

土木学会平成30年度全国大会
研究討論会 研-04 資料

膨大な点検データと性能評価の 齟齬をどうする！

座長	渡辺 忠朋	北武コンサルタント(株)
話題提供者	松本 高志	北海道大学
	内田 慎哉	富山県立大学
	土屋 智史	(株)コムスエンジニアリング
	安川 義行	東日本高速道路(株)
	岡本 大	(公財)鉄道総合技術研究所
	湧田 雄基	北海道大学

日	時	平成30年8月29日(水) 13:00~15:00
場	所	北海道大学札幌キャンパス
教	室	高等教育推進機構E214教室

複合構造委員会

膨大な点検データを性能評価にどう使うか？

—性能評価に必要な点検データ—

北武コンサルタント株式会社 渡辺 忠朋

1. 維持管理の現状と問題認識

我が国の高度経済成長期に建設された橋梁などの土木構造物は、供用期間が50年を超えつつあり、適切な維持管理のもとに供用を継続することや、構造物や社会状況により更新を進めていくことが求められている。

社会資本としての機能を維持するためには、合理的な維持管理を行う必要がある。そのためには、構造物の使用や安全の性能の限界を明確にし、かつ現状および将来の構造物の性能を把握する必要がある。

しかし、現在の維持管理における構造物の性能の評価は、主として材料の劣化にのみ着目して判断されることが多いのが通例である。この評価法は、評価の結果が構造性能に着目した結果と必ずしも一致するわけではなく、一般には安全側の評価を与えることから、限られた維持管理予算を有効に使用するという観点では、必ずしも合理的とは言えない問題もある。また、場合によっては、構造物の安全に直結する劣化も見逃される場合もあり得ると言う問題もある。このような問題を解決するため、構造性能に着目した評価をすることが重要なことは言うまでもない。

すなわち、既存構造物の劣化状態が構造性能に及ぼす影響を可能なかぎり定量化することが、合理的な維持管理に必要不可欠であり、それが急務であると考えられる。

2. 点検データの有効利用と性能評価

構造物の安全性・使用性等を確保するための維持管理においては、構造物の状態を定期的に点検して評価を下し、必要があれば対策を施すという手順を確実にかつ効率的に機能させることが重要である。2014年より道路の橋梁、トンネル等の定期点検は5年に1回が基本となり、点検技術は多種多様なものが投入されている。一方で、鉄道においては、古くから構造物の保守が実施されている。このように、我が国の土木構造物の維持管理の歴史は、多種多様でありカオスと言える。ただし、土木構造物の用途・機能を維持するために必要とされる技術（維持管理技術）は、事業体に関わらず同様の技術に帰着すると考えられる。

しかしながら、一方で、点検データは膨大に得られるが、その全てが性能評価において有効に活用されているとは言い難い現状がある。点検データは構造物の「症状」を示すものから性能評価のモデルの「入力」となるものまで広く、また、用途・機能を満足するために定められる既設構造物の要求性能に対する満足度を、間接的に表すとされるデータが大多数であり、性能の評価の信頼性は、それらを用いて判断する技術力に左右されるのが実態である。今はこれらをまとめて「診断」を行っているのが現状であると考えられる。

3. 論点

この研究討論会では、定量的な性能評価を今後進展させるために、点検データと性能評価の関係について現状を確認し、今後の方向について意見交換を行う。

複合構造物の構造検査と性能評価に関する研究小委員会（H216 小委）の活動

北海道大学 松本 高志

1. 維持管理と医療

構造物の維持管理は人間に対する医療によくたとえられる。維持管理においては、点検、評価、対策の段階を踏んで安全性を確保し、医療においては、検査、診断、治療により生命を守る。技術者を構造物の医者であると呼ぶことも多い。であれば、思考の補助線として医療の用語・考え方から維持管理を見直してみるのも無益とは言えないだろう。これを以下に試みる（図1）。

人間は構造物と違ってプロセスの実効性について不満を持ったり心配をしたりする。体調不良を抱えた患者として病院に駆け込んだはいいが、不満を持つことは多々ある。時間がかかる、金がかかる、この検査・薬は意味があるのか、人によって言うことが違う、等々。構造物は文句を言わない代わりに管理者は同様の問いを発しても良いだろう。時間がかかる、金がかかる、この点検と対策は意味があるのか、診断が分かれるのはどうということなのかと。

医療では、エビデンス（根拠）・ベースド（基づく）・メディシン（医療）（Evidence Based Medicine, EBM）と呼ぶ、米国の医療効率化の背景にある動きがある。医療の効果として、臨床研究の結果（エビデンスがあるかどうか）を示すのは今や当然とされているようである。最も信頼性の低いエビデンスは専門家の個人的な経験と見解であり、これは過去の反省に立っている。これより信頼性が高いのは過去のデータをまとめたデータ、さらには一定の人数を将来に向けて追跡し検証していくコホート研究などの結果がある。さらに上位のエビデンスとして統計に基づいたものがいくつかある。

追及しているのは「治る」という目的につながる「検査」「診断」「治療」「予防」であり、それぞれに高いレベルのエビデンスが追及されている。構造物には「性能を確保」するための「設計」「予防」「点検」「評価」「補修・補強」が必要であり、より高いレベルのエビデンスがそれぞれに求められている。アメリカでは 2006 会計年度より 20 年間のプロジェクトとして橋梁長期性能プログラム (Long Term Bridge Performance Project, LTBPP) が開始されている。目視による定性的な点検が必ずしも予測モデルの高度化に結び付いていないことを踏まえて、廃棄される橋梁の徹底的な「解剖的調査」も含めて実性能に関する精度の高いデータを得ることを目指している。我が国においては 2014 年より道路の橋梁・トンネル等の定期点検は 5 年に 1 回が基本となり、多種多様な点検技術と共に膨大なデータが蓄積されるに至った。これを契機として、EBM や LTBPP のように維持管理のプロセスを精査すべき時が来ていると考えられる。

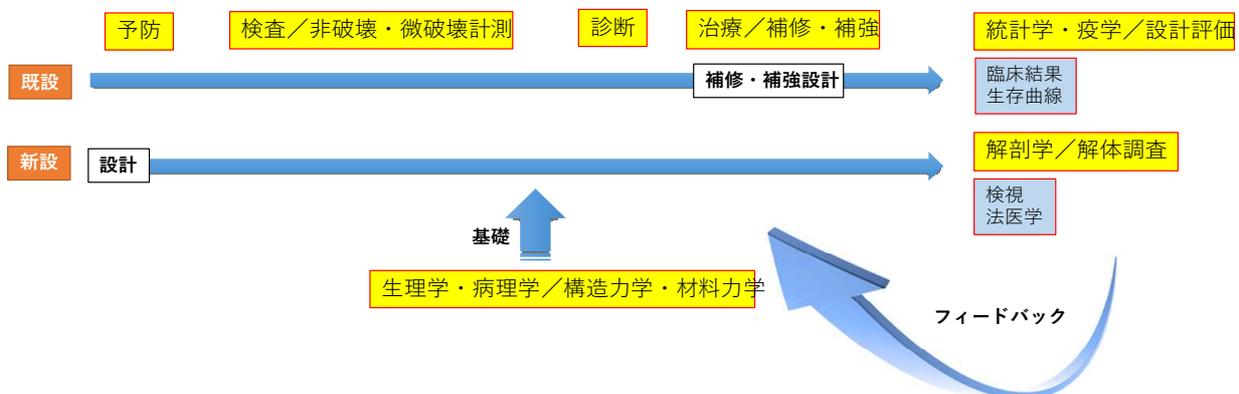


図1 医療とのアナロジー

2. H216 小委の活動内容

複合構造委の H216 小委は既存構造物の劣化状態が構造性能に及ぼす影響を可能なかぎり定量化することを

目的として、2016年より活動を始めた。2年間の最初の1年余で、以下の項目に関連した話題提供を通して現況の把握と委員会内の情報共有を図ってきた。(1) 定量的な構造性能評価法に関する各種手法の調査、(2) 構造性能評価を踏まえた検査手法の検討、(3) 構造物の性能・品質の数値化の検討、(4) 実務における合理的な検査・評価体系の検討、(5) 既設構造物の耐力評価基準 (Load Rating) の調査・検討、である。これらの議論に基づき、点検、解析と性能評価の合理的・効率的な体系を実地確認するために、委員会内にてブラインド部材性能評価を実施することとした。

3. ブラインド部材性能評価

ブラインド部材性能評価の目的は以下の通りである。

エビデンスに基づいた実効性の高い部材性能評価のための点検、解析、評価の技術と体系を検証する試みを行うことを目的とする。

本評価は、実務を模擬することで、点検と性能評価 (解析を含む) の関係と、そこに含まれる技術者の判断を洗い出すことを目的としている。ゆえに下記の実務で遭遇する最も困難なケースを全体のシナリオとした。

表面がコンクリートで中身が不明の部材が2体あり、一見したところ心配な損傷レベルにあり、評価が必要となった。しかしながら、設計図書も点検記録も評価記録もない。新たに点検を行って評価を行う、もしくは点検結果を解析につないで解析により評価を行うものとする。評価基準は管理者により定められている。

本評価は下記の工程表 (表1) に基づき (多少の前後はあるが) 本稿執筆時点では破壊実験まで進んでいる。破壊実験の実施後は、点検、解析、評価の技術と体系を部材性能の定量的評価の観点から検証する予定である。

表1 ブラインド性能評価工程表

日付	ステージ	内容
2018/3/2	第6回小委員会	参加要領案議論
2018/3/3 ～ 2018/3/31	幹事会	参加要領案・参加申し込み票確定 参加呼びかけ
2018/4/1 ～ 2018/5/中旬	点検	損傷前の部材に対して、初期値取りの点検、調査、計測を行う。
2018/4/30		参加申し込み締め切り
2018/5/連休明け	第7回小委員会	実施報告、今後のスケジュール確認
2018/5/下旬	損傷実験	所定の荷重レベルまで載荷して部材に損傷を与えたとともに、部材挙動を確認する。
2018/6/1 ～ 2018/7/中旬	点検 評価	損傷した部材に対して、解析による定量的性能評価につながる点検、調査、計測を行う。 損傷した部材の残存性能について、点検結果より定量的／定性的性能評価を行う。
2018/7/下旬 ～ 2018/8/下旬	解析 評価	点検結果を踏まえた解析により、損傷した部材の挙動を定量的に推定する。 損傷した部材の残存性能について定量的評価を行う。
2018/7/下旬	破壊実験	損傷した部材を終局状態まで載荷して、部材挙動と残存性能を確認する。
2018/8/中旬 ～ 2018/9/1	点検 検証	破壊後の部材について、測定を行う。 点検、解析、評価の技術と体系を部材性能の定量的評価の観点から検証する。 検証用にブラインドではない解析と評価を行う。

4. おわりに

研究討論会では、本稿の内容に関して H216 小委の活動を紹介する。浅学ゆえに医療の用語・考え方には誤解があるかもしれない。その際にご容赦頂きたい。

1. 目的

本研究では、塩害を受ける RC 部材を対象として、曲げ耐力を予測する手法¹⁾を活用して求めた劣化過程²⁾（潜伏期、進展期、加速期および劣化期）の推移（ここでは劣化曲線という）を、対象とする部材の点検結果を想定した調査結果を用いてベイズ理論により更新することにより、将来におけるバラツキを低減する手法を構築するとともに、手法の妥当性の評価も併せて行った。

2. 劣化曲線の算出方法

2.1 鉄筋腐食開始時刻、腐食ひび割れ発生時刻および加速期終了時刻の算出

鉄筋腐食開始時刻： $t_{corr.}$ (年)、腐食ひび割れ発生時刻： $t_{cra.}$ (年) および加速期終了時刻： $t_{de.}$ (年)の算出式をそれぞれ示す。

$$t_{corr.} = \frac{1}{4x_2D} \left\{ \frac{0.1(c + C_{error})}{\text{erf}^{-1}\left(1 - \frac{C_{lim}}{x_1C_0}\right)} \right\}^2 \quad (1)$$

$$t_{cra.} = t_{corr.} + \frac{x_3\eta W_c}{V_b} \quad (2)$$

$$W_c = \frac{100\rho_s}{\pi(\gamma-1)} \left[\alpha_0\beta_0 \frac{0.22\left\{2(c + C_{error}) + \varphi\right\}^2 + \varphi^2}{E_c(c + C_{error} + \varphi)} (f_c')^{\frac{2}{3}} + \alpha_1\beta_1 \frac{c + C_{error} + \varphi}{5(c + C_{error}) + 3\varphi} w_{cr} \right] \quad (3)$$

$$t_{de.} = t_{cra.} + 0.5t_{corr.} \quad (4)$$

ここで、 c ：かぶり(mm)、 D ：塩化物イオンの見かけの拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 C_{lim} ：鉄筋腐食発生限界塩化物イオン濃度(kg/m^3)、 C_0 ：表面塩化物イオン濃度($=-6.0d+15.1=14.0(\text{kg}/\text{m}^3)$)、 d ：H.W.L.から部材下面までの距離[=0.19(m)]、 W_c ：腐食ひび割れ発生時の腐食量(mg/cm^2)、 η ：腐食ひび割れ発生時の腐食量に関する補正係数[=3.68]、 V_b ：腐食ひび割れ発生前の鉄筋の腐食速度($\text{mg}/\text{cm}^2/\text{年}$)、 ρ_s ：鉄筋の密度[=7.85(mg/mm^3)]、 γ ：腐食生成物の体積膨張率[=3.0]、 w_{cr} ：腐食ひび割れ発

生時のひび割れ幅[=0.1(mm)]、 $\alpha_0, \beta_0, \alpha_1, \beta_1$ ：補正係数である。式(1)~(4)の確率変数： $C_{lim}, x_1, C_0, C_{error}, x_2, x_3, V_b, f_c'$ はモンテカルロ法(MCM)により発生させた標本観測値である。

2.2 塩害劣化進行過程の各期間の算出

2.1で求めた $t_{corr.}$ (年)、 $t_{cra.}$ (年)および $t_{de.}$ (年)を用いて、各劣化過程の定義²⁾および既往の研究³⁾から、各劣化過程の期間を次に示すように算出した。

$$t < t_{corr.} < t_{cra.} < t_{de.} \quad \cdots \text{潜伏期} \quad (5)$$

$$t_{corr.} < t < t_{cra.} < t_{de.} \quad \cdots \text{進展期} \quad (6)$$

$$t_{corr.} < t_{cra.} < t < t_{de.} \quad \cdots \text{加速期} \quad (7)$$

$$t_{corr.} < t_{cra.} < t_{de.} < t \quad \cdots \text{劣化期} \quad (8)$$

$t_{corr.}$ (年)、 $t_{cra.}$ (年)および $t_{de.}$ (年)を10000回のシミュレーションを行って求め、供用年数0から50年までの劣化曲線を算出した。算出した結果を図-1に示す。

3. 点検結果を反映した劣化進行過程の更新手法

潜伏期における表面塩化物イオン濃度および塩化物イオンの見かけの拡散係数について、各種非破壊試験により求めた確率分布に従って、それぞれ20個のデータを生成した。なお、本研究では、表面塩化物イオン濃度はガーゼ法や土研法などにより測定した飛来塩分量から推定し、塩化物イオンの見かけの拡散係数は4プローブ法により計測された電気抵抗率から推定⁴⁾した値を用いることを想定している。

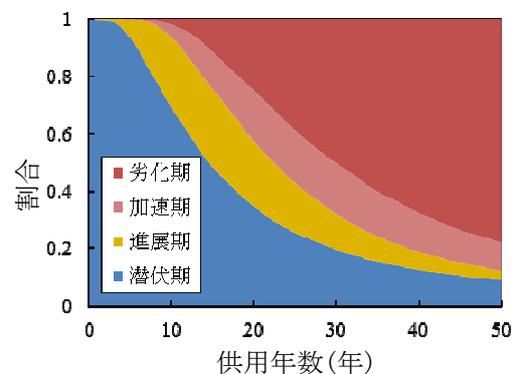


図-1 劣化曲線

キーワード 塩害、劣化曲線、劣化進行予測、モンテカルロ法、ベイズの定理

本稿は下記の共著者・タイトルにて発表されたものである。

平野正大, 内田慎哉, 鎌田敏郎: RC 部材の点検結果を用いた塩害劣化進行予測の更新手法に関する基礎研究, 平成 26 年度全国大会 土木学会第 69 回年次学術講演会, 第 V 部門, pp.319-320, 2014.9.10.

3.1 点検結果の反映方法

本研究では、点検結果を反映した表面塩化物イオン濃度および塩化物イオンの見かけの拡散係数は、ガンマ分布に従うと仮定した。表面塩化物イオン濃度の確率分布に点検結果を反映させる手法について述べる。すなわち、表面塩化物イオン濃度に関するデータ： $\bar{C}_0^{1,n} = (\bar{C}_0^1, \dots, \bar{C}_0^n)$ が獲得できたと考える。このとき、観測値により修正された劣化予測モデルの事後確率密度関数： $\pi(\alpha, \beta | \bar{C}_0^{1,n})$ はベイズの定理、

$$\pi(\alpha, \beta | \bar{C}_0^{1,n}) \propto L(\bar{C}_0^{1,n} | \alpha, \beta) \pi(\alpha) \pi(\beta) \quad (9)$$

により算出することができる。ここで、 $L(\bar{C}_0^{1,n} | \alpha, \beta)$ は点検結果 $\bar{C}_0^{1,n}$ が観測される同時生起確率密度（尤度）であり、また、 $\pi(\alpha)$ 、 $\pi(\beta)$ は確率変数である α と β の事前確率密度関数である。なお、事後確率密度関数： $\pi(\alpha, \beta | \bar{C}_0^{1,n})$ を算出するためには確率分布 $L(\bar{C}_0^{1,n} | \alpha, \beta) \pi(\alpha) \pi(\beta)$ からのランダムサンプリングが必要となる。しかしながら、直接サンプリングすることは困難であるために、マルコフ連鎖モンテカルロシミュレーション法により事後確率密度関数： $\pi(\alpha, \beta | \bar{C}_0^{1,n})$ を算出する。塩化物イオンの見かけの拡散係数も同様に点検結果を反映させる。

3.2 ケーススタディの概要

本研究では、ケーススタディとして、供用年数 15 年目の潜伏期（図-1 参照）における点検結果として、その後の劣化進行が比較的遅いケース 1、およびその後の劣化進行が比較的早いケース 2 の 2 通りを想定した。具体的には、ケース 1 における表面塩化物イオン濃度は平均値 10.0 (kg/m³)、標準偏差 5.05 (kg/m³) の正規分布、塩化物イオンの見かけの拡散係数は平均値 0.20、標準偏差 0.24 の対数正規分布とした。ケース 2 では表面塩化物イオン濃度は平均値 20.0 (kg/m³)、標準偏差 5.05 (kg/m³) の正規分布、塩化物イオンの見かけの拡散係数は平均値 0.60、標準偏差 0.24 の対数正規分布とした。それぞれの分布に従って 20 個のデータを生成した。

3.3 劣化曲線の妥当性の評価

点検結果を反映した確率分布を用いて、2 章で示した方法により劣化曲線を算出した（図-2 および図-3 参照）。ケース 1 を反映した場合とケース 2 を反映した場合を比較すると、ケース 1 の方が潜伏期は大きく、劣化期が小さくなっていることがわかる。このことから、劣化の進行が遅い場合を想定したケース 1 と、劣化の進行が早い場合を想定したケース 2 をそれぞれ適切に反

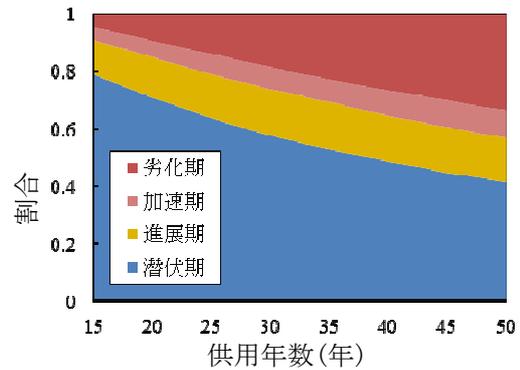


図-2 ケース 1 を反映した劣化曲線

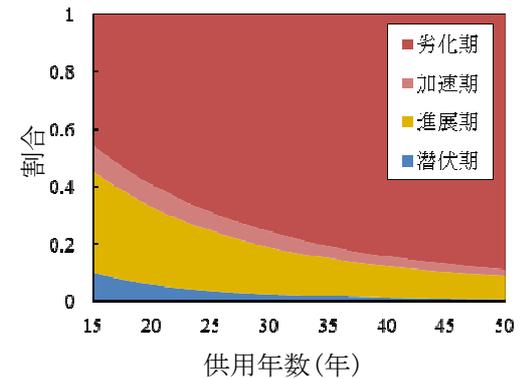


図-3 ケース 2 を反映した劣化曲線

映できていると考えられ、本手法の妥当性が検証できたものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、著者らの過去の研究成果に基づき劣化曲線を求めるとともに、点検結果を反映させることにより、劣化曲線を更新し、将来時点での不確実性を低減する方法を構築した。今後の課題としては、実際の点検結果のデータを用いて本手法を適用し、実構造物に対する本手法の有効性を検証することが挙げられる。

参考文献

- 1) 木下真一，内田慎哉，鎌田敏郎：飛沫帯にある RC 部材の曲げ耐力に関する劣化予測手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.887-892，2011
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書[維持管理編]，2007
- 3) 高橋順，江本久雄，宮本文穂：コンクリートコア試験に基づく橋梁健全度評価システムの検証法に関する一考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.1399-1404，2012
- 4) 榎原彩野，齋藤佑貴，皆川浩，久田真：電気抵抗率による物質透過性評価に及ぼす塩化物イオン濃度の影響，土木学会第 65 回年次学術講演会，2010.9

定量的な性能評価に向けた解析事例の紹介

株式会社コムスエンジニアリング 土屋 智史

1. はじめに

既設構造物の性能の評価および判定に関して、2014年に制定された複合構造標準示方書〔維持管理編〕では、鋼・コンクリート合成構造に対する「定量的評価手法」として非線形有限要素解析による評価の方法と、「外観変状に基づく評価手法」として外観上のグレードによる評価の方法が具体的に規定されている^{1),2)}。他の示方書や指針・基準類においても、構造物の「性能評価」に関して、順次何らかの改訂がなされていくものと想定される。

このようなもとの、合理的な維持管理を実現するためには、構造物の性能をできる限り精度よく、かつ定量的に評価することが重要となるが、非線形解析の果たすべき役割は非常に大きいと思われる。

2. 想定する解析手法と技術者

コンクリート標準示方書³⁾や複合構造標準示方書¹⁾では、新設構造物の設計時照査への適用を念頭に、(非線形)有限要素解析による照査の編が構成されている。そこでは、今後の技術の進展を見込んだ上で、載荷経路依存型の材料モデル(コンクリートに関しては平均応力-平均ひずみ関係)が提示されており、応答値と限界値を比較する照査の仕組みが整えられている。これらの材料モデルは、変状(疲労による損傷を含む)を有する既設構造物への展開が比較的容易である利点を有しており、維持管理にも、同モデルを準用することができる。また、変状の分布は、通常、三次元的かつ非対称な条件となることから、変状を有する構造物および部材には、三次元解析を適用することを基本とする。なお、平均応力-平均ひずみ関係よりも微視的な視点に立ったモデルに基づく解析手法の適用も勿論可能であるが、これらの手法では、一般に解析自由度が増大する。

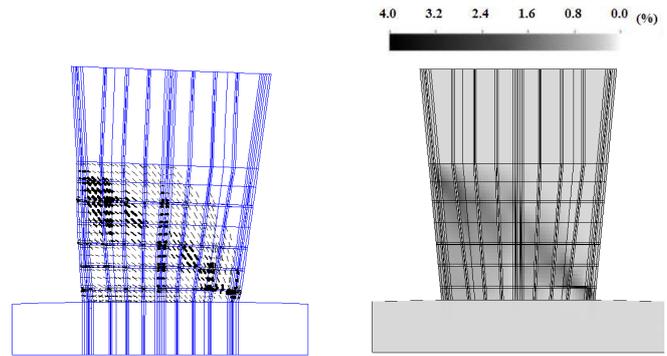
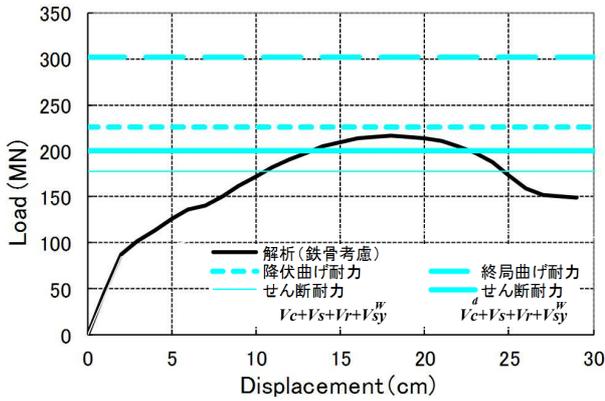
非線形数値解析は、構造物の性能を定量的に評価可能な性能評価手法であり、対象構造物の評価に関する十分な実績を有する解析コードと、適切な知識と経験を有する解析者および結果の評価者との組合せによって、信頼性の高い評価結果を得ることができる²⁾。

なお、蛇足ながら、数値解析は恣意的な結果を無理やり誘導するために用いるものではない。いかなるケースにおいても、「補強不要」といった結果をもたらす“万能薬”ではないことは言うまでもない。

3. 解析評価事例

実務において材料モデルに基づく非線形解析を適用するのは、現状では既設構造物の保有耐力の確認や耐震診断に関する事例が多く、構造形式としては質点系モデルの適用が困難な場合や地中構造物(例えば⁴⁾)等が主な対象となる。棒部材の場合は、曲げ挙動は(特異な変状がなければ)線材モデルによっても精度よく追跡できることから出番は少ないのに対し、せん断・ねじり挙動は構造形式等によっては耐力算定式を用いると過度に安全側評価となる場合もあるため、しばしば材料モデルに基づく非線形解析が適用される。

図-1は、既存中空SRC橋脚の耐震補強検討の一環で行った保有せん断耐力評価の一例⁵⁾である。鉄骨フレームが負担するせん断耐力をどのように見積もるかによって、補強量が大きく変わってくるのが想定されたが、せん断耐力を解析的に評価することができ、解析結果も判断材料の一つとして、耐震補強を終えた事例である。図-2は、異高型複断面に対して地盤との相互作用を考慮した非線形解析を適用した事例⁶⁾である。このような特殊な断面には、通常の耐震検討手法を適用することは困難であることが分かっているが、躯体と地盤との相互作用の影響により、応答と損傷が連続的な三次元的分布となることが確認でき、解析により損傷モードと領域を把握することができる。このような場合には、地盤情報を適切に入手することが肝要である。図-3は、鉄筋腐食を有する試験体の再現解析の一例⁷⁾であり、断面欠損と腐食膨張を要素ごとに数値的に導入して周辺コンクリートの腐食ひび割れを再現した上で、地震動等の所定の作用を入力して応答を確認する。実構造物を想定すれば、断面欠損と腐食膨張の点検情報が解析結果の精度を左右することを意味する。



(1) 橋軸方向の荷重－変位関係と設計式による耐力

(2) 橋軸直角方向載荷時のひび割れパターン図 (変形 10 倍に拡大) と主ひずみコンター図

図-1 中空 SRC 橋脚の解析評価例⁵⁾

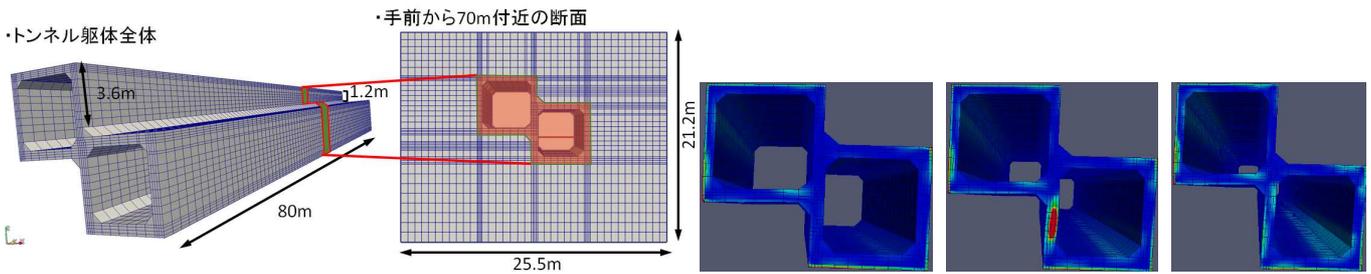
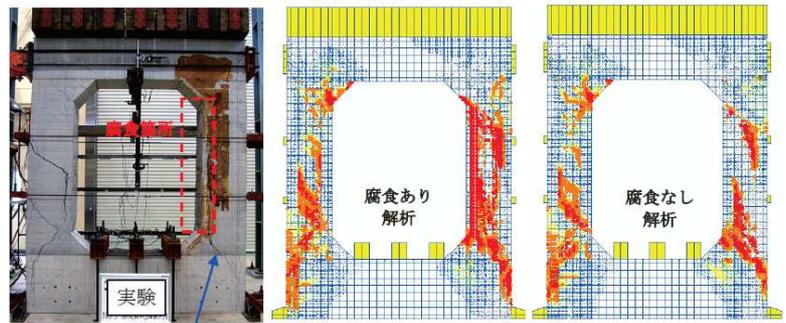
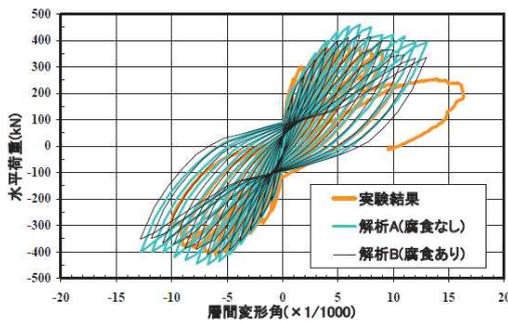


図-2 異高型複断面の地盤連成解析事例⁶⁾



(a) 水平荷重－層間変形角関係

腐食ひび割れと載荷 ひび割れが連続 (b) ひび割れ状況(R=+10/1000)

図-3 鉄筋腐食を考慮した再現解析例⁷⁾

4. まとめ

定量的な構造的な性能評価の実現に向けて、単に解析技術の開発だけでなく、点検データの有効活用とともに、品質保証の観点から安全係数の設定や解析結果の妥当性評価に関する環境整備を進めていく必要がある。土木学会では、数値解析の技術評価制度が設けられており、その一層の活用も望まれる。

参考文献

- 1) 土木学会：2014年制定複合構造標準示方書，2015年
- 2) 複合構造委員会：土木学会平成27年度全国大会研究討論会 研-16 資料，維持管理を変える～点検依存からの脱却と構造的な性能評価の実現に向けて～，2015.9
- 3) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書，2018.3
- 4) 土屋智史ほか：近接するLNG地下タンク群と地盤で構成されるタンクヤード全体の3次元動的応答解析，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.71，No.3，pp.429-448，2015.
- 5) 土木学会：2009年制定複合構造標準示方書 [制定資料]，pp.542-551，2019年
- 6) 佐々木孝太ほか：三次元非線形有限要素法を用いた複断面トンネルにおける耐震性能の検討，第51回地盤工学研究発表会(岡山)，pp.1485-1486，地盤工学会，2016.9
- 7) 松尾豊史，松村卓郎，岩森暁如：鉄筋腐食が生じたRCボックスカルバートのせん断耐荷特性に関する解析的評価，コンクリート工学論文集，第24巻第3号，pp.161-171，2013.9

2018.8.29
土木学会全国大会
研究討論会(複合構造委員会)

NEXCO東日本における点検と評価

建設・技術本部
技術・環境部 構造技術課
安川 義行

あなたに、ベスト・ウエイ。



NEXCO東日本の管理する高速道路の特徴

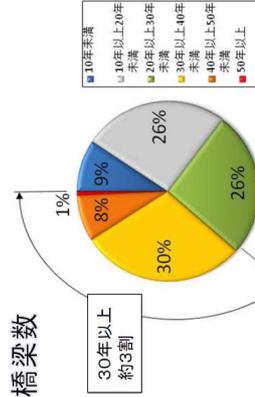
■ 管理延長 約3,871km・43路線※1

管理延長(km)	全体	3,871
トンネル延長(km)	全体	315
橋梁延長(km)	全体	508

■ 平均利用台数 286万台/日※2

■ 凍結防止剤使用量 53t/km※3

■ 経過年別橋梁数



※1:平成29年4月1日現在
※2:平成28年度の日平均利用台数
※3:平成5~24年平均散布量

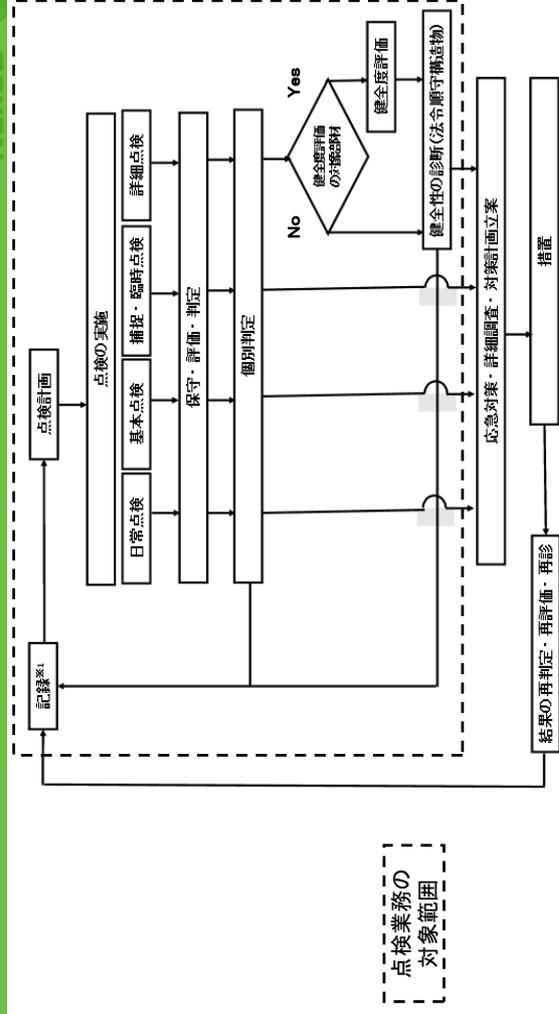


本日の話題

- NEXCO東日本の管理する高速道路の特徴
- 点検業務の流れ
 - ・点検の種類
 - ・点検業務
- 点検とそれに基づく判定
 - ・個別判定:主に短期の補修計画策定に活用
 - 変状判定区分 (AA、A1、A2、B、OK、R、E、e)
 - 対策判定区分 (S、a、b、c、r)
 - ・健全度評価:主に中長期の修繕・更新計画に活用
 - 部材(上部構造、下部構造等)ごとに評価 (I、II、III、IV、V)
- 点検の効率化・高度化・信頼性向上に関する取組
 - ・SMH構想



点検業務の流れ



※1記録は、点検に関する事項(判定・評価・診断、対策後の判定・評価・診断修正等)を指す。
ここの記録は、所定の様式への記録、点検データ管理システム及びBMSへの投入をいう。



「判定の標準」を参考にして変状の進行状況により構造物の機能面から見た変状の程度等から判定 (AA、A1、A2、B、OK、R、E、e)

対象構造物: 橋梁 > 点検箇所: コンクリート橋 > 点検部位: RC桁 > 変状の種類: 劣化による変状

変状パターン	変状の概要	判定区分	
		AA	A1~A2 B
ひび割れ	主に使用環境の要因による引張応力で生じるコンクリートの破壊現象(塩害等)	-	耐久性に影響を及ぼすひび割れが見られる
エロジョン	コンクリート内を雨水が浸透してコンクリートの石成分が打砕目やひび割れ部等から滲出物となって剥れる現象	-	局所的に水やエロジョンの滲出が見られる
錆汁	内部鋼材の腐食によって、コンクリート部材のひび割れ等から錆が表面に流出する現象	-	鉄筋の錆汁の滲出が著しい
鉄筋の露出、腐食	コンクリート中または大気中の鋼材(部材)が酸化して錆びる現象	広範囲にわたり鉄筋の断面欠損が見られる	局所的に鉄筋の露出、腐食が見られる

表11-3-5-1判定の標準(5/26) [コンクリート橋 2/4]抜粋

変状や劣化の進行状況、構造物の性能に着目して、「健全度評価の標準」を参考にして変状グレードを決定 (I、II、III、IV、V)

RC・PC中空床版 > 部材: 主版部 > 劣化機構: 凍結防止剤による塩害[端部劣化]

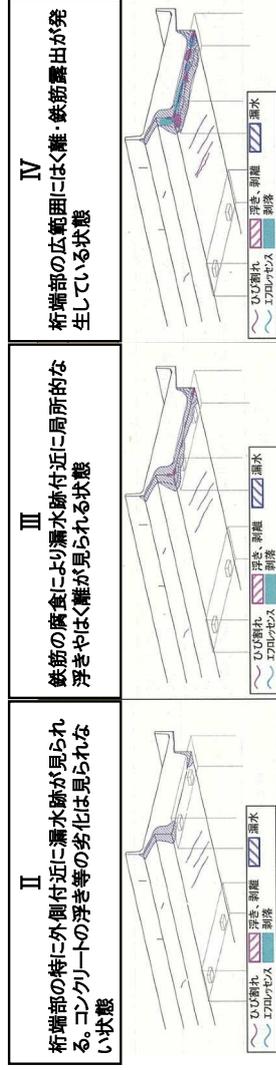


表11-3-6-1 健全度評価の標準(1/32) 抜粋

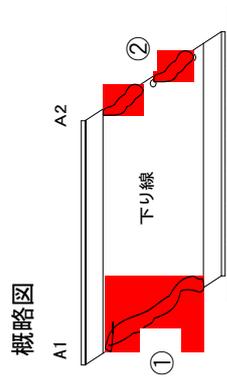
「判定の標準」を参考にして変状の進行状況により構造物の機能面から見た変状の程度等から判定 (AA、A1、A2、B、OK、R、E、e)

対象構造物: 橋梁 > 点検箇所: コンクリート橋 > 点検部位: RC桁 > 変状の種類: 劣化による変状

変状パターン	変状の概要	判定区分	
		AA	A1~A2 B
ひび割れ	主に使用環境の要因による引張応力で生じるコンクリートの破壊現象(塩害等)	-	耐久性に影響を及ぼすひび割れが見られる
エロジョン	コンクリート内を雨水が浸透してコンクリートの石成分が打砕目やひび割れ部等から滲出物となって剥れる現象	-	局所的に水やエロジョンの滲出が見られる
錆汁	内部鋼材の腐食によって、コンクリート部材のひび割れ等から錆が表面に流出する現象	-	鉄筋の錆汁の滲出が著しい
鉄筋の露出、腐食	コンクリート中または大気中の鋼材(部材)が酸化して錆びる現象	広範囲にわたり鉄筋の断面欠損が見られる	局所的に鉄筋の露出、腐食が見られる

表11-3-5-1判定の標準(5/26) [コンクリート橋 2/4]抜粋

評価例: RC中空床版橋端部のはく離・鉄筋露出

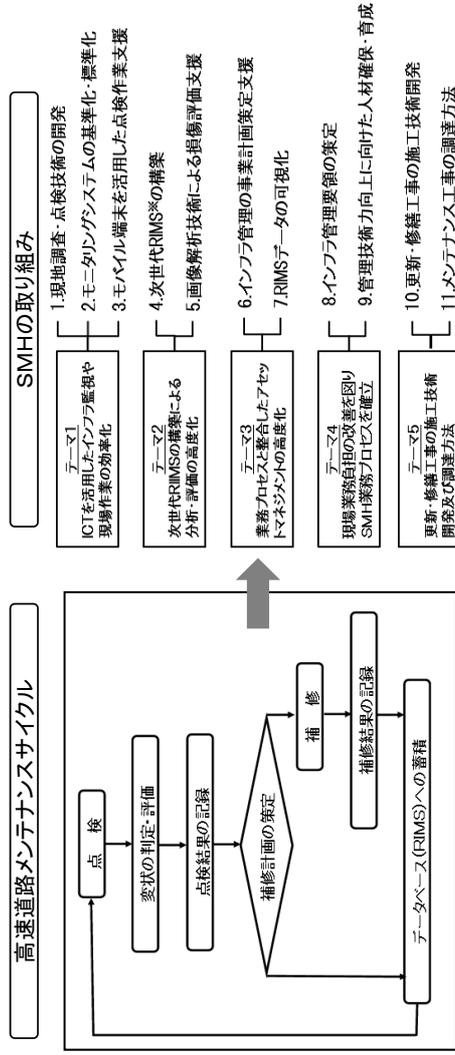


変状判定区分: A1
対策判定区分: a
変状グレード: III
(原因)伸縮装置からの漏水(塩水含む)
(対策)漏水原因の補修対策後、断面修復

点検の効率化・高度化・信頼性向上に関する取組

SMH(Smart Maintenance Highway)構想

長期的な高速道路の「安全・安心」の確保に向けICTや機械化を積極的に導入し、これらが技術者と融合した総合的なメンテナンスサイクルを構築



※RIMS: 道路保全情報システム (Road Maintenance Information Management System)

1. はじめに

建設後長期経過した鉄道構造物が増加しており、維持管理の効率化が課題となっている。本稿では、鉄道コンクリート構造物の維持管理に関する技術基準である「鉄道構造物等維持管理標準」¹⁾ (以下、鉄道維持管理標準) の概要と、現状の課題に対する取り組みについて述べる。

2. 鉄道維持管理標準の概要

鉄道構造物の維持管理は、性能照査型の体系となっており、要求性能として、安全性・使用性・復旧性を設定している。これらの要求性能を満足しているか否かは、性能項目（破壊、公衆安全性、乗り心地など）ごとに断面力や変位・変形などの指標を用いて照査することにより明らかとなるが、建設時に適切な設計・施工が行われたことが確認され、その状態を保っていると認められれば、要求性能を満足するといえる。そこで、策定された維持管理計画のもと、図1に示す流れで構造物の検査を行い、健全度に応じて措置を講じ、検査や措置の結果を記録するという手順により維持管理を行うことが基本となる。検査の区分は、表1に示すとおりである。

目視により性能照査を行う場合には、性能項目の趣旨を十分理解した上で、経験や知識に基づき判断する。一方、個別検査などで定量的な性能照査を行う場合は、式(1)に示す維持管理指標 J を用いて、現時点および目標とする供用期間終了時の照査を行う。そして、表3に示す破壊に関する安全性の健全度判定例のように、 J の値に応じて健全度を判定する。

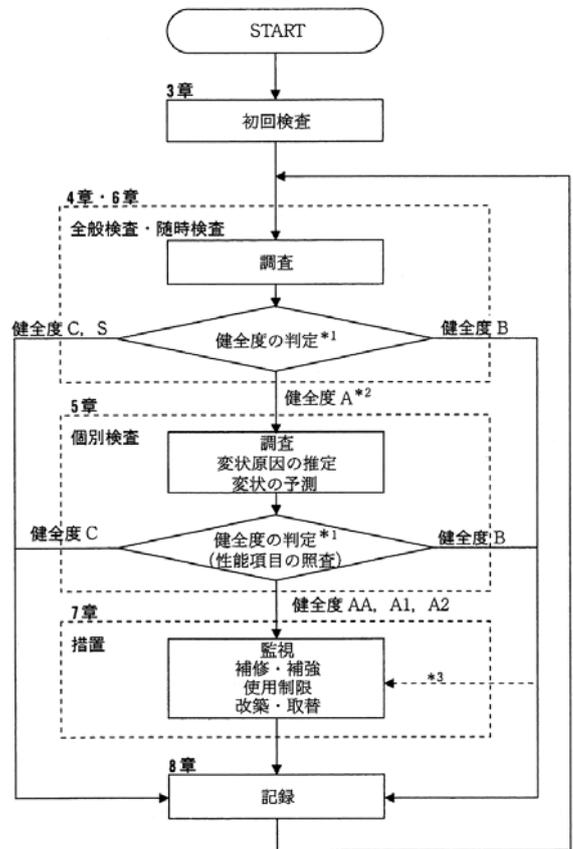
$$J = \gamma_i \cdot I_{Rm} / I_{Lm} \times K_m \quad (1)$$

ここに、 I_{Rm} : 維持管理用応答値、 I_{Lm} : 維持管理用限界値、 γ_i : 構造物係数、 K_m : 設計式を既設構造物の維持管理に用いるための補正係数である。

3. 現状の課題

維持管理の記録は、設計図書、建設時の施工記録、建設後の検査結果や措置の記録などが対象となる。こ

のうち、検査の記録に関しては、全般検査が中心であり、顕著な変状が生じていない構造物においては、表2に示す健全度の判定のみが記録されているケースが多い。しかし、さらなる構造物の経年増加に伴い、変状を生じる構造物の増加も予測されることから、今後は、定量的なデータを取得するケースが増加していくものと



*1 健全度については、表2参照

*2 健全度 AA の場合は緊急に措置を講じた上で、個別検査

*3 必要に応じて、監視等の措置。

図1 鉄道構造物における維持管理の流れの例¹⁾

表1 検査の区分と概要

検査の区分		時期	目的	調査方法
初回検査		供用開始前	新設構造物および改築・取替を行った構造物の初期の状態を把握	入念な目視、必要に応じて目視以外の方法
全般検査	通常全般検査	2年毎	構造物の変状等の有無およびその進行性を把握	目視を基本
	特別全般検査	2年毎、延伸可	健全度判定の精度を高めるため、必要に応じて通常全般検査に代えて実施	入念な目視、必要に応じて目視以外の方法
個別検査		必要に応じて実施	全般検査、随時検査の結果、詳細な検査が必要とされた構造物に対して、精度の高い健全度の判定を行う	入念な目視、必要に応じて目視以外の方法
随時検査		必要に応じて実施	地震等により、変状の発生もしくはその恐れのある構造物を抽出	目視を基本

考えられる。定量的なデータは、変状の進行性の判断や予測にも必要であり、これらのデータを維持管理に活用していくための記録方法が課題の一つと考えられる。

また、耐力等の限界値の設定においては、剥離・剥落によるコンクリート断面の減少や腐食による鋼材断面の減少の影響を考慮して求めることとしている。しかし、これらの影響について環境条件等を考慮するには至っていない事など、予測精度の向上も今後の課題と考えられる。

4. 今後の取り組み

計画的・効率的な維持管理を行っていくためには、図2に示すように、設計・施工データと維持管理データ（検査記録）を統合したデータベースを構築し、現時点の性能照査から将来の変状予測までを FEM 解析等により精度よく行い、維持管理計画へ反映することが有効な手法の一つと考えられる。今後は、このような維持管理システムを構築していくとともに、精度の高い変状予測を可能とするための解析モデルの充実が重要と考えられる。

5. おわりに

鉄道の維持管理においては、早い時期から予防保全の重要性が認識されていたが、その取り組みはまだ十分とは言えない状況にある。今後、さらに老朽構造物が増加していくこと考慮すると、事後保全だけでは対応が困難となることが考えられる。予防保全を積極的に取り入れて計画的・効率的な維持管理を行っていくためには、構造物の設計～施工～設計耐用期間に至るまでを連続して取り扱うことが出来るような維持管理システムを構築していく必要があると考える。

表2 構造物の状態と標準的な健全度の判定

健全度	構造物の状態	
A	AA	運転保安、旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす、またはそのおそれのある変状等があるもの
	A1	進行している変状等があり、構造物の性能が低下しつつあるもの、または、大雨、出水、地震等により、構造物の性能を失うおそれのあるもの
	A2	変状等があり、将来それが構造物の性能を低下させるおそれのあるもの
B	将来、健全度 A になるおそれのある変状等があるもの	
C	軽微な変状等があるもの	
S	健全なもの	

表3 破壊に関する安全性の照査と健全度判定例

現時点	照査結果	健全度	
	目標とする供用期間終了時		
$J > 1.0$	—	AA	
	$J > 1.0$	A1	
	$0.8 < J \leq 1.0$	A2	
	$0.7 < J \leq 0.8$		B
			C
$J \leq 1.0$		S	

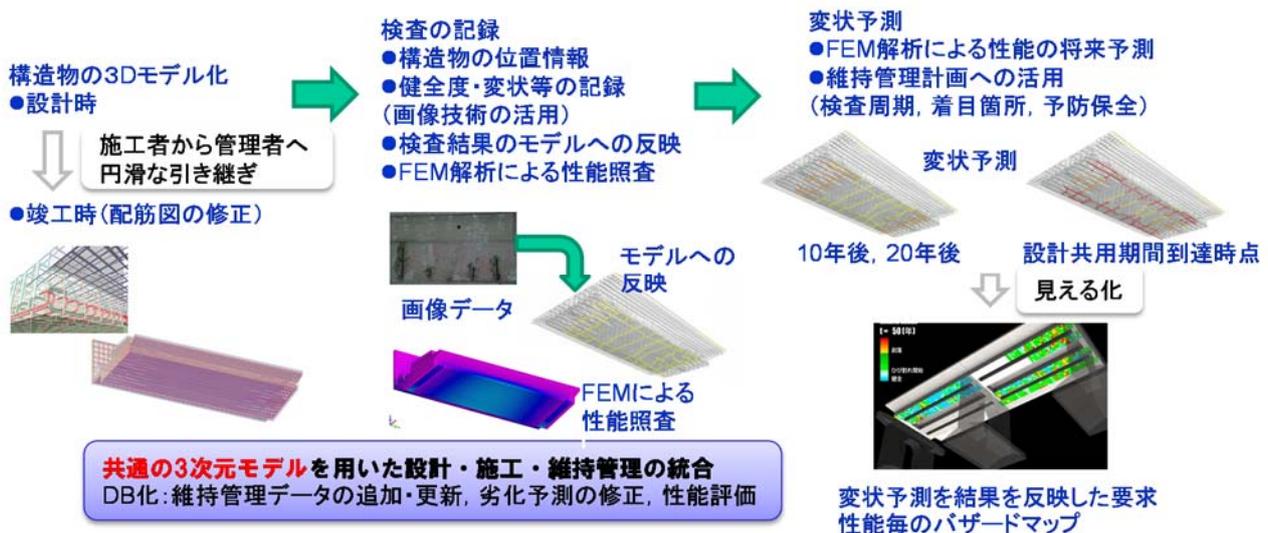


図2 構造物データベースを活用した今後の維持管理のイメージ

参考文献

1) 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。

1. はじめに

本稿では、インフラ維持管理におけるデータサイエンスの活用について述べる。近年話題の「データサイエンス」については、様々な定義がなされるが、ここでは、私見を含めた解釈により、インフラマネジメントや構造物性能評価 等の具体的な土木の課題に対するデータサイエンスの活用に関して話題提供を行いたい。

2. インフラ維持管理にデータサイエンスを用いる場合の課題

インフラ維持管理業務では、点検記録等のデータに基づいて意思決定を行う事より、データサイエンスとの相性が良好であり、多数の先行研究・開発が報告されている¹⁾。インフラ維持管理分野においてデータサイエンス等を活用し、構造物性能評価等のモデリングを行う場合には、少なくとも次の3つの課題が存在する。

- ① **正例データの偏り**: インフラマネジメントにおいて扱う対象とする事象は、極めて発生頻度の低い場合が多い。例えば、変状や損傷等の発見や予測等を行う場合には、極めて発生確率の低い事象を扱い、これらの事象発生リスクを限りなくゼロに近づける等の要件が求められる。対象事象（正例）が含まれる割合が0.1%といった事も有り、このような場合には、10万レコード中に100件程度しか正例が存在しないデータを扱うこととなる。こうしたデータは一般に、不均衡データ（Imbalanced data）と呼ばれ、モデリングや得られたモデルの性能評価の際には注意が必要である。正例・負例の判別性能を表現する混同行列等を用い、各指標の意味を正しくとらえ、正例に関する精度や検出率をあわせて評価する事が必要である。また、正例件数が少ない場合は特に、過適合にも注意が必要である。
- ② **データクレンジング**: インフラ維持管理業務で蓄積されているデータは、維持管理業務では問題が生じない値であっても、データサイエンス等の機械による利用時には、例えば、データ値表現の揺れや、複数値の登録 等である。これらのデータエラーは、人による登録時の混入や、管理者毎の表現の差異、あるいは、入力や評価基準・仕様の変更等により生じる場合もある。データエラーは、データが実業務で利用されている証とも言えるが、分析等の前には、適切に処置する事が必要である。データクレンジングやデータ調製等の前処理は、分析結果の性能や解釈に大きく影響する重要な工程である。
- ③ **分析結果の解釈と業務との比較**: 分析により得られた結果について、業務等における利用を検討する場合には、業務導入の貢献を含めた評価が必要となる。インフラ維持管理において、分析結果が解釈できない成果をそのまま業務で用いる事は難しく、多くの場合には、生成したモデルの解釈を試みる。しかし、得られるモデルの解釈性と性能とは、一般にはトレードオフの関係となる(図-1)。深層学習等により得たモデルについて、推定等の性能が十分に高い場合には、モデルの解釈に注力せず、高い性能を業務で直接に用いる方策を選定する方向も有る。獲得したモデルの業務導入の評価においては、「現業」との比較により評価を行う事が考えられるが、現業の定量化の方法を含め、評価方法と導入効果のシミュレーション等について、議論が必要となる。

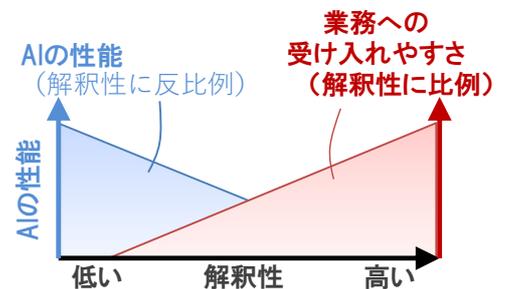


図-1 AI の性能と解釈性の一般的な関係

3. データサイエンスが可能にする事

データ分析を行うことで、データのマクロ的な特性を把握することができる。多量のデータの全体的な傾向を把握することで、データへの理解と、新たな知見に関する気づきを得ることが期待される。データ分析についてのツールやクラウドサービスについては、近年多数発表されている²⁾。データの傾向やルール抽出に関するデータマイニング的なアプローチのほか、判別や推定等の多変量解析や機械学習手法も活用できる(図-2)。

これらの手法の多くは、機械による統計的処理の強みを活かし、多くのデータが示す挙動を捉えたモデリングが可能である。ただし、これらのモデリングにより得られる結果は、データの大半が示唆する知見であり、業務において既知の内容である場合も多い。

データサイエンスにより新たな発見を得るためには、こうしたマクロ的な結果を理解し、排除等した上で、より詳細なデータの挙動を調査し、議論を詰めていく事が、重要な取り組みであると考えられる。このような場合には、データに対する充分な理解と、構造物を取り巻く工学的知識をふまえた充分な議論が必要である。

区分	分析の目的	目的変数 (従属変数)	説明変数(独立変数)			
			量的	質的	質/量混合*	
統計的傾向分析	値を把握	なし	・表可視化(個々の値を把握)・統計量算出(代表値を把握)			
	データ分布を把握		・散布図・ヒストグラム(度数分布を把握)			
地理的傾向分析	空間分布を把握		・路線傾向把握(路線上の分布を把握)・地図可視化(地理的分布を把握)			
時間的傾向分析	時間変遷を把握		・時間傾向把握(時間変遷を把握)			
ルール抽出 (探索的 データ分析)	データの相関/ 共起を調べる	なし	・相関図 ・相関係数 ・因子分析	・クロス集計 ・アソシエーション分析 ・ベイジアンネットワーク	・統合多重相関分析	
	データの相違を 調べる (仮説検証)		・検定(対応の無い2変数) ・F検定(2変数) ・分散分析(3変数以上)	・カイニ乗検定(2変数間 /3変数以上)		
	データ削減(縮退/ 要約)		・主成分分析(PCA)			
	類似性評価/クラス リング		・クラスター分析 ・数量化IV類	・数量化III類		
推定 (多変量解析/ 機械学習)	量の推定 (回帰)	あり	量的	・重回帰分析	・数量化I類	・統合重回帰分析
	質の推定 (判別/識別)		質的	・判別分析 ・決定木分析 ・SVM	・数量化II類 ・アソシエーション分析	・損傷予測審与分析 ・bias補正混合判別予測

図-2 東京大学 社会連携講座 成果の概要より引用¹⁾

4. おわりに

データサイエンスに関して、データサイエンティスト協会が示すデータサイエンティストのスキルレベルの定義³⁾によれば、「ビジネス力」、「データサイエンス力」、「データエンジニアリング力」の3つの視点が示されている。また、同様の整理になるが、Drew Conway が 2010 年に示したデータサイエンスベン図⁴⁾では、「Hacking Skills」、「Math & Statistics Knowledge」、「Substantive Expertize」の3つが示されている。これらは少しずつ異なる見方があるものの、互いに大きな齟齬は無い。このような種類のスキル・専門性を全て有する人物がデータサイエンティストだとすれば、そうした専門家が出現することは、大変に期待が高い。しかし、土木のメンテナンスに関する分野において、全ての領域の深い知識と経験を兼ね備える人物を待つよりも、それぞれの専門家が語彙を共有し、チームを組んで議論する方が取り組み方としては未来に近いとも考えられる。Drew Conway の示す「Hacking Skills」や「Math & Statistics Knowledge」は、これまでの常識と違った知見を維持管理現場に与えてくれる可能性がある。ただし、これらにより示される結果は、物理的な特性は考慮しない結果として出力され、多くの場合には「仮説」しか示してくれない。この結果を紐解き、構造物の劣化等の事象の背景に潜む状況を理解するためには、より慎重な解釈と議論が必要であり、この部分には、まだまだ人に残された仕事が沢山有り、AI(あるいは情報技術者)と土木の専門家とが協働して価値を生み出されるべき取り組みだと考えられる。また、このようにして生み出した結果を実際の業務でどのように活用するかに関しては、適切な評価方法に基づいた柔軟な思考が求められる。

参考文献

- 1) 東京大学 大学院情報学環 社会連携講座「情報技術によるインフラ高度化」,
<http://www.advanced-infra.org/english.html>, accessed on July, 2018.
- 2) Wakuda, Y., Isobe, M., and Ishikawa, Y.: Data Science Support System for Infrastructure Maintenance on Cloud, International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE), 2018.
- 3) データサイエンティスト協会, データサイエンティストスキルチェックリスト ver2.00,
https://www.slideshare.net/DataScientist_JP/2017-81179087, accessed on July, 2018.
- 4) Drew Conway, The Data Science Venn Diagram,
<http://www.dataists.com/2010/09/the-data-science-venn-diagram>, accessed on July, 2018.

連絡先

〒060-0814 札幌市北区北 14 条西 9 丁目 北海道大学 数理・データサイエンス教育研究センター
E-mail: wakuda@lmd.ist.hokudai.ac.jp, TEL: 011-706-4401