論文

鉄筋腐食を有する桟橋梁の残存性能評価手法と実桟橋への適用に関する研究

宇野　州彦[*1]，　Cabatit Kyle Didacus[*2]，　千々和　伸浩[*3]，　田中　豊[*4]，　山路　徹[*5]

Study on Evaluation Methodology of Residual Structural Performance of Pier Beams with Rebar Corrosion and Its Application to Corroded Pier

Kunihiko UNO[*1], Kyle Didacus CABATIT[*2], Nobuhiro CHIJIWA[*3], Yutaka TANAKA[*4] and Toru YAMAJI[*5]

要旨：港湾施設の維持管理を計画的に実施していくためには，現状の施設における残存性能を評価した上で適切な補修補強を行う必要があるが，既存施設の残存性能評価に関する研究事例はあまり多くない．そこで本研究では，鉄筋腐食を有する実桟橋の梁を対象に載荷実験を実施して，鉄筋腐食の状況や程度と梁の残存性能との関係を明らかにし，構造解析等により桟橋の残存性能評価を行うためのモデル化手法について提案した．

キーワード：桟橋，残存性能評価，鉄筋腐食，載荷実験，維持管理

1. はじめに

港湾施設は海洋環境下におかれ，塩害や波浪等の影響を受けやすいことから，鉄筋腐食等の劣化が早期に進行する場合がある．維持管理を計画的に実施していくためには，現状の施設における残存性能を評価した上で適切な補修補強を行う必要があるが，既存施設の残存性能評価に関する研究事例はあまり多くない．著者の一人は，既往の研究[1)~3)]を踏まえ，「港湾の施設の維持管理技術マニュアル」[4)]（以下，維持管理マニュアル）に基づいた一般定期点検診断で示される梁の劣化度判定結果(a~d)から，桟橋の残存耐力を評価する技術を開発している[5)]．これにより，劣化度に応じた梁部材の骨格モデルを規定することで汎用の構造解析プログラムを用いた残存耐力評価を行うことが可能となった．さらに，腐食メカニズムの違いによる梁の残存耐力の違い[6)]や，寸法効果[7)]を考慮することで，耐力評価の精度を向上させる劣化骨格モデルの補正を提案している[8)]．一方でこれらの研究は，民間企業の保有する比較的規模の小さな桟橋を対象としており，公共桟橋をはじめとする大きな規模の桟橋での検討は実施していない．

そこで本研究では，鉄筋腐食を有する比較的規模の大きな実桟橋の梁を対象に載荷実験を実施し，鉄筋腐食の状況や程度と梁の残存性能との関係を明らかにし，構造解析等により桟橋の残存性能評価を行うための手法について提案する．

2. 実験概要

2.1　試験体概要および実験ケース

本実験で用いた実梁部材の解体撤去した状況を**図-1**，**図-2** に示す．図のように梁の下面および側面において劣化の進行が著しい状況が確認できる．本実験で用いる試験体は計 4 体で，このうち比較的劣化が進行しているものが 2 体であり，劣化の程度が軽微なものが 2 体となっている．当該桟橋は直杭式桟橋構造で，試験体 4 体のうち劣化が進行している 2 体は沖側に配置されているものであった．それぞれ



図-1　切り出した実梁部材



図-2　実梁部材の鉄筋腐食状況（梁下面）

*1　五洋建設（株）技術研究所　担当部長
*2　東京科学大学環境・社会理工学院　博士課程
*3　東京科学大学環境・社会理工学院　教授
*4　（国研）海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所構造研究領域　主任研究官
*5　（国研）海上・港湾・航空技術研究所港湾空港技術研究所構造研究領域　領域長

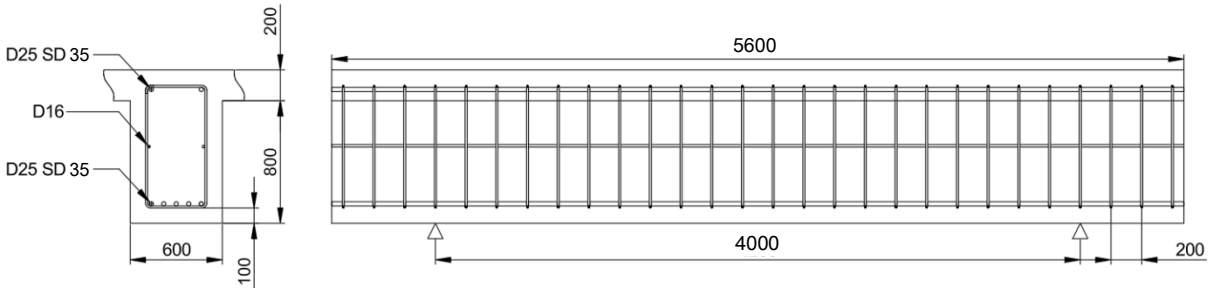


図-3　試験体形状および寸法（単位：mm）



(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3



(d) Case4

図-4　各試験体のセットアップ状況

表-1　劣化度判定基準 [4]に加筆

部位	劣化度	判定基準
梁 下面部	a	幅3mm以上の鉄筋軸方向のひび割れがある。
		かぶりの剥落がある。
		錆汁が広範囲に発生している。
	b	幅3mm未満の鉄筋軸方向のひび割れがある。
		錆汁が部分的に発生している。
	c	軸と直角な方向のひび割れのみがある。
		錆汁が点状に発生している。
	d	変状なし。
梁 側面部	a	係船岸の性能を損なうような損傷がある。
	b	幅3mm以上のひび割れがある。
		広範囲に亘り鉄筋が露出している。
	c	幅3mm未満のひび割れがある。
		局所的に鉄筋が露出している。
	d	変状なし。

表-2　コンクリートの材料特性

	圧縮強度 N/mm^2	ヤング係数 $\times10^3\ N/mm^2$
Case1	22.2	22.5
Case2	24.9	24.0
Case3	27.9	27.7
Case4	27.1	24.6

表-3　鉄筋の機械的性質

	降伏点 N/mm^2	弾性係数 $\times10^3\ N/mm^2$	規格
鉄筋D25	367.4	188.9	SD35
鉄筋D16	312.1	126.2	SD35

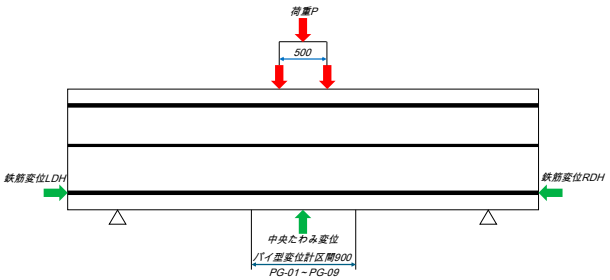


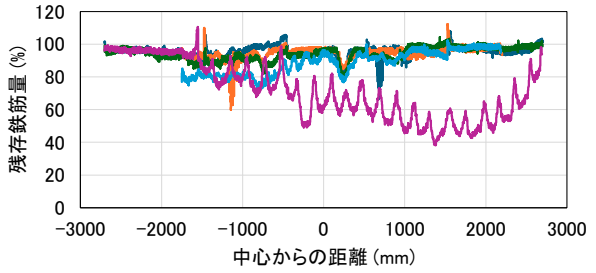
図-5　試験体の計測内容および位置（単位：mm）

の鉄筋の腐食状況については，載荷実験後に鉄筋を斫り出して調査を行った．

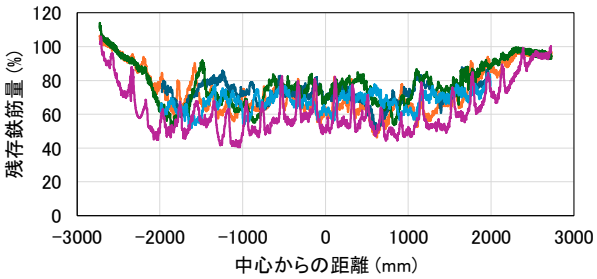
試験体の形状および寸法を図-3 に示す．図中の寸法値は実測値ではなく設計値である．主鉄筋は D25，スターラップ筋は D16 が 200mm 間隔で配置してある．実験は純曲げ区間を 500mm 設けた 4 点曲げ載荷とした．各試験体のセットアップ状況を図-4 に示す．Case1 は底面および試験体に向かって右側面の



図-6　3D スキャナを用いた測定結果の一例

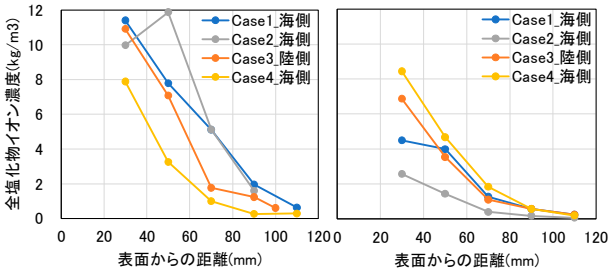


(a) Case1



(b) Case3

図-7　鉄筋腐食量測定結果



(a) 梁底面　　(b) 梁側面

図-8　塩化物イオン量試験結果

鉄筋腐食が著しく，かぶりコンクリートの剥落が見られる．Case2 は側面部に鉛直方向のひび割れが数本確認できるが，コンクリートの剥落や錆汁等は見られない．Case3 は底面のかぶりコンクリートが広範囲で剥落しており，側面部も剥落が見られる．Case4 も Case2 と同様に側面部のひび割れが確認できる程度であった．各試験体について，維持管理マニュアル[4]に基づき劣化度判定を行った結果，Case1 および Case3 が劣化度 a，Case4 が劣化度 b，Case2 が劣化度 d であった．なお，劣化度の判定基準を**表-1** に示す．

2.2　使用材料および計測項目

コンクリートの材料特性および鉄筋の機械的性質を**表-2**，**表-3** に示す．載荷実験後の試験体からコンクリートのコアと鉄筋を採取し，コンクリートの圧縮試験と鉄筋の引張試験を実施した．なお，採取に当たっては，比較的劣化の見られない場所から採取するようにした．設計当時の図面より，コンクリートの設計基準強度 F_c は 210kg/cm^2 と記載されており，どの試験体も必要強度を有していることが確認できた．一方で，スターラップ筋については，降伏強度や弾性係数が小さい結果となった．試験体の計測内容と計測位置を**図-5** に示す．載荷ジャッキ位置に設置したロードセルにより荷重を測定し，試験体下側中央部のたわみ量および下段鉄筋が試験体内部へ引き込まれる量を変位計により測定した．また，試験体下側中央部の 900mm の区間にパイ型変位計を設置した．100mm 区間を測定するパイ型変位計を連続して 9 ヶ所設置した．

2.3　鉄筋の腐食量調査および塩化物イオン量試験

載荷実験後の試験体を対象に，鉄筋の腐食量調査および塩化物イオン量試験を実施した．鉄筋の腐食量調査については，試験体から鉄筋を斫り出し，60℃の 10%クエン酸二アンモニウム溶液に浸漬して腐食生成物を除去した後，3D スキャナを用いて鉄筋の断面積を測定した．測定結果の一例を**図-6** に示す．また，鉄筋腐食の著しい Case1 および Case3 の残存鉄筋量を**図-7** に示す．図中には色の異なる 5 本の測定結果を示しているが，これは試験体の下段鉄筋 5 本それぞれの残存鉄筋量を示している．Case1 では側面のかぶりコンクリート剥落が見られる試験体右側，Case3 では端部を除く全域において腐食量の多いことが確認できる．試験体の平均腐食率については，Case1 は 13.3%，Case3 は 34.4%であった．なお，Case2 は腐食による鉄筋断面の減少は確認されずほぼ健全な状況であった．Case4 は全域において若干の鉄筋腐食が見られ，平均腐食率は 4.2%であった．なお，残存鉄筋量や平均腐食率については，当該鉄筋の公称断面積を残存鉄筋量 100%あるいは平均腐食率 0%として算出している．

次に，試験体の側面および底面からコアを採取して実施した塩化物イオン量試験の結果を**図-8** に示す．梁底面においてはいずれの試験体においても表面から 100mm 以内の範囲では塩化物イオン濃度が大きな結果であった．底面のかぶりコンクリート剥落が見られた Case3 においては，試験体から主鉄筋の斫り出しによるかぶりの推定では最小値が 40.5mm 程度しかなく，かぶりが不足していたことで鉄筋腐食に至ったものと考えられる．その他の試験体の最小かぶりは Case1 では 78mm 程度，Case2

は 73mm 程度，Case4 は 100mm 程度であり，Case1 と Case2 では最小かぶり厚が同程度であるが鉄筋腐食は主に Case1 に見られた．Case1 と Case3 については，Case2 と Case4 に比べより海側に配置されていたことから，配置場所による影響もあるものと推察される．梁側面については底面に比べて塩化物イオン濃度が比較的小さいものの，各試験体の側面における最小かぶりは，Case1 は 50mm 程度，Case2 は 80mm 程度，Case3 は 30mm 程度，Case4 は 40mm 程度であり，側面かぶりの剥落は Case1 で見られた．

3. 事前解析による試験体の曲げ耐荷性能の把握

載荷実験に先立ち，健全な試験体における曲げ耐荷性能を把握するため，事前解析を実施した．解析には非線形構造解析システム COM3[9]を用いた．解析モデルを**図-9** に示す．試験体は**図-1** および**図-3** に示すように T 型形状であるが，本解析は試験体の剛性が大きく変化する主鉄筋の降伏荷重等の把握が主目的であるため，解析モデルは矩形としてモデル化を簡略化した．また，解析における外形寸法や鉄筋のかぶり，コンクリートおよび鉄筋の材料特性は設計値を用いてモデル化した．

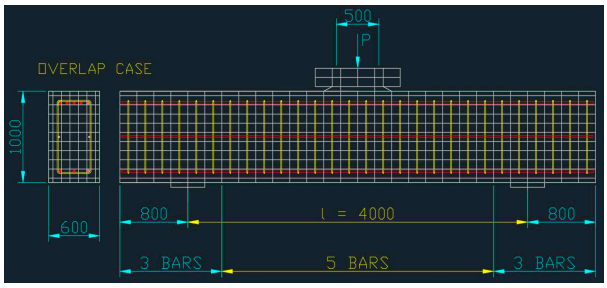


図-9　解析モデル

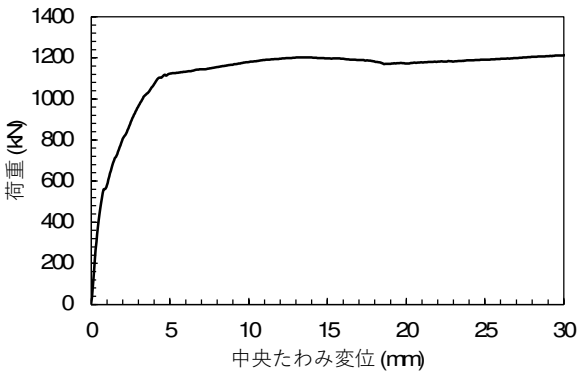


図-10　解析から得られた荷重－変位関係

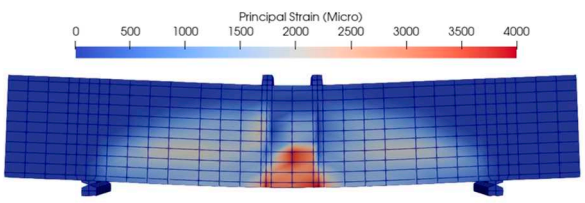


図-11　コンクリートの最大主ひずみコンター

解析から得られた荷重－変位関係を**図-10** に示す．図より，荷重約 500kN で勾配の若干の変化と荷重約 1100kN で大きな勾配の変化が確認できる．**図-11** に荷重 1100kN におけるコンクリートの最大主ひずみコンターを示す．梁底面中央部に曲げによる大きなひずみが発生し，せん断ひずみの発生も確認できる．なお，荷重 1100kN においては，主鉄筋が降伏に至っていることを確認している．

4. 実験結果および考察

4.1　荷重－変位関係

載荷実験により得られた各試験体の荷重－変位関係を**図-12** に示す．鉄筋腐食がほとんど見られなかった Case2 は，荷重約 1200kN で鉄筋降伏したものと推察され，**図-10** に示す解析結果とほぼ同等の耐荷性能および変形性能であることが確認できる．Case4 は若干の鉄筋腐食を有していたことから，Case2 に比べて耐荷力がやや小さくなったものと考えられる．Case1 は，荷重約 800kN までは Case2 や Case4 とほぼ同程度の勾配であるものの，その後に急激な荷重低下が見られる．荷重低下時には底面のコンクリートの剥落が見られた（**図-13**）．その後は 600kN 程度の荷重を保持しながら変位が増大する結果となった．荷重低下が見られた要因について，梁下側鉄筋の定着切れが想定されたため，鉄筋が試験体内部に引き込まれているか確認した．**図-5** における LDH および RDH の測定結果を**図-14** に示す．なお，鉄筋が内部に引き込まれる際の変位量を正側と

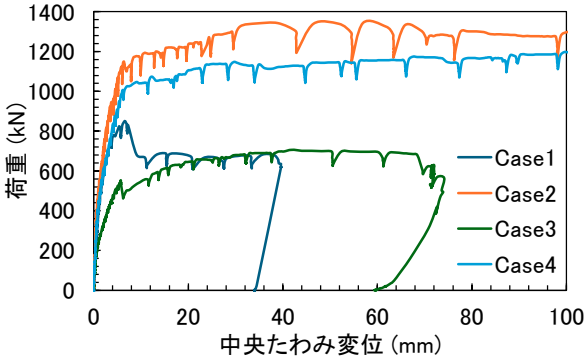


図-12　荷重－変位関係



図-13　かぶりコンクリートの剥落状況（Case1）

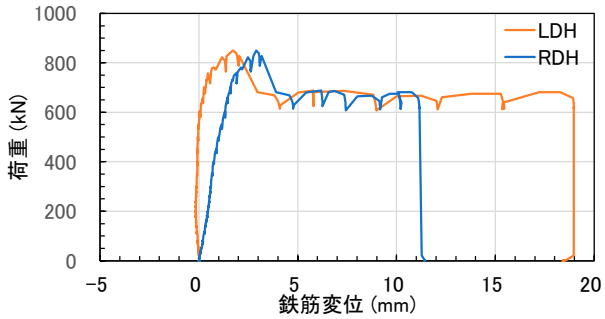


図-14　梁下側鉄筋の変位（Case1）

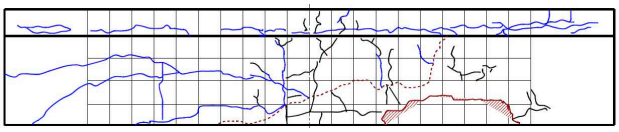


図-15　Case3 の損傷状況

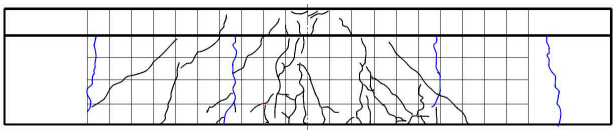
して測定している．結果から，載荷初期より鉄筋が引き込まれている状況が見られ，荷重が低下した後はその変位量が非常に大きくなっていることが分かる．このことより，鉄筋腐食により付着が切れるだけでなく定着がとれない状況においては，耐荷性能が大きく低下することが示された．梁の下段鉄筋については，一般に鍔プレートを介して杭頭部と接合されているが，杭頭部の腐食程度によっては梁の耐荷性能に影響を与える可能性があると示唆される．Case3 については平均鉄筋腐食率が最も大きな試験体であるが，載荷初期の段階から他の試験体との剛性（勾配）が異なることが確認できる．その後は 600kN までしか耐荷力が見られず，試験体中央部のひび割れが大きくなっていく状況が確認された（**図-15**）．なお，Case3 においては最大で 2mm 程度鉄筋が内部に引き込まれており Case1 に比べ小さかったものの，載荷前より主鉄筋のうち 1 本に破断が見られたことや腐食量が多いことから，ひび割れ分散性が低く局所的な損傷に至ったために耐荷力が小さかったものと考えられる．

4.2　ひび割れ性状

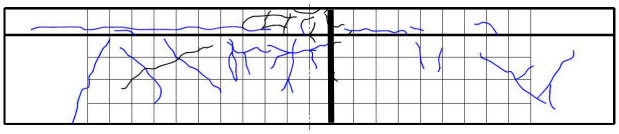
各試験体のひび割れ性状を**図-16** に示す．図中の青線が実験前より入っていたひび割れ，黒線が載荷により発生したひび割れである．また，赤の破線が実験前からコンクリートが剥落していた範囲を示しており，赤の実線が実験により剥落が生じた範囲を示している．Case1 は載荷前より鉛直方向にも水平方向にもひび割れが生じており，試験体下側に生じている水平ひび割れについては，主鉄筋位置となっている．Case1 では**図-14** の鉄筋変位で示したように鉄筋とコンクリートとの付着力が低下していたこと



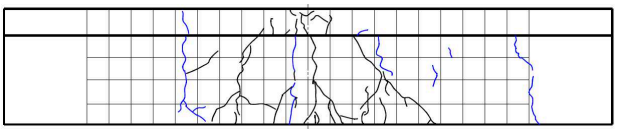
(a) Case1



(b) Case2



(c) Case3



(d) Case4

図-16　各試験体のひび割れ性状

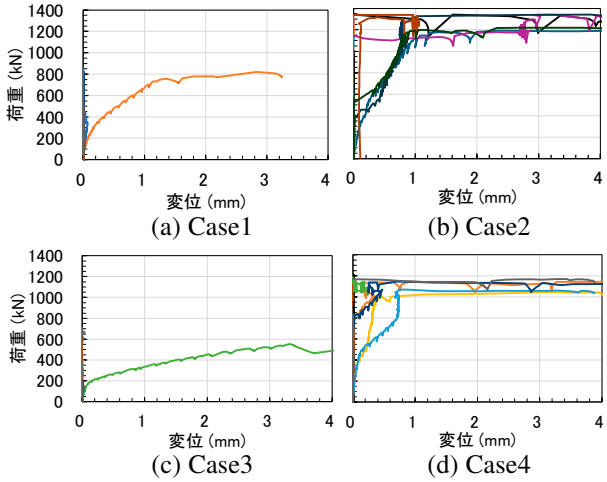
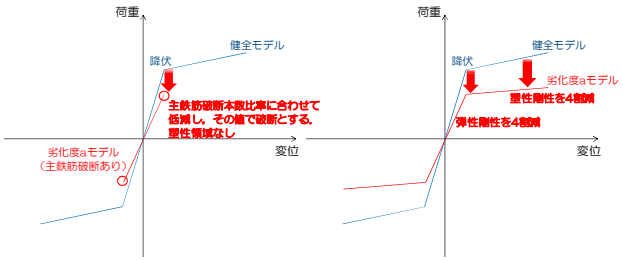


図-17　パイ型変位計の測定結果

が推察され，それにより耐荷力が小さく，さらに載荷前より生じていたひび割れ幅が拡大することにより，載荷によるひび割れもあまり分散しない結果となっている．Case3 は鉄筋の腐食率が高いことから，Case1 と同様にひび割れが分散せず局所的な破壊形態に至ったことが考えられる．Case2 や Case4 においては腐食の程度がほとんどない，あるいは軽微な腐食であることから，ひび割れ分散性が見られる結果となった．

次に試験体底面に設置したパイ型変位計の測定結果を**図-17** に示す．先述したように，Case1 および Case3 においてはひび割れが分散しない結果となっ



(a) 劣化度 a（破断あり）　(b) 劣化度 a（破断なし）

図-18　劣化度に応じた骨格モデルの例 [5] より抜粋

たが，パイ型変位計においても一つの変位計のみが変位が増加する結果となっていることが確認できる．一方，Case2 や Case4 については，ひび割れが分散していることがパイ型変位計の測定結果にも現れており，多くの変位計で変位が増加している状況が分かる．

5. 劣化梁の構造解析におけるモデル化手法の提案

鉄筋腐食により劣化した梁を構造解析でモデル化する手法について，これまでの研究において**図-18** に示すような骨格モデルを提案している [5]．前章に示した載荷実験結果より，Case2 の降伏荷重と比較して Case1 が約 6 割程度であったこと等から比較的規模の大きな桟橋においても，曲げ剛性や降伏点等については**図-18** や文献 5)に示す骨格モデルと同程度の耐荷性能の低下モデルにより構造解析をモデル化可能であると考えられるが，降伏後の塑性領域における耐荷性能についてはさらに検討が必要である．また，同じ劣化度であっても Case1 と Case3 では耐荷性能に違いが見られるため，腐食の位置や状況によっても骨格モデルを別途検討する必要があると考えられる．骨格モデルを実装する場合においては，危険側の評価とならないような配慮や，危険側の評価が想定される場合の条件等も明示することが求められるものと思われる．その他，腐食のばらつきをより詳細に考慮したモデル化については，様々な劣化状況の梁を対象とした実験や解析がさらに必要であり，今後の課題である．

6. まとめ

本研究では，鉄筋腐食を有する比較的規模の大きな実桟橋の梁を対象に，4 点曲げ載荷実験を実施し，鉄筋腐食と梁の残存性能との関係について検討し，構造解析等により桟橋の残存性能評価を行うための手法について提案を行った．曲げ載荷実験より，単に鉄筋腐食による耐荷力の低下だけではなく，杭頭部の腐食により梁端部の定着力が低下している場合においても耐荷性能が大幅に低下することが確認できた．また，公共桟橋等における比較的大きな桟橋においても，既往の研究で示していた骨格モデルがある程度有効であることが分かった．

謝辞

本研究の一部は，内閣府総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造 プログラム（SIP）第３期「スマートインフラマネジメントシステムの構築」JPJ012187（研究推進法人：土木研究所）によって実施されました．

参考文献

1) 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.
2) 加藤絵万，岩波光保，山路徹，横田弘：建設後 30 年以上経過した桟橋上部工から切り出した RC 部材の劣化性状と構造性能，港湾空港技術研究所資料，No.1140，2006.
3) 加藤絵万，濱田洋志，岩波光保，横田弘：局所的に生じた鉄筋腐食が RC はりの構造性能に及ぼす影響，港湾空港技術研究所報告，Vol.47，2008.
4) (一財)沿岸技術研究センター：港湾の施設の維持管理技術マニュアル（改訂版），沿岸技術ライブラリー No.49，2018.
5) 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桟橋への適用，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.74，No.2，pp.I_55-I_60，2018.
6) 高谷哲，中村士郎，山本貴士，宮川豊章：コンクリート中の鉄筋の腐食生成物の違いがひび割れ発生腐食量に与える影響，土木学会論文集 E2（材料・コンクリート構造），Vol.69，No.2，pp.154-165，2013.
7) 星隈順一，運上茂樹，長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究，土木学会論文集，No.669／V-50，pp.215-232，2001.
8) 宇野州彦，岩波光保：鉄筋腐食を有する桟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.
9) K. Maekawa, A. Pimanmas, H. Okamura : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON Press, 2003.