが始まり、そのプログ

ラムディレクター（PD）を拝命した。維持管理更新の研究開発に本格的に関与するようになったのである。橋を中心にインフラそのものにも、またインフラ関係者にも大変お世話になっており、これまでの御恩を返せれば、という思いで PD の仕事に励んでいる。ここでは私の維持管理更新についての思い、現在の活動を少し紹介させていただこうと思う。

### 2. アメリカでの道路橋のインフラ維持管理

誰でも建設には熱心だが、維持管理となると後手に回りがちになる。自然なことである。

鉄道の分野では、わが国の国鉄や今の JR がそうであるように、軌道、鉄道構造物だけでなく、車両や運転まですべてを鉄道会社が管理し、料金を徴収するビジネスなので維持管理の意識も自然と生まれる。事実、鉄道の維持管理は歴史、伝統もあり、今でもしっかりしている。

これに対し、道路は国とか地方自治体のもので基本的には無料であり、利用者である自動車を管理するわけではなく、繋がりが薄い。担当している人にも維持管理の意識が生まれにくい状況にある。

アメリカでも 1960 年台までは維持管理の意識はまったくなかったようであり、それを変えたのは 1967 年のシルバー橋の事故であった。1928 年に完成した同橋は、吊チェーンが腐食のために切れ、金曜日の夕方だったため、46 名の生命を失うこととなった。今に至るまで橋梁界では史上最大の事故である。その後もアメリカでは橋の事故が続き、1970 年台前半には 2 年に一度に目視点検が義務化された。点検データをベースに経験的マネジメントが展開されていくことになる。

私の近い友人の一人に Bojidar Yanev 博士という方がいる。彼と知り合ったのもインフラの維持管理に関心を持ちはじめた 1990 年台中頃で、つくばでの土木研究所が主催



\* Yozo FUJINO

横浜国立大学  
先端科学高等研究院  
上席特別教授

した Bridge Workshop であつたと思う。私の研究の方向に影響を与えた方の一人である。これまでも維持管理のポイントや“つば”を数多く教えていただいている。彼は 1980 年台半ばにニューヨーク市 (NYC) 交通局に入り、当時荒廃していた NYC の橋梁のレトロフィットを任せられることになる。橋梁現場にもマメに通い、彼は「自分には NYC の橋の泣き声が聞こえてくる」という。痛みが分かるほど現場に行っているということである。10 年ほど前に Bridge Management という本<sup>2)</sup>を出した。素晴らしい内容の本なので、若手の大学の先生、エンジニアとその訳本「橋梁マネジメント」<sup>3)</sup>を 2009 年に出版した。その本には原本にはない副題「技術・経済・政策・現場の統合」をつけた。これがヤネフさんのもっとも主張されたことだと思ったからである。工学は真を追及する場面が多いが、マネジメントで大事なことは決定 (決断) することで、ブリッジマネジメントは両者をバランスよくやることだと説いている。

ヤネフさんの本からの「橋梁の健全度と経年の関係」<sup>2)</sup>を図 - 1 に示す。NY 州のデータも含めて、ヤネフさんが解析した結果である。それによると、NYC の橋梁の健全度は 30 年ぐらいで 7 点 (まったく健全) から 4 点 (使うには問題ないレベル) 近くに下がるが、補修が入るので横ばいの傾向を示す。補修の影響を取り除くと、50 年から 60 年で使えない状態 (健全度 2 点) に平均的には達し、できの悪い橋梁では 30 年のオーダーでその域に達するというのをこの図は示している。膨大な点検データをもっているゆえに得られる貴重な結果である。前述のシルバー橋の事故も経年ほぼ 40 年で発生しており、過去の大きな事故を調べると 40 年前後が多いのに驚く。笹子トンネルの事故も完成後はほぼ 40 年であつたし、劣化が原因ではないが設計ミスが原因であつたミネアポリスの IW35 の橋梁も完成後はほぼ 40 年であつた。40 年経過するといろいろな問題が顕在化するということを示している。

アメリカのニューヨーク市イーストリバーにはブルックリン橋、マンハッタン橋などの 1800 年台終わりから 1900 年台はじめに架けられた大きな吊橋がいくつもある。これらは維持管理がまったく何も行われない状態が 1970 年台まで続いた。多くの橋は通行料が無料で修繕費はどうしても税金でまかなわなければいけないことになる。税金から維持管理の費用を出すというのはなかなか難しいところがあり、その後もほとんど何もしない状態が続いたことになる。その結果ブルックリン橋では 460 M\$ (500 億円相当)、マンハッタン橋では 780 M\$、ウイリアムズバーグ橋では 1 000 M\$ の大規模補修費がかかると言われている。これらの金額は新設するより高つくことになる。一方、1931 年にできたジョージワシントン橋は通行料を取るため維持管理の補修の費用を捻出することができた。そのため 1992 年から大規模補修を行い、現在でも非常に良い状態が続いている。ヤネフさんの Bridge Management の表紙を同橋が飾ったのは維持管理の優等生だからであろう。橋などのインフラは大規模補修を含め適切な維持管理を行っていれば、100 年以上健全な状態で保持でき、それを怠り、

何もしないでいるとあとで大きなつげが回ってくるということなのである。

ヤネフさんからは、アメリカでは道路系のインフラの維持管理では日本より 10 年から 20 年も先輩なのだから、先輩であるアメリカの失敗例、成功例の経験をよく学んでほしいといわれている。海外での事例をよく勉強するという意味においても、皆さんに心していただきたいと思う。

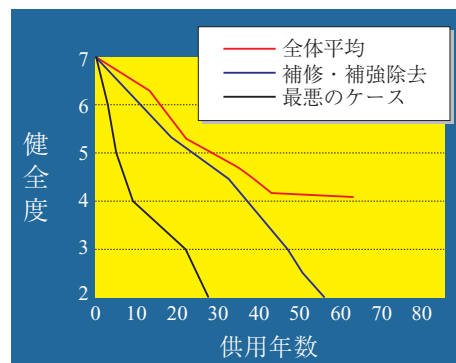


図 - 1 NY 市の橋梁健全度と経年の関係

### 3. わが国の高速道路の維持管理更新

本特集号にも記事が載るように、ネクスコ系や都市高速の大規模更新が現在進行中であるが、それは、国土交通省の「高速道路のあり方検討有識者委員会」(座長 寺島実郎) が 2011 年 12 月に出した中間報告に拠っている。そこでは現行の償還計画に含まれていない更新や道路の機能強化、将来の維持管理などへの対応について償還期間の取扱いを含めた検討が必要と記述され、実際の検討が始まったのである。首都高速道路(株)に、2012 年 3 月に関連委員会が設置された。実は、首都高速道路(株)では遡ること 8 年前の 2004 年に、「首都高速道路の管理の今後のあり方について」という委員会 (委員長 中村英夫) が設置され、私も委員として参加し、更新改築についての議論もあったように記憶しているが、報告書は外部には出さず内部資料として扱われた。このように首都高速では準備がある程度、整っていたので、最初に委員会を設置できたのである。ネクスコ 3 社の検討委員会、阪神高速(株)の検討委員会がともに 2012 年 11 月にスタートした。笹子トンネルの事故が起きたのは、その直後の 2012 年 12 月であつた。その翌月 2013 年 1 月に首都高速での検討委員会の報告書が出された。それぞれの検討委員会は技術的な検討が主であつて、その後、国土省との検討のなかで、予算規模が確定された。

2000 年から毎年数%の割合で公共投資が継続的に確実に減っていく状態が始まった。インフラにとり大変、厳しい時代が 2010 年までの 10 年であつた。2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震がきっかけかどうかはわからないが、インフラが常時そして災害時にも健全に機能することの重要さを社会が徐々に認識していったおかげではないかと思っている。笹子トンネルの事故も大きく影響したと思われるが、2013 年、2014 年に出された首都高速、ネクスコ 3 社、阪神高速、本四高速から大規模更新の報告書が社

会から受け入れられたのはこのような背景があったと思っている。

インフラは道路の占める割合が高いが、それ以外にも上下水道、港湾、空港、河川設備等々さまざまなものがあり、現在では総額は 800 兆円をゆうに超えているといわれている (図 - 2)。インフラは世界的な経済学者である宇沢弘文が 40 年前から提唱してきた「社会的共通資本」<sup>4)</sup> という概念の 3 つの要素の一つを占める。今、この社会的共通資本を GDP (国内総生産) に代わる富の指標 IWI (Inclusive Wealth Index) にしようとする動きが国連大学を中心に行われている<sup>5)</sup>。GDP は年あたりのフロー、消費を示す部分が多いのに対し、自然資本、人工資本 (インフラを含む) と人的資本という、未来に渡せる、われわれの財産で「富」を測ろうとする IWI はストックを重視する考え方である。よりその重要性が評価されつつあるインフラであり、インフラによって異なりはあろうが、今後、大規模更新・改修がさまざまなインフラの分野で議論されることになる。伸び悩む GDP のなかで、いかに効率的な維持管理を行うかは、正しくわれわれの技術開発とマネジメント力にかかっている。

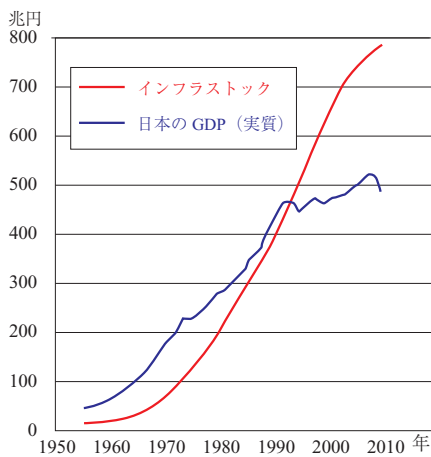


図 - 2 増え続けるインフラストック

#### 4. 戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) SIP インフラ

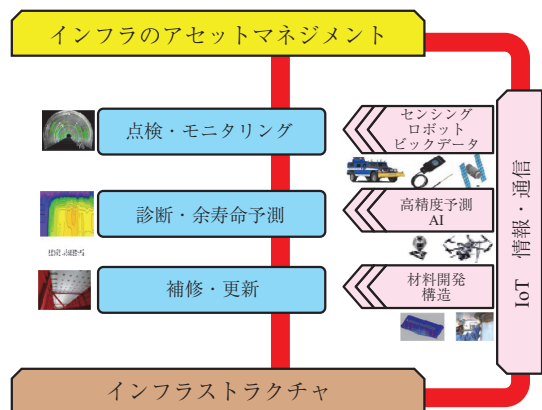
わが国の科学技術の司令塔である内閣府総合技術・イノベーション会議 (CSTI) (議長 安倍晋総理) は平成 26 年度 (2014 年) から、CSTI としては初めて内閣府自身の予算で国家的重要課題に取り組むことを決め、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) をスタートさせた。2014 年度から始まった 10 課題にはエネルギー、燃焼 (エンジン)、パワーエレクトロニクス、革新的構造材料などと並んで「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」が選ばれた。インフラはこれまで国土交通省や農林水産省に任されてきたが、笹子トンネルの事故が与える社会心理的影響の大きさのなかで、インフラの維持管理更新に国を挙げて取り組む必要性を認識したものと思われる。具体的には、ICT に代表されるさまざまな先端技術を活用して、より効率的でコストパフォーマンスのよいインフラマネジ

メントの展開を企図したのである。

図 - 3 にアセットマネジメントのフローを示すが、点検・モニタリング、診断、余寿命予測、補修・補強の各ステップに先端技術を投入し、土木インフラ技術と摺り合せ、実際に使える技術、システム (実装) とするのが SIP インフラの狙いである。私はそのプログラムディレクター (PD) の任にある。

SIP は 2014 年秋から実質 4 年半の計画でスタートした。国土交通省直執行のものもある。ほとんどの課題は公募で選ばれており、その数は 60 にのぼる。国もしくは国系の研究所が 12 課題、大学が 16 課題、民間が 32 課題で参加機関の総数が 255、参加メンバーは 1 500 名のオーダーである。おそらく、土木系以外のメンバーが半数を越えると思われる。これだけの数の研究開発者が参加していることを嬉しく思い、また責任の大きさも感じている。予算はこれまでのところ年あたり 30 億円あまりである。

テーマを大きく分ける (図 - 4) とインフラのアセットマネジメントを回すのに必要な、主に材料をベースにした ① 構造材料・劣化機構・補修・補強、計測系技術が主役となる ② 点検・モニタリング、点検を支援する ③ ロボット、点検やセンサーからのビッグデータを処理、解析する ④ 情報・通信の 4 つの基盤技術とこれらの技術を利用して展開される ⑤ アセットマネジメント技術の 5 つから



世界に先駆けた「超スマート社会」の実現 (Society 5.0)

図 - 3 増え続けるインフラストック

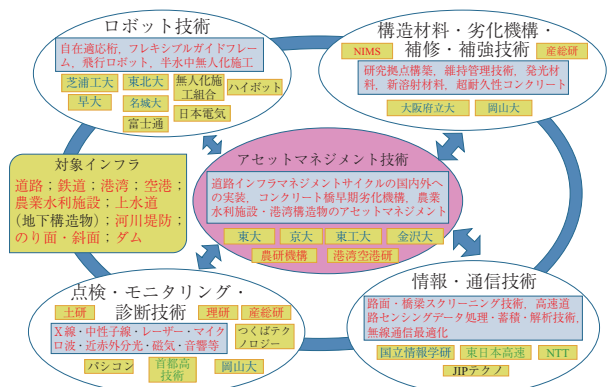


図 - 4 インフラ維持管理・更新・マネジメント技術の構成



構成されている。

古市公威先生が1915年の土木学会第一回総会での会長就任演説において「研究の範囲を縦横に拡張せられんことを。しかして、その中心に土木あることを忘れられざらんことを」と述べられている。古市先生のこの言葉にはイノベーションの勧めを私は強く感じ、とても好きな言葉の一つであり、図-4のように土木が深くかわるアセットマネジメントを中心に置く構図にしたかったのである。

## 5. SIPで展開されている技術の紹介

さまざまな技術開発が今、精力的に行われているが、そのなかからいくつかを紹介しよう。

### 5.1 目視・打音検査の自動化・合理化

点検技術の基本である目視・打音検査に相当する信頼性・効率に優れた技術が開発されれば、現在の点検需要に対して、きわめて有効である。

そこで、画像計測を用いた損傷の自動検出や、音響解析に基づいた打音の評価に関する研究が進められている。図-5は、東急建設チームが開発している、自走型可変構造システムによるトンネル点検システムで、画像計測によるトンネル内のクラック検出の例である。図-6は、NECチームによる打音システムであり、ドローン搭載を想定して、打音発生装置と音響解析システムをコンパクトに一体化している。このように、画像・音響計測は、現場を直接改善する技術として技術開発が進められている。

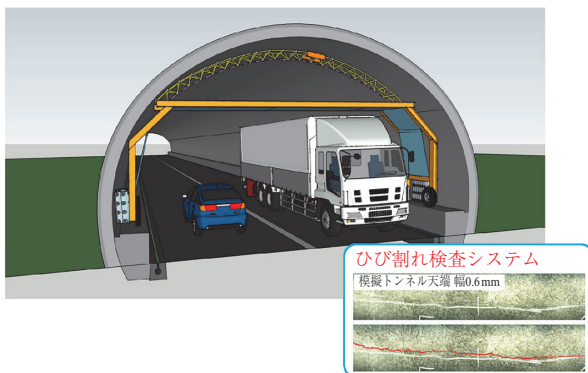


図-5 東急建設チームの画像解析

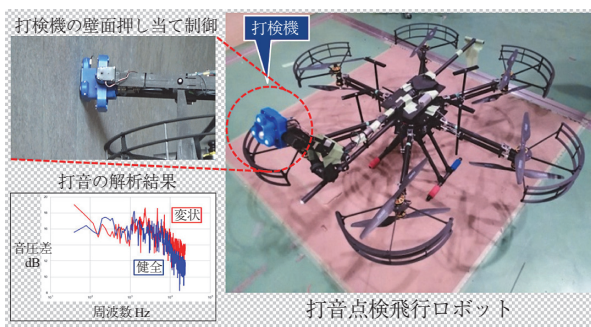


図-6 NECチームの打音システム

### 5.2 新たな計測原理への挑戦

近接目視は、形状等表面状態の異常の検知、打音検査は

内部欠陥の検知であるとも考えられるから、それらを異なる計測原理で実現する技術開発も進められている。図-7は、産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門チームによるものであるが、X線の散乱を計測することで、鉄筋コンクリート内部の鉄筋の腐食の検知を目指している。通常のX線撮影と異なり、散乱を利用していることから、同じ面にX線源と検出器を設置できる。したがって、設置が制約される実際のインフラ現場の条件にも適合し得る手法である。土木研究所構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ 石田 雅博 上席研究員らのチーム 土木研究所チームではメンバーの理研グループと図-8に示すように中性子線計測を実用化し、従来、計測ができなかったコンクリート構造物中の水分や空隙の検出を実現する開発を進めている。

このように、従来技術に比べて、はるかに高度で高精度のインフラの劣化に関する情報が得られるようになりつつある。それに対して、現在の土木工学はこのような情報が得られることを想定しておらず、当然、現行の点検要領等各種基準にも評価項目として含まれていない。実用化にあたっては、構造物の性能との関係の明確化と評価の基準化が必須であり、今後、その確立に向けて、注力していく予定である。

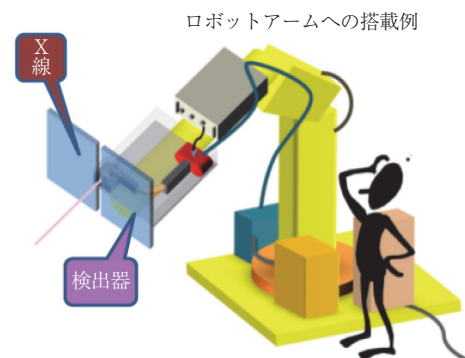


図-7 産総研チームのX線システム

### 小型中性子源による橋梁内部の可視化技術

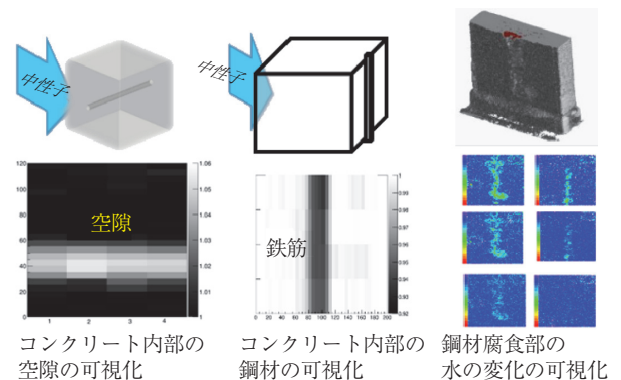


図-8 土木研究所+理研チームの中性子線計測

### 5.3 モニタリング技術

センシング技術に加え、ICT技術の進展を受けて、長期的かつ継続的に構造物の監視を行い、その変化から異常を

検知しようとするモニタリングも注目を集めている。JIPテクノサイエンスチームでは東京大学長山准教授や鈴木助教らと協力して、多様な構造物を対象とした高精度のワイヤレスセンサの開発も進めている。

#### 5.4 効率化を支える研究開発

このように、高度な定量的データが取得できる多彩なセンシング技術が実用化に近づいている。これらを、維持管理の現場の革新に結びつけるには、インフラは広域に存在し、また、それぞれの規模も大きいことから、移動手段・アクセス手段を同時に効率化する必要がある。その一つが最近注目を浴びているマルチコプターの活用である。図-9は東北大チームの例であり、画像計測システムを搭載して、点検業務の高度な自動化を目指している。特徴的なのは、機体がフラーレン構造の「籠」に囲まれていることで、それにより、衝突の際の安全性・飛行性を画的に向上し、維持管理上問題となる狭隘箇所への進入を実現しようとするものである。マルチコプターは風に弱いものが多かったが、この1年の努力で改善により瞬間風速で10 m/s程度までは安定した飛行が可能になってきた。

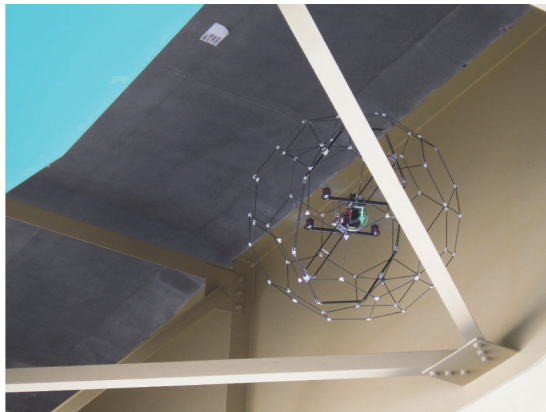


図-9 東北大チームのマルチコプタ

また、インフラの場合、道路、鉄道など線状なので、走行車両に計測機器を搭載することで、交通を阻害することなく、また、迅速に広域を点検する、移動体モニタリング技術も有望である。図-10は、パシフィックコンサルタンツチームによるトンネル検査装置を搭載した車両の開発の例である。図-11は、東京大学大学院工学系研究科水谷助教らの東大チームが開発している車載のレーダーによって、路面下の橋梁床版の損傷を高速走行しながら検知するものである。高度な波形処理を施すところに従来の手法との違いがある。

人工衛星搭載の合成開口レーダー SAR や走行車両など高速な移動体によって広域を高い頻度で安定的に計測することができれば、移動体計測によって異常が検知された箇所を重点的に高度な計測技術で診断するなどの段階的なスクリーニングも可能となり、さらなる合理化・効率化が期待される。

このような検査技術の高度化は、同時にこれまでにない大量のデータをもたらす。しかも、データの一つ一つが、それぞれインフラの劣化状態を反映した貴重なものであ

る。そのような大量でかつ高質のデータの効率的処理も大きな課題である。インフラ維持管理の特性やニーズに適した情報技術体系を構築する必要があり、そこで、各種センサや移動手段をネットワーク化してIoTプラットフォームとして運用するための研究開発も並行して進めている。



図-10 パシフィックコンサルタンツチームのトンネル検査車両

車載型地中探査レーダーの床版・舗装内部探査への応用



図-11 東大チームの地中レーダー搭載車（時速80 kmの高速で地中からの反射波の非接触計測が可能）

インフラアセットマネジメントは図-3に示すように点検・モニタリング、診断・余寿命予測、補修・更新という流れが基本であるが、もっとも難しいのは、診断・余寿命予測であることは、医学の場合を考えてみても、容易に想像がつくであろう。最近、東大の前川宏一先生チームは、RC床版の移動輪荷重による疲労損傷を対象に実験を行わずとも、解析により予測可能であることを示しつつある<sup>6)</sup>。この技術が確立すれば、正しくアセットマネジメントが回るための最大の課題・難題が解決されることを意味しており、大いに期待しているところである。SIPインフラを始めてはや3年近くが経過し、その成功につながる大きな成果が生まれはじめていることを嬉しく思っている。

## 6. おわりに

1990年台半ば、次の時代のインフラはいかにあるべきかを議論する場をもったことがある。そこには安西祐一郎（いずれも当時 慶応大、情報）、故吉田和夫（慶応大、機械）、石川正俊（東大、計測）と土木からは私が参加した。そのときの提案は、「知的社会基盤の構築」というものであった。スマートインフラともいえるものである。これは、人間になぞらえれば、防御系（皮膚、骨格）や循環系（血

液)に対応する、防波堤や建物、ライフラインはあるが、インフラにもセンシングしてアクションを行う神経頭脳系を入れていく、というのである。あれから20年経過したいま、その知的社会基盤の構築が国家プロジェクトSIPとして進められつつあることを感無量に思う。

SIPでは、単なる技術開発を超えて、イノベーション、さらには社会変革を視野に、社会実装を進めることが強く求められており、本文からもお分かりいただけるように、インフラ維持管理現場での実証研究を重視し、推進してきた。今後は実用化・ビジネス化に焦点が移る。SIPの成果を地方にも浸透させたく、昨年度から北は北海道から南は沖縄まで、大学を中心に8つの地域拠点を配置した。社会が続くかぎり、インフラ維持管理には終わりが無い。継続的に改善・革新が行われる仕組みづくりもまた重要であり、インフラを資産と考える「アセットマネジメント」の枠組みの研究を並行して進めている。

第5期科学技術基本計画<sup>7)</sup>の超スマート社会サービスプラットフォーム(Society 5.0)の構築にもインフラは重要なエレメントとして位置付けられている。インフラは全国津々浦々の社会経済活動の基盤であり、そのためには持続的なインフラ維持管理の実現が欠かせない。SIPはそれに貢献することが責務でもあり、それが次世代への富に繋がる。今後とも皆様ご批判とご理解・ご協力が賜れば幸いである。

なお、紙面の都合で、SIPインフラ維持管理研究のごく一部しか紹介できなかった。詳細については、ホームページ<sup>8)</sup>を参照されたい。

私は、若いときは新設の長大橋で計画、設計、施工に関わる研究関連プロジェクトで存分に楽しみ、とくにこの15年は維持管理更新でべつの楽しみを味わせていただいている。大学に籍を置きながらも実務にもいろいろ関係でき、私はまったくラッキーであり、お返しをしないと罰が当たると思っている。

#### 参考文献

- 1) 片山恒雄:「建設の時代」から「保守の時代」に、技術と経済、pp.6-10, 1994.8
- 2) Bojidar Yanev: Bridge Management, Wiley, 2007
- 3) 藤野陽三(監訳):橋梁マネジメント, 技報堂出版, 2009
- 4) 宇沢弘文:共通的社会資本, 岩波新書 696, 2000
- 5) 植田和弘他訳 武内和彦監修:国連大学 包括的「富」報告書 2012, 明石書店, 2014
- 6) Maekawa, K 他: Data assimilation with coupled hygral-mechanistic model for fatigue life assessment of RC bridge decks by using non-destructive inspection methods, Journal of Disaster Research, (accepted for publication)
- 7) <http://www8.cao.go.jp/cstp/tyousakai/kihon5/chukan/index.html>
- 8) <http://www.jst.go.jp/sip/k07.html>

【2017年2月3日受付】



刊行物案内

## 会誌「プレストレストコンクリート」講座集 2016年1月

本書は、本工学会が発行する会誌「プレストレストコンクリート」に掲載された連載記「講座」のバックナンバー(1963～2014年)を系統的に整理して単行本化したものです。

「講座」では、プレストレストコンクリートに関連する材料、設計、施工、維持管理、数値解析等、多岐にわたる技術を取り上げ、各分野の専門家による当時の最新技術の紹介や適当な専門書がないテーマの解説がされています。この機会に、過去の貴重で良質な連載記事「講座」を体系的な知識習得にお役立てください。



#### 冊子の構成

講座集 1.	建築編
講座集 2.	施工・品質管理編
講座集 3.	施工・品質管理編
講座集 4.	設計編
講座集 5.	材料編
講座集 6.	PCに関する試験および測定入門講座編
講座集 7.	PCの新しい材料入門講座編
講座集 8.	FEM解析・耐震解析・温度応力解析編
講座集 9.	よくわかる補修・補強・非破壊検査編
講座集 10.	プレストレッシングの基本編
講座集 11.	わかりやすいPC技術編

セット販売価格(全11冊 化粧箱入)  
定 価 27,000 円+税/送料 1,500 円  
会員特価 22,000 円+税/送料 1,500 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会