機械学習を用いた桟橋の残存耐力評価における説明変数の影響検討と実桟橋での検証

宇野　州彦[1]・Charan KAMERI[2]

[1]正会員　五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）
E-mail: kunihiko.uno@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

[2]正会員　五洋建設（株）技術研究所（〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1）

著者らはこれまでに，劣化度判定結果を用いた桟橋の残存耐力評価手法を提案し，汎用の構造解析プログラムや人工知能を用いて残存耐力評価を行うことを可能とした．一方で，建設年次の古い桟橋においては図面等の情報が十分でないことも想定され，そのような桟橋においても効率的にメンテナンスを行うことが求められる．そこで，桟橋の残存耐力評価における説明変数の感度分析や導入する説明変数による予測の精度向上に関する検討を行い，実桟橋において検証を行った．その結果，想定する作用によっては，少ない説明変数であっても精度良く損傷を予測することが可能であることが示された．

Key Words: *steel pipe piled pier, residual structural performance, machine learning, explanatory variable, Chebyshev distance, Manhattan distance*

1.　はじめに

高度経済成長期に建設された社会基盤施設のうち，建設から50年以上経過する公共の港湾施設の割合は，2040年3月には約66%に達するとされており，適切な維持管理は一層重要となってきている．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，施設に不具合が生じてから対策を講じる事後保全型の維持管理が採用されている場合も多い．予防保全型維持管理への転換によりコストを抑えることで，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，供用継続の可否等の判断が可能な技術はこれまで存在しなかった．

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)]等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これまでに開発している[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り，どのような損傷がどの範囲に生じるのかを把握することができるようになっている．また，地震力等の想定外力に対して生じる桟橋梁の有害ひび割れの発生（使用限界状態におけるひび割れ幅の限界値）や降伏状態（塑性化），終局状態といった各損傷状態における損傷の桟橋梁総面積に対する比率（以下，損傷面積率）や損傷分布を推定する人工知能（AI）技術を導入した残存耐力評価手法も開発している[6)]．自治体等が管理する桟橋等の港湾施設においては，より効率的に維持管理を行っていく必要もあると考えられるため，このような簡易に残存性能を評価する技術は有効であると思われる．AIモデルを導入することで，構造解析を実施することなく，残存性能を評価することが可能になる．

しかし，メンテナンスをより効率的に実施するためには，限られた情報からでも桟橋の残存耐力が評価できることが望ましい．メンテナンスで対象となる施設は，一般に建設から多くの年月が経過しており，図面等の情報

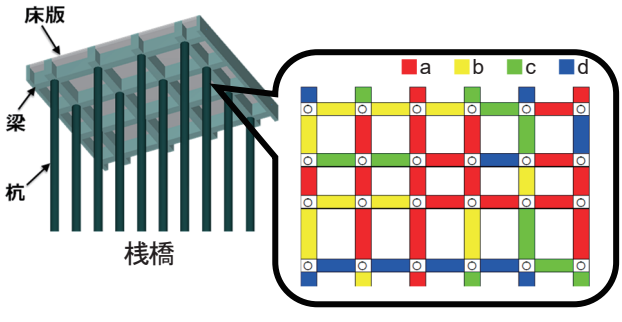


図-1　劣化度判定結果を表示した桟橋上部工梁の平面図

が限られていることも想定される．このような施設においても精度よく残存耐力が評価できることが求められる．

そこで本論文では，AI を用いた桟橋の残存耐力評価において，各説明変数の感度分析や予測精度に寄与する説明変数に関する検討を行い，構築した AI モデルについて実桟橋での検証を行う．なお，本研究では**図-1** に示すような桟橋の劣化度判定結果 [4]を活用して，桟橋の残存耐力評価を行うものとする．また，残存耐力評価については，例えば文献 7),8)にあるように，残存耐力評価指標を用いて残存耐力の有無を判断したり，施設の供用継続の可否を判断したりすることを示す場合もあるが，本研究においてはその一つ手前の段階である桟橋の損傷面積率や損傷分布を明らかにすることを桟橋の残存耐力評価と位置付けており，損傷面積率や損傷分布を明らかにする方法を本研究では残存耐力評価手法と呼ぶこととする．

2. 予測精度に影響する劣化度の重み付けに関する検討

(1) 導入する距離の概念に関する検討

著者は，文献 6)において残存耐力を評価する当該梁の周囲の梁の劣化状況を重みを付けて考慮するために，チェビシェフ距離の概念を取り入れている．これにより比較的精度の良い桟橋の残存耐力評価を可能にしている．一方で，距離の概念としては，マンハッタン距離も考えられる．本論文では周囲の梁の影響を考慮する方法として，どちらの距離の概念が予測精度向上に寄与するか検討を行った．ここでは各距離の概念について簡単に説明する．

まず，チェビシェフ距離とは，距離を表現する概念の一つであり，二次元空間においては縦横二軸のうち座標差の大きな方がチェビシェフ距離となる．例えば**図-2** において点 A(1,1)と点 B(2,4)は x 軸方向の座標差が 1，y 軸方向の座標差が 3 であるため，チェビシェフ距離は 3 となる．桟橋におけるチェビシェフ距離の考え方と特徴量について分かりやすくするため，桟橋上部工を構成する梁や杭頭部，床版を全て同じサイズで表示すると**図-3** に示すようになる．**図-4** は全て同じサイズとした桟橋上部工を示しており，赤色および青色でハッチングしている箇所が梁を示している．ハッチングのない箇所は杭頭部もしくは床版である．**図-4** に示すような劣化度分布において，赤色でハッチングした梁（座標(2,1)）は同図右側のような特徴量が得られる．この特徴量は**表-1** のように劣化度の分布割合で表現することができる．損傷予測を行う場合に，この梁における説明変数として，この梁自体の劣化度のみではなく，周辺梁の状況も考慮した**表-1** に示す特徴量を説明変数とすることで，当該梁の位置情報や周辺梁の劣化状況を加味した状況で損傷を予測することとなるため，高い精度が得られるものと考えている．一方で，マンハッタン距離は各座標の差の絶対値の総和を 2 点間の距離とするもので，**図-5** のように示される．この図から点 A と点 B のマンハッタン距離は 4 となる．周囲の梁の重み付けとしては，マンハッタン距離の方が

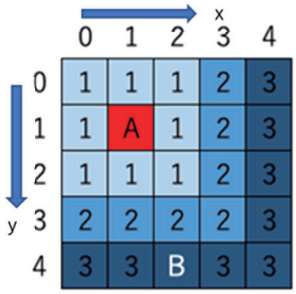


図-2 チェビシェフ距離の例

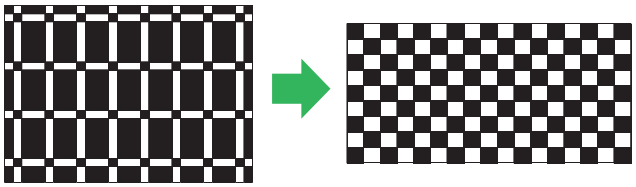


図-3 梁，杭頭部，床版を全て同じサイズで表示した例

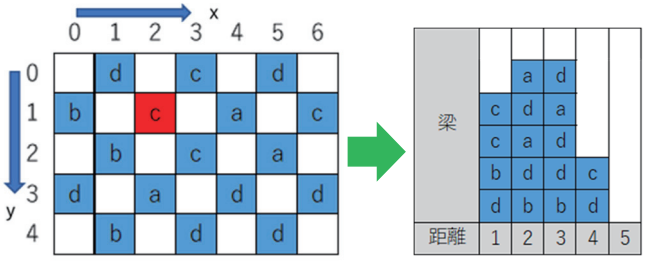


図-4 梁の劣化度と分類結果の例

表-1 劣化度の分布割合

説明変数	1				2				…
	d	c	b	a	d	c	b	a	…
割合	0.25	0.5	0.25	0	0.4	0	0.2	0.4	…

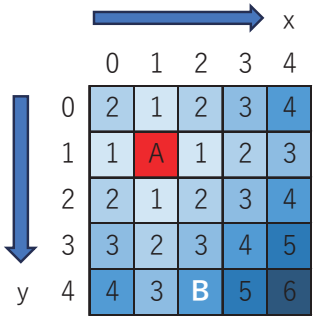


図-5 マンハッタン距離の例

より適していると考え，本論文にて検討することとした．

(2) 学習予測モデル

各梁の損傷予測方法には，勾配ブースティング木[9]（以下，GBDT）を用いる．まずGBDTアルゴリズムの基礎となる決定木について説明する．決定木とは**図-6**に示すように，複数のノードと枝で構成される階層的な木構造を学習するモデルであり，分類や回帰のタスクに用いられる．対象とする梁がどのような条件，状況であるのかを真偽テストを行っていくことで，目的変数に最も影響すると考えられる説明変数についてクロス集計を繰り返すことなく明らかにできるという特徴がある．また，分岐を階層的に繰り返すことで，複雑な分離も可能となる．つまり，決定木の構造は真偽テストによる分岐を複数保有する構造となる．GBDT とは，複数の決定木を構築してアンサンブル学習を行うモデルである．アンサンブル学習のイメージを**図-7** に示す．アンサンブル学習とは，複数のモデルを組み合わせて精度を高める手法である．本研究では，GBDT の実装として用いられるXGBoost[9]を使用する．

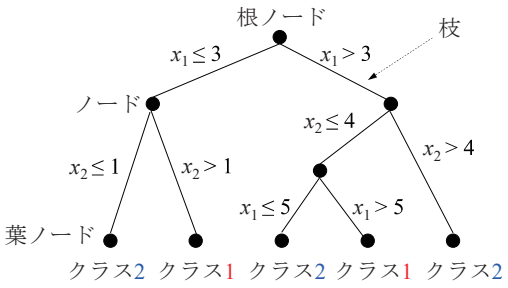


図-6 決定木の構造

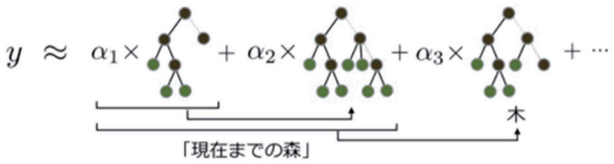


図-7 アンサンブル学習のイメージ

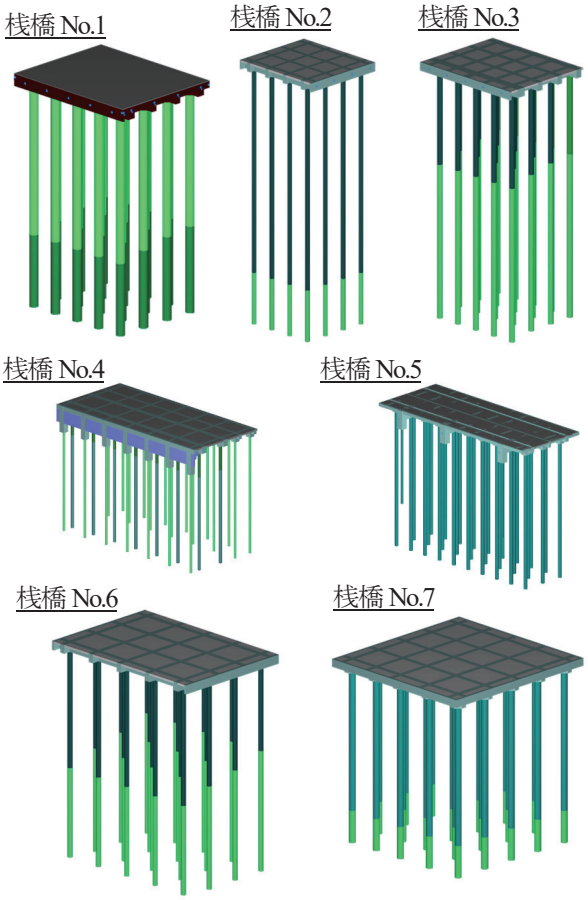


図-8 学習と精度検証に用いた桟橋モデル

(3) 教師データと解析モデルの構築手順

機械学習に使用する教師データは，**図-8**に示す梁数や杭列数等の異なる7種類の桟橋を対象とした．維持管理マニュアルに示される劣化度判定結果[4]と外力条件を無作為に組み合わせ，合計1001パターンの解析モデルと各々の解析モデルに対応する構造解析結果を基にした説明変数および目的変数で構成され，桟橋梁の劣化度判定結果および寸法情報，チェビシェフ距離が説明変数であり，外力により損傷した桟橋梁の結果が目的変数となる．なお，本研究においては距離を10まで考慮することとした．距離をどこまで考慮すべきかについては今後の課題である．桟橋梁の総面積に対して，各劣化度(a~d)を**表-2**に示すような面積率で概ね割り振っており，各劣化度を有する梁を無作為に配置している．例えば桟橋の梁が100 本で構成されている場合，パターン1では，桟橋梁100 本全てが劣化度dである．パターン38の場合は，桟橋梁100 本のうち，劣化度aである梁が80 本，劣化度bが10本，劣化度cが10 本であり，劣化度dと判定される梁は存在しないという状況を示している．外力条件に関しては，静的作用と動的作用を考慮した．静的作用については，桟橋に作用する船舶の接岸力や牽引力を想定し，各桟橋モデルの海側中央に荷重を作用させる．動的作用については，レベル1地震動とレベル2地震動を考慮する．レベ

表-2 各劣化度の桟橋面積率パターン（一部を掲載）

パターン	各劣化度の面積率			
	a	b	c	d
1	0%	0%	0%	100%
2	0%	20%	0%	80%
3	0%	0%	20%	80%
4	0%	20%	20%	60%
5		40%	0%	60%
34	60%		40%	
35	80%	0%		20%
36	80%	20%	0%	0%
37	80%	0%	20%	0%
38	80%	10%	10%	0%
39	100%	0%	0%	0%

ル 1 地震動は当該桟橋が位置する港湾近傍で想定される地震動，レベル 2 地震動は東北地方太平洋沖地震及び兵庫県南部地震において観測された複数の地震動を使用している．教師データとなる構造解析結果は，汎用構造解析プログラム Engineer's Studio[10]を用いて計算した．汎用構造解析プログラムで残存耐力を評価する手法については既報 [5]に示す通り，各梁の劣化度に応じた劣化骨格モデルの定義に基づいて桟橋のモデル化を行い，構造解析から残存耐力を評価した．機械学習手法において，構造解析結果を正解値として精度検証を行うことから，本研究における機械学習を用いた損傷予測は，汎用構造解析によって得られる損傷結果に整合させることを目標としている．また，構造解析結果を正解値とすることから，構造解析における解析誤差や構造解析結果そのものの確からしさについては考慮されない．

説明変数としては劣化度判定結果と外力条件，また桟橋法線直角方向の杭の列数を設定している．劣化度判定結果については，2 章(1)で示したように距離の概念をそれぞれ導入する．外力条件は，レベル 1 もしくはレベル 2 地震動を One-hot Encoding[11]で入力した．目的変数は，構造解析から得られた梁の有害ひび割れ，降伏状態，終局状態の各損傷面積率及び損傷データである．なお，ここでの損傷面積率や損傷データは，桟橋上部工における梁全数の損傷結果を示している．

解析モデルを構築する手順は，まず劣化度判定結果とその他の説明変数，目的変数の解析結果とを対応させた教師データを作成した後，機械学習モデルのタイプを選定する．各モデルにはハイパーパラメータと呼ばれる学習や処理の挙動を制御するパラメータがあり，事前に設定を行う．決定木の本数や木の深さ（層数）の最大値，葉を構成するデータ数等がハイパーパラメータに相当する．これらを事前に設定し，推定誤差が最小となるように重みやバイアス等のパラメータの最適値を探索し，モデルを構築していく．本研究におけるハイパーパラメータは，決定木の本数を 100，木の深さの最大値を 9，葉を構成するデータ数を 1 とし，さらに各決定木においてランダムに抽出される列の割合範囲に関するハイパーパラメータを 1 とした．また，計 1001 パターンのデータのうち，教師データから無作為に抽出した 80 %をパラメータの最適化に用いる学習用データとし，残りの 20 %をモデルの検証用データとした．学習に際しては，過度に学習を進めると検証用データに対する精度や汎化性能が悪化する，いわゆる過学習が発生する可能性がある．そこで，学習ループにおいて検証精度を監視し，検証精度が改善しない，もしくは悪化するタイミングで学習をストップさせる Early Stopping を採用した．検証方法においては，交差検証を用いてできるだけ多くの学習データを使用して汎化性能の向上を図った．

(4) 検証結果

本節では距離の概念として，チェビシェフ距離とマンハッタン距離をそれぞれ考慮した際の損傷推定の正解率により推定精度を確認する．なお比較として，周囲の梁の劣化度を全く考慮しないパターンについても精度検証を行った．正解率については，各梁における予測と正解の結果が 4 クラス（損傷なし，ひび割れ，降伏，終局）のマルチクラス分類であると考え，検証用データ全体の梁数に対して，予測モデルが正解した梁数の割合を算出したものを正解率とする．また，結果の各クラス（損傷なし，ひび割れ，降伏，終局）のマルチクラス分類においては，梁の損傷の度合いに，損傷なし＜ひび割れ＜降伏＜終局のような順序関係があると考えられる．このような場合，例えば正解が「降伏」の梁に対して，「損傷なし」と予測するモデルよりも「ひび割れ」と予測するモデルの方が高く評価されるべきだと考えられる．したがって，評価指標にカッパ係数も併記することとした．さらに，クラス分類の評価指標として正解率を用いる場合，検証データに含まれる各クラス数に偏りがある場合にうまく評価できない場合がある．より適切な評価を行うために，適合率と再現率という評価指標が用いられる．適合率とは，モデルが予測したクラスのうち正解したクラス数の割合であり，再現率とは正解クラス数のうちモデルが正解したクラス数の割合である．適合率と再現率はトレードオフの関係にあるため，両者の調和平均でバランスをとった指標として F1 スコアを用いられることから，F1 スコアについても併記している．なお，これ以降の検証結果についても，正解率とあわせて，カッパ係数と F1 スコアを併記することとしている．

推定結果を**表-3** に示す．結果から周囲の梁の劣化状況を考慮しない場合には精度が 5～6 割程度と低く，周囲の梁を考慮することで，精度が 8 割以上となることが確認できた．また，チェビシェフ距離とマンハッタン距離については，マンハッタン距離の方が若干精度が良いものの，それほど大きな差はなく，いずれの距離の概念を導入しても精度良く残存耐力を評価できることを確認した．

3. 桟橋形状寸法の考慮が残存耐力の予測精度に与える影響

(1) 検討対象とする説明変数

1 章で述べたように，建設年次が比較的古い桟橋においては，図面等の情報が不足している可能性がある．著者は文献 6)において，桟橋の残存耐力評価のための説明

表-3　損傷推定結果（距離概念の導入）

		評価指標	周囲考慮なし	チェビシェフ距離	マンハッタン距離
静的作用	接岸力想定	**正解率(%)**	**64.2**	**87.4**	**89.1**
		カッパ係数	0.59	0.82	0.85
		F1スコア	0.46	0.77	0.77
	牽引力想定	**正解率(%)**	**63.7**	**88.3**	**88.8**
		カッパ係数	0.57	0.85	0.85
		F1スコア	0.41	0.71	0.72
動的作用	L1地震動	**正解率(%)**	**58.7**	**86.2**	**87.2**
		カッパ係数	0.52	0.79	0.81
		F1スコア	0.39	0.65	0.68
	L2地震動	**正解率(%)**	**50.2**	**85.9**	**85.9**
		カッパ係数	0.46	0.81	0.81
		F1スコア	0.38	0.69	0.71

表-4　損傷推定結果（梁と杭の考慮）

		評価指標	梁・杭考慮	梁を非考慮	杭を非考慮
静的作用	接岸力想定	**正解率(%)**	**87.4**	**87.2**	**79.8**
		カッパ係数	0.81	0.81	0.79
		F1スコア	0.69	0.69	0.66
	牽引力想定	**正解率(%)**	**88.3**	**88.1**	**78.7**
		カッパ係数	0.84	0.84	0.74
		F1スコア	0.72	0.69	0.59
動的作用	L1地震動	**正解率(%)**	**86.2**	**80.2**	**71.1**
		カッパ係数	0.81	0.77	0.65
		F1スコア	0.71	0.61	0.51
	L2地震動	**正解率(%)**	**85.9**	**81.3**	**70.9**
		カッパ係数	0.82	0.77	0.63
		F1スコア	0.66	0.62	0.49

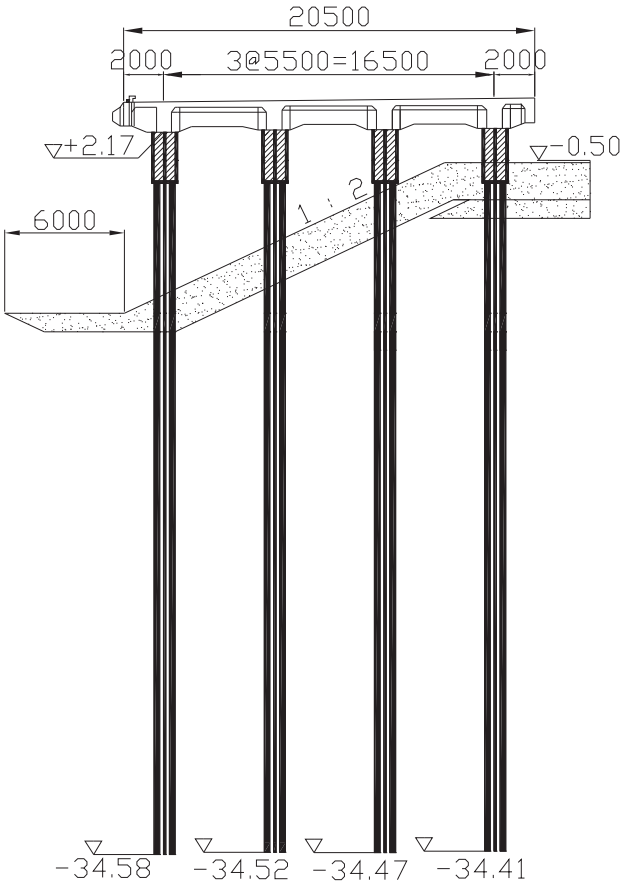
変数として，桟橋の梁の寸法や杭の突出長を用いているが，これらの情報が不明な場合，残存耐力の精度にどの程度の影響を与えるのかについて検討を行う．具体的には，梁または杭の寸法情報や突出長情報を入力しない場合の損傷結果の精度を確認することとした．なお，2 章において検討した距離概念については，本章ではチェビシェフ距離を用いることとした．また，文献 6)等で述べている梁の接合情報（両接合か片接合か）や梁の位置情報等の説明変数については，考慮するものとする．

(2)　検証結果

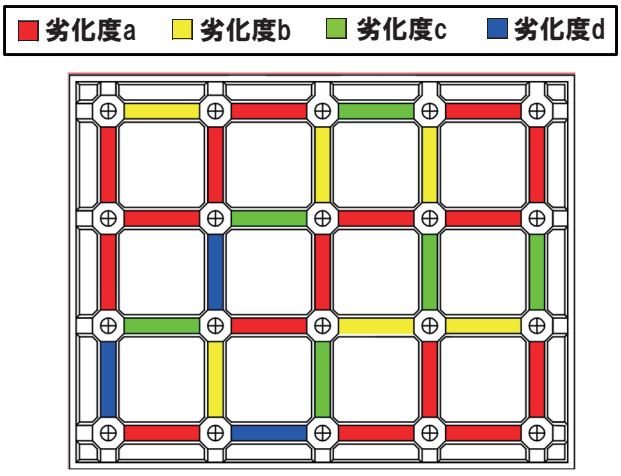
梁の寸法情報や杭の突出長情報を考慮した際に推定精度に与える影響について，**表-4** に推定結果を示す．梁と杭の両方を説明変数として考慮したものと比較して，いずれか一方のみとした場合には，推定精度は低下する結果となった．梁と杭の考慮の有無で比較すると，杭の突出長を考慮しない場合には，推定精度が約 10%程度低下することが明らかとなった．この結果から，杭の突出長については，説明変数として考慮すべきであると考えられる．一方，梁の寸法情報については，杭の突出長と比較して推定精度の低下の程度は小さい．特に静的作用においては，ほとんど違いのない結果となった．静的作用については接岸力や牽引力を想定しているため，桟橋の損傷程度としても降伏損傷以上となるものがほとんどないため，梁の寸法形状が結果にさほど影響を与えなかったものと考えられる．一方で，動的作用については，梁の損傷が大きくなる傾向にあるため，寸法情報を考慮しないと精度の低下を招く可能性があることが示唆される結果となった．

4.　実桟橋への適用

本章では，実際の劣化度判定結果を基に，桟橋の残存耐力評価に与える説明変数の影響について検討すること



(a)　側面図（寸法単位：mm）



(b)　平面図（劣化度判定結果含む）

図-9　対象桟橋

とする．なお，これまでの検討結果から，梁や杭の情報については説明変数として考慮することが望ましい結果となったことから，本章においては，距離概念が予測精度に与える影響について検討するものとする．

(1) 対象桟橋の概要

対象となる桟橋の側面図ならびに平面図を**図-9** に示す．

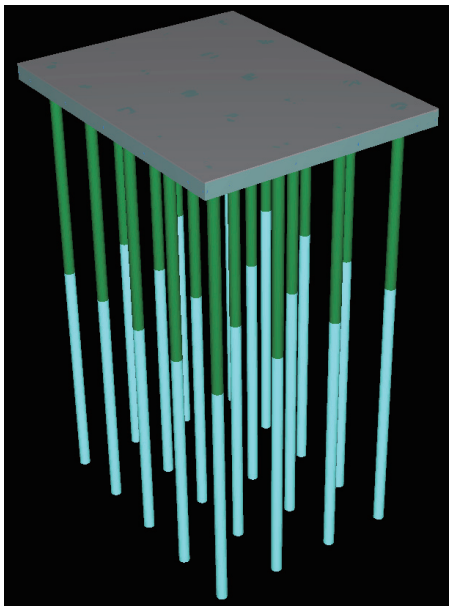


図-10 対象桟橋の解析モデル

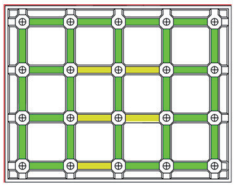
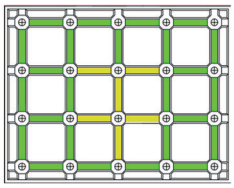
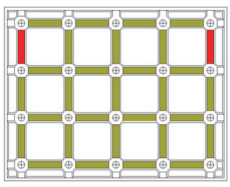
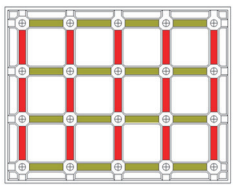
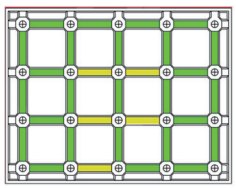
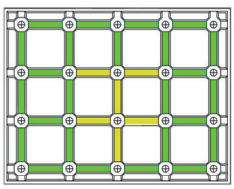
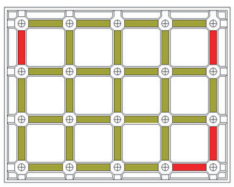
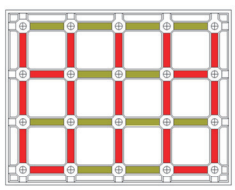
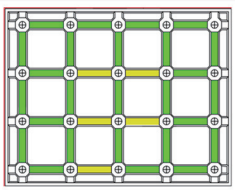
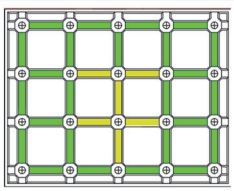
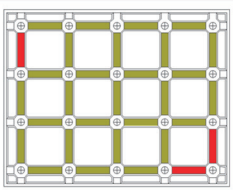
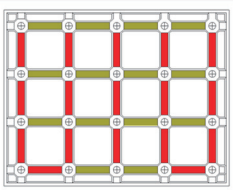
平面図には対象桟橋の劣化度判定結果を併記している．また，AI モデルでの予測に際して，構造解析モデルの構築も行った，解析モデルを**図-10** に示す．対象桟橋の材料物性として，上部工コンクリートの設計基準強度は 27N/mm^2，鉄筋は SD345，鋼管杭は STK400 である．鋼管杭はφ914.4mm を使用している．上部工は平面寸法が 20.5m×26m であり，梁は法線方向，法線直角方向ともに幅 800mm，高さ 1250mm である．梁の配筋は，法線方向梁については，海側・陸側と中央部で異なっており，また杭頭部と梁中央部でも異なっている．海側・陸側の杭頭部は，上側主鉄筋は D19 が 7 本と 4 本の 2 段配筋で，下側主鉄筋は D19 が 7 本の 1 段配筋となっている．海側・陸側の梁中央部は，上側主鉄筋と下側主鉄筋ともに D19 が 7 本の 1 段配筋である．中央部の杭頭部は，上側主鉄筋は D22 が 7 本と 5 本の 2 段配筋で，下側主鉄筋が D22 が 7 本の 1 段配筋である．中央部の梁中央部は，上側主鉄筋，下側主鉄筋ともに D22 が 7 本の 1 段配筋である．法線直角方向の梁については，いずれも上側主鉄筋は D25 が 7 本と D22 が 2 本の 2 段配筋で，下側主鉄筋は D25 が 7 本の 1 段配筋となっている．

(2) 予測結果

対象桟橋を AI モデルにて残存耐力を予測した結果を**表-5** に示す．表中には正解率のほかにカッパ係数と F1

表-5 対象桟橋の予測結果

■終局損傷 ■降伏損傷 ■ひび割れ損傷 ■損傷なし

距離概念	接岸力想定	牽引力想定	L1地震動	L2地震動
チェビシェフ距離（正解率）	 100%	 100%	 90.3% (κ:0.85, F1:0.70)	 93.5% (κ:0.86, F1:0.72)
マンハッタン距離（正解率）	 100%	 100%	 96.8% (κ:0.92, F1:0.80)	 93.5% (κ:0.89, F1:0.75)
構造解析結果（正解）				

スコアも併記しており，それぞれ κ，F1 と表記している．静的作用については，チェビシェフ距離とマンハッタン距離のいずれにおいても，構造解析結果と完全に一致する結果となった．2 章における検証においても，静的作用の方が推定精度が高かったことから，いずれの距離概念においても，精度良く損傷を予測することが可能であることが分かった．

動的作用においては，L1 地震動においてチェビシェフ距離とマンハッタン距離で精度に若干の違いが見られ，マンハッタン距離の方が精度良く損傷を予測することができた．L2 地震動については正解率は同じであったものの，マンハッタン距離の方が損傷程度が大きく評価される傾向が確認された．この要因については，今後検討する必要がある．

5. まとめ

本研究では，これまで開発してきた AI による桟橋の残存耐力評価に関して，説明変数として与える距離概念の検討や説明変数として導入する桟橋形状寸法の情報が予測精度に与える影響について検討を行った．

本研究より得られた知見を以下に示す．

・距離概念としてこれまで導入していたチェビシェフ距離に対して，今回新たにマンハッタン距離の概念について検討を行った．推定精度を比較すると，マンハッタン距離の方が若干精度が良いものの，いずれの距離概念でも精度に大きな違いがないことが確認された．また，この距離概念そのものは説明変数に導入しないと精度が大きく低下することも確認できた．

・桟橋の寸法情報については，杭の突出長の情報が必須であることが確認できた．梁の寸法情報については，静的作用についての評価であれば情報がなくても精度にあまり影響がないものの，動的作用には影響のあることが確認できた．

・実桟橋で得られた劣化度判定結果を基に，距離概念の導入が予測精度に与える影響について検証を行った．対象桟橋においては，いずれの距離概念についても高い精度で予測することができた．

本研究で得られた結果から，想定する作用に応じて少ない桟橋情報でも桟橋の残存耐力を精度良く予測することが可能であり，本論文で示した技術は効率的なメンテナンスを行う上での一助になるものと考えている．

REFERENCES

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，川端雄一郎，岩波光保：港湾 RC 構造物の確率論に基づく保有性能評価，港湾空港技術研究所資料，No.1225，2010.
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) 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.
7) 小泉哲也，山本修司，竹地晃一郎，門脇陽治：被災した係留施設の残存耐力の評価手法の開発，港湾技研資料，No.912，1998.
8) 内田吉文，本多和彦，吉村藤謙：地震後における岸壁の残存耐力評価手法について，地盤工学会誌，Vol.59，No.10，pp.46-47，2011.
9) 門脇大輔，阪田隆司，保坂桂佑，平松雄司：Kaggle で勝つ データ分析の技術，pp.111-270，技術評論社，2019.
10) FORUM8 Co., Ltd.：Engineer’s Studio Ver. 9.0.2 Manual
11) 斎藤康毅：ゼロから作るディープラーニング－Python で学ぶディープラーニングの理論と実装－，pp.39-239，オライリージャパン，2016.

(Received September 30, 2025)
(Accepted November 30, 2025)

STUDY ON THE INFLUENCE OF EXPLANATORY VARIABLES IN THE EVALUATION OF RESIDUAL STRUCTURAL PERFORMANCE OF PIERS USING MACHINE LEARNING AND VERIFICATION ON ACTUAL PIERS

Kunihiko UNO and Charan KAMERI

The authors have previously proposed a method for evaluating the residual structural performance of piers using deterioration assessment results, utilizing general-purpose structural analysis programs and artificial intelligence. However, it is anticipated that sufficient information, such as drawings, may be lacking for aging piers. Efficient maintenance is still required for such structures. Therefore, we investigated sensitivity analysis of explanatory variables in residual structural performance evaluation and methods to improve prediction accuracy by introducing additional explanatory variables. These findings were verified on actual piers. The results demonstrated that, depending on the assumed loading conditions, damage can be predicted accurately even with a limited number of explanatory variables.