

舞鶴港で貨物船が岸壁に衝突！ 損傷した栈橋を3次元解析で評価・復旧

高本 裕継¹・石橋 伸司¹

¹近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 技術開発課

(〒663-8135兵庫県神戸市中央区小野浜町7番30号)

舞鶴港第4ふ頭地区-10m岸壁は、1968年に供用を開始した直杭栈橋構造の係留施設である。老朽化の進行が著しく、補修工事を計画していた。このような中、貨物船が、栈橋に衝突し損傷する事故が発生し、復旧方法を検討する必要性が生じた。通常、栈橋の設計では、横断面方向の2次元骨組構造解析を行うのが一般的である。しかしながら、栈橋の損傷状況を考慮すると、通常の2次元骨組構造解析での評価が困難と考えられた。そこで、復旧検討は、損傷した状態の栈橋を解析できる3次元有限要素解析を用いて行った。

キーワード 維持管理、船舶事故、3次元解析

1. はじめに

船舶が衝突し、港湾施設に必要とされる機能を失った事例として、2018年9月4日の台風21号で関西空港連絡橋にタンカーが衝突が記憶に新しい。この衝突により、橋桁の作り直しが必要となり、全面復旧まで約7か月の期間を有した。このように港湾施設は船舶との衝突事故により、本来必要とされる機能を失うことがある。

海難統計等資料¹⁾によると、船舶事故隻数を海域別に分類すると、約4割が港内（港則法上の港域）となっており、このうち約3割が防波堤、灯浮標、漁具等の物件との衝突事故となっている。これらの統計的な数値から港湾施設が船舶衝突により損傷することがわかる。

一方、港湾施設の老朽化については、他のインフラと

同様に著しく進行している。港湾施設の耐用年数は50年と設定されていることが多く、岸壁では建設後50年以上を超過する割合は、2018年時点では約2割、2038年には約7割に増加すると見込まれている。しかしながら、設計供用期間を超過した施設の維持管理の対応については、技術マニュアル等は整備されているものの、個々の状況を勘案し、施設管理者等が総合的に判断し実施する状況である。本稿では、舞鶴港で検討した設計供用期間を超過した岸壁の船舶衝突事故による損傷に対する復旧方法の検討を3次元有限要素解析を用いて行ったので報告する。

2. 岸壁の概要と老朽化判定

(1) 舞鶴港第4埠頭地区-10m岸壁

舞鶴港は京都府の日本海側に位置し、若狭湾の一部を成す支湾である。リアス式海岸や山々に囲まれた地形、潮位差が小さいことから天然の良港である。

舞鶴港第4埠頭地区-10m岸壁（以下、「当該施設」という）は高度経済成長期の初期に逼迫する木材需要に対応すべく、1968（昭和43）年度に竣工、供用を開始した施設である。岸壁水深10.0m、延長199.5mで設計対象船舶は10,000トンである。当該施設の設計供用期間は50年であるが、供用期間を超える現在も供用しており、近年は取扱貨物は主に合板などの木製品となっている。

写真-1に当該施設の航空写真を、図-1に断面図を示す。



写真-1 舞鶴港第4ふ頭地区（航空写真）

岸壁の構造形式は、直杭式横桟橋であり、前面桟橋とその背後の土留護岸並びに背面の棚式桟橋と土留護岸の2重構造となっている。前面桟橋の鋼管杭の杭径はφ610mm、杭の下端深度はDL-27.0mとなっている。海底地盤は粘性土と砂質土の互層となっており、杭下端は平均N値=61回の礫混じり砂質土となっている。

(2) 維持管理計画に基づく老朽化判定

当該施設の点検・診断は平成24年に実施しており、その点検結果を表-1に示す。主要部材である本体工（鋼管杭）の健全度はC評価（部材の性能低下はないが、変状が発生している状態）であるが、上部工（下面）は梁、床版にひび割れや鉄筋露出が見られ、当該施設の評価はA判定（施設の性能が低下している状態）となっていた。これらの結果を受けて、港湾管理者である京都府は維持管理工事を順次進める計画をしていた。

3. 船舶衝突事故による岸壁損傷状況

当該施設への衝突事故は、9,000トン級の貨物船によ

り発生した。舞鶴港に入港後、当該施設に接岸しようとしていたところ、船首が桟橋下部に潜り込んだ。桟橋の損傷箇所は北側から約40mの位置で、桟橋上部工ブロックNo.9とブロックNo.10を支えている鋼管杭うち2本が屈曲していたが、上部工の著しい損傷はなかった（図-2）。事故後、詳細調査のため、杭の屈曲部分（杭頭部から水深5m）は切断した。

4. 復旧設計における課題とその対応方針

(1) 復旧設計における課題

損傷した桟橋の復旧方法として、損傷部分の上部工を撤去し、新たな杭の打設、新設上部工の設置が考えられた。しかしながら、当該施設は先に示した通り、老朽化による劣化も進行しており、以下のような設計上の課題があった。

- ・桟橋設計では横断面方向2次元の骨組構造解析を行うが、損傷した杭がない状態の評価は困難となること。
- ・既設コンクリートは老朽化が著しく、上部工の新設コンクリートとの一体化による評価が困難であること。
- ・杭を新設する場合、近傍に既存杭がある若しくは引き

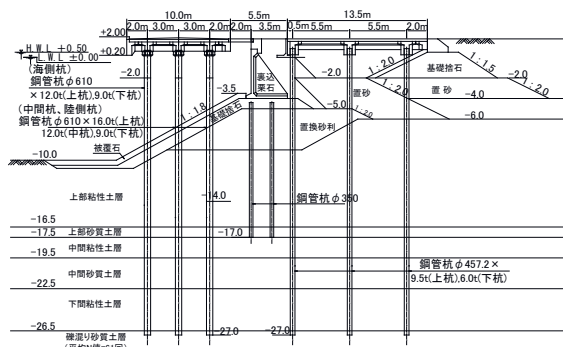


図-1 第4ふ頭地区ー10m岸壁断面図

表-1 老朽化判定結果

点検部材等	調査方法	個別評価	健全度	評価に起因する代表的な変状写真
岸壁法線	測量及び目視調査	D	A	
上部工(上面・側面)	目視調査	B		
上部工(下面)	潜水目視調査	A		
本体工・土留	肉厚測定	C		
マウンド・海底地盤	潜水目視調査	B		
電気防食工	陽極消耗量・電位測定	D		
付帯設備	目視調査	C		
施設の状態				
A 施設の性能が低下している状態				
B 放置した場合、施設の性能が低下する恐れがある状態				
C 施設の性能に関わる変状は見られないが、継続して観察する必要がある状態				
D 異常はみられず、十分な性能を保持している状態				

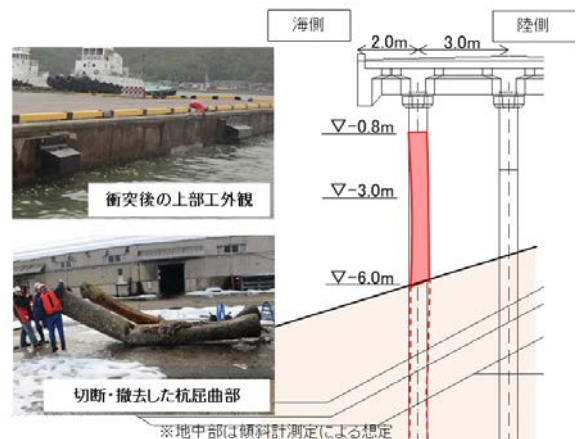
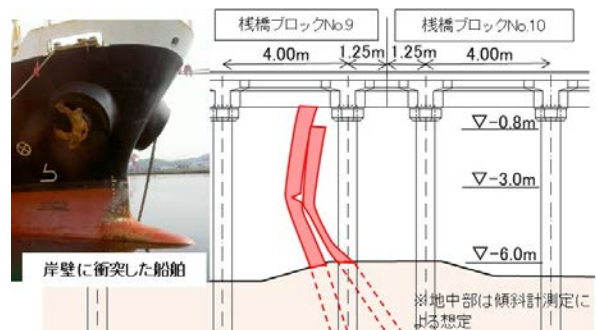


図-2 桟橋損傷状況図（上：正面図，下：断面図）

抜くため、新設杭の周面抵抗力や地盤の横方向地盤反力の評価が困難であること。

・既設杭の間に杭を新設する場合、規定の間隔を保持できなければ、評価の難しい群杭効果の影響を考慮しなければならないこと。

(2) 課題への対応方針

本案件のような復旧方法は、過去に事例がなかったため、国土技術政策総合研究所及び港湾空港技術研究所の専門家に以下のような助言を受け、復旧設計に取り込むこととした。

- ・損傷箇所のみを復旧するのであれば、損傷した鋼管杭がない状態を3次元有限要素解析（以下、「3次元解析」という）で評価する。
- ・上部工の老朽化した既設コンクリートと新設コンクリートは一体化せず縁切りして評価する。
- ・栈橋設計において、船舶接岸時の水平方向抵抗が不足するようであればストラット工法などの新技術を適用する。

5. 復旧検討の手順と設計条件

(1) 復旧検討の手順

復旧検討の手順フローを図-3に示す。まず既存資料による当該施設の資料収集整理を行った。当該施設の設計は、昭和30年代に行われており、設計計算書は現存しなかった。そこで、維持管理計画書に記載のある当該施設の諸元や設計条件、点検結果などを基に設計条件の整理を行った。次に、事故後の施設現況を把握するため、現地調査を行った。現地調査では3.に記した損傷状況や鋼管杭と上部工の正確な配置や寸法、上部工（梁・床版）の現況確認などを行った。これらの作業を終えた後に3次元解析を使った検討を進めることとした。

3次元解析では、まず原設計図モデル（以下、「設計図モデル」という）での照査を行い、これをベースモデ

ルとした。次に、杭が損傷した状況のモデル（以下、「杭欠損モデル」という）を評価し、さらに損傷した杭の上部工を一部切欠いた状態（以下、「上部工切欠モデル」という）での評価を行った。これらの評価結果をもとに対策断面の検討を行うこととし、対策断面として新設杭を設置する案と設置しない案を検討することとした。

(2) 設計条件の整理

復旧にあたって、設計条件は当初設計のものを踏襲することが前提である。ここでは当該施設を復旧するために必要となった設計条件について特筆する。

a) 適用する技術基準

港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁾（以下、「港湾基準」という）では、「建設」、「改良」、「維持」により適用する技術基準を定めている。本案件は、専門家の助言を踏まえ、「改良」には当たらず設計当時の技術基準に該当し、「港湾工事設計要覧（昭和34年）」（以下、「設計要覧」という）を適用することを基本とした。

b) 耐用年数

当該施設は、1968（昭和43）年に供用を開始し50年以上を経過していた。本検討を行う時点で残存供用期間は明確になっておらず、今までの供用期間に更に50年を加えた設計供用期間とした。具体的には、2019年に供用後51年となるため、さらに50年を加えた101年とした。

c) 腐食速度

鋼材の腐食速度については、過年度の点検調査により実績を確認した上で設定することとした。2016（平成18）年度の調査結果では、供用38年間で最大腐食厚が0.6mmとなっており、腐食速度は約0.02mm/年であった。この腐食速度は、設計要覧及び港湾基準に記載のある腐食速度0.03mm/年よりも小さいかったため、港湾基準等に記載のある標準値を採用することとした。

d) コンクリート圧縮強度

コンクリートの材料特性については、現存する資料から確認できなかった。そのため、コンクリート圧縮強度は、簡易的ではあるものの現地調査で既存梁をテストハンマーを用いて測定し強度を推定することとした。No.9、No.10それぞれのブロックにつき10か所ずつ計20箇所、損傷杭周辺の梁を上面から測定した。各測点のコンクリート推定強度は20～35N/mm²であり、平均値は25N/mm²であった。これによりコンクリート圧縮強度は、港湾工事で一般的に用いられる24N/mm²とした。

6. 3次元解析による復旧検討

(1) 原断面の再現設計と損傷断面の照査

復旧工法の検討に先立ち3モデル（「設計図モデル」、「杭欠損モデル」、「上部工切欠モデル」）の3次元解

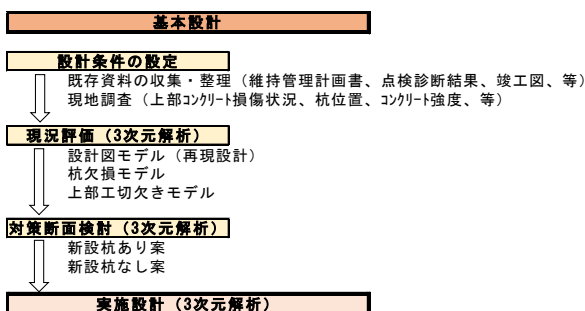


図-3 復旧検討手順フロー図

析を行った。このうち、図-4に示す範囲の杭及び梁を対象に照査を行った。照査した状態は、常時、地震時3方向（陸→海、海→陸、法線平行方向）、船舶接岸時、船舶牽引時の6ケース、照査項目は、杭の応力、杭の支持力、梁の断面力である。ここでの杭の肉厚は、供用開始以降50年間、腐食が進行したものとした。

各モデルの照査結果の概要を次に示す。

設計図モデルでは、すべての照査項目で許容値以内となり、設計上成立するモデルであることを確認できた。特に杭の支持力については、設計計算上支配的な照査項目ではないことがわかった。

杭欠損モデルは、照査した3モデルで比較すると各照

査項目とも相対的に耐力比が大きい傾向であった。これは欠損杭の上部工が残置しているため全体的にバランスが悪いためと考えられる。杭の応力と支持力は許容値以内であったが、梁の断面力では地震時と接岸時に陸側の梁で許容値を超える箇所があった。

上部工切欠モデルでは、切り欠いた上部工の重量を減じているため、周辺の杭では応力及び支持力とも相対的に小さく、すべて許容値以内となった。

表-2に作成した3次元モデルと常時（クレーン荷重+死荷重+上載荷重）の照査結果を示す。

(2) 復旧比較案の抽出・選定

上記(1)の解析結果をもとに、復旧断面案3案を作成し得失の比較を行った。3案はそれぞれ（A案）欠損箇所を新たな独立栈橋とするもの、（B案）新たな杭を設けず既設杭に支保工を設置し残置した上部工を支えるもの、（C案）上部工を一部切欠き、そこにP C床版橋桁を設置するものである。評価の概要を次に示す。

A案は、群杭効果とならないための杭の離隔は確保できたが、杭の周面抵抗力や地盤の横方向地盤反力を適切に評価することが困難であった。また海上での杭打ち作業が必要となるが、舞鶴港では冬季の海上施工は不可であるため、復旧作業がさらに遅くなる可能性があった。

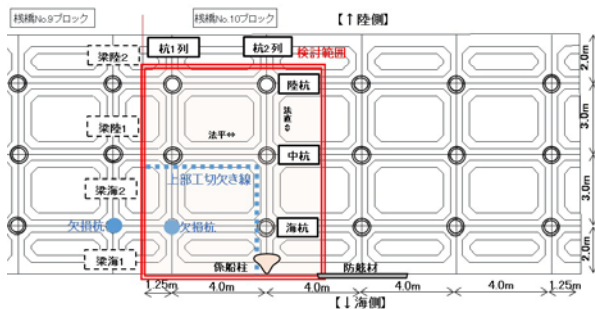


図-4 照査検討範囲

表-2 検討モデルと照査（常時）結果の概要

検討モデル	杭の応力	杭の支持力	梁の断面力（曲げモーメントのみ）
【設計図モデル】 			
【杭欠損モデル】 			
【上部工切欠モデル】 			

B案は残置した上部工を活用するため、既設コンクリートと新設コンクリートとの一体化を回避できるというメリットがあった。

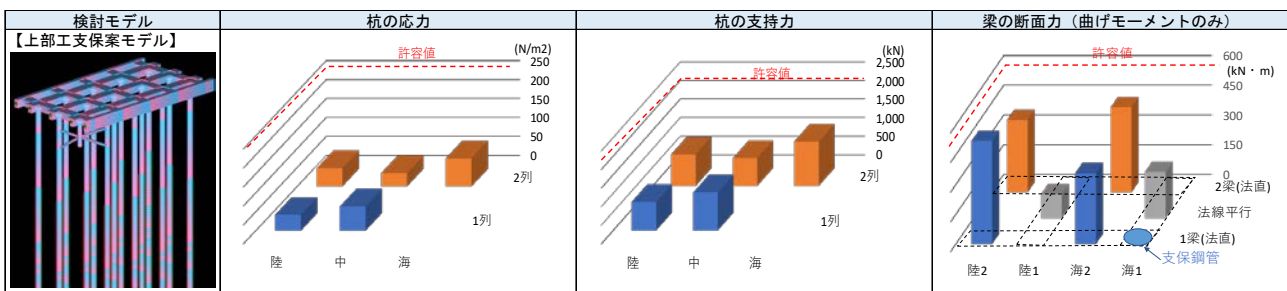
C案はPC床版橋桁を使った構造で、ほとんどの作業を陸上で完遂できるというメリットがあった。しかしながら、PC桁を支える重要な部材となる台座（新設コンクリート）と既設梁（既設コンクリート）を一体化する必要があり、上部工としての一体的な評価が困難であった。比較の詳細を表-3に示す。

これらを比較し、残置している上部工を活用するB案が設計上成立する案であることを確認し採用することとした。表-4にB案のモデル図と照査結果（常時）の概要を示す。表-2と比べると、全体的には杭欠損モデルに近い結果であった。B案では、既設杭2本に支保を設置したため、杭欠損モデルの残置した上部工と同様に荷重が作用した。一方、梁の断面力については、杭欠損モデルに比べ欠損杭周辺の断面力が小さくなっていることから、支保設置による効果が確認できた。

表-3 復旧断面案比較表

	A案（新設杭あり）	B案（新設杭なし）	C案（新設杭なし）
断面図			
平面図			
特徴	・補修箇所のみ独立橋樑構造 ・隣接杭間隔、残置杭から新設杭まで十分な間隔を保ち群杭効果を十二の構造	・残置した上部工を活用した構造 ・隣接杭からの支保工を伸ばし、欠損杭頭部の位置に鋼管を挿入する構造	・上部工（床版および梁）の一部を撤去し、支間長約10mの1径間PC床版橋樑構造
メリット	・汎用的でシンプルな構造 ・新設する上部コンクリートは既設と分離することが容易となる。	・主たる構造部材となる梁を活用しており、上部コンクリートを新設と既設の一体化の評価が不要となる。 ・杭打船による作業がないため、工事費・工期の削減が可能となる。	・杭不要かつ新設構造は全て低水位以上に設置され、水中工事不要となる。 ・PC桁はJIS規格品から選定できる。 ・杭あり案に比べ杭打船作業や水中作業が少ないため工事費・工期の削減が可能となる。
デメリット	・欠損杭の地盤の評価（横抵抗など）が困難である。 ・既設部と新設部の挙動に差が生じ、揺れ等による亀裂等を引き起こす可能性がある。 ・杭打船の手配・回航、冬場の海上施工不可等の制約があり、工期・工事費が大きくなる。 ・既存橋樑上部工の撤去範囲はB案に比べ広い。	・上部工支保材（鋼材）は工場加工品となるため、事前に既設杭間の位置関係など綿密な調査、施工が必要となる。 ・支保材の取付けは水中作業となり、1日あたりの施工能力に限界がある。	・PC桁受け台座は既存梁との一体化が必須であり評価が困難である。 ・橋樑No.9'ロックとNo.10'ロック間の目地部において、PC桁のたわみが最大となり、既設との目地の高低差が生じる。 ・既存橋樑上部工の撤去範囲はB案に比べ広い。
評価	・設計が難しく、施工に係る工事費・工期が杭なし案に比べ大きい。	・残置した梁を活用することで、主たる構造部材での既設と新設コンクリートの一体化を回避できる。	・PC桁受け台座は既存梁との一体化が必須であり評価が困難である。

表-4 B案モデルと照査（常時）結果の概要



(3) 既設鋼管杭等の照査

B案は既設杭（φ610）に鞘管（φ812）を組み合わせ支保として一体化する構造である。各部材の設計は、3次元解析により発生応力等を確認し、各部材の照査は格点式ストラット工法技術マニュアル³⁾を参考に行うこととした。

設計を進めていくと、鞘管下端付近で既設杭に発生する応力（地震時法線平行方向）が許容値を超過したため補強が必要であった。鞘管を設置した既設杭の応力比分布は図-5（左：補強前、右：補強後）の通りである。補強前は、鞘管下端の深度-3.5mの位置で応力比が1.4（=NG）になっている。上部鞘管はスタットジベルと無収縮グラウトにより既設杭と一体化することとしている。そのため、杭頭部の重量が大きくなっており、さらに杭断面が鞘管（φ812）から既設杭（φ610）に極端に変化していることが原因と考えられた。このような状況から、既設杭の補強は上部鞘管の径よりも小さい下部鞘管（φ711）を設置し、杭の断面変化を緩和することとした。既設杭との一体化は技術マニュアルの格点部での付着力確保の方法として記載のあるシアキー方式（丸鋼などを

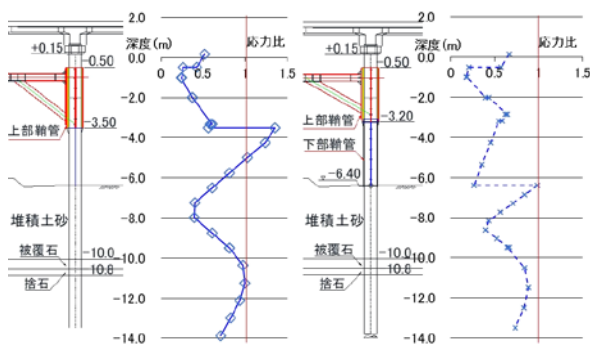


図-5 鞘管を設置した既設杭の応力比分布図
（左：補強前、右：補強後）

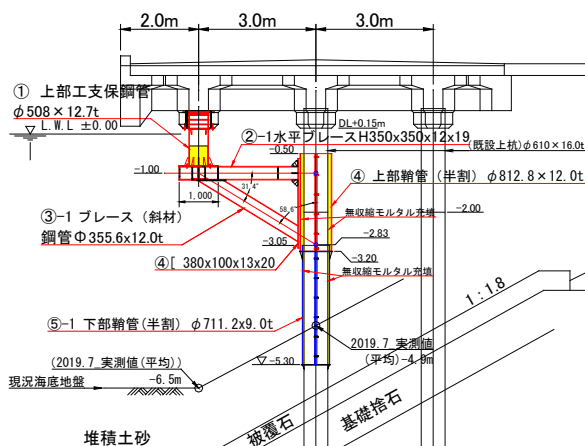


図-6 復旧断面部材構成図

既設杭外側及び鞘管内側の円周方向に一定間隔で溶接する方法）を用いることとした。補修後の応力比分布図（同図右）を見ると、下部鞘管下端で応力比が突出しているものの許容値以内になった。これらの検討結果によるB案の部材構造は図-6の通りである。

(4) 施工方法の検討

採用した復旧案は、残置した梁と杭を活用した構造で設計としては効率的ではあるが、施工の作業条件としては芳しくない。上下鞘管の設置にあたっては、残置した上部工の下部へ運搬、既設杭との一体化作業は困難が想定された。また現地陸上及び水中での溶接作業が多くなることが想定された。そのため、施工方法を工夫した。主な点を以下に記載する。

- ・主要部材は工場製作とし、溶接の品質を確保する。
- ・上向き溶接により品質悪化が懸念される箇所は、予め工場溶接とするかボルトによる接合とした。
- ・水中部への部材運搬は、栈橋前面からフロートを使って上部工の下部に侵入させ組み立てを行う。
- ・栈橋床版（梁の残置）は一部撤去し、開口部から上部工下部の作業性と明るさを確保する。
- ・老朽化した梁の断面修復を行う。

7. おわりに

本報告は、き損原因者が復旧方法の検討に際して、当事務所が技術的支援を行ったものである。本案件の現地施工は2020年1月に着工しており、2020年中には完了予定である。引き続き老朽化による補修工事を実施し、設計モデル通りの構造体とすることとしている。

港湾の施設の維持管理について、本案件のような船舶衝突事故による復旧検討事例は紹介されていない。そのため、本報告が今後の港湾の施設の維持管理の事例として参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) 海上保安庁：交通政策審議会第26回海事分科会参考資料1（平成25年7月3日）
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（平成30年5月）
- 3) 沿岸開発技術研究センター：格点式ストラット工法技術マニュアル（平成12年9月）