

論文 検査情報と3次元情報を活用したコンクリート 構造物の性能評価システムの開発

土橋 亮太¹・金島 篤希¹・仁平 達也¹・大滝 航²・坂口 淳一³

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 鋼・複合構造
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: dobashi.ryota.48@rtri.or.jp, kaneshima.atsuki.17@rtri.or.jp, nihei.tatsuya.87@rtri.or.jp

²非会員 北武コンサルタント株式会社 技術開発室
(〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通7-4-7)

E-mail: w-ootaki@hokubu-c.co.jp

³正会員 北武コンサルタント株式会社 技術本部 構造部
(〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通7-4-7)

E-mail: j-sakaguchi@hokubu-c.co.jp

鉄道構造物の設計や施工の段階において、使用材料や配筋などの多くの情報が蓄積されている。これらの情報を適切に記録し活用することで、より高精度かつ効率的な維持管理が可能となる。そこで、本研究では3次元図面情報や施工・検査の情報および構造解析結果を一元管理し、これを用いて構造物の状態を推定するシステムを開発した。具体的には、データベース上の様々な入力情報を用いて、構造物の変状予測や3次元FEM解析等を実施し、これらを視覚的に確認できるシステムを開発した。RCスラブ桁を対象とした開発システムの試行を実施し、その有効性を確認した。さらに、設計や施工の情報を活用し、予め変状予測や性能予測を実施する、開発システムを用いた、予防保全型の新しい維持管理手法を提案した。

Key Words : RC structure, Maintenance, Construction Information Modeling, FEM analysis

1. はじめに

コンクリート構造物の主たる変状である鋼材腐食、これに起因する変状予測や耐荷性能の推定方法は、鉄道構造物等維持管理標準・同解説構造物編（コンクリート構造物）¹⁾（以下、維持管理標準）等に記載されており、部材全体や面全体に変状が発生することを想定した安全側の評価方法となっている。しかしながら、実構造物に発生する変状は、部材や面での均一な変状の発生ではなく、**図-1**に示すような、かぶり不足等に起因する局所的な範囲での発生がほとんどである。維持管理標準に示された方法は、実際の変状状態と差異があるため、実務において、定量的な変状予測や性能予測を実施した事例が少ない要因の一つになっている。

昨今、国土交通省が主導し、構造物の建設や維持管理に3次元情報を用いた業務の効率化や高精度化を目指す Construction Information Modeling/Management (CIM) に関する取組²⁾が行われている。これに関して、設計段階から施工段階へのデータを引き継ぐ事例、例えば、接合部等の錯綜する鉄筋の干渉確認³⁾や施工段階の事前確認⁴⁾等で、

図-2に示すような、配筋情報を有する3次元図面情報を活用した事例が増加しつつある。鉄道構造物においても、



(a) スラブ桁下面 (b) 中間スラブ下面

図-1 実構造物のはく落事例

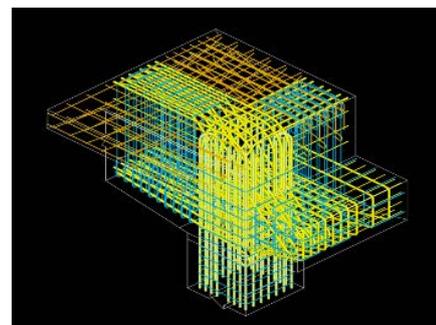


図-2 3次元配筋図の例⁵⁾
(ラーメン高架橋上層端部)

今後、設計成果物などが3次元図面となることも想定されることから、設計段階、施工段階のデータをクラウド化し、一元で管理したプラットフォームを用いて、維持管理段階まで引継ぎ、検査情報などを加えてこれらをデータベース化し、活用することは業務上有効であると考えられる。

そこで、本論文では、形状図や配筋図等の設計情報、かぶり等の施工情報、および変状写真やたわみ等の検査情報を、構造物の3次元情報として記録し、変状の発生範囲やその要因を考慮できる、時間軸を考慮した3次元FEM解析を可能とするコンクリート構造物の性能評価システムの開発(2章)を行った。開発システムの有効性を確認するために、既設RCスラブ桁を用いた試行を行った(3章)。これらを踏まえて、開発システムが維持管理業務に及ぼす効果について検討した(4章)。

2. 開発システムの概要

(1) システムの構成

図-3にシステムの構成を示す。本システムは、3次元

情報を用い、構造物の現状評価および将来予測を行うものである。データ入力機能の「入力インターフェース」、データ出力機能の「可視化システム」、およびデータを管理するデータベースで構成される。「入力インターフェース」は、Windows環境で動作するアプリケーションとし、位置情報や3次元の構造物情報等のデータを入力することで、データベース(DB)へ登録する機能を持たせた。「可視化システム」は、WebシステムにおいてDBに登録された各種データをブラウザ上で図化を可能とする。DBは「可視化システム」が稼働可能なWebサーバー上に構築することを基本とし、図-4に示すような、必要なデータを同一画面での重畳表示を可能とした。なお、以降では、3次元構造一般図に加え配筋情報を有するものを3DCADとし、配筋情報を有さないものを3Dモデルと定義する。

(2) 入力インターフェース

a) 位置情報

位置情報インターフェースは、線路や構造物等の位置情報をDBに登録する機能とした。構造物の位置をプロ

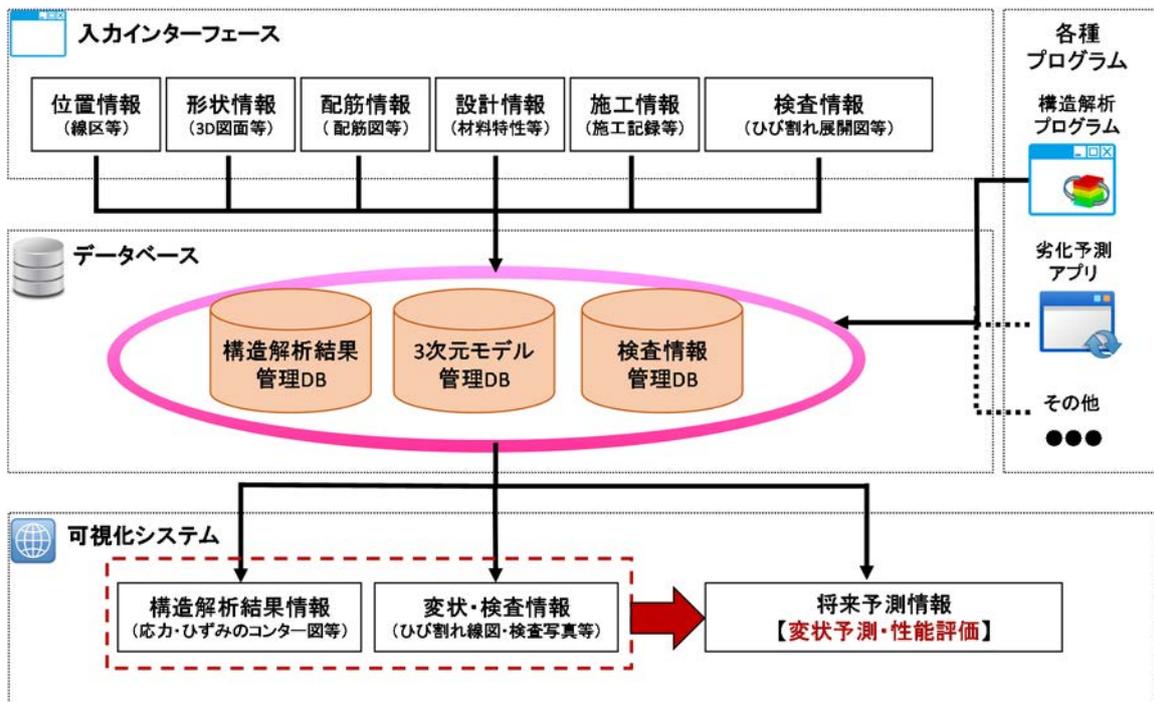


図-3 開発システムの構成

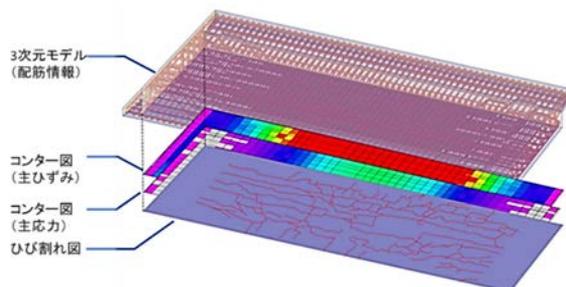


図-4 各種情報の重畳表示の例

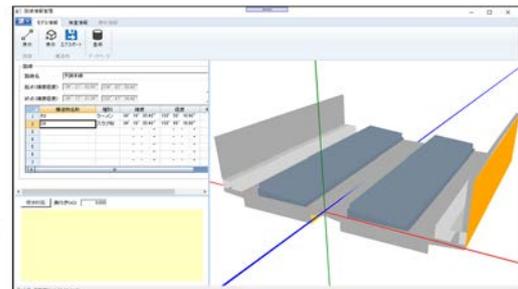


図-5 3次元モデルの入力

ットした路線図の表示が可能なシステムとしており、緯度経度やキロ程などの情報を有することとした。

b) 形状情報

形状情報インターフェースは、図-5に示すような、構造物の3Dモデルを構築しDBに登録する機能とし、既設構造物を想定した3DCADがない場合と、新設構造物を想定した3DCADがある場合の両方に対応することを想定した。

3DCADがある場合、本システムにインポートすることで、形状に関する情報を読み込み3Dモデルに変換することとした。また、これらの作成した3Dモデルの各面に対して、2次元の変状展開図や変状画像等を貼り付けることを可能とした。図-6に2次元のひび割れ展開図を3Dモデル上に変換した例を示す。

現状においては、そもそも3次元形状図面である3Dモデルがなく、2次元の一般図で管理している構造物がほとんどである。そこで、これらに対応できるように、断面形状寸法と奥行きを簡易入力による3Dモデルの生成が可能なシステムとした。図-7にRCT桁の3次元モデル作成画面の表示例を示す。

c) 配筋情報

配筋情報インターフェースは、図-8に示すような3DCADをDBに登録、管理する機能とした。3DCADは、部材や鉄筋種別などを予めレイヤー（画層）管理のうえ作成することで、後述する(4)に示す、構造解析におけるFEM解析モデルの要素と連携することとした。

d) 設計情報

設計作用や地盤条件、材料の特性値等の属性情報を、文献²⁾や鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）⁶⁾（以下、RC標準）等を参考に、変状予測や性能評価に必要な情報をDBに登録、管理することとした。

e) 施工情報

配筋状況やコンクリート打設記録、および図-9に示すような、鉄筋のかぶり測定記録等を想定し、文献²⁾を参考に、施工情報をDBに登録、管理することとした。施工時において配筋を修正する場合は、c) 配筋情報の3次元で作成された3DADを適宜修正の上、再度インポートすることを想定した。

f) 検査情報

検査時期や検査者等の検査業務の情報とともに、構造物の表面状態、ひび割れ展開図、はく落範囲等の変状情報を、図-10に示すように、構造物の形状を踏まえて3次元情報として登録、管理することとした。

(3) データベース

a)~f)に示した入力インターフェース、および各種アプリケーションから登録される構造物等の情報を管理する。また、登録されたデータベースは、クラウド化を想

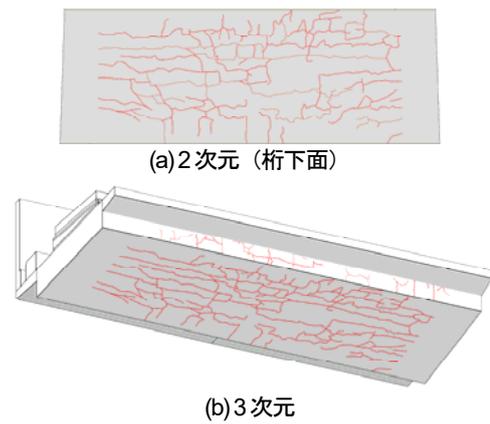


図-6 ひび割れ展開図の例（RCスラブ桁）

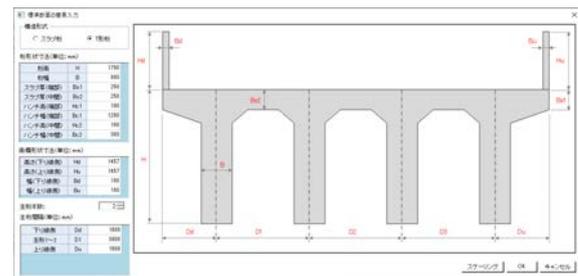


図-7 RCT 桁の 3 次元モデル作成画面

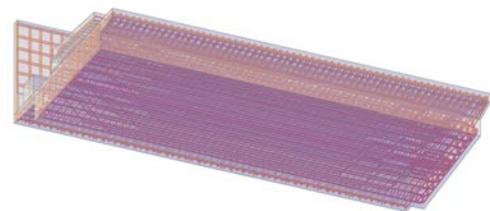


図-8 3次元配筋図の例（RCスラブ桁）

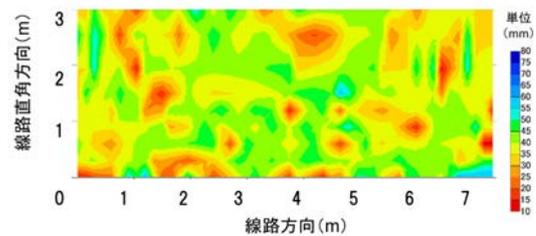


図-9 かぶり測定の例（RCスラブ桁下面）

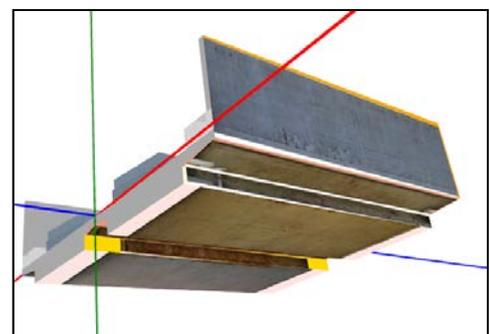


図-10 変状情報の表示例

表-1 使用ソフトウェア

ソフトウェア	用途
Civi3D 2017	3次元CAD作成
Femap	FEMモデル作成
FINAS/STAR	非線形構造解析

定し、後述する可視化システムから参照可能とした。

(4) データベースと解析モデルの連携

入力インターフェースにて、DBに格納された3DCADのレイヤー（画層）や属性情報を活用した、3次元FEM解析モデルを半自動で作成する。なお、開発システムを介して、同一ルールでモデル作成することで、解析モデル作成における労力軽減や時間短縮が可能となるとともに、DBに登録された類似形状のモデルなどを比較等により、解析モデルの妥当性の確認がより容易なることを想定する。表-1に開発システムで用いたソフトウェアを示す。

(5) 可視化システム

可視化システムは、設計、施工、維持管理の各段階においてDBに登録された各種情報から、用途に応じて合成および加工した可視化用データを生成するものである。登録された情報が時系列データであれば、時間軸を考慮したデータも可視化することが可能となる。また、前述した、図-4に示したように、配筋、かぶり、変状状態、3次元FEM解析結果等を合成表示することを可能とした。

3. 開発システムの試行

(1) 試行概要

本章では、2章で示した開発システムを用いて、3DCADを有するRCスラブ桁を対象とした、施工情報や検査情報等を用いた変状予測、これらに加えて設計情報等を用いた3次元FEM解析による性能評価を実施した。具体的には、構築したDBと汎用FEM解析ソフトを連携させ、かぶりやはく落箇所、たわみ等の検査結果を反映した3次元FEM解析を用いて供用期間中の耐荷性能の経時的な変化を推定した。

(2) 対象構造物

対象構造物は、図-11と図-12に示す供用35年の単線並列RCスラブ桁とした。スパンは8.2m、スラブ厚さは700mmで片持ちスラブを有し、地覆やダクトが配置され、高さ1.8m程度の高欄が全長にわたり目地なく配置されている。軌道種別はスラブ軌道である。

(3) 入力インターフェースの情報登録

対象構造物の、位置情報、形状情報、配筋情報、設計情報、施工情報、および検査情報を2章(2)の入力インターフェースにより各データベースへ登録した。位置情報より、RC標準を参照し、塩化物イオンに関する地域区分はS2地域かつ海岸線から1.5km以上離れていることから、一般の環境下での供用と分類された。形状情報と配

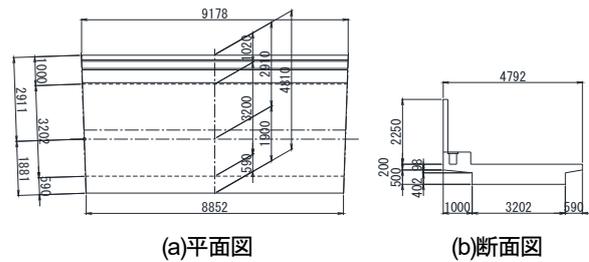


図-11 2次元表示の対象構造物の一般図
(単位 mm)



図-12 対象構造物の外観

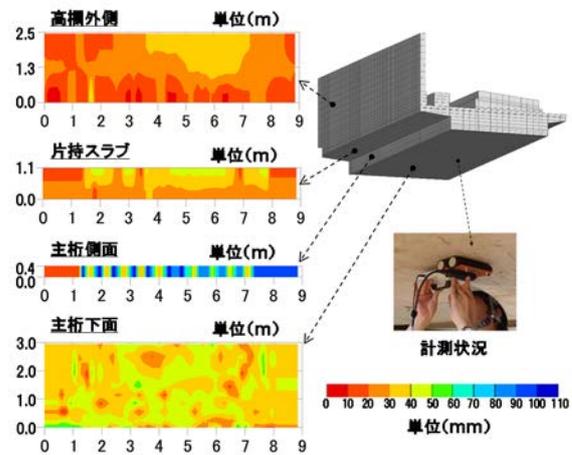


図-13 かぶり測定結果

筋情報については、作成した3DCADより各種データを取得した。設計情報より、各種材料の設計値や設計荷重(E-17)等を取得した。施工情報において、かぶりは、著者らの既往の検討⁷⁾を踏まえた測定方法により、スラブ下面、片持ちスラブ下面、および高欄外側の各面のかぶり値を取得した。図-13に測定結果を示す。

検査情報より、目視においてひび割れは確認されたものの、主桁下面の線路直角方向に曲げひび割れと思われる変状は確認されなかった。なお、図-12の(b)に示す高欄の一部の箇所にも、はく落が確認され、当該箇所のかぶりは10mmであったことを確認した。コンクリート中の塩化物イオン量は 0.3kg/m^3 以下であることを確認した。また、レーザードップラー速度計⁸⁾を用いた測定により、旅客列車通過時の支間中央のたわみの測定値は0.3mmであったことを確認した。

(4) 性能評価において検討した解析モデル

解析モデルは、解析結果に大きく影響するため、構造

物の応答性状に影響する部材等を適切にモデル化する必要がある。そのため、解析モデルは、図-14に示す、主桁のみ、すなわち非構造部材を考慮しないモデルであるモデルAと、非構造部材である高欄、地覆・ダクト、および路盤コンクリートを含めたモデルBを用いて検討を行った。鉄筋コンクリートの解析モデルはソリッド要素とし、分散ひび割れ-分散鉄筋モデルを用いた。要素分割や鉄筋コンクリートの要素に用いる非線形材料構成則には、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編：標準〕「10編 非線形有限要素解析による性能照査」に準じた分散ひび割れモデルによる材料構成則⁹⁾を用いている。

支点条件は、支承線上の位置で、桁下面に弾性要素を介して鉛直変位を拘束した。起点方の変位拘束節点においては、線路方向の変位も拘束した。荷重の载荷は、主桁本体と版上構造に関する死荷重を载荷した後に、列車荷重+衝撃荷重+遠心荷重の20%ずつ増分させた。

解析モデルにおける要素の重心位置は、かぶりの測定箇所と必ずしも一致しない。そこで、かぶり測定値をFEM解析モデルの要素特性へ反映する方法として、GISを使って勢力圏を求める方法の一例として用いられている、ポロノイ分割¹⁰⁾を用いることとした。ポロノイ分割とは、図-15に示す、隣り合う母点間を結ぶ直線に垂直二等分線を引き、各母点の最近隣領域を分割する手法である。具体的には、構造物表面のかぶりの適用領域を設定し(図-15(a))、FEM解析モデルの表面を構成する要素の重心位置(図-15(b))と、適用領域を設定した構造物の表面情報(図-15(a))を重ね合わせ、要素の重心位置の座標が属する測定値の適用領域を、その要素に適用する測定値とした(図-15(c))。これらは、軸方向鉄筋が配置されている表面から1~2要素に対してX方向(軸方向鉄筋)、Y方向(せん断補強鉄筋等の横方向鉄筋)のそれぞれに適用した。図-16に、解析モデルへのかぶり測定値の反映結果を示す。

なお、コンクリートの変状の影響を解析上表現するために、便宜的に、鉄筋の腐食によりひび割れが発生した場合にはコンクリートの引張強度を健全時の10%に低減、鉄筋の腐食によりはく落が発生した場合にはコンクリートの引張強度・圧縮強度を健全時の10%に低減し、FEM解析モデルの要素特性に反映することとした。

(5) 適用した解析モデル

図-17に両モデルの列車荷重の荷重倍率と鉛直変位の関係を示す。非構造部材のモデル化の有無により、耐力が大きく異なることが確認できた。図-18に示す荷重100%時のひずみ分布では、非構造部材を含む桁下面のひずみは、スラブ下面に線路直角方向に曲げひび割れが発生しないレベルであった。これは、目視検査による検

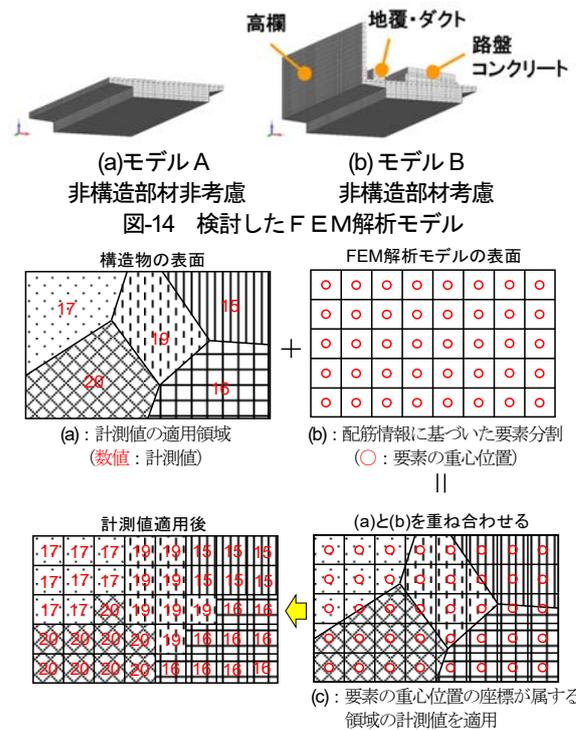


図-15 表面情報の要素特性反映方法

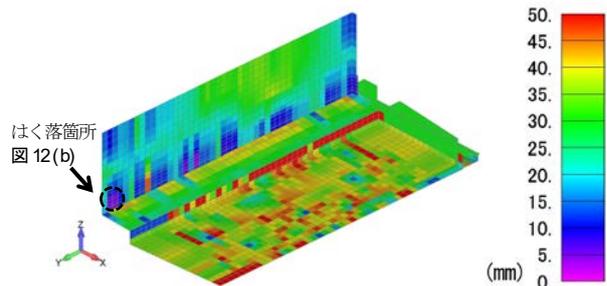


図-16 解析モデルへのかぶり測定値の反映結果

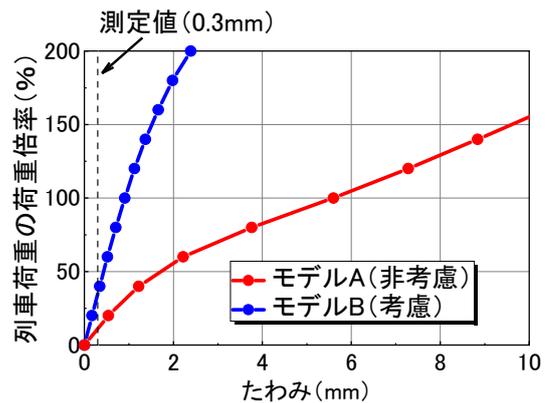


図-17 FEM解析モデル範囲の影響検討結果

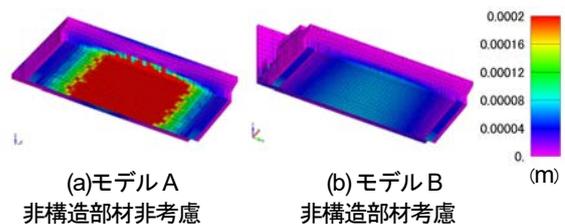


図-18 荷重倍率100%におけるひずみ分布

表-2 同定した鉄筋の腐食速度

変状過程	各期の終了の指標と閾値	鉄筋の腐食速度 (mm/年)	
		標準	同定値
潜伏期	中性化残り ≤ 10mm	0.0	0.0
進展期	鉄筋の腐食深さ ≥ Δγ _{er}	3.0 × 10 ⁻³	1.65 × 10 ⁻³
	鉄筋の腐食深さ ≥ Δγ _{es}		
加速期	性能項目の照査により判定	8.0 × 10 ⁻³	8.0 × 10 ⁻³
劣化期	—	(設計標準の値)	

Δγ_{er}: ひび割れ発生時の鉄筋の腐食深さ, 13 (c/φ) × 10⁻³ (mm)
 Δγ_{es}: 剥離、剥離発生時の鉄筋の腐食深さ, 56 (c/φ) × 10⁻³ (mm)
 ここに, c: かぶり (mm), φ: 鉄筋径 (mm)

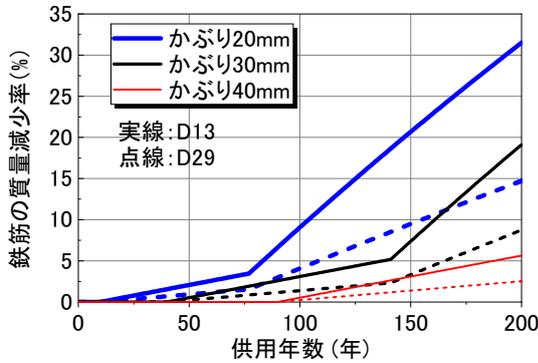


図-19 鉄筋の質量減少率の予測結果の例

査情報と一致した。また、設計荷重と実列車荷重の相違はあるものの、非構造部材を考慮したことで測定値 (0.3mm) とも概ね一致することとなった。そのため、維持管理において性能を評価できる FEM 解析モデルは、非構造部材を含むモデル B (図-14 (b)) が妥当であることを確認した。

(6) 変状予測結果および性能予測結果

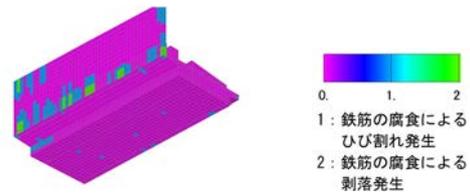
a) 予測方法

施工情報であるかぶり測定値と、検査情報であるはく落箇所から、当該構造物の鉄筋の腐食速度を同定し、変状予測を行った。この変状予測の結果をFEM解析モデルの要素特性に反映させ、鉄筋の腐食に伴う鉄筋の断面積の減少を考慮した性能予測を行った。具体的には、図-12 (b)に示した、はく落発生箇所のかぶりが10mmであったことに基づき、維持管理標準に準じた変状の予測モデルにより、当該構造物の鉄筋の腐食速度、特にはく落発生までの腐食速度を同定した。すなわち35年がかぶり10mmの箇所ではく落が発生するように、加速期 (前期) までの鉄筋の腐食速度を算出した。表-2に同定した腐食速度を示す。これを踏まえて、図-19に示すような、鉄筋の質量減少率の予測結果をかぶりおよび鉄筋径ごとに各要素に設定した。なお、本検討においては、構造物の腐食速度は各部材、各面とも同一速度として算定した。

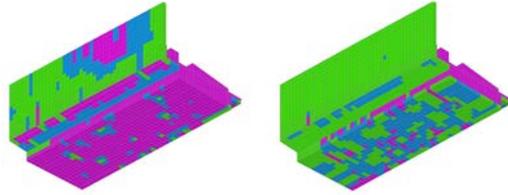
b) 予測結果

解析ケースは、供用年数0年 (T-0) , 35年 (T-35) , 100年 (T-100) , 200年 (T-200) とした。図-20に、各面の変状状態の推定結果を示す。供用35年 (現在) より100年後と200年後の変状状態を推定した。

図-21 に検討ケースごとの列車荷重の荷重倍率とス



(a) 35年後 (現在)



(b) 100年後 (c) 200年後

図-20 各面の変状状態の推定結果

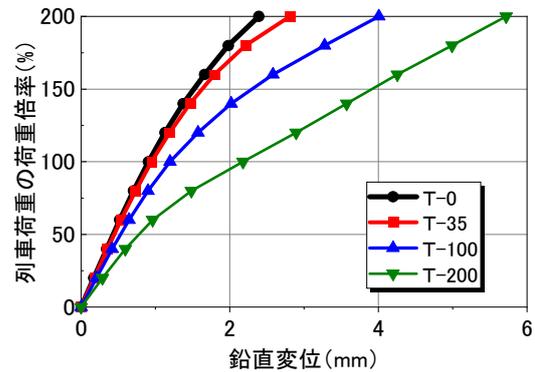
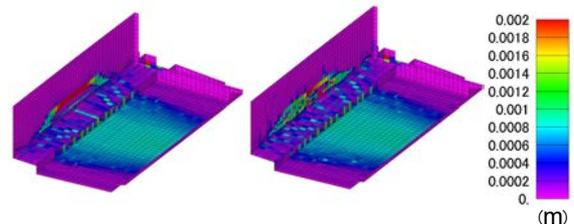
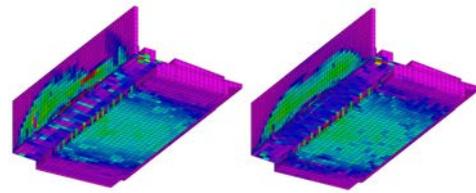


図-21 列車荷重の荷重倍率と鉛直変位



(a) T-0 (列車荷重 380%) (b) T-35 (列車荷重 380%)



(c) T-100 (列車荷重 360%) (d) T-200 (列車荷重 300%)

図-22 鉛直変位 10mmにおける最大主ひずみ分布

ン中央における鉛直変位 (たわみ) の関係を示す。T-200のケースであっても、列車荷重程度であれば3mm程度のたわみとなることが想定された。これは、鉄道構造物等設計標準・同解説 (変位制限)¹¹⁾の走行安全性のたわみの限界値 (20.5mm) , や乗り心地のたわみの限界値 (16.2mm) を大きく下回り、供用年数が増加しても鉛直変位 (たわみ) により列車走行に支障が生じる可能

性がほとんどないことが示唆された。

図-22 にスパン中央の鉛直変位が 10mm 時の最大主ひずみの分布を示す。いずれの検討ケースにおいても、スラブ下面よりも、高欄や片持スラブのひずみが大きくなった。供用開始時の T-0 では、高欄にひずみが集中しているが、T-35、T-100、T-200 は鋼材腐食の進行に伴い、高欄にひび割れやはく落が発生し、高欄の応力分担が小さくなることにより、構造物全体に対してよりひずみが分散することが推定された。列車荷重等の荷重作用に起因したひび割れ等の変状は、解析結果から得られたひずみが大きい箇所から発生する可能性が高いため、高欄の変状発生を想定した検査が有効であることが示唆された。

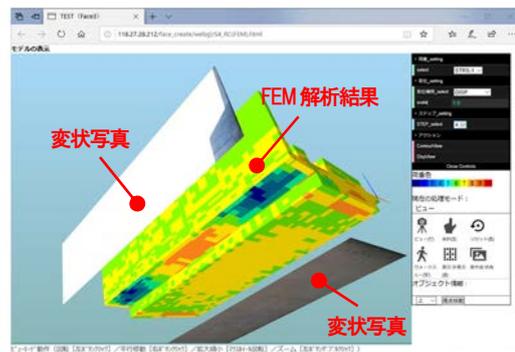


図-23 開発システムにおける各種情報の重畳表示の例

4. 開発システムの維持管理業務に及ぼす効果

現状の維持管理においては、目視による点検と過去の経験等に基づき、半定量的に構造物を性能評価し、健全度を判定しているが、発生する変状は供用環境だけでなく、設計や施工の影響を大きく受けるといえる。そのため、設計段階、施工段階から得られる諸数値、および適切な解析モデルを用いて、現有性能を定量的に評価することや、予め供用期間中の変状予測および性能変化を予測することが有効であると考えられる。

しかしながら、一般的な設計計算の場合、コンクリートの材料構成則として引張応力は考慮されていないことや、非構造部材の影響が考慮されていないことから、たわみ等は、設計で想定した値と実測値は必ずしも一致しないことが多い。このことは、発生する変状や損傷、構造物の限界値に至る状態が設計で想定した状態と異なる可能性があることを示唆している。また、コンクリート構造物の施工は現場作業が多いため、必ずしも設計で想定した誤差範囲に収まらない可能性があり、図-1 に示したような変状が発生することも想定される。本論文では、これらを踏まえて開発したシステムの概要を 2 章に、試行を通じた開発システムの活用方法について 3 章に示した。設計、施工の有益な多量の 3 次元情報を活用し、図-23 に示すような、3 次元視点により、事前に変状や性能を予測しておくことで、予防保全型の高精度かつ効率的な維持管理が可能になると考える。なお、本論文で示した方法およびモデルは、文献²⁾の CIM モデル詳細度 400 以上を想定している。

実務においては、開発システムにより、構造物の初回点検の位置付けである、初回検査時に得られたかぶり測定結果や、初列車のたわみ計測結果等を踏まえた変状予測や性能予測を実施した上で、供用開始することが可能となる。その後、供用中の変状の発生やその進行、実測値の変化を踏まえて、変状予測や性能予測を適宜修正しながら、構造物の健全度を把握することが可能となる。

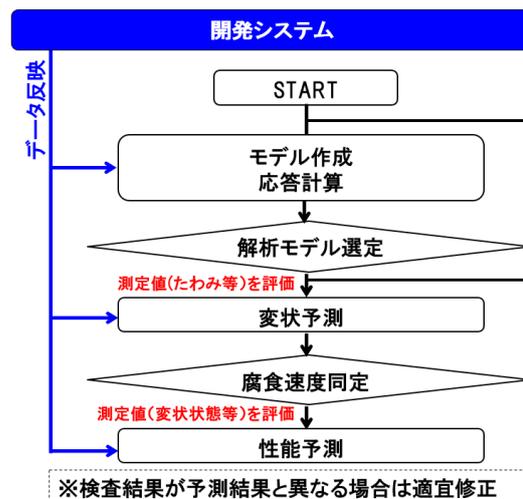


図-24 開発システムの活用方法のフロー

すなわち、図-24 に示すようなフローにより、開発システムを用いた維持管理を行うことで、検査の着目点が明確になり、精度の高い維持管理計画を構築できる、予防保全型の維持管理が可能になるものとする。

5. まとめ

3次元図面情報 (3DCAD) や施工、検査の情報、および構造解析結果などを一元管理し、これを用いて構造物の状態を推定するシステム、および、これに関する要素技術を開発した。以下に成果を述べる。

- 1) システムのデータベースに入力した情報を用い、3次元 FEM モデルを作成し、解析を実施するプロトタイプを開発した。3DCAD、FEM 解析結果、変状情報等を同一画面上に重畳して出力することで、これらの情報を視覚的に確認することを可能とした。
- 2) 局所的なかぶり不足に伴う鋼材腐食を考慮した経時的な構造物の性能変化を、実測値を踏まえて推定し、3次元情報で管理する手法により、共用期間中の変状予測および性能予測が可能となる。

- 3) 形状・寸法情報，設計・施工情報，変状・検査情報等を活用した，3次元情報に基づく予防保全型の維持管理を可能とするシステムを提案した。
 - 6) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，2004.
 - 7) 土橋亮太，小林史，堂内悠吾，仁平達也：RCラーメン高架橋のかぶり測定法の検討，第26回鉄道技術連合シンポジウム (J-RAIL2019)，S2-1-3，2019.
 - 8) 上半文昭：鉄道構造物の遠隔非接触検査技術の開発，実験力学，Vol.17，No.4，pp.281-289，2018.
 - 9) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2017.
 - 10) 例えば，奥貫圭一：GISを活用した空間分析，地学雑誌，Vol.117(2)，pp.324-340，2008.
 - 11) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限，2006.
- 参考文献
- 1) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説構造物編（コンクリート構造物），2007.
 - 2) 国土交通省CIM導入推進委員会：CIM導入ガイドライン（案），2018.
 - 3) 例えば，一般社団法人日本建設業連合会：2018施工CIM事例集，2018.
 - 4) 例えば，国土交通省：BIM/CIM事例集 ver.1，2019.
 - 5) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，配筋の手引き，2004.

(2020.4.3 受付)

THE DEVELOPMENT OF A NEW CONSTRUCTION INFORMATION MODELING
SYSTEM EVALUATING THE PERFORMANCE OF RC STRUCTURES
UTILIZING THE INFORMATION OF INSPECTION
AND 3D COMPUTER-ASSISTED DRAFTING

Ryota DOBASHI, Atsuki KANESHIMA, Tatsuya NIHEI,
Wataru OHTAKI and Junichi SAKAGUCHI

In this study, a new construction information modeling system (BIM/CIM) for railway RC structures was developed. It can connect some software could do deformation prediction and 3D FEM analysis, and it can show results of evaluations of performance of RC structures utilizing the information of inspection results and 3D computer-assisted drafting. From a test using this system for evaluating a RC slab beam, because this system can have a large amounts of effective information from the design and construction phase, and because it can show a lot of analysis results on the time axis, it was confirmed that the system was effective for the predictive maintenance for railway RC structures.