# 橋梁の維持管理を効率化・高度化する デジタルツイン

Digital Twin Technologies for Efficiently and Precisely Assessing Structural Soundness of Bridges

久國 陽介 HISAKUNI Yosuke 渡部 一雄 WATABE Kazuo 釘宮 哲也 KUGIMIYA Tetsuya

実世界のデータを基に仮想空間上に対象物の忠実なモデルを構築し,現象の分析・推定や,推定結果の実世界への フィードバックなどに用いるデジタルツインが注目されている。これを橋梁(きょうりょう)に適用することで,健全性の診断 や,劣化の予測,災害時の状態把握といった維持管理の効率化・高度化が期待できる。

東芝は,電子機器の開発で培った大規模構造解析技術を活用し,橋梁の挙動を高精度に表現するデジタルツインを開発 している。今回,実在の橋梁を対象に形状モデルを作成し,車両の重量や温度変動による橋梁全体の変形を解析して実測 値と比較することで,高精度に解析できることを確認した。

Digital twins are attracting attention as way to analyze various data collected in physical space using a precise model that replicates an object in cyberspace. The analysis results are then used to make improvements to the physical object. Lately, demand has grown for applying digital twin technologies to facilitate efficient, precise bridge maintenance and management, including high-level diagnostics of structural soundness and deterioration, and precision assessment of conditions in the event of a disaster.

Toshiba Corporation is developing digital twin technologies to precisely replicate the behavior of bridges by using our large-scale structural analysis technologies acquired in the course of developing electronic devices. We have created a geometric model of an actual bridge, with simulation tests confirming that deformations of the entire bridge according to vehicle weight and temperature fluctuations closely match actual measured data.

## 1. まえがき

近年,道路や,橋梁,トンネル,上下水道などの社会イ ンフラ構造物の老朽化が問題となっている。国内のインフラ 構造物は,その多くが高度経済成長期以降に整備されてお り,建設から50年以上経過する構造物の割合は,今後加 速度的に増加する。加えて,少子高齢化に伴う人材不足も 指摘されており,インフラ構造物の老朽化対策として,効率 的な維持管理技術が求められている<sup>(1)</sup>。

一方で,計算機やネットワーク技術の発展に伴い,イン フラ構造物の維持管理に,収集したデータやAIによる分析 を活用する取り組みが進められている<sup>(2)</sup>。このようなデータ の利活用の一形態として,実世界にある対象物の性質や挙 動を再現する双子のようなモデルを仮想空間上に構築する, デジタルツインの概念が挙げられる。

東芝は、電子機器向けに培ってきた大規模構造解析技術<sup>(3), (4)</sup>を橋梁のデジタルツイン開発に適用し、交通量や、 気象状況、点検・補修履歴のデータを活用したシミュレー ションによって、橋梁の健全性を推定する技術を開発してい る。これにより、優先して点検すべき箇所の提示や、補修 方法の選定といった維持管理の効率化・高度化が期待でき る(図1)。



シミュレーションによる健全度評価と劣化予測

## 図1. デジタルツインを活用した橋梁維持管理

実在の橋梁のデータを基に仮想空間上にモデルを構築し,健全性を推定 して劣化度合いに応じて点検・補修することで,維持管理の効率化・高度 化を図る。

5年後

Bridge maintenance and management using digital twin technologies

ここでは、実在の橋梁を対象に構築した大規模橋梁モデ ル(以下,橋梁モデルと略記)と、車両の重量・温度の変 動による橋梁の変形の解析,及び実測値との比較による解 析精度の検証について述べる。

## 2. 橋梁モデル

ここでは、神戸市の東神戸大橋(阪神高速道路5号湾岸 線)の橋梁モデルを構築した。

橋梁全体をモデル化する場合,複雑な形状の構造体を 単純な梁(はり)形状で近似する方法が一般的である。この 手法は計算コストを削減できる点で優れるが,細部の再現 性は十分でなく,破壊の起点となるような応力集中部など局 所的な変形を捉えることは難しい。したがって,局所に注目 する場合は,解析領域を限定して部分的に詳細なモデルを 作成する必要があった。

そこで当社は、大規模構造解析技術を活用し、橋梁全体 を精緻にモデル化した。これによって、橋梁全体から局所 までの挙動を一貫して表現することが可能になる。一般に、 温度や変位といったモニタリングデータや、腐食やひび割れ といった変状の程度を示す点検データは、局所的な観測点 で得られたものである。これらのデータを活用し、局所的な 変位や変状が橋梁全体にどのように影響するかを推測する 上で、橋梁全体の精緻なモデル化は有効である。

東神戸大橋の橋梁モデルを,図2に示す。この橋梁は 全長885 mであるが,舗装を含む主構を80 mm以下の間 隔,直接の測定対象ではない橋脚や主塔といった支持構造 は400 mm以下の間隔で計算点を設けた。計算規模が大 きくなった分,並列計算機を活用することで解析時間短縮 を図った。192並列計算環境下では,一定の車両荷重や 温度変動による変形を求める応力解析は2時間半程度,温 度分布を求める熱伝導解析は10分程度で実行可能である。

#### 3. 車両荷重による変形の解析

作成した橋梁モデルを用いた解析の精度を検証するため に、車両荷重による橋梁の変形について、実測値と解析値 を比較した。

実在の橋梁の上に質量10t及び20tの車両(荷重車)を 停車させ、車両荷重によって生じた橋梁の変形を測定した。 荷重車は1台から3台を組み合わせることで、およそ10tか ら50tの車両荷重を設定でき、橋梁上の3か所の測定位置 ((a)橋脚間,(b)主塔と橋脚間,(c)主塔間)でたわみ(変 位)を測定した。シミュレーションでは、荷重車のタイヤ接 地面に位置する舗装に、車両重量相当の表面力を与え、 橋梁全体の変形を求めた。

荷重車周辺の変形例を図3に示す。舗装やそれを支える 床の部材(床版)に注目すると、荷重車のタイヤ位置では局 所的なたわみが生じ、床版全体に荷重車位置を中心にたわ みが分布しており、この床版変形に伴って、付随する部材 の変形が生じていることが分かる。このように、タイヤ位置 による局所的な荷重から、橋梁各部へ荷重が配分され変形 する様子が表現できた。

変位の実測値と、シミュレーションで得た解析値をプロットしたものを図4に示す。荷重に対して橋梁の変位は比例するが、実測値はある程度のばらつきを持っている。そこで、



## 図3. 車両荷重による変形

車輪位置での局所的なたわみと、上路での舗装や床版の変形が下路へ伝わる3次元的な変形が確認できる。

Deformations caused by vehicle load



# 図2. 東神戸大橋の大規模構造解析モデル

主塔

主塔や橋脚も含めて橋梁全体を精緻にモデル化した。各鋼板の板厚や添 接部も忠実に形状再現した。

Large-scale structural analysis model of Higashi Kobe Bridge



図4. 車両荷重による変位の解析値と実測値の比較 解析値は実測値のばらつきの範囲内に収まり、いずれの位置でも良好な一 致を示した。

Comparison of measured and simulated values of deformation according to vehicle load

荷重と変位間の線形性を仮定して、実測値を単回帰したも のと解析値を比較した。(a)~(c)いずれの位置でも解析値は 実測値と良好に一致し、実測値のばらつきの範囲内(95%) 信頼区間内) に収まる結果を得た。

# 4. 日照温度変化による変形の解析

日射及び外気温によって橋梁の温度が変化することで生じ る熱伸縮変形について、実測値と解析値を比較して、橋梁 モデルの有効性を確認した。

まず、橋梁の上部床版と下部床版の温度を測定し、シ ミュレーションに用いた。天候による温度変化の違いに注目 し、5月下旬の晴天時と7月上旬の雨天時の、1日分の温 度を1時間ごとに測定した(図5)。測定値は橋梁の局所的 な温度であるため、橋梁内の3次元的な温度分布を熱伝導 解析により求めた。この温度分布に従って、橋梁全体の熱 伸縮変形を解析した。

実測値は、図6に示すように、橋梁を支持する主塔や橋 脚部に変位計を設置し、主構の変位を測定した。

熱伸縮は、解析値・実測値ともに変位計設置時の値を 基準(ゼロ)として、そこからの変化量を求めた。

晴天時と雨天時の主構の熱伸縮について、解析値と実 測値を図7に示す。雨天時は温度変動が小さいため、橋梁 の熱伸縮も小さく、最大10mm程度であった。一方、晴 天時は-35 mmから+10 mm程度まで伸縮量が変化した。 解析値は、晴天時に実測値よりやや大きいものの、晴天と 雨天時の熱伸縮の違いを再現し、時刻に伴う変化を2時間 以下の誤差で捉えており、良好に現象を表現している。

晴天時は14時及び21時に測定部における橋梁の熱伸縮



図5. 晴天時と雨天時における橋梁の上路床版と下路床版の温度 晴天時は、下路は上路の影になり日照が遮られるため、上路と下路に大き な温度差が生じる。

Upper and lower deck temperature measurements in sunny and rainy conditions



#### 図6. 変位の測定位置と測定実施例

主塔及び橋脚の主構支持部に変位計を設置し、温度変化による主構の熱 伸縮を測定した。

Measurement positions of deformation according to temperature

がほぼゼロとなる(図7中の丸印)興味深い挙動を示した。 これらの時間帯でも橋梁各部の温度は異なっており、熱伸 縮は均一ではない。したがって、橋梁各部の熱伸縮量は異 なるものの、測定部において変形量が同じになるような温度 パターンであったと推測される。このように、晴天時は雨天



#### 図7. 晴天時と雨天時における主構の熱伸縮の解析値と実績値

橋梁の温度分布を考慮することで、晴天・雨天時の変形メカニズムを再現した。

Comparison of measured and simulated values of thermal expansion and contraction of main girder of bridge in sunny and rainy conditions

時よりも複雑な挙動を示すが,橋梁モデルを使ったシミュ レーションは実現象を良好に再現できる。これに対して, 橋梁全体の温度を均一に昇降させる解析では,晴天時の 挙動は再現できなかった。

このように、橋梁モデルと解析手法の有効性を確認した。

### 5. あとがき

橋梁のデジタルツイン開発の一環として,実在の橋梁を 精緻に形状再現した橋梁モデルによる変形解析について述 べた。この技術が,車両荷重や温度変動といった日常的に 橋梁に生じる変形を高精度に表現できることを,実測値と 比較検証することで確認した。

引き続き,橋梁の自重による変形や応力状態の再現と いった検証を進めている。このような日常的に生じる変形を シミュレートすることで,橋梁の劣化箇所の特定や補修効果 の見積もりを行い,維持管理の高度化に貢献できる。

今後は,実用上要求される解析精度と計算時間をバラン スさせるようモデルを改善し,維持管理や設計業務での活 用を図っていく。

ここに記載した技術は,阪神高速道路(株)との「大規模 解析モデルによる挙動シミュレーションに関する共同研究」 の成果の一部である。

# 文 献

- 国土交通省. "令和5年版国土交通白書 2003 デジタル化で変わる暮らしと社会". 国土交通白書. <</li>
  https://www.mlit.go.jp/statistics/ hakusyo.mlit.r5.html>, (参照 2024-06-14).
- (2) 土木学会技術推進機構 SIP インフラ連携委員会. インフラ維持管理への AI技術適用のための調査研究報告書. 土木学会, 2019, 175p.
- (3) 廣畑賢治,ほか.電子機器の信頼性向上を支える大規模構造解析・寿 命予測技術、東芝レビュー、2012,67,7, p.23-27.
- (4) 門田朋子,ほか.電子機器の信頼性向上を目指す大規模・き裂進展シ ミュレーション技術.東芝レビュー. 2013, 68, 4, p.50–53.



久國 陽介 HISAKUNI Yosuke 研究開発センター 知能化システム研究所 機械・システムラボラトリー 土木学会会員 Mechanical Systems Lab.



**渡部 一雄** WATABE Kazuo 研究開発センター 知能化システム研究所 土木学会・日本コンクリート工学会・米国光学会(Optica)会員 Advanced Intelligent Systems Labs.



釘宮 哲也 KUGIMIYA Tetsuya, D.Eng. 技術企画部 技術経営企画室 戦略企画担当 博士(工学) 日本機械学会・日本材料学会会員 Planning Group