

第24回 国土技術開発賞 優秀賞受賞

人工知能を用いた栈橋の
残存耐力評価技術

～構造物の寿命を予測し合理的・計画的な維持管理に貢献～

〔受賞者〕 五洋建設株式会社

〔本稿執筆者〕 宇野 州彦
うの くにひこ

以下に、第24回 国土技術開発賞で優秀賞を受賞した「人工知能を用いた栈橋の残存耐力評価技術」を紹介します。

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ている。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月で約21%、2030年3月に約43%、2040年3月には約66%に達するとされている。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）。この他に、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約30,000施設が存在する。

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」の場合が多い。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・更新費用では、「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いわれており、民間の港湾施設においても同様の傾向にあると推測される。

よって、「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、維持管理の調査から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や判断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、残存耐力から構

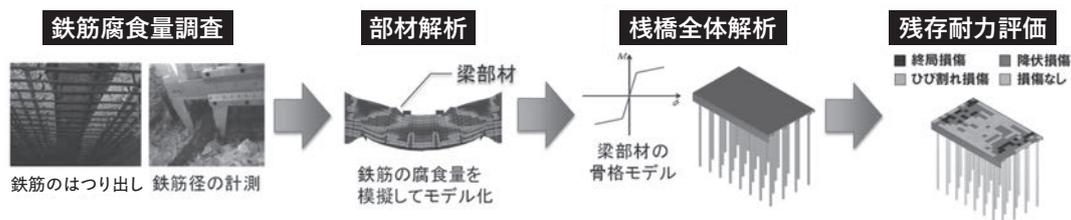


図1 栈橋の残存耐力を評価するための手順

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できる技術を開発した。

2. 開発技術の概要

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はつり、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、次にそれぞれの梁のFEM解析を行い、梁部材の骨格モデルを算定する必要がある。

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、梁部材をモデル化する上で必要となってくる。FEM解析で梁部材の骨格モデルが求めれば、栈橋全体系を解析ソフトでモデル化し、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、はつ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たものをモデル化するのではなく、鉄筋が腐食する際に生じる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、考慮可能な解析ソフトが限られることと高度な解析技術を要することとなる。これらことから、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-2)¹⁾。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。

まず、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、試験体が想定どお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。次に、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、実験が再現可能であることも示した(図-3)。

この構造実験では、電食により強制的に鉄筋を

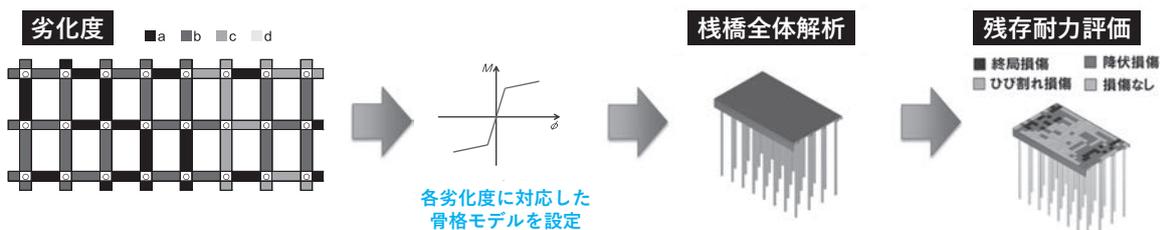


図-2 劣化度判定結果から構造解析により残存耐力を評価する技術

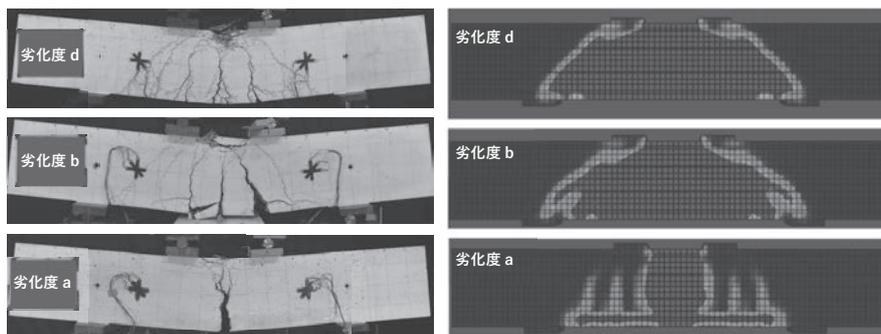


図-3 実験・解析による劣化度と部材耐力の関係性の把握

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、腐食生成物に違いがあり、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、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²⁾。

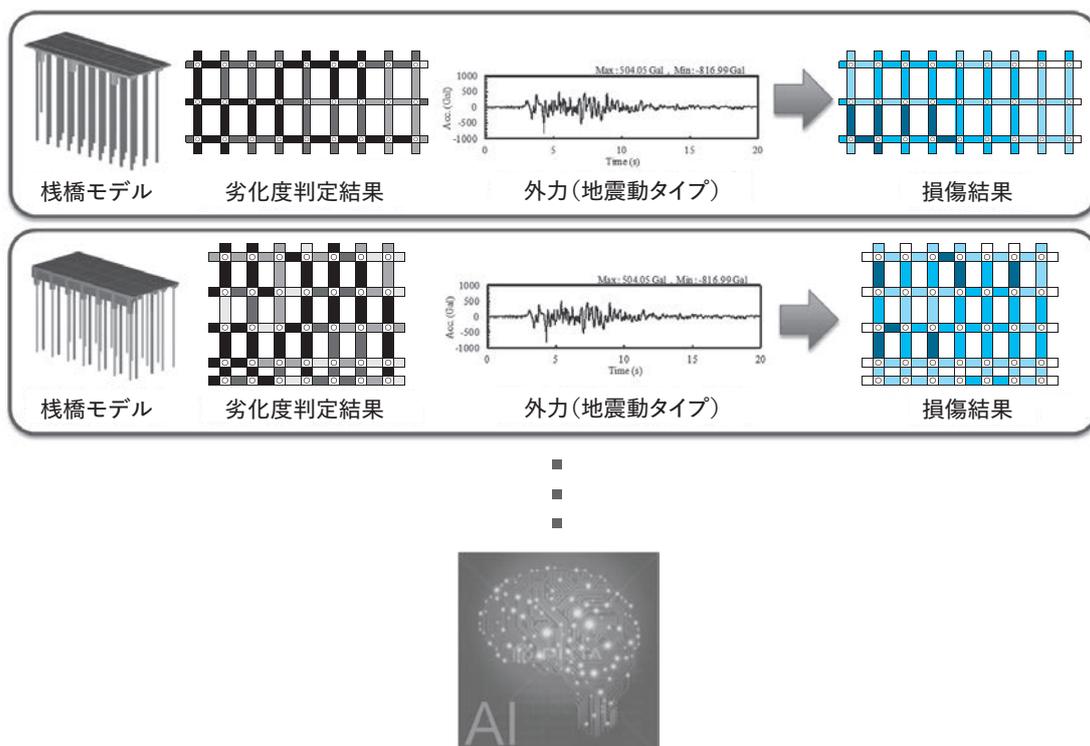
以上により、梁の劣化度が分かれば残存耐力評価を行うことが可能となったが、栈橋全体系の構造解析は都度行う必要があることから、コストや

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）^{3),4)}。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、構造解析を実施し、その組み合わせにおける構造解析結果を取得する。これを目的変



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

	栈橋A	栈橋B
劣化度		
構造解析結果 (正解)		
AI予測結果		
正解率	90.7%	86.2%

図-6 劣化した栈橋の残存耐力評価と正解率

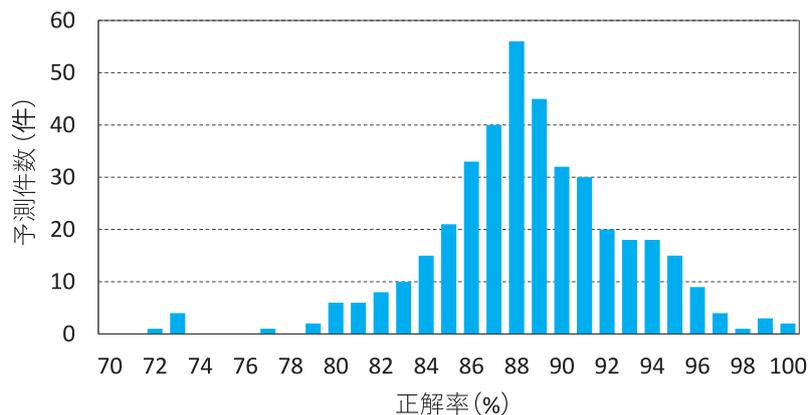


図-7 AIモデルの精度検証結果

数として、説明変数とセットにして教師データを作成した。

3. 開発技術の特徴

構築したAIモデルで残存耐力を評価した事例として、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、構造解析を実施した結果も示している。また、構造解析結果を正解値とした正解率も併記している。

この結果から、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、400件の残存耐力評価を行い、予測精度の検証を行った(図-7)。検証結果として、おおむね80%以上の正解率で予測可能であり、中央値は88%と高い精度となっている。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。

4. 開発技術の効果

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、鉄筋のはつり出し作業や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。例として3,000㎡の栈橋を対象とした場合、鉄筋のはつり出し作業として約2～3カ月、その後のFEM解析で約2カ月、栈橋全体系の構造解析（残存耐力評価）で約1.5カ月要するため、合計5.5～6.5カ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カ月、AIによる残存耐力評価を約0.1カ月で行うことができ、合計0.6～1.1カ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%削減できている。

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-8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。

さらに、様々な補修補強パターンに応じた損傷予測（補修補強による定量的な効果）も把握可能なため、合理的な維持管理計画を立案できる。ここでは、建設後30年が経過した栈橋を例にして、特に補修を行わずに建設後50年経過してから全面的に補修を実施する「事後保全」のケース（以下、「ケースA」という）と、「予防保全」により部分補修を行うケース（以下、「ケースB」という）を検討し、ライフサイクルコストの試算を行う。なお、ライフサイクルコストの試算に関しては、建設後30年経過からの補修に関する費用を対象とし、建設後50年経過時点までに要した費用とする。また、部分補修を行うケースについては、残存耐力評価を行った上で降伏損傷または終局損傷と判定される梁のみを部分補修するものとする。劣化の進行については、マルコフ連鎖モデルを使って予測する。

ケースAおよびケースBにおける、劣化度ならびに残存耐力評価の経時変化を図-9に示す。ケースAについては、建設後50年経過まで補修を行わないため、栈橋全体に劣化が進行している状況がうかがえる。残存耐力としては、建設後30年経過時点で降伏損傷が発生しており、建設後40年経過時には降伏損傷の範囲が拡大している。建設後50年経過すると、降伏損傷だけでなく終局損傷となる梁も出現している。

ケースBについては、建設後30年経過時点で降伏損傷が発生している梁を補修している。建設後40年経過すると前回補修した梁とは別の梁で降伏損傷が発生しているため、この梁を補修して

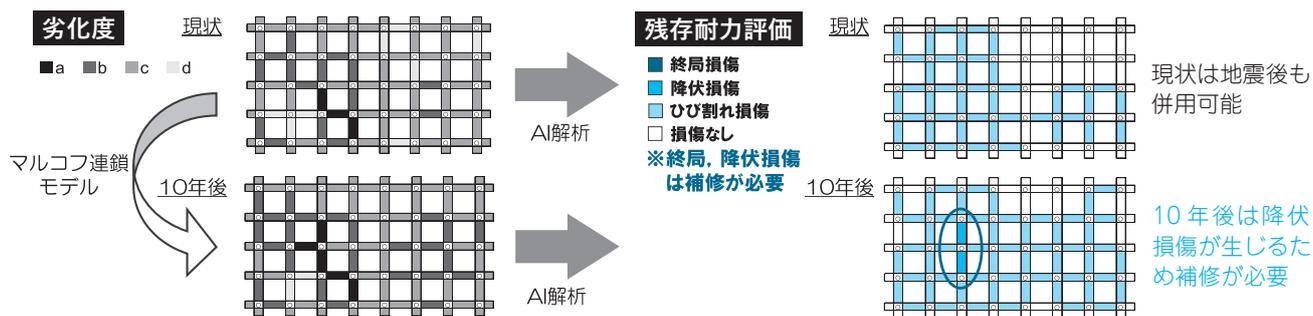
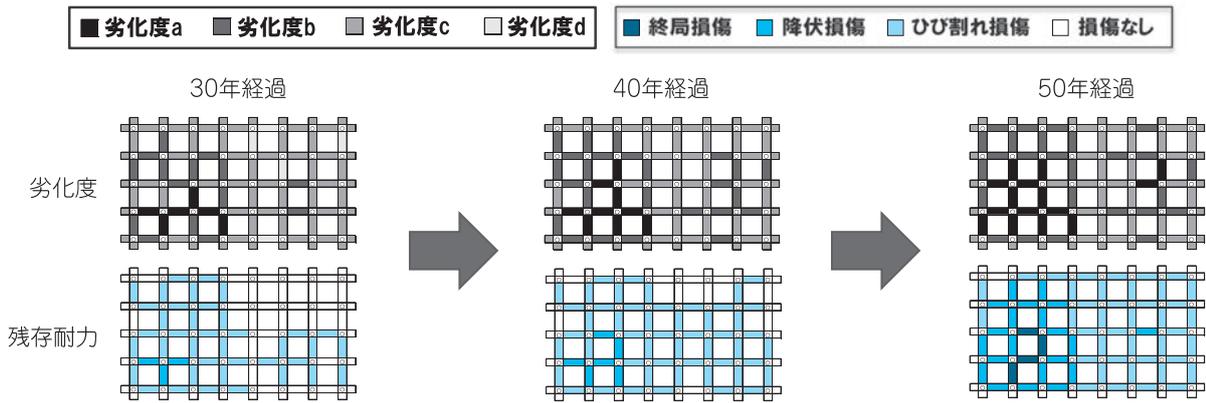


図-8 残存耐力評価の将来予測事例

ケースA：事後保全のケース



ケースB：予防保全のケース（降伏損傷以上と判定される梁を補修する）

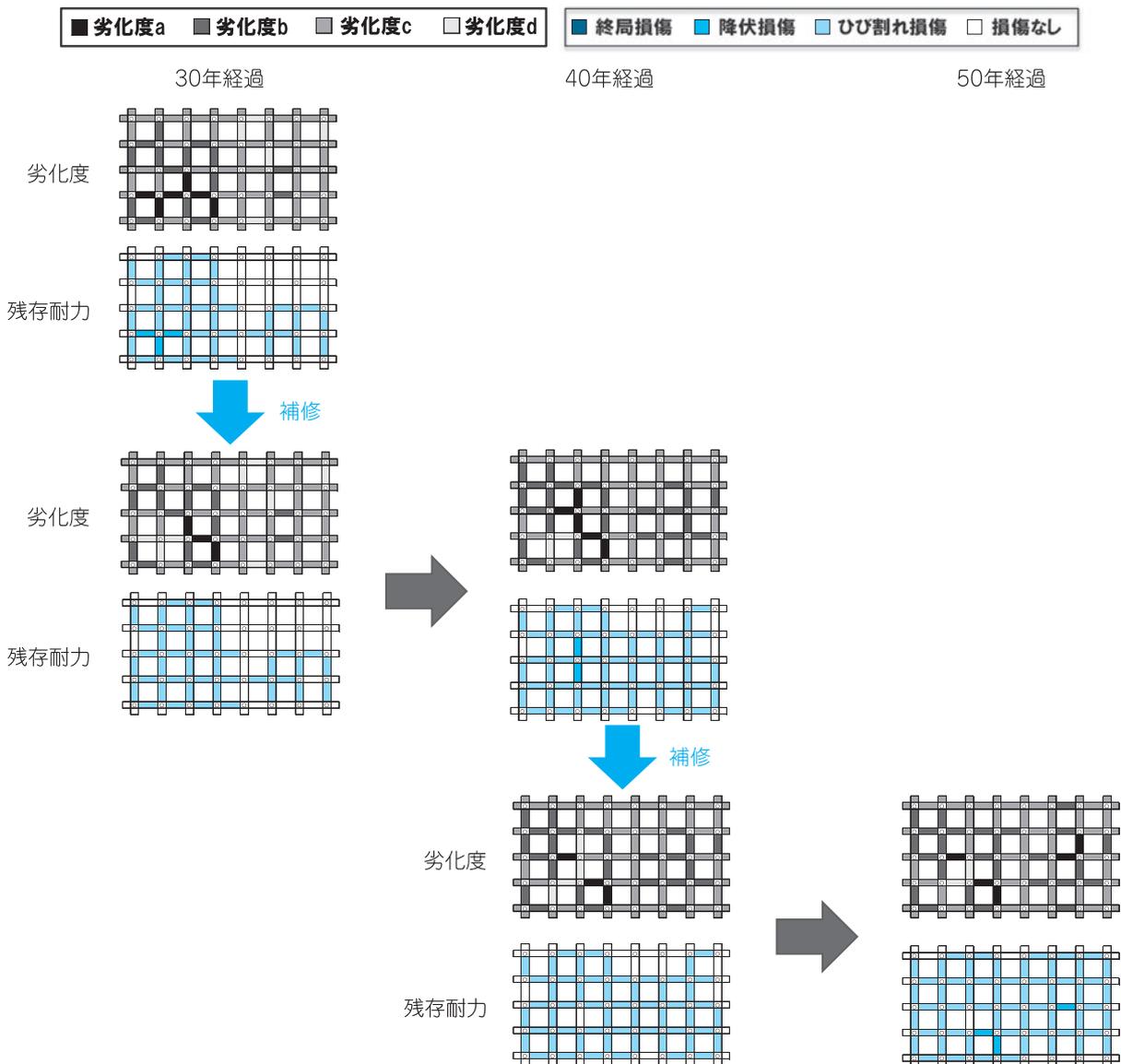


図-9 ケース A, B の劣化度および残存耐力評価の経時変化

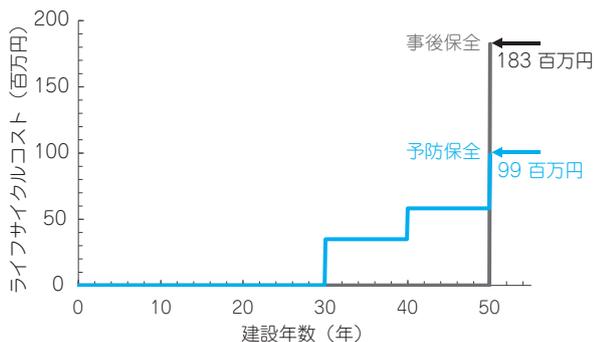


図-10 ライフサイクルコストの試算結果

いる。建設後50年経過すると、さらにまた別の梁で降伏損傷が発生するため、この梁を補修している。このようにケースBでは、降伏損傷の発生が予測される梁を都度補修している。

各ケースのライフサイクルコストを試算した結果を図-10に示す。ケースAでは、全面補修に要した費用が約1億8,300万円となった。一方ケースBでは、建設後30年経過時の補修費用が約3,500万円、建設後40年経過時の補修費用が約2,300万円、建設後50年経過時には約4,100万円となり、合計で約9,900万円となった。本検討においては、部分補修を繰り返すことで、コストを46%削減することが可能となった。なお、上記の補修費用は梁のみの補修を対象としており、杭や床版については含まれていない。また、補修工法に係る費用であり、補修工事に伴う足場設置費用等は計上していない。コストの算定に当たっては、国土技術政策総合研究所研究報告⁵⁾を参考とした。

以上のように、残存耐力評価を行った上で地震力により損傷する恐れのある梁を部分補修することでライフサイクルコストを低減でき、地震力による損傷も防ぐことができるため、栈橋の長寿命化が実現できる結果となる。

5. おわりに

本技術は、施設管理者の方々から従前より問い合わせいただいていた「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?」、「供用できない範囲はどこなのか?」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当たり、ご指導、ご支援をいただいた皆さまに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.J1, pp.132-141, 2020.
- 5) 高橋宏直, 横田弘, 岩波光保: 港湾施設のアセットマネジメントに関する研究 - 構造性能の低下予測とアセットマネジメントの試行例 -, 国土技術政策総合研究所研究報告, No.29, 2006.