



坂井 康人

京都大学経営管理大学院
道路アセットマネジメント政策講座 特命教授

道路ネットワークのデジタル化とデジタルインフラアセットマネジメントへの期待

はじめに

昨今、内閣府は第5期科学技術基本計画において、IoTやAI、ロボット等の技術により社会の変革を起こす社会、つまりSociety5.0を目指すべき未来社会の姿として提唱している。

国交省ではIoT・AIなどの革新的な技術の現場導入や3次元データの活用などを進めることで、建設生産システム全体の生産性向上を図ることをi-Constructionとして推進している。このような背景の中で、現実世界（フィジカル空間）でのセンサーネットワークが生み出す膨大な観測データなどの情報について、サイバー空間の強力なコンピューティング能力と結びつけ数値化し定量的に分析することで、これまで「経験と勘」に頼っていた事象を効率化し、より高度な社会を実現するために、あらゆる社会システムの効率化、新産業の創出、知的生産性の向上などを目指すサイバーフィジカルシステムやSociety 5.0といった概念が広まりつつある。都市高速道路である阪神高速においても橋梁やトンネルといった道路構造物や管理施設、さらには車両交通、エネルギー、環境といった現実世界にある様々なデータをロボットやセンサー技術で収集・蓄積し、サイバー空間でAIや大規模データ処理技術を駆使して分析・知識化を行い、そこで創出した情報・価値をもとに、人が最適な意思決定を行っていく次世代のインフラマネジメントをサイバーインフラマネジメントとし、その実現に向けた取り組みを行っている（図1）。本稿では、サイバーインフラマネジメントの概念と具体的な取り組み内容および今後のデジタルインフラアセットマネジメントへの期待について紹介することとしたい。

道路ネットワークのデジタル化と災害時のシミュレーション

阪神高速では1995年1月に発生した兵庫県南部地震により甚大な被害を受けて以降、橋梁の落橋・倒壊対策はすでに完了しているが、大規模地震時に路面に大きな段差が生じて緊急輸送の支障とならないよう桁間連結や支承の補強や取り換え、段差防止装置の設置などを行う対策を推進しているところである。これらが

現状未整備の掛け違い橋脚上の支承部において大地震により段差が生じた場合であっても、速やかに緊急輸送路としての機能を回復するために段差復旧資機材の配備計画を行う必要がある。

そこで、これまで蓄積してきた道路構造物の設計図面や計算書等に基づき、阪神高速全路線のうち橋梁を対象に同じ性質・挙動を示すネットワークモデルをサイバー空間上に構築、再現し（図2）、南



図1 サイバーインフラマネジメントの概念

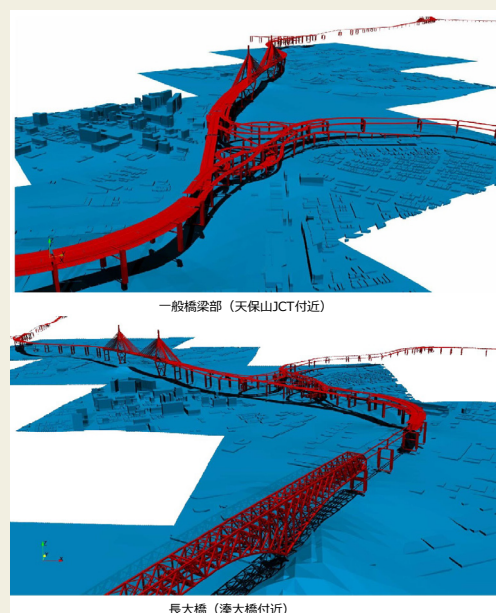


図2 デジタルツインモデルの一例

海トラフ地震や上町断層帯を震源とする地震等を想定して（図3）、デジタルツインモデルを用いたシミュレーションを実施した。シミュレーションにより得られた被災度判定分布を踏まえ、重点的に着目すべき路線、橋梁を明らかにできるなど、耐震対策や緊急点検計画の合理化に役立てられると同時に、地震後にかけ違い部で生じる段差量を推定することで、段差応急復旧資機材の配備計画検討の際の支援ツールとしての活用が期待できる（図4）。

サイバー空間に構築するデジタルインフラアセットマネジメントへの期待

サイバーインフラマネジメントで構築するデジタルアセットマネジメントに期待される例として3つ紹介する。

（1）災害時におけるシミュレーションによる被災度判定

大地震発生直後においては、緊急点検等の初動活動を実施し、応急復旧や通行再開路線の迅速な判断・対応が求められる。阪神高速が保有する地震計データに加えて、気象庁の地震計測震度データも取り込み地震被災度を推定する地震被害予測システムを構築し、地震発生直後の阪神高速ネットワークの被害状況をリアルタイムで推定することに取り組んでいる。ただし、現状では構造物の部材の詳細な被災状況は点検時に現場で確認してはじめて把握でき、少ない時間のなかで被災エリアの構造物を順に確認していく必要がある。

そこで、地震直後に橋脚天端や地表に設置した加速度計から加速度波形を即時に抽出し、デジタルツインモデルの各質点に入力して路線レベルでの影響を加味したシミュレーションを実施することで、橋梁の部材の耐力超過箇所を抽出する（図5）。これによりシミュレーション上で損傷箇所と損傷程度が推定され、現場点検時に注意して確認すべき部材や橋梁としての構造安全性の確認が可能となる。

震災復旧は図6に示すように時系列目標を定めているが、情報収集の前段階でシミュレーションを開始することで、災害発生時に組織される災害対策本部が行

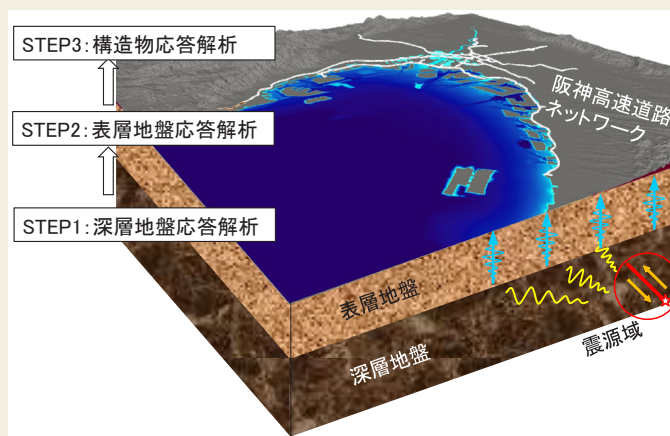


図3 地震応答シミュレーションの方法

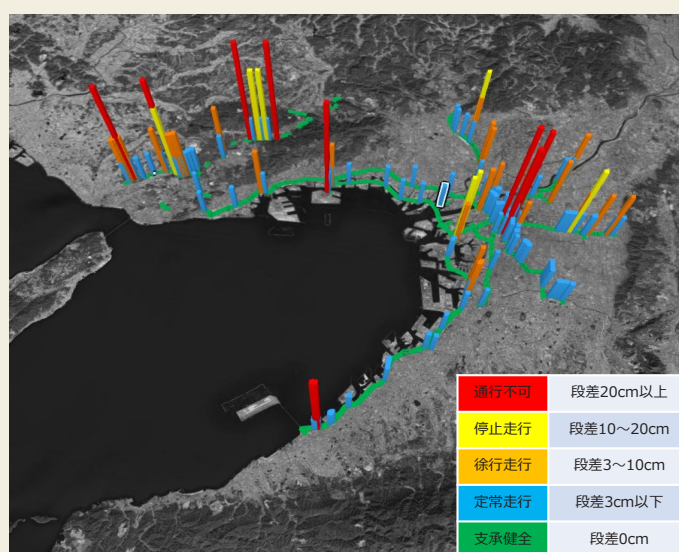


図4 支承部の段差量推定結果イメージ

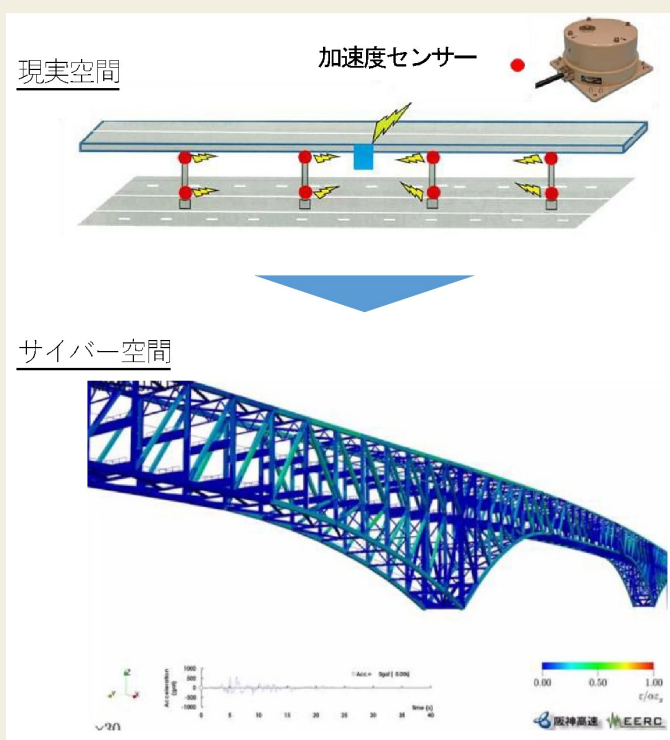


図5 シミュレーションによる被災度判定イメージ

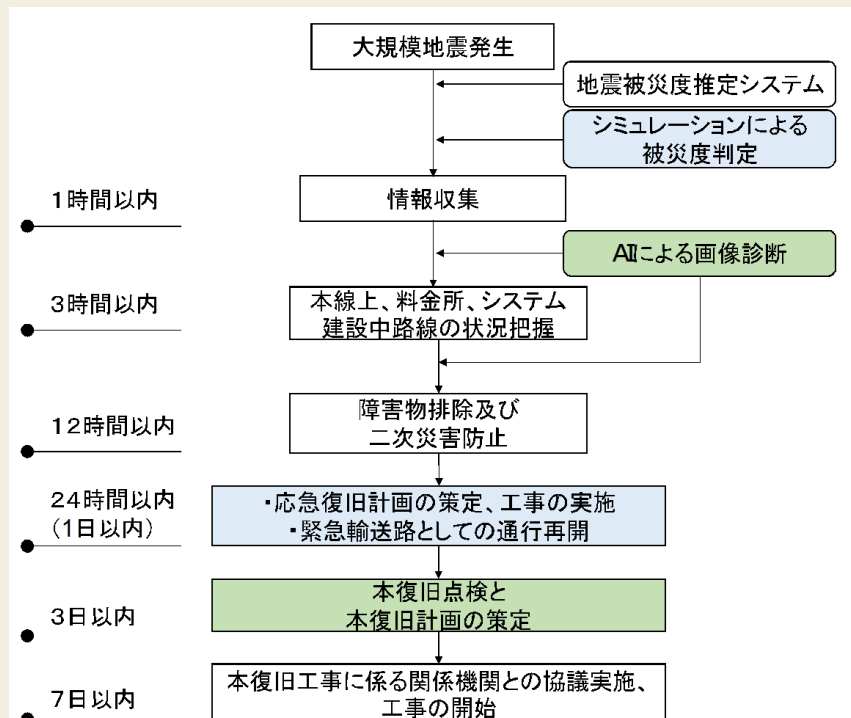


図6 震災復旧の基本的な流れ

う道路構造物の被害状況の把握、応急復旧箇所の選定および応急復旧する優先路線の方針決定を支援する。

(2) 点検診断結果の見える化

阪神高速ではビッグデータを集約・統合するため、GISデータと関連システム（総合防災システム、点検・保守管理システム、建物管理システム等）を相互に連携させたり、各種のデータ（点検結果や工事情報等）を一元管理するCOSMOS（New Communication Systems for road Maintenance and Operations）というシステム統合体の構築を行い、運用している。

COSMOSの機能のひとつである点検・保守管理システムにおいて、橋梁やトンネル構造物の日常・定期・臨時点検の結果や損傷写真がデータベース上で収集・管理されており、一部の点検結果はGISデータとも紐づいている。これらの点検結果を3次元で管理することで2次元のデータベースでは把握できなかった情報が得られると考えられる。

そこで、阪神高速のデジタルツインモデルを利用して、これに点検診断結果や損傷写真を時間軸を持たせて貼り付ける。これにより、サイバー空間のデジタルツインモデルの各部材に、現実の構造物に発生した劣化・損傷情報が見える化され

る（図7）。見える化により期待できる効果としては、キーワード（例えば「損傷度」）で検索をかけると、損傷度ランク毎の部材が色付けされ、構造物の弱部をビジュアル的に俯瞰して瞬時に把握できるようになる。また、時間軸を持たせることで、その部材の劣化・損傷がどのように進展したか、隣接部材との劣化程度の差異、簡易な劣化進展予測等が、構造物全体を俯瞰しながら把握・分析可能となる。これにより、構造物の修繕の是非や実施時期の判断を支援する。

(3) 画像診断（AI）による被災後の補修・補強方針の策定

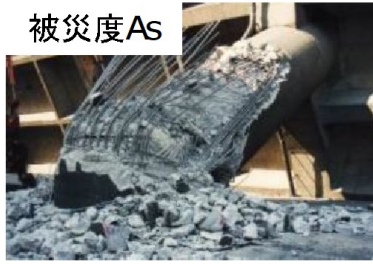
1995年1月に発生した兵庫県南部地震

では、広い地域で甚大な被害がもたらされ、阪神高速においても3号神戸線で635mにわたって倒壊、4ヵ所で落橋したのをはじめ、5号湾岸線でも1ヵ所で落橋するなどの甚大な被害を受けた。現在の地震発生後から本復旧工事に着手するまでの時系列目標は図6のとおりであるが、震災当時は復旧計画基本事項調整会議を開催したのは、およそ震災発生から1か月後であった。この理由としては、被災した構造物の写真を職員が撮影して持ち帰り、橋脚基ずつの損傷ランクを判定する作業・会議を実施していたことと、さらに、複数グループの職員が各々の被災エリアを分担して行っていたことによ



図7 点検結果の見える化のイメージ

被災度As



被災度B



被災度C



被災度D



AIによる画像診断

(損傷ランク判定)

表2-9 被災度別復旧方法

被災度	復旧方法
As	再構築
A	修繕・補修
B	修繕・補修
C	修繕・補修
D	修繕

補修・補強方法
の選定

工 費	標準工期												単価 (1延床㎡)	金額
	1ヶ月	2ヶ月	3ヶ月	4ヶ月	5ヶ月	6ヶ月	7ヶ月	8ヶ月	9ヶ月	10ヶ月	11ヶ月	12ヶ月		
現地調査	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	12,000	6,500,000
土留、基礎工	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	12,000	4,000,000
アーチング・コンクリート工	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	12,000	3,000,000
基礎掘削工	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	12,000	2,400,000
下地処理	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	12,000	2,100,000
鉄骨、鋼筋工	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	12,000	2,100,000
鋼骨骨組み工	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	12,000	2,100,000
鋼骨骨組み工	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	12,000	2,100,000
アーチング・コンクリート工	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	12,000	2,100,000
コンクリート・基礎工	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	12,000	2,100,000
土留工	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	12,000	2,100,000
基礎掘削	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	12,000	2,100,000
鉄骨コンクリート	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	12,000	2,100,000
土留掘削・基礎工	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	12,000	2,100,000

(注) 上記工期には、日・夜間作業を含まない。

1延床㎡当り標準 12,000円

工費の算定

図8 画像診断 (AI) による被災後の補強補修方針策定のイメージ

り、担当エリア内での相対的な損傷判定に陥りやすく、他エリアと比較した際に損傷程度に対する判定結果にばらつきが生じ、整合を取るのに時間を要したことが要因の一つである。このような経験を踏まえて、将来起こり得る大地震に備えて迅速な初動対応を確立する必要がある。

そこで、被災直後に人またはドローン等によって損傷写真を取得し、その場で撮影画像をサーバへアップロードする。事前に過去の被災写真から深層学習したAIがそれらの撮影画像を読み込み、自動的に損傷ランクを判定しふり分けける。また、ふり分けされた撮影画像を人による目視判定に基づいて再学習し、精度を向上させる。これにより、損傷判定の作業・会議に要する時間・人工は大幅に削減され、かつ人の判定による損傷ランクの判定のばらつきが解消される。さらに、損傷程度やランクから補修・補強方

法を自動的に選定し、過年度の工事積算データをもとに概算工費の算定を行う(図8)。このとき、写真撮影時の位置情報をもとに撮影画像をGISデータに紐づけて管理することで、被害集中エリアが迅速に把握できる他、復旧工事の工区設定や工事単位での概算工費まで算定する。これにより、被災後3日以内に実施すべき本復旧計画をより早く実施することが可能となる(図6)。

おわりに

サイバーインフラマネジメントを実現するうえで、まずは独立した各種のシステムおよびデータに互換性を持たせて、相互に連携できることが必要である。つまり、多種多様な管理データを緯度経度、管理番号、キロポスト等の位置情報を基に互換性を持たせて一元管理する取り組みを推進しなくてはならない。また、こ

れまで取得してこなかったデータが必要となる可能性もあり、その場合はロボットやセンサー、カメラ等の最新のIoTやICT技術を用いて積極的に取得することが求められる。

デジタルツインモデルを用いたサイバーインフラマネジメントを実装化していくうえでは、モデル精度の向上に取り組む必要がある。また、今後は土木構造物だけでなく、施設、交通、エネルギー、環境等の各種データの相互連携することで新たな価値の実現を目指していきたい。

さかい やすひと／京都大学経営管理大学院道路アセットマネジメント政策講座特命教授 1992年阪神高速道路公団入社。主に高速道路の建設、保安全管理に係る企画部門に従事。京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻博士課程修了(2009年)、京都大学博士(工学)。2022年より現職。デジタルアセットマネジメントの実装化に向けた研究を行っている。