# RC上部エが損傷した桟橋の 余震時耐震性能評価のためのモデル化

# 大矢 陽介1·川端 雄一郎2

<sup>1</sup>正会員 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1) E-mail:ooya-y@pari.go.jp

<sup>2</sup>正会員 国立研究開発法人港湾空港技術研究所 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1) E-mail:kawabata-y@pari.go.jp

桟橋構造物を対象とした地震後の供用可否判断や最適な修復シナリオ構築に活用することを目的に、地 震力や地震後の供用荷重による桟橋のRC上部工の損傷が、後続の地震に対する耐震性能に与える影響を 模型実験および数値解析より評価した.また、地盤と杭の相互作用を考慮した地震応答解析より、本震や 地震後の供用荷重による上部工の損傷が、余震の際の地震時挙動に与える影響を確認した.その結果、後 続の地震動に対する桟橋の残存耐力は、地震時に経験した水平変位と供用時の上部工荷重による損傷によ り低下することが分かった.また、地震応答解析よりRC上部工の損傷を考慮しても桟橋の残留水平変位 は変わらないこと、損傷程度が大きくなるほど杭上部で杭の曲率は大きくなるが、地中部では損傷程度に 関係なく曲率の変化は小さいことが分かった.

#### *Key Words* : open-type pier, seismic design, residual structural performance, earthquake ground motion, finite element method

## 1. はじめに

南海トラフの地震などの巨大地震を考えた場合,地震 後の復旧などを含めた構造物の維持管理が求められてい る.しかし,地震によって構造部材が損傷した場合,供 用の可否判断のための残存性能評価技術,また損傷程度 に応じた修復技術などについては十分に確立されていな い.このうち残存耐力評価技術に着目すると,損傷を受 けた鉄筋コンクリート (RC)は剛性等の力学特性が変 化し,設計時の構造応答と異なるため,地震時損傷を考 慮した余震に対する耐震性能評価手法の構築が不可欠で ある.

本研究は桟橋構造を対象に、地震後の供用可否判断や 最適な修復シナリオ構築に活用することを目的に、地震 力や地震後の供用荷重による桟橋のRC上部工の損傷が、 後続の地震に対する耐震性能に与える影響を模型実験お よび数値解析より評価した.さらに、余震に対する耐震 性能評価に向けて、杭と上部工の接合部の回転変形に着 目した、RC上部工の損傷を考慮した桟橋のモデル化を 検討した.

なお、RC上部工の上部工荷重に対する耐力と区別す

るため、特段の説明がない場合、耐力とは桟橋の水平耐 力を示すこととする.

# 2. 地震時変位と上部工荷重によるRC上部工の損 傷と桟橋の水平耐力

#### (1) 検討内容

損傷シナリオは、図-1に示す①地震力による損傷、② 上部工荷重による損傷、③後続の地震力による損傷の三 段階を想定し、性能を評価した.検討対象は、桟橋の法 線直角方向の杭1列分を約1/4の縮尺でモデル化した実験 供試体<sup>1)</sup>で、解析では更に鋼管中心位置で対称条件を設 定した1/2モデルとした.図-2に有限要素モデル、写真-1 に実験供試体を示す.解析には、汎用構造解析コード DIANA<sup>2)</sup>を用いた.

実験試験体の鋼管杭には鋼種STK400,外径216.3mm, 厚さ4.5mmのものを使用した. 桟橋RC上部工は幅300mm, 高さ300mm,スパンは杭中心で1250mm,鋼管の埋め込 み長は250mmとした. 鋼管杭は,仮想地盤面から1/βの 位置を仮想固定点とし,実験では仮想固定点以下を2重 鋼管,解析では仮想固定点を変位拘束条件として固定し



図-3 ひび割れ図(実験)およびひび割れひずみコンター図(解析)

た. また, 鋼管杭A, C杭には100kN, B杭には50kNの上 部工の自重と上載荷重相当の軸力を与えた. 第1段階の 交番載荷では, 鋼管杭のひずみが降伏ひずみ (2000µ) に達した際の水平変位を1 & として, これを基準に行っ た. 1 & は実験の3供試体で28mmから30mmの範囲, 解析 で30mmであった.

#### (1) 検討内容

図-3に第1段階(本震時,地震力)および第2段階(供用時,上部工荷重)おけるRC上部工のひび割れ図およ

びひび割れひずみコンター図、図-4に上部工の水平変位 と水平荷重の関係を示す.2 &以降になると繰返しとと もに最大荷重は小さくなり、3 &のサイクル途中で荷重 はピーク値を示し、これ以降は水平変位が大きくなると 荷重は減少した.また、陸側の杭頭部周辺において損傷 が最も早く始まり、損傷の程度が大きい.解析結果は実 験の最大水平荷重の1.5倍を示し、実験結果との差異が 明らかであるが、これらの傾向は両者で共通している.

第1段階の最大水平変位と第2段階の上部工荷重の最 大値の関係を図-5,最大水平変位と初期剛性の関係を図



-6に示す. 第1段階における最大水平変位が大きくなる と、第2段階の上部工荷重の最大値および初期剛性は小 さくなった. 図-3に示すように RC 上部工のスパン間に おいて地震力による損傷が小さくても、杭頭周辺部の損 傷により上部工の耐荷性能は大きく低下することが分か った. 図-7に第2段階の上部工載荷荷重と第3段階(余 震時, 地震力) の最大水平荷重の関係を示す. 図中の凡 例の色の違いは、第1段階における最大変位の違いであ る. 第1段階の最大変位が1δ,および2δ,においては, 上部工載荷荷重が大きくなると後続の地震力に対する水 平耐力は小さくなった.一方,事前の地震力において損 傷が大きい 3 δ および 4 δ においては、上部工載荷荷重

の大きさによらず水平耐力は変わらない. これは、桟橋

RC 上部工が損傷しても、桟橋構造全体の水平耐力に対 する鋼管杭の負担分が残存するためと考えられる.

100

● 実験 — 解析 200

150

600

図-7に示すように、鋼管杭のみの水平耐力に相当する 上部工と杭頭をピン結合とした骨組み解析の最大水平荷 重は 92kN となり、この考察を支持する結果である.ま た,図-8に示すように桟橋の初期剛性は,残存耐力と比 べて損傷による低下程度が大きいことが分かった. 剛性 低下による固有周期の長周期化といった振動特性の変化 により、設計条件が変わることも修復設計の際には考慮 が必要であろう.



表-1 梁要素の材料パラメータ

部材	モデル	EA	EI	$N_y$	$M_p$
		kN	kN·m <sup>2</sup>	kN	kN·m
上部工	約二次	2.98×10 <sup>6</sup>	22343	—	_
杭頭部	形水川シ				
鋼管(充填)	線形	8.41×10 <sup>6</sup>	6965	—	—
鋼管	非線形 (バイリニア)	6.59×10 <sup>6</sup>	3695	1219	82

## 3. 杭と RC 上部工の接合部のモデル化

#### (1) 地震応答解析における桟橋のモデル化

桟橋の地震被害の代表例として、1995 年兵庫県南部 地震における神戸港 T 桟橋の事例がある.被害の概要 を図-9に示す.桟橋は 3 列の杭長 19.5m の鋼管杭(杭径 700mm,板厚 9mm~14mm)で構成され、最大で約 1.7m 海側へ変位したことが確認された.また、被災後の鋼管 杭の引き抜き調査より、杭頭および地中部で座屈が発生 していたことが確認された.その後の数値解析等による 検討から、護岸背後の埋立土層と沖積砂層の過剰間隙水 圧の上昇に伴い、護岸が桟橋と捨石層を押し出したこと により、桟橋が海側へ変位し、地中部で鋼管が座屈した ものと推定されている<sup>例に13</sup>.

このような液状化に伴う地盤の流動による地中部の鋼管の変形を再現するには、杭間の地盤のすり抜けといった現象の再現性や計算負荷を考慮して、二次元有効応力解析が用いられることが多い<sup>例えば4)</sup>.この二次元有効応力解析では、桟橋は梁要素でモデル化され、杭と地盤の間を非線形ばねにより接続することで、杭と地盤の三次元的な相互作用を表現することが可能である.本研究は、地震動や上部工荷重による RC 上部工と杭の接合部の損傷が地震後の残存耐力に与える影響を評価することを目的としているため、地盤と構造物の相互作用を考慮可能な二次元有効応力解析による検討が必要といなるため、

桟橋構造は梁要素でモデル化する.

### (2) 杭とRC上部工の接合部のモデル化方法

桟橋を梁要素を用いた骨組みモデルで解析する場合, 杭と上部工の接合部は梁要素同士を剛結合することが一 般的である.しかし,桟橋の模型実験を骨組みモデルを 用いて再現解析する場合,杭と上部工を剛結合する方法 では荷重一変位関係における初期剛性と最大荷重を過大 に評価するため,接合部に非線形回転ばねを用いること の必要性が示された<sup>5)</sup>.本研究では,前述の三次元解析 において,水平変位と上部工荷重によって杭と上部工の 接合部周辺の損傷が大きくなることで,損傷後の余震時 の最大荷重と初期剛性が杭と上部工をピン結合とした骨 組み解析の結果に近づくことに着目し,既往の研究と同 様に杭と上部工の接合部に非線形回転ばねを設けること とした.解析モデルのモデル図を図-10,梁要素の材料 パラメータを表-1に示す.なお,解析には,二次元有効 応力解析コード FLIP<sup>6</sup>を用いた.

### (3) 模型実験の再現解析

三次元解析で得られた荷重と変位の関係を対象に,骨 組み解析において,杭と上部工の接合部に設けた回転ば ねのばね定数のパラメータスタディを行った.ばね定数 を変えた水平変位と荷重の関係を図-11に示す.剛結合 (ばね定数 1.0×10<sup>10</sup> kN·m/rad.)とピン結合(100



kN·m/rad.)の初期剛性と最大荷重の違いは明かであり、 最大荷重は変位 300mm 時点で 2.4 倍の違いがある.

パラメータスタディより決定した接合部の回転ばねの 回転角と回転力の関係を図-12に示す.三次元解析で見 られた水平変位に対して最大荷重以降に荷重が低下する ことを再現するようばね定数を決定したため,回転ばね 特性の骨格曲線もピークを示す形状となった.また,回 転ばねの履歴特性として,原点指向型のモデルを用いた. 骨組み解析における繰返し載荷試験の結果を三次元解析 と比較して図-13に示す.

非線形回転ばねの特性(図-12参照)より,上部工の 損傷の程度は、回転角の最大値で表現することが可能で ある.図-14は、地震力(第1段階)および上部工荷重 (第2段階)の後に再び地震力(第3段階)を与えた三 次元解析の結果(図-7)に対応した骨組み解析の結果で ある.ただし、第2段階では、上部工荷重を載荷するの ではなく、上部工荷重による接合部の損傷パラメータと して、第1段階の後に非線形回転ばねに対して最大回転 角を設定し、その後、地震力(第3段階)の解析を実施 した.すなわち、本震時に発生した最大回転角と損傷パ ラメータの大小関係で、第3段階の残存耐力が決まり、 供用荷重による上部工の損傷を余震時の耐震性能照査へ 取り入れることが可能である.



## RC上部工の損傷が桟橋の地震時挙動へ与える 影響

#### (1) 検討内容

本検討では、提案した RC 上部工の損傷を表現可能な 非線形回転ばねモデルを用い、地盤と杭の相互作用を考 慮した地震応答解析において、本震や地震後の供用荷重 による上部工の損傷が、余震の際の地震時挙動に与える 影響を検討する.

検討対象は、前述の神戸港 T 桟橋の被災事例とした. 被災した神戸港 T 桟橋においても RC 梁でクラックが多 数確認されている<sup>3</sup>が、前述の模型実験と比較すると損 傷程度は小さい.これは、鋼管杭の曲げ耐力が上部工よ りも小さいため、上部工よりも鋼管の損傷が大きく、杭 頭部で座屈が発生したことが理由と考えられる.本検討 では模型供試体を対象とした骨組み解析と同様に、上部 工の損傷により接合部の曲げ伝達力が小さくなることを 想定し、杭と上部工の接続に非線形回転ばねを設けた.

## (2) 解析条件

解析条件,地盤や桟橋の材料パラメータ等は,被災状況を再現できた既往の研究<sup>4</sup>と同一とした.有限要素モデルを図-15に示す.本震と余震の入力地震動は,1995年兵庫県南部地震の際の神戸港ポートアイランドの鉛直

アレー記録について、振幅を 0.5 倍した加速度波形を用いた.本震および余震の入力地震動を図-16に示す.

杭と上部工の接合部は、剛結合と非線形回転ばねの2 種類とした.非線形回転ばねのパラメータは、前述の模 型実験を対象とした再現解析の荷重一変位関係を参考に、 桟橋部のプッシュオーバー解析より求めた.設定した非 線形回転ばねの特性は、図-12の回転力(縦軸)を20倍 にしたもので、図-17に示すようにプッシュオーバー解 析の結果は、剛結合と結果を上限、ピン結合の結果を下 限とした範囲において、最大荷重を示した後に荷重低下 を示す荷重一変位関係となった.

解析は,表-2に示す3ケース実施した. Case1と Case2 は,接合部の非線形回転ばねの有無が異なり, Case2 と Case3 は本震後の供用荷重による上部工の損傷の有無が 異なる.上部工の損傷は,前述の実験供試体を対象とし た解析と同様に,本震の後に損傷パラメータとして,非 線形回転ばねに最大回転角(0.05 rad)を設定した. 余震ともに、各ケースの水平変位時刻歴の違いは小さかった.本震後の供用荷重による上部工の損傷を考慮した Case3 は、余震開始以降の時刻歴が他の 2 ケースよりも やや変位が小さくなった.また、残留変位(40 秒時 点)は-0.79m で、残留変位が最も大きかった Case2 の-0.83m より 5%小さくなった. 桟橋は土留めとして護岸 の変位を抑えることはなく、また、桟橋は護岸や地盤の 変位により海側へ押し出されるため、上部工の損傷程度 によって、護岸や地盤の変位に違いが現れず、結果的に 桟橋の水平変位の違いも小さかったと考えられる.

各ケースの本震後および余震後の変形図を図-19,過 剰間隙水圧比の分布図を図-20に桟橋部を中心に拡大し て示す.本震により護岸背後の埋土層で液状化が発生し, 余震により埋土層の液状化範囲は深部まで広がった.ま た,海底地盤における過剰間隙水圧比は,余震により本 震終了時より大きくなった.非線形回転ばねを用いた Case2 および Case3 では,杭と上部工の接合部で回転変 形が発生したため,剛結合である Case1 との余震後の変 形モードに違いが見られる.

## (3) 解析結果

桟橋上部工の水平変位時刻歴を図-18に示す.本震と



表-2	解析ケーン	ス
-----	-------	---

ケース名	接合部	本震	本震後の供用時 上部工損傷	余震
Case1	剛結剛	毎日、汨ルミコムヨ	無し	観測記録
Case2	非線形	(11年前1月1日秋 (11年前1月1日秋	無し	(振幅0.5倍,本
Case3	回転ばね	(加水中田 0.31百)	有り	震と同じ)

図-21に中間杭の接合部に設けた非線形回転ばねの履 歴を示す. Case3 では供用荷重による上部工の損傷を設 定したことで剛性は大きく低下したが,結果的に余震に よる上部工の損傷程度は Case2 と Case3 で大きな違いが なかった. このことが本震後の供用荷重による上部工の 損傷を考慮した Case3 において, Case2 と明瞭な結果の 差異が現れなかった理由と考えられる.

で除した最大曲率比の分布を図-22に示す. 杭の発生曲

率分布は、杭上部で各ケースの差異が明瞭に現れた. 接

合部の回転変形を考慮した Case2 および Case3 の結果は,

剛結合の Casel より曲率が小さくなった. さらに、本震

後の供用荷重による損傷を考慮した Case3 の方が Case2

より曲率が小さくなった. これは, 設定した損傷パラメ

ータ(最大回転角)が回転力がピークを示す時の回転角 よりも大きいため、Case3 における杭への曲げ伝達性能

が Case2 より小さくなったことが理由と考えられる.現

杭の最大曲率分布および最大曲率を全塑性モーメント







上部工では必要鉄筋量の減少,鋼管杭では板厚の減少で きる可能性を示した.

今後,桟橋の杭頭部の接合条件といった構造特性に合わせた,上部工の損傷を考慮可能な接合部のモデルの開発が必要である.

謝辞:本研究は、平成25年度吉田研究奨励賞を授与された研究課題である.ここに記して謝意を表す.

#### 参考文献

- 川端雄一郎,岩波光保,加藤絵万,西田孝弘:地震 動により損傷した桟橋 RC 上部工の残存性能評価, 港湾空港技術研究所資料, No.1267, 2013.
- 2) TNO DIANA BV .: User's Manual Release 9.5, 2014.
- 南兼一郎,高橋邦夫,横田弘,園山哲夫,川端規之, 関口宏二:神戸港 T 桟橋の地震被害状況と静的およ び動的解析,基礎工, Vol.25, No.9, pp.112-119, 1997.
- 4) 塩崎禎郎,長尾毅,小堤治,宮下健一朗:局部座屈 を考慮した直杭式横桟橋の二次元有効応力解析,土 木学会第34回地震工学研究発表会講演論文集,9pp., 2014.
- 5) 横田弘, 片岡保人, 菅原亮, Hazem El-Bakry, 川端 規之: 桟橋の鋼管杭と上部工接合部の力学的挙動に

杭頭部で見られた発生曲率の差異は,標高が低くなる とともに小さくなり,捨石部で曲率の差異は小さくなっ た.剛性の大きな捨石部で曲げ変形が抑制するため,接 合部の回転変形の違いの影響も捨石部で小さくなったと 考えられる.また,地中部で全塑性モーメントを超える 曲率が発生した範囲においては,ケース毎の明瞭な差異 は確認できなかった.地中部で発生する杭の曲げ変形は, 地盤の変位に起因するため,地盤の変位に違いが見られ なかったように,地中部の杭の発生曲率にも違いが現れ なかったものと考えられる.

## 5. おわりに

余震の地震力に対する桟橋の残存耐力は、本震時に経 験した水平変位と供用時の上部工荷重による損傷により 低下する.桟橋の地震力に対する耐力におけるRC上部 工の負担分には上限があり、上部工の損傷が大きくなっ ても、鋼管杭への水平力の荷重伝達ができれば、地震力 に対する耐力は一定値を保持することが分かった.

地盤と杭の相互作用を考慮した地震応答解析より,上 部工の損傷を考慮しても,桟橋の水平変位に対する影響 は小さかった.杭の発生曲率は,上部工の損傷を考慮す ることで杭上部で曲率が減少したが,地中部における曲 率の変化は小さかった.上部工の損傷を考慮することで, 6) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity

# NUMERCAL MODELING FOR SEISMIC PERFORMANCE RE-ASSESSMENT DURING AFTERSHOCK OF RC SUPERSTRUCTURE OF OPEN-TYPE PIER DAMAGED BY EARTHQUAKE GROUND MOTION

# Yousuke OHYA and Yuichiro KAWABATA

A purpose of this study is to make a determination criteria whether the facility can be used or not and building the most suitable restoration scenario for damaged open-type pier after earthquakes. An experiment and numerical analyses were conducted to evaluate the influence of damage on a RC superstructure in a pier cased by an earthquake ground motion and a load in service after the earthquake which affects seismic performance during an aftershock. Then, we confirmed seismic behavior of an open-type pier whose the RC superstructure have received damage due to main shock and load in service after earthquake by seismic analyses which consider soil-pile interaction. As the result, residual strength of the RC superstructure the aftershock decreased as well as the damage due to horizontal displacement and load in service increased. Then the results of seismic analysis indicated that even if damage of the RC superstructure at the upper part of the steel pipe piles became big, but underground section showed that change is small.