

# AI を用いた栈橋の残存耐力評価技術

## 構造物の寿命を予測し合理的で計画的な維持管理に貢献

宇野 州彦

高度経済成長期に数多くの港湾施設が建設され、適切な維持管理がより一層重要となってきた。一方で、維持管理の調査結果である劣化度や性能低下度では、栈橋の供用継続の可否や補修補強のタイミングが把握できず、施設管理者が維持管理を計画的に実施しづらい現状にある。そこで、AI を用いて栈橋の残存耐力や寿命を推定し、供用可否等を判断できる技術を開発した。本稿では、開発技術の概要と、技術の精度検証、技術適用による効果や実栈橋への適用事例について紹介する。

キーワード：栈橋, 残存耐力, AI, 将来予測, 予防保全

### 1. はじめに

高度経済成長期に数多くの社会基盤施設を整備したわが国では、現在その供用期間が50年を超える構造物も多く、適切な維持管理はより一層重要となってきた。建設後50年以上経過する公共の港湾施設の割合は、2020年3月現在約21%であるが、2030年3月に約43%、2040年3月には約66%に達すると予測されている<sup>1)</sup>。また、公共の港湾58,839施設のうち10,178施設が要緊急対策施設であることが判明している(2019年3月31日時点)<sup>2)</sup>。他、鉄鋼、セメント、非鉄金属などの民間企業が保有する港湾施設も数多く存在する。

港湾法の改正に伴い港湾施設の点検が義務化されたものの、特に民間では施設に不具合が生じてから対策を講じる「事後保全」とする場合が多い。国土交通省が所管する社会基盤施設を対象に推計した維持管理・更新費用は、「事後保全」を「予防保全」に転換することで、1年当たりの費用は2048年度には約5割減少し、2019～2048年度の30年間の累計でも約3割減少する見込みと言われており<sup>3)</sup>、民間の港湾施設に

においても同様の傾向にあると推測される。「予防保全」によりコストを抑えることで、民間の港湾施設の維持管理や補修補強が積極的に進むものと考えられる。しかし、維持管理の調査で得られる劣化度や性能低下度は、調査時点における施設の状態を表すものであり、供用継続の可否や補修補強を行うタイミングの合理的な判断指標を示し管理者自らが判断することが可能な技術はこれまで存在しなかった。

そこで、港湾の栈橋を対象に、調査結果に基づき評価した残存耐力から構造物の寿命を推定し、施設管理者が意思決定しやすい情報を提供する技術を開発した。

### 2. 技術の概要

栈橋の残存耐力を評価するための手順を図-1に示す。残存耐力を評価するためには梁の鉄筋の腐食程度を把握する必要があることから、まず梁下面のコンクリートを研り、鉄筋を表面に露出した上でノギス等により鉄筋径を測定し鉄筋の腐食量を算定する。梁ごとに鉄筋腐食量を算定することができれば、次に個々

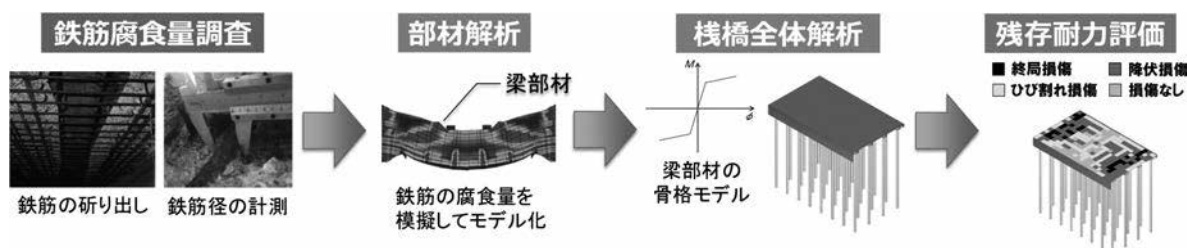


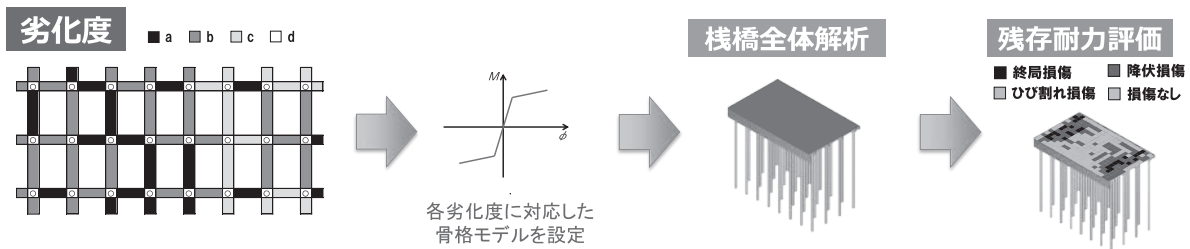
図-1 栈橋の残存耐力を評価するための手順

の梁のFEM解析を行い、梁部材の骨格モデルを算定する。梁部材の骨格モデルは、残存耐力評価を行うための栈橋全体系の構造解析を行う際に必要となる。FEM解析で梁部材の骨格モデルが求めれば、栈橋全体系の解析モデルでモデル化を行い、地震応答解析を実施することで地震により生じる梁の損傷といった残存耐力を求めることができる。しかし、鉄筋腐食が想定される梁が多くなると、斫り出すコンクリートの箇所や量が膨大となり現実的ではなくなる。また、FEM解析を行う際には、鉄筋の腐食量を模擬してモデル化する必要があり、単に鉄筋径を減少させるだけでなく、鉄筋が腐食する際の膨張圧等も考慮できる解析コードを用いることが望ましく、考慮可能な解析コードが限られ、且つ高度な解析技術を要することとなる。これらのことから残存耐力評価を行うことは非常に困難であった。

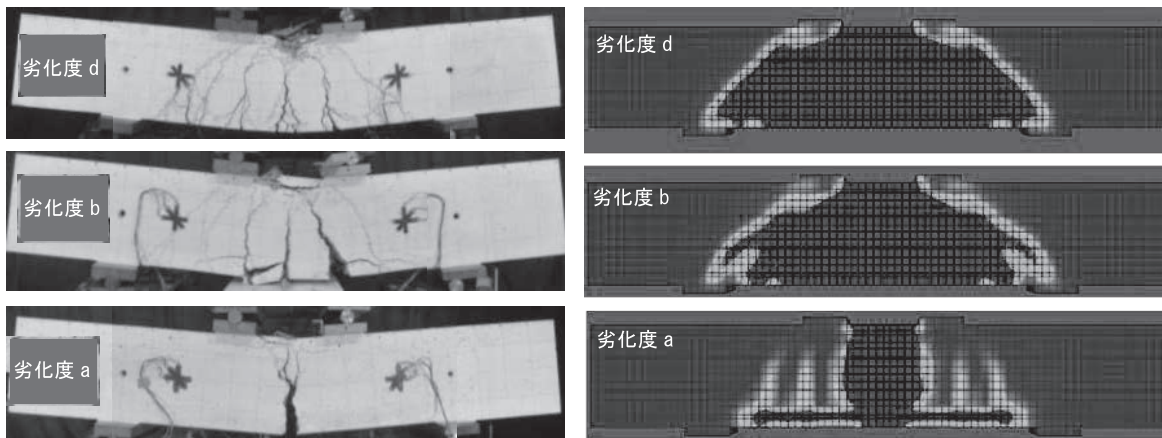
そこで、まず一般定期点検から得られる劣化度 a ~ d を用いて残存耐力を評価できる技術を開発した (図一2)<sup>4)</sup>。劣化度から残存耐力を評価できるようにするには、それぞれの劣化度から梁部材の骨格モデルを算定する必要がある。各劣化度と梁部材の耐力との関係を明らかにするために、構造実験を行った。梁の最下段鉄筋を電食により強制的に腐食させ、各劣化度に相

当する試験体を製作した。鉄筋の腐食状況は、試験体が想定通りに腐食しているかどうかをテストピースにより適宜確認を行った。構造実験により劣化度によって破壊形態が異なることや、耐力に違いがあることを明らかにした。またFEM解析も実施し、実験を再現できることも確認した (図一3)。一方、この構造実験では、電食により強制的に鉄筋を腐食させたことから、自然暴露環境により腐食した鉄筋と異なり、腐食生成物の相違により、腐食時の膨張量にも違いがあること、また構造実験に用いた試験体寸法が実物梁に比べ小さかったことから、寸法効果の影響が排除できないことの課題が残されていた。そこで、栈橋更新工事に伴い、実際に老朽化した栈橋梁の一部を撤去する機会を活用して載荷実験を行い、自然環境で腐食した梁と耐力との関係性を明らかにした。また試験体と実物梁、実物寸法による試験体の構造性能を比較することで寸法効果の影響も考察し、課題であった腐食方法と寸法の影響を考慮した骨格モデルを構築した<sup>5)</sup>。

以上により、梁の劣化度が分かれば残存耐力評価が可能となったものの、栈橋全体系の構造解析は都度行う必要があることから、コストや時間の面で課題が残っていた。また、構造物の寿命を推定するために、点検診断時の残存耐力評価だけでなく、点検から年数



図一2 劣化度判定結果から構造解析により残存耐力を評価する技術



図一3 実験・解析による劣化度と部材耐力の関係性の把握

が経過したときの残存耐力評価を複数年予測することが必要になることから、都度構造解析を実施するのは現実的ではなかった。

そこで、人工知能（AI）を用いて、構造解析を行うことなく残存耐力を評価できる技術を開発した（図—4）<sup>6), 7)</sup>。AIモデルの構築には、約2,000ケースの構造解析条件と構造解析結果の組み合わせを教師データとしてAIに学習させた（図—5）。教師データの構造解析条件（説明変数）として、栈橋の種類や劣化度、外力をランダムに組み合わせた上で構造解析を実施し、その組み合わせにおける目的変数となる構造解析結果を取得する。これら説明変数と目的変数をセットにした教師データを作成した。

### 3. 開発技術の精度と技術適用による効果

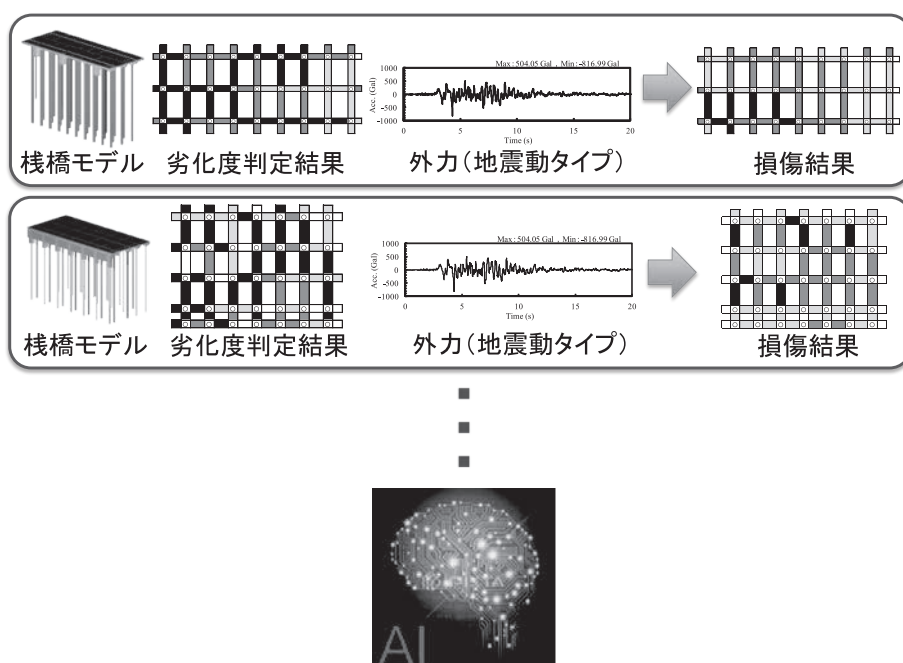
構築したAIモデルで残存耐力を評価した事例について、劣化した栈橋Aおよび栈橋Bの残存耐力の予測結果を図—6に示す。AIモデルによる予測結果と

あわせて、正解となる構造解析を実施した結果および正解率も示している。この結果から、本開発技術は高い精度で損傷を予測できることが分かる。また、今回対象とした栈橋においては、終局損傷に至る梁の箇所を適切に予測できている。さらに、この2件を含む計400件の残存耐力評価を行い、予測精度の検証を行った結果を図—7に示す。概ね80%以上の正解率で予測可能であり、検証結果の中央値は88%と高い値となっている。以上のことから、精度の高いAIモデルを構築することができた。

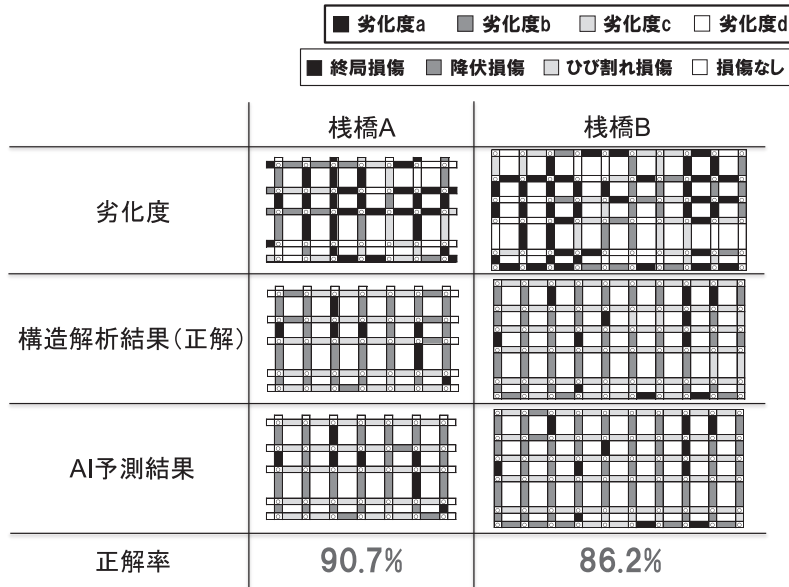
AIを用いた評価技術であることから、地震力により損傷する具体的な梁部材とその損傷程度を即時に把握することが可能である。本技術の経済的効果として、先に述べたように鉄筋のやり出し作業やFEM解析、栈橋全体系の構造解析を不要にした点が挙げられる。一例として3,000m<sup>2</sup>の栈橋を対象とした場合、鉄筋のやり出し作業として約2～3ヶ月、その後のFEM解析で約2ヶ月、栈橋全体系の構造解析（残存耐力評価）で約1.5ヶ月要するため、合計5.5～6.5ヶ月



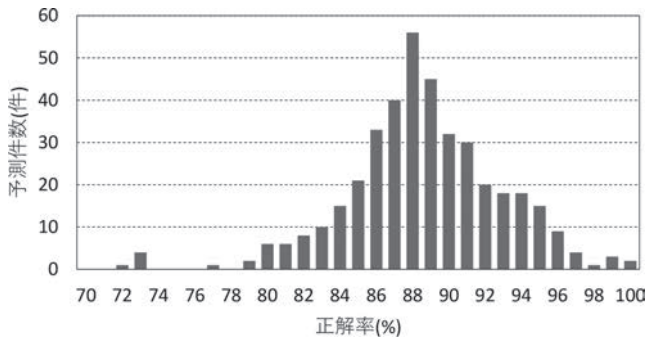
図—4 AIを用いた栈橋の残存耐力評価



図—5 AIモデルの学習方法イメージ



図一六 劣化した栈橋の残存耐力評価と正解率



図一七 AIモデルの精度検証結果

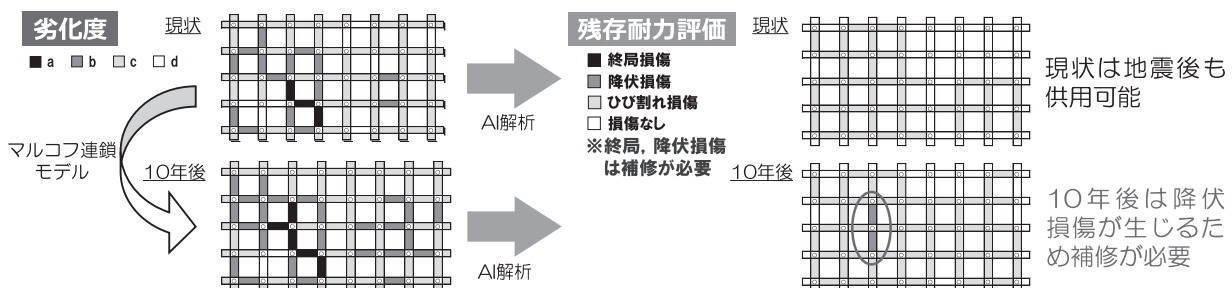
月が必要とされていた。本技術を活用することで、一般定期点検と劣化度判定までを約0.5～1ヶ月、AIによる残存耐力評価を約0.1ヶ月で行うことができ、合計0.6～1.1ヶ月で残存耐力評価が可能となる。残存耐力を算定するまでの期間を最大で約91%削減できる。

また、マルコフ連鎖モデル等の劣化進行の確率モデルを本技術と併用することで、年数の経過による残存耐力の変化を把握することができるため、栈橋の供用継続が可能な期間を具体的に設定することができる。

現状と将来の残存耐力評価の事例を図一八に示す。図に示すように、現状の劣化度においては残存耐力評価を行うと、損傷なしあるいはひび割れ損傷のみとなっているため、直ちに補修が必要な状況ではない。しかし、マルコフ連鎖モデルにより10年後の劣化度を予測して、その劣化度に対する残存耐力評価を行ったところ、降伏損傷が生じる梁が出現した。この結果を活用することで、例えば10年以内に補修工事の計画を立案し早期に対応をとることが可能となる。直ちに補修が必要となるような損傷がいつ現れるのか、またどの梁に出現するのかを把握することができるため、部分補修を行う等の対応も可能となる。

#### 4. 実栈橋への適用

ここでは、1970年代に建設された栈橋について、本技術を適用して残存耐力を評価した事例について述べる。対象となる栈橋の平面図を調査から得られた劣化度判定結果とあわせて図一九に示す。当該栈橋は、南側の一部について補修工事をすでに実施しており、



図一八 残存耐力評価の将来予測事例

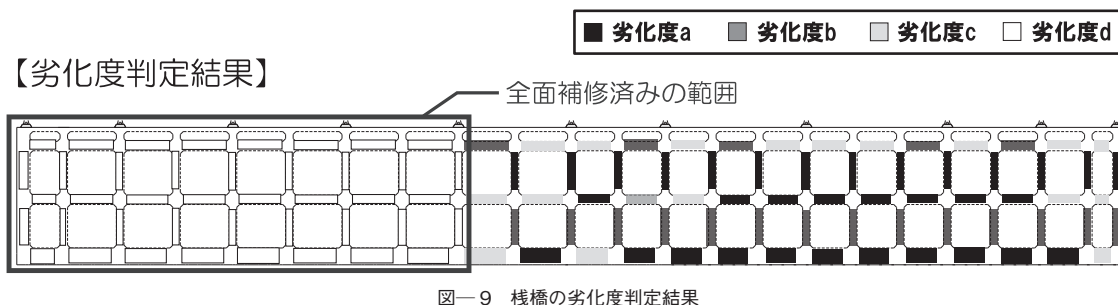


図-9 栈橋の劣化度判定結果

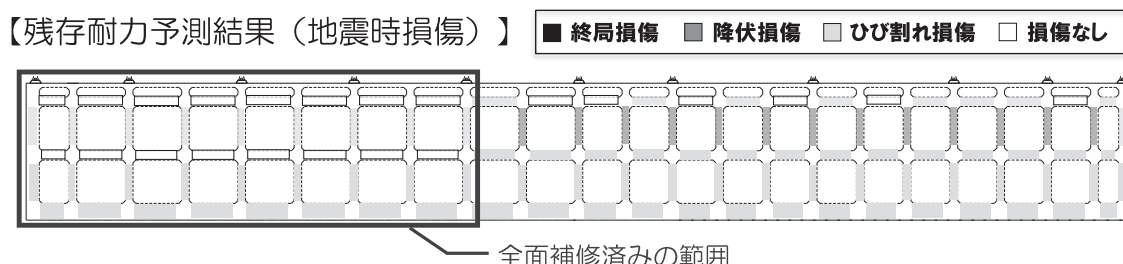


図-10 栈橋の残存耐力評価結果（レベル1地震動）

補修済みの範囲については、劣化度dと判定されている。このような一部補修済みの栈橋に対して、本技術により残存耐力を評価した結果を図-10に示す。結果から、未補修範囲においては、地震時に降伏を超える損傷が発生すると評価された。さらに、未補修部分の劣化した梁の影響を受け、すでに補修を行った梁についても損傷が拡大することが示された。このように、部分的な補修を行う際には、補修による効果と未補修部分の相互影響をあらかじめ把握しておくことが重要であり、それらを把握して補修を実施しなければその効果は限定的なものとなる可能性がある。本技術を活用することで、部分補修による効果や未補修部分の影響を考慮した予測を事前に把握することができるため、単に現状の残存耐力を把握するだけでなく、より合理的な補修方法を検討することができる。

### 5. おわりに

本技術は、施設管理者の方々から従前より問合せいただいていた「点検調査結果については理解したが、結局この栈橋はいつまで使えるのか？地震がきたら壊れるのか？」という懸念に対し、施設管理者が補修補強等の判断ができる指標が必要と考え、開発を始めたものである。劣化した栈橋の危険性を具体的に把握することで、施設管理者が積極的に維持管理に関わることとなり、予防保全型の維持管理へ転換が図られるも

のと考えている。本技術の活用により、合理的で計画的な維持管理が促進されることを祈念する次第である。

最後に本技術の開発や実栈橋への開発技術の適用にあたり、ご指導、ご支援をいただいた皆様に、謝意を表します。

JCMA

#### 《参考文献》

- 1) 国土交通省：国土交通省インフラ長寿命化計画（行動計画）令和3年度～令和7年度，pp.6-7，2021.
- 2) 国土交通省：令和2年版国土交通白書，pp.142-143，2020.
- 3) 国土交通省：令和2年版国土交通白書，p.146，2020.
- 4) 宇野州彦，岩波光保：劣化度判定結果を活用した残存耐力評価手法の実栈橋への適用，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.74，No.2，pp.I-55-I-60，2018.
- 5) 宇野州彦，岩波光保：鉄筋腐食を有する栈橋上部工を模擬した試験体の残存耐力に与える腐食方法及び縮尺の影響評価，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.75，No.2，pp.I-827-I-832，2019.
- 6) 宇野州彦，白可，岩波光保：人工知能技術を活用した栈橋の残存耐力評価手法に関する研究，土木学会論文集B3（海洋開発），Vol.76，No.2，pp.I-600-I-605，2020.
- 7) 宇野州彦，白可，岩波光保：画像情報を用いた機械学習手法による栈橋の残存耐力評価に関する研究，AI・データサイエンス論文集，Vol.1，No.1，pp.132-141，2020.

#### 【筆者紹介】

宇野 州彦（うの くにしこ）  
五洋建設株式会社  
技術研究所 土木技術開発部  
担当部長

