

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1405 September 2022

栈橋の偶発状態に対する耐震性能照査法の高度化に関する課題の整理

田渡 竜乃介, 水谷 崇亮, 野津 厚, 小濱 英司, 大矢 陽介, 近藤 明彦
加藤 絵万, 川端 雄一郎, 田中 豊, 竹信 正寛, 松村 聡, 浜本 尚拓
稲田 滉平

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. 用語の定義	4
3. 栈橋の要求性能, 性能規定および性能照査法	5
3.1 H30基準の概要	5
3.2 他の構造物および他の分野の基準における事例	6
4. 通常栈橋のレベル2地震動に対する耐震性能照査	8
4.1 H30基準における通常栈橋に関する課題	8
4.2 要求性能	8
4.3 性能規定	8
4.4 性能照査法	8
5. 耐震栈橋のレベル2地震動に対する耐震性能照査	9
5.1 H30基準における耐震栈橋に関する課題	9
5.2 要求性能	9
5.3 性能規定	10
5.4 性能照査法	10
6. 今後検討すべき研究課題	12
6.1 通常栈橋	12
6.2 耐震栈橋	12
6.3 栈橋全体その他の課題	13
7. 結論	13
8. あとがき	14
参考文献	14

Perspective on Seismic Design of Pile-Supported Wharves for Level-2 Ground Motions

Ryunosuke TAWATARI ¹⁾, Takaaki MIZUTANI ²⁾, Atsushi NOZU ³⁾,
Eiji KOHAMA ⁴⁾, Yousuke OHYA ⁵⁾, Akihiko KONDO ⁶⁾, Ema KATO ⁷⁾,
Yuichiro KAWABATA ⁸⁾, Yutaka TANAKA ⁹⁾, Masahiro TAKENOBU ¹⁰⁾,
Satoshi MATSUMURA ¹¹⁾, Naohiro HAMAMOTO ¹²⁾, Kohei INADA ¹³⁾

Synopsis

We held a seminar in 2021 for the purpose of identifying and sharing current issues on seismic design for pile-supported wharves described in the technical standard and commentaries for port and harbour facilities in Japan revised in 2018, in collaboration with the National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) and Japanese Technical Association for Steel Pipe Piles and Sheet Piles (JASPP). This technical note summarizes the discussions at the seminar in terms of viewpoints of research aimed at improving the seismic design methods for level 2 ground motions.

The main issues identified are 1) Performance requirement for level-2 ground motions of non-high-earthquake-resistance wharves (standard wharves) has not been defined, 2) The present method which counts the number of plastic hinges on the piles for the performance verification of level-2 earthquake resistance for the serviceability or reparability of high earthquake-resistance wharves does not correspond to the actual serviceability or reparability, and 3) Decrease in strength due to the exceedance of ultimate curvature cannot be expressed in the current numerical seismic analysis (i.e., FLIP) with the present relationship between the bending moment and the curvature. To assess these issues, it was suggested that safety should be specified as the performance requirement for level-2 ground motions of standard wharves. It was also suggested that performance evaluation should be made for the actual loads corresponding to expected transport of emergency supplies or freight on major shipping route that need to be maintained after the level-2 ground motions. We identified the necessity for specific researches on the performance verification methods that were consistent with the proposed performance requirements.

We will continue researches based on these proposed policies. Also, we will discuss other types of berthing facilities, considering the issues and policies identified for piers, so that we can improve the seismic design method for higher accuracy and efficiency.

Key Words: pile-supported wharf, seismic design, level-2 ground motion, performance requirements

-
- 1) Research trainee, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department (Pacific Consultants, Co., Ltd.)
 - 2) Head of Foundations Group, Geotechnical Engineering Department
 - 3) Director of Earthquake Disaster Prevention Engineering Department
 - 4) Head of Earthquake and Structural Dynamics Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Department
 - 5) Principal Researcher, Earthquake Disaster Prevention Engineering Department
 - 6) Senior Researcher, Earthquake and Structural Dynamics Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Department
 - 7) Former Head of Structural Mechanics Group, Structural Engineering Department
 - 8) Head of Frontier Technologies for Structures Group, Structural Engineering Department
 - 9) Senior Researcher, Structural Mechanics Group, Structural Engineering Department
 - 10) Head of Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM
 - 11) Senior Researcher, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department
 - 12) Former Member, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department
 - 13) Member, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5057 Fax : +81-46-844-0618 e-mail:mizutani-t@p.mpat.go.jp

栈橋の偶発状態に対する耐震性能照査法の 高度化に関する課題の整理

田渡 竜乃介¹⁾・水谷 崇亮²⁾・野津 厚³⁾・小濱 英司⁴⁾・大矢 陽介⁵⁾
近藤 明彦⁶⁾・加藤 絵万⁷⁾・川端 雄一郎⁸⁾・田中 豊⁹⁾
竹信 正寛¹⁰⁾・松村 聡¹¹⁾・浜本 尚拓¹²⁾・稲田 滉平¹³⁾

要 旨

港湾空港技術研究所では、国土技術政策総合研究所および一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会と合同で、栈橋の耐震性能照査法に関する研究の現状把握、平成30年度に改訂された現行の港湾の施設の技術上の基準・同解説に関する課題の抽出および今後の方針の検討を目的とした勉強会を令和3年度から4年度にかけて開催した。本資料は、当該勉強会での議論の内容を取りまとめ、設計法の高精細化に向けた研究の視点を整理したものである。

抽出された主な課題として、1)耐震強化施設ではない栈橋（通常栈橋）のレベル2地震動に対する要求性能が設定されていない、2)耐震強化施設である栈橋の使用性および修復性に対応する性能規定として標準とされている限界曲率超過箇所の個数を数える方法は、実際の使用可否または修復可否に即していない、3)FLIP等の数値解析においてバイリニア型で表現している鋼管杭のM- ϕ 関係では限界曲率超過に伴う耐力低下が表現できない、といった内容が挙げられた。また、これらに対する主な解決方針として、通常栈橋のレベル2地震動に対する要求性能を安全性とすること、被災後の緊急物資輸送または幹線貨物輸送を想定し、レベル2地震時照査に続いてレベル2地震後の静的照査による判定を行うことなどが提案され、合わせて上記の要求性能に対応した性能照査法に関する具体的な研究課題が整理された。

本勉強会で挙げられた検討方針については、港湾空港技術研究所および国土技術政策総合研究所において検討が継続される予定である。また今後は、栈橋における課題および解決方針を参考に、他の岸壁構造形式についても議論を重ねることにより、さらに高精度かつ効率的な設計法へと改善できるよう取り組みを進めていく。

キーワード：栈橋，耐震性能照査法，レベル2地震動，要求性能

-
- 1) 地盤研究領域 基礎工研究グループ 依頼研修員（パシフィックコンサルタンツ株式会社）
 - 2) 地盤研究領域 基礎工研究グループ長
 - 3) 地震防災研究領域長
 - 4) 地震防災研究領域 耐震構造研究グループ長
 - 5) 地震防災研究領域 上席研究官
 - 6) 地震防災研究領域 耐震構造研究グループ 主任研究官
 - 7) 元 構造研究領域 構造研究グループ長（現 国土交通省関東地方整備局 東京港湾事務所長）
 - 8) 構造研究領域 構造新技術研究グループ長
 - 9) 構造研究領域 構造研究グループ 主任研究官
 - 10) 国土技術政策総合研究所 港湾空港部 港湾施設研究室長
 - 11) 地盤研究領域 基礎工研究グループ 主任研究官
 - 12) 元 地盤研究領域 基礎工研究グループ 研究員
 - 13) 地盤研究領域 基礎工研究グループ 研究員

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5057 Fax：046-844-0618 e-mail: mizutani-t@p.mpat.go.jp

1. まえがき

栈橋は港湾における係留施設などとして広く活用されている構造形式である。特に重力式や矢板式の係船岸では成立が困難な軟弱粘性土地盤に適しており、また、既存の重力式・矢板式係船岸を改良する際には、それらの前面に栈橋を新設することにより既設構造物を活用して経済的な増深や耐震性能の向上が可能である。一般的には、図-1.1に示すように、基礎鋼管杭、RC 上部工、渡版および土留壁で構成されており、それぞれの部材および構造全体について応力や変位、作用耐力比が許容値以下となることを照査する方法が標準とされている。

耐震性能照査に関しては、旧来、地域や地盤種別、施設の重要度に基づき設定した設計震度により照査する方法が採用されていた¹⁾が、1995年に発生した兵庫県南部地震における被災を契機に、1999年(平成11年)に改訂された港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁾において施設の供用期間中に発生する確率が高いレベル1地震動(以下、L1地震動)、および当該地点において供用期間中に発生する確率が低いが大強度を持つレベル2地震動(以下、L2地震動)の2つの地震動に対して性能を照査する方法に改められた。以降、耐震強化岸壁に関しては現在に至るまで、L2地震動による被災後にも用途に応じた使用性または修復性を有することが要求性能として定められている。

その後、港湾の施設の技術上の基準は2007年(平成19年)に改定され³⁾、性能規定型の基準に移行した。性能規定化された基準の特性を最大限に生かすためには、施設の照査方法の高度化を推進することが不可欠であり、栈橋についても照査方法の高精細化が求められているところである。港湾空港技術研究所(以下、港空研)では、国土技術政策総合研究所港湾施設研究室(以下、国総研)および一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会と合同で、栈橋の設計法に関する研究の現状把握、課題の抽出および共有を目的とした勉強会(以下、勉強会)を2021年5月から2022年5月にかけて全4回開催した。勉強会において、著者らは各々の専門分野の観点からの課題提起、最新の研究状況の紹介、関連分野における研究状況の分析・説明等を行うとともに、筆頭著者が作成した原案等について対等な立場でフリーディスカッションを行った。本稿は勉強会での議論を踏まえ、筆頭著者が基礎工研究グループ長の指導の下、とりまとめを行い、設計法の高度化に向けた研究の視点を整理したものである。

第2章では本稿における用語の定義を示す。第3章では2018年(平成30年)に改定された港湾の施設の技術

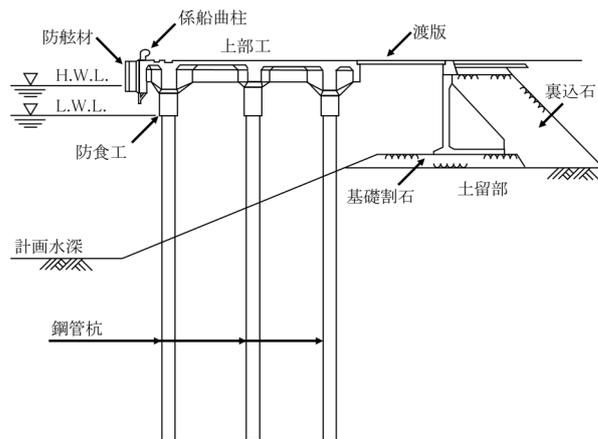


図-1.1 標準的な栈橋断面

上の基準⁴⁾における、栈橋の要求性能および性能規定、性能照査法の概要について整理し、他の構造物や他の基準における要求性能の事例と比較する。第4章では耐震強化施設ではない栈橋(通常栈橋)について、第5章では耐震強化施設である栈橋(耐震栈橋)について、抽出された課題および設計法の高度化に向けた基本方針を整理する。第6章ではその基本方針に従って、今後どのような検討が進められるべきかを示す。第7章では勉強会により得られた成果を簡潔に取りまとめる。

なお、本稿で述べる内容は、2022年5月末時点におけるものであり、今後研究が進むにつれ多少の方針変更が発生する可能性があることに留意されたい。

2. 用語の定義

本稿で用いる用語は以下のとおりとする。

(1) 省令

港湾法第56条の2の2第1項に基づき規定された、港湾の施設の技術上の基準を定める省令(改正平成29年12月26日国土交通省令第72号)を指す。

(2) 告示

省令の規定に基づき規定された、港湾の施設の技術上の基準の細目を定める告示(改正平成30年3月16日国土交通省告示第448号)を指す。

(3) H30基準

上述の省令および告示の改正、施行を受け改訂された港湾の施設の技術上の基準・同解説(平成30年5月)⁴⁾における省令、告示、解釈、解説文の記載をまとめて指

す。なお、平成 11 年 4 月²⁾および平成 19 年 7 月³⁾に改訂された過去の版はそれぞれ H11 基準および H19 基準と称す。

(4) 解釈

H30 基準内において記載されている、技術基準を運用する際の妥当と考え得る具体的な考え方を指す。解釈には、国から国土交通省地方整備局長・内閣府沖縄総合事務局長・国土交通省北海道開発局長宛に通知、港湾管理者等に参考通知された「港湾の施設の技術上の基準の解釈等」の内容が示されている。

(5) 偶発作用／偶発状態

本稿においては、種々の偶発作用のうち、省令第 1 条第 6 号で示される L2 地震動（施設を設置する地点において発生するものと想定される地震動のうち、最大規模の強さを有するもの）により生じる作用、および主たる作用として L2 地震動による作用を受けた状態を指す。

(6) 耐震栈橋

栈橋のうち、省令第 1 条第 7 号に規定された耐震強化施設（大規模地震対策施設または大規模な地震が発生した場合においてこれと同等の機能を有する必要がある施設）に該当するものを指す。

(7) 通常栈橋

栈橋のうち、耐震栈橋ではないものを指す。

(8) 耐震性能照査

本稿では、L2 地震動による偶発状態に対して、作用による損傷の程度が要求性能に応じた限界値以下であることの照査を指す。

(9) FLIP

1998 年に運輸省港湾技術研究所において開発された、有効応力法に基づく二次元地震応答解析プログラム（Finite element analysis of Liquefaction Program）⁵⁾およびその更新版を指す。地盤の液化化現象、海水等の流体、矢板や杭等の構造部材、地盤と構造部材の動的相互作用を考慮した変形解析が可能である。

(10) N-pier

1999 年に運輸省港湾技術研究所、鋼管杭協会および（株）海洋河川技術研究所が共同開発した、杭式栈橋の弾塑性解析プログラム⁶⁾およびその更新版を指す。

3. 栈橋の要求性能、性能規定および性能照査法

3.1 H30 基準の概要

3.1.1 要求性能

栈橋の要求性能は省令第 29 条において定められている。表-3.1 に示したとおり、栈橋における要求性能として、永続状態および変動状態においては「機能を損なわずに継続的に使用できること」（使用性）が求められる。また、耐震強化施設である栈橋の要求性能は、偶発状態に相当する L2 地震動等の作用による損傷等が、「軽微な修復による L2 地震動の作用後に当該栈橋に必要とされる機能の回復に影響を及ぼさないこと」（修復性）、さらに耐震性を必要とする栈橋の要求性能については「L2 地震動の作用後に当該栈橋に必要とされる機能を損なわず継続して使用することに影響を及ぼさないこと」（使用性）と示されている。ここで示す偶発状態の修復性および使用性とは、被災前と同等の機能を発揮することを定めたものではなく、被災後の緊急物資輸送や幹線貨物輸送のために栈橋を利用する船舶に対して、被災直後、または被災後の軽微な修復後に利用可能となることを定めたものである。

表-3.1 各状態における栈橋の要求性能

状態	主たる作用	通常栈橋	耐震強化施設である栈橋
永続状態	自重、土圧、水圧		使用性
変動状態	L1 地震動 船舶の牽引力		
偶発状態	L2 地震動	—*1	修復性 使用性（更に耐震性を必要とする栈橋）

*1：H30 基準の解説において、「耐震強化施設以外の直杭式横栈橋では、L2 地震動に関する偶発状態における照査を省略することができる」とされている。

3.1.2 性能規定

栈橋の性能規定は、告示の第 55 条において定められている。なお、耐震強化施設である栈橋については、告示第 48 条の岸壁の性能規定に準ずるものとして、「主たる作用が L2 地震動である偶発状態に対して、要求性能に応じて、作用による損傷の程度が限界値以下であること」と示されている。解釈の中に記載のある、照査項目および限界値を定める標準的な指標を表-3.2 に示す。

法線の変形に関する限界値は、耐震強化施設である重力式係船岸の解説に記載されている限界値に準じ 1m とすることができる。また、杭の損傷に関する限界値は、耐震強化施設の種類に応じ H30 基準の解釈の中で下記のとおり示されている。

(1) 特定（緊急物資輸送対応）および特定（幹線貨物輸送対応）

杭1本につき2箇所以上で限界曲率に達している杭が、当該栈橋の断面内に存在しないことを照査する。図-3.1に概念図を示す。

(2) 標準（緊急物資輸送対応）

杭1本につき限界曲率に達した箇所が2箇所未満である杭が、当該栈橋を構成する杭に少なくとも1本存在していることを照査する（当該栈橋の断面内に存在する全ての杭が、杭1本につき2箇所以上、限界曲率に達している状態ではないことを照査する）。図-3.2に概念図を示す。

表-3.2 耐震強化栈橋の偶発状態に対する性能照査項目及び限界値を定める標準的な指標

要求性能	設計状態			照査項目	限界値を定める標準的な指標
	状態	主たる作用	従たる作用		
修復性・使用性	偶発状態	L2地震動	自重、載荷重	法線の変形	残留変形量
				上部工の断面破壊	設計断面耐力
				杭の損傷	限界曲率
				杭に作用する軸方向力	杭の支持力

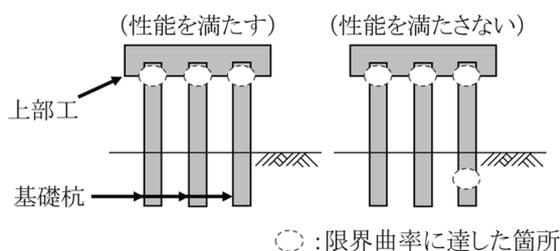


図-3.1 耐震強化施設（特定（緊急物資輸送対応）、特定（幹線貨物輸送対応））における性能規定の概念図

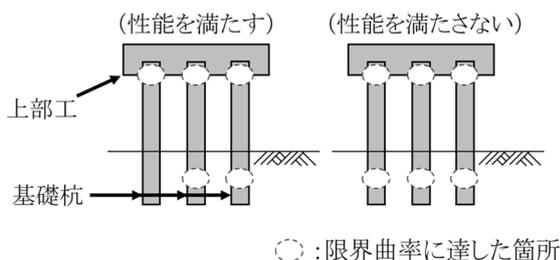


図-3.2 耐震強化施設（標準（緊急物資輸送対応））における性能規定の概念図

3.1.3 性能照査法

H30 基準では、解説において①杭と地盤の3次元動的相互作用を考慮した地震応答解析による栈橋と地盤の一体解析、②別途算定された杭周辺部の地盤の変形量を用いて栈橋の骨組み構造を用いた応答変位法を実施する方法の2つが例示されている。

栈橋と地盤の一体解析としては、FLIP が広く用いられている。FLIP では被災事例に対する複数のキャリブレーションが行われ、その適用性が確認されている⁷⁾など。

栈橋の骨組み構造を用いた応答変位法としては、N-pier の改良版である N-pier Ver.3.00 が挙げられる。N-pier は H19 基準の改訂に伴い 2007 年に公表され、プッシュオーバー解析結果を骨格曲線とした質点系の地震応答解析を行うことのできる機能が追加されている。しかしながら、現在は FLIP と比べて実務での活用事例は少ない。

3.2 他の構造物および他の分野の基準における事例

3.2.1 H30 基準における栈橋以外の構造物に関する要求性能

(1) 部材

省令の第7条では施設を構成する部材の要求性能が規定されている。要求性能としては、自重や土圧などの永続作用および変動波浪や L1 地震動などの変動作用による損傷等が、「当該施設の機能を損なわず継続して使用することに影響を及ぼさないこと」（使用性）と示されている。また、当該施設の被災に伴い、人命、財産または社会経済活動に重大な影響を及ぼす恐れのある施設（以下、偶発対応施設）を構成する部材の要求性能については、設計津波や L2 地震動などの偶発作用による損傷等が「当該施設の機能が損なわれた場合であっても、当該施設の構造の安定に重大な影響を及ぼさないこと」（安全性）とされている。さらに性能を向上させる必要がある施設を構成する部材および設計津波から当該施設の背後地を防護する必要がある施設を構成する部材の要求性能については、損傷等が「軽微な修復による当該施設の機能の回復に影響を及ぼさないこと」（修復性）と示されている。このほか、耐震強化施設を構成する部材の L2 地震動による損傷等が「軽微な修復による L2 地震動の作用後に当該施設に必要とされる機能の回復に影響を及ぼさないこと」（修復性）とされており、さらに耐震性を必要とする施設の部材は「L2 地震動の作用後に当該施設に必要とされる機能を損なわず継続して使用することに影響を及ぼさないこと」（使用性）と示されている。

(2) 防波堤

省令の第 14 条で規定されている防波堤の要求性能は、港内波浪低減に対する供用性、自重や L1 地震動等の永続作用および変動作用に対する使用性が示されている。また、偶発対応施設については設計津波や L2 地震動などの偶発作用による損傷等が、「当該防波堤の機能が損なわれた場合であっても、当該防波堤の構造の安定に重大な影響を及ぼさないこと」(安全性)と示されている。ただし、設計津波から背後地を防護する必要がある防波堤の要求性能としては、設計津波や L2 地震動等の偶発作用による損傷等が、「軽微な修復による当該防波堤の機能の回復に影響を及ぼさないこと」(修復性)と示されている。

これらに加えて、偶発対応施設の要求性能として、設計津波を超える規模の強さを有する津波が発生した場合でも、津波の作用による損傷等が「当該防波堤の構造の安定に重大な影響を及ぼすのを可能な限り遅らせることができるものであること」(粘り強い化)とされている。

(3) 橋梁

省令の第 38 条で規定されている橋梁の要求性能は、永続作用および変動作用に対する使用性が示されている。また、L2 地震動等の偶発作用に対する安全性、さらに耐震性を向上させる橋梁については偶発作用に対する修復性が示されている。

加えて、耐震強化施設に接続する道路に係る橋梁の要求性能については、L2 地震動に対して地震作用後の橋梁に必要とされる機能までの修復性が、さらに耐震性を向上させる必要がある橋梁の要求性能については使用性が示されている。

(4) H30 基準におけるレベル 1 およびレベル 2 地震動に対する要求性能の整理

(1)から(3)で述べた H30 基準における栈橋以外にも含む構造物等の L1 および L2 地震動に対する要求性能を表-3.3 に整理する。

3.2.2 道路橋示方書・同解説

道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編(平成 29 年 11 月)(以下、H29 道示)⁸⁾では、耐震設計上の橋の重要度の区分によって異なる耐荷性能を設定している。通常の橋(A 種)に対応する耐荷性能 1 については、永続作用や変動作用が支配的な状況において、機能面から橋としての荷重を支持する能力が損なわれていない状態(使用性に相当)を所要の信頼性で実現すること、および構造安全面

表-3.3 省令に示されている L1 および L2 地震動に対する要求性能

構造物・要素	全体	偶発対応施設 ^{*1}	耐震施設 ^{*5}
部材(7条)	L1: 使用性	L2: 安全性 L2: 修復性 ^{*2,*3}	L2: 修復性 L2: 使用性 ^{*4}
防波堤(14条)	L1: 使用性	L2: 安全性 L2: 修復性	—
栈橋(29条)	L1: 使用性	—	L2: 修復性 L2: 使用性 ^{*4}
橋梁(38条)	L1: 使用性 L2: 安全性 L2: 修復性 ^{*4}	—	L2: 修復性 L2: 使用性 ^{*4}

*1 人命、財産又は社会経済活動に重大な影響を及ぼすおそれのある施設

*2 更に性能を向上させる必要がある施設

*3 耐津波施設

*4 更に耐震性を必要とする/向上させる必要のある施設

*5 橋梁の場合は耐震施設に接続する橋梁

から致命的な状態でないように所要の安全性を確保する(安全性に相当)ことが定められている。また、偶発作用が支配的な状況において、構造安全面から致命的な状態でないように所要の安全性を確保する(安全性に相当)ことが合わせて定められている。一方で高速自動車国道などの重要な橋(B 種)に対応する耐荷性能 2 については、耐荷性能 1 に加えて、偶発作用が支配的な状況において、部分的に荷重を支持する能力の低下が生じているが、橋としてあらかじめ想定する荷重を支持する能力の範囲である状態(修復性に相当)を所要の信頼性で実現するように定められている。

H29 道示における要求性能を表-3.4 に整理する。

表-3.4 H29 道示における橋の要求性能

通常施設(A 種の橋)	重要施設(B 種の橋)	耐震施設
変動: 使用性 変動: 安全性 偶発: 安全性	変動: 使用性 変動: 安全性 偶発: 修復性 偶発: 安全性	— (要求耐震性能は路線の位置付けや重要度で規定)

3.2.3 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計

鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計(平成 24 年 9 月)(以下、H24 鉄道標準)⁹⁾では、地震時における構造物の要求性能は安全性について設定し、新幹線鉄道や開削トンネルなどの重要度の高い構造物については復旧性についても設定している。ここで示す安全性は、構造物の建設地点で考えられる最大級の地震動である L2 地震

動に対して構造体全体系が破壊しないための性能と、少なくとも構造物の建設地点で設計耐用期間内に数回発生する確率を有する L1 地震動に対して、構造物の変位を走行安全上定まる一定値以内に留めるための性能を指している。また、H24 鉄道標準における地震時の復旧性は、構造物周辺の環境状況を考慮し、想定される地震動に対して、修復の難易度から定まる一定の範囲内に構造物の損傷を収めることにより、短時間で機能回復できる状態に保つための性能を指している。

H24 鉄道標準における要求性能を表-3.5 に整理する。

表-3.5 H24 鉄道標準における構造物の要求性能

一般構造物	重要度の高い構造物	耐震構造物
変動：安全性 偶発：安全性 (偶発：復旧性)*	変動：安全性 偶発：安全性 偶発：復旧性	— (要求耐震性能は路線の重要度で規定)

※一般の構造物も含め、地震後の構造物の機能回復の観点から設計を行うことが解説内で示されている。

4. 通常栈橋のレベル2地震動に対する耐震性能照査

4.1 H30 基準における通常栈橋に関する課題

H30 基準において、変動状態までの設計を行う通常栈橋 (L2 地震動非対応の栈橋) については、偶発状態に対する要求性能が規定されていない。しかしながら、施設の置かれる状況によっては、実際には L2 地震動作用時における栈橋の大規模な被害が許容できない可能性があることが課題として挙げられた。

4.2 要求性能

表-3.1 に示したとおり、通常栈橋は偶発状態における要求性能が明確に定義されていない。これに対し、同じ H30 基準において橋梁に対してはすべての構造物に対して安全性が要求されている。また、表-3.4、表-3.5 に示したとおり、他の分野の基準では通常施設・一般構造物に対して偶発状態における安全性が求められている。こ

れらを念頭に議論を進めた結果、被災時および被災後における栈橋上への立ち入り可否の観点などから、勉強会では通常栈橋の偶発状態に対する要求性能として、表-4.1 のように安全性を設定する必要があることが示された。ここで示す安全性の内容としては、L2 地震時および被災後において、施設が構造の安定性を失わず、倒壊をしない範囲の損傷に留まる必要があることを指している。特に、フェリーターミナルなどのように一般の利用者が立ち入るような栈橋や、耐震強化岸壁に隣接する栈橋、倒壊した場合に被災後に使用する泊地・航路を妨げる可能性があるような重要度の高い栈橋などについては、その重要性を考慮して実際に発生する作用 (永続状態に作用する常時荷重) を想定し、その作用下においても施設の倒壊や水没によって人命の安全に重大な影響が生じない範囲の被害に確実に留まることを照査すべきであることが挙げられている。

4.3 性能規定

主たる作用が L2 地震動である偶発状態に対する通常栈橋の性能規定は、前述の要求性能と対応させ、作用による損傷の程度が限界値以下であること、とすることが考えられる。ここで示す限界値は、栈橋が構造的安定性を失わないことを念頭に、上部工、杭、土留工、構造全体に対してそれぞれ適切な値を定めることとなる。具体的にどのような性能規定を設定すべきかについては、今後検討を進めていくことが望ましい。

4.4 性能照査法

通常栈橋の照査方法については、一般の施設とさらに性能を向上させる必要のある施設 (偶発対応施設) により区分することを提案する。偶発対応施設については地震時および被災後の耐荷性能を定量的に把握することが望ましいため、地盤の流動や液状化が考慮可能な地震応答解析 (FLIP など) による照査を想定する。なお、通常栈橋に対して L2 地震動に相当する照査用震度により骨組み解析などで静的照査することも考えられるが、現段

表-4.1 通常栈橋における要求性能一覧

分類	対象事象		設定	要求性能	要求性能の解説
通常施設	自重	永続状態	杭、上部工の大きさに応じて設定	使用性	損傷無し (弾性範囲内の変形)
		接岸・牽引	接岸する船舶の規格に応じて設定		
	L1地震動	変動状態	対象地点における再現期間75年に設定	安全性	当該岸壁の損傷の程度が、当該岸壁の機能を損なわず継続して使用できる範囲に留まること 対象事象に対する損傷が、供用中および被災後にわたって構造の安定性を失わない範囲に留まること。 特に、不特定多数の利用者が頻繁に利用する栈橋や港の利用上重要度が高い栈橋等にあつては、対象事象に対する損傷が、供用中および被災後にわたって人命の安全確保に重大な影響が生じない範囲に確実に留まること
		L2地震動	偶発状態		

※赤字は勉強会における提案箇所を示す。

階の技術では地盤の流動による影響を骨組み解析上で考慮することが難しく採用は困難と考えられる。

また、安全性を規定するがそこまでの重要度を有さない一般の施設の照査方法については、FLIPによる手法を新たに全施設へ適用することは計算負荷が大きいことから、例えば L1 地震時の安全率を考慮した照査によって L2 地震時にも倒壊しないことが示されているとみなすといった、簡易的な手法の適用が考えられる。過去の大規模地震時の被災調査等において、通常栈橋であっても倒壊・水没したような事例は極めて稀であることから、このような手法の適用可能性は一定程度あるものと考えられる。

なお、上記の「一般の施設」と「偶発対応施設」をどのように区分するかについても、今後さらに議論を深め検討を進める必要があると考えられる。

5. 耐震栈橋のレベル2地震動に対する耐震性能照査

5.1 H30 基準における耐震栈橋に関する課題

H30 基準における栈橋の使用性・修復性に対応する耐震性能照査は、限界曲率の発生箇所や箇所数、法線の残留変形量で性能の有無を判断する方法がとられているが、これは L2 地震被災後の実際的な使用可否や修復可否に即した性能規定となっていない点が課題として挙げられた。

また、FLIP における鋼管杭の M-φ 関係は最大曲げ耐力を折れ点とするバイリニア型で表現されているため、限界曲率超過後に生じると考えられる曲げ耐力や鉛直耐力の低下を表現することができていない点も課題として挙げられている。

5.2 要求性能

耐震栈橋の偶発状態における要求性能としては、H30 基準では地震後に必要な機能に対する使用性、修復性が示されており、それに対応して、残留変位が一定程度以下であることや限界曲率超過箇所に基づいた性能規定が定められている。しかしながら、この考え方は、L2 地震後の栈橋の性能を L2 地震動による栈橋の損傷レベルで評価することを意味しており、損傷した栈橋が実際に使用できるか、修復できるかといった性能を直接評価する方法になっていないことが課題である。これに対し、まずは要求性能として被災後に必要とされる性能をより明確に示すことが必要である。特定（緊急物資輸送対応）については図-5.1 に示すとおり、被災直後の緊急物資輸送に対応する作用（荷役による上載荷重、接岸力または牽引力など：ポスト L2 荷重）に対して速やかに機能が発揮できる状態を要求性能とする必要があることが示された。また、特定（幹線貨物輸送対応）および標準（緊急物資輸送対応）については、被災後に利用が想定される船舶に対し、軽微な修復（仮渡版の設置、砕石敷均しによる不陸の解消など）ののちに利用可能である状態を要求性能とすべきであることを示した。これらの要求性能を表-5.1 に整理して示す。

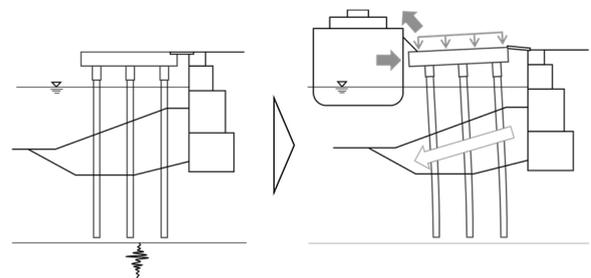


図-5.1 L2地震時照査(左)およびポストL2照査(右)の概念図

表-5.1 耐震栈橋における要求性能一覧

分類	対象事象		設定	要求性能	要求性能の解説
耐震施設	自重	永続状態	杭、上部工の大きさに応じて設定	使用性	損傷無し（弾性範囲内の変形） 当該岸壁の損傷の程度が、当該岸壁の機能を損なわず継続して使用できる範囲に留まること
	接岸・牽引	変動状態	接岸する船舶の規格に応じて設定		
	L1地震動		対象地点における再現期間75年に設定	使用性	対象事象に対する損傷の程度が、被災直後に想定される緊急物資輸送に対応する作用（荷役、接岸力、牽引力等）に対して、速やかに機能が発揮できる範囲に留まること（特定（緊急物資輸送対応））
	L2地震動	偶発状態	対象地点において発生が想定される最大級の地震動のうち当該施設に最も影響を及ぼすと考えられる地震動	修復性	対象事象に対する損傷の程度が、対象事象発生後一定期間の後に想定する緊急物資輸送船の受け入れが可能となるよう、ある程度の修復の範囲に留まること（標準（緊急物資輸送対応）） 対象事象に対する損傷の程度が、対象事象発生後速やかに想定する幹線貨物輸送船（コンテナ船、バルク船等）の受け入れが可能となるよう、軽微な修復の範囲に留まること（特定（幹線貨物輸送対応））

※赤字は勉強会における提案箇所を示す。

5.3 性能規定

主たる作用が L2 地震動である偶発状態に対する耐震
栈橋の性能規定は、前述の要求性能と対応させ、被災後
に想定される外力に対する損傷の程度を限界値以下とす
ることが考えられる。ここで示す限界値は、栈橋が構造
的安定性を失わないことを念頭に、上部工、杭、土留工、
構造全体に対してそれぞれ適切な値を定めることとなる。
なお、本稿で示した修復性に対応する性能規定は、被災
後に船舶が利用するまでの期間で修復できる範囲の損傷
までを許容しているが、現時点における技術では栈橋の
撤去を必要とするような基礎杭の塑性化および座屈なら
びに上部工の破壊を許容できないものと考えられる。将
来において、技術の発展により被災後の利用までに損傷
した部材を修復できる方法が確立された場合は、損傷の
修復方法と修復期間を適切に設定し、またその方法によ
る修復後の性能を評価可能な解析手法を用いた照査を行
うことで、栈橋の諸元のさらなる合理化を進めることが
可能となる。

L2 地震被災後の緊急物資輸送時に想定される外力の
設定には、災害時協定や港湾 BCP などにおいて被災後に
栈橋を使用する船舶をあらかじめ定めることが望ましい。
その際、表-5.2 に示す栈橋の被災後の利用シナリオの例
を参考とすることができる。表-5.2 は、過去の被災事例
や被災後の取組を整理した文献^{10) 11) 12)}などに基
づく作成したものである。実務においては、各港湾・各
施設の実態を考慮し、より具体的なシナリオを作成すべ
きであると考えられる。

5.4 性能照査法

5.4.1 性能照査のステップ

被災後の利用に関する要求性能を満足することを確認
するための性能照査方法として、L2 地震時照査および
被災後の船舶利用に相当する L2 地震後照査（以下、
ポスト L2 照査）を実施する必要があることが勉強会に
て示された。性能照査の手順は以下の 3 ステップを提
案する。

- ① 栈橋の利用方法に応じた被災後の要求性能および
性能規定を確認し、設計外力や復旧期間を設定
- ② L2 地震動で加振、あるいは L2 地震動相当の外力で
載荷（L2 地震時照査）
- ③ 被災後に想定される外力（緊急物資輸送対応の牽引
力など）で載荷（ポスト L2 照査）

現在、L2 地震時照査において一般的に使用されている
性能照査法は FLIP であり、一部のジャケット式栈橋等

三次元的な効果を確認する際には多入力地震応答解析等
を用いられることがある。また、ポスト L2 照査におい
ては FLIP、あるいは変動状態の照査でも用いられる骨組
み解析によることができると考えられる。本検討ではこれ
らの組み合わせにより耐震性能照査を行うことを提案す
る。

5.4.2 L2 地震時照査

L2 地震時照査法としては、FLIP と多入力地震応答解
析の 2 種類の手法が考えられる。

FLIP は地盤と構造物の有限要素法による 2 次元動的有
効応力解析プログラムであり、液状化を生じるような大
規模地震時の被災事例についても精度よく再現可能な手
法として、港湾構造物の耐震性能照査に広く用いられて
いる。

多入力地震応答解析は、基盤加速度を解析空間全体に、
別途算定した杭周辺の相対地盤変形量を地盤ばねにそれ
ぞれ作用させることにより、栈橋の骨組構造を用いた時
刻歴応答解析を実施する方法である。この手法はジャケ
ット式栈橋における 3 次元動的挙動を解析する方法とし
て用いられる場合がある。多入力地震応答解析は使用さ
れる構造形式が限定されるため優先度が低いものと考え
え、本勉強会では具体的な課題の検討を省略した。

5.4.3 ポスト L2 照査

ポスト L2 照査法としては、FLIP と骨組み解析の 2 種
類の方法が考えられる。

FLIP は前述のとおり動的解析手法として用いられて
いるが、外力の静的な載荷についても行うことが可能な
手法である。L2 地震時照査およびポスト L2 照査を FLIP
で一貫して行った場合、同一プログラム内で連続的に解
析することが可能であるため比較的計算が容易となるも
のと考えられる。

骨組み解析は梁要素による骨組構造に対し、作用荷重、
支点条件およびばねを設定することで静的な力のつり合
いを計算する手法であり、牽引力および接岸力などによ
る変動状態に対して一般的に用いることのできる解析方
法である。L2 地震時照査を FLIP で行った後にポスト L2
照査を骨組み解析で行う場合、FLIP で生じた地盤の側方
流動や液状化による地盤ばねの変化などの境界条件の引
継ぎ方法、限界曲率を超過した箇所耐力低下表現方法
などが課題であると考えられる。

表-5.2 耐震強化栈橋（特定・標準（緊急物資輸送対応））の被災シナリオ分類

想定被災タイプ		1. 局地型	2. 局地津波型	3. 広域津波型	
被害の特徴 考えられる被災後の 緊急物資輸送および荷役 シナリオ適用に関する 留意事項	各段階で入港する船舶 と運搬物資・サービス	1~3 日後	対象港湾の近隣で発生し、 大きな揺れを伴う 輸送艦、巡視船 人員、緊急物資	対象港湾の沖合で発生し、 広範囲に大きな揺れと津波を伴う。 渡漕船、航路啓開船 航路啓開	
		3~10 日後	輸送艦、巡視船 緊急物資、燃料	輸送艦、フェリー、RORO 船 緊急物資、燃料	
		10 日~1 か月後	フェリー、RORO 船 緊急物資、被災者支援	フェリー、RORO 船 緊急物資、被災者支援	
		1 か月後~	フェリー、RORO 船 被災者支援	フェリー、RORO 船 クルーズ客船 被災者支援	
	復旧後*	被災前に利用していた船舶 本来の機能	被災前に利用していた船舶 本来の機能	被災前に利用していた船舶 本来の機能	
	被害の特徴 考えられる被災後の 緊急物資輸送および荷役	1 か月後~	<ul style="list-style-type: none"> 比較的狭い範囲の被害 栈橋背後に大きな段差や亀裂 荷役機械が損傷 道路が寸断され陸上輸送が困難 	<ul style="list-style-type: none"> 泊地・航路が津波に伴う漂流物により閉塞、航路啓開が必要 比較的狭い範囲の被害 栈橋背後に大きな段差や亀裂 荷役機械が損傷 道路が寸断され陸上輸送が困難 	<ul style="list-style-type: none"> 泊地・航路が津波に伴う漂流物により閉塞、航路啓開が必要 広範囲にわたる被害 栈橋背後に大きな段差や亀裂 荷役機械が損傷 道路が寸断され陸上輸送が特に困難
			<ul style="list-style-type: none"> 被害が局所的なため、近隣の港から物資が届く。 必要物資や人員を海上運搬に頼ることから、被災後から小型支援船が荷役を開始する。 その後、車両や人員を乗せる比較的大型の支援船が到着する。 	<ul style="list-style-type: none"> 被害が局所的なため、近隣の港から物資が届く。 荷役に先立ち航路の確保を行う。 その後、近隣の港湾を出発した小型支援船により物資の荷役を開始し、徐々に大形の支援船が到着するようになる。 	<ul style="list-style-type: none"> 被害が広域のため、遠方の港から物資が届く。 荷役に先立ち航路の確保を行う。 必要物資や人員を海上運搬に頼ることから、航路確保後からフェリー、RORO 船などの比較的大形の支援船が到着し荷役を開始する。
	シナリオ適用に関する 留意事項	1 か月後~	<ul style="list-style-type: none"> 【共通】 段差や亀裂、土留壁背後の液状化の状況によっては物資の荷役が困難になる可能性がある。 耐震栈橋に隣接する岸壁の変状によっては、支援船の係留・荷役作業範囲および泊地に影響を及ぼす可能性がある。 【バルク栈橋】 仮置きしてあるバルク貨物や備え付けのアンローダーが地震により崩壊することで、支援船の係留・荷役作業範囲が狭まる可能性がある。 【コンテナ栈橋】 ガントリークレーンや積み上げたコンテナが地震により倒壊することで、支援船の係留・荷役作業範囲が狭まる可能性がある。 【フェリー栈橋】 ボーンディングブリッジが地震により倒壊することで、支援船の係留・荷役作業範囲が狭まる可能性がある。 	<ul style="list-style-type: none"> 【共通】 地震による留意事項は1.局地型と同様。 流木や家屋などの漂流物や海底地形の変化によって泊地水深が影響を受ける可能性がある。 【バルク栈橋】 仮置きしてあるバルク貨物が津波により移動・流出することで、支援船の係留・荷役作業範囲が狭まる可能性がある。 【コンテナ栈橋】 ガントリークレーンの電源が津波により喪失し使用中に停止した場合、支援船の係留・荷役作業範囲が狭まる可能性がある。 積み上げられたコンテナが津波により移動・流出することにより、支援船の係留・荷役作業範囲が狭まる可能性がある。 【フェリー栈橋】 — 	<ul style="list-style-type: none"> 【共通】 地震による留意事項は1.局地型と、津波による留意事項は2.局地津波型と同様。 【バルク栈橋】 — 【コンテナ栈橋】 — 【フェリー栈橋】 —

*ここで示す復旧は、被災前の形状あるいは効用に相当する原形復旧を基本とする。ただし、事情により従前の施設の効用より改良される場合はこの限りではない。

6. 今後検討すべき研究課題

6.1 通常栈橋

通常栈橋については、L2 地震時照査を変動状態までの照査のみとする簡易手法が検討課題として挙げられる。

要求性能として安全性を求めるすべての通常栈橋について、高精度に構造物の挙動が把握可能な FLIP による照査を追加で行うこととすると設計負荷が大きくなるものと想定される。そのため、L1 地震時の安全率を考慮した照査によって、L2 地震時にも構造的な安定性を保つものとみなし、実際には追加の照査を行わないというような簡易手法の適用が考えられる。

実務への適用に向けては、より詳細な情報収集を行うほか、永続状態・変動状態に対して断面を決定したモデルケースを設定し、それらの断面の L2 地震時の挙動を精査するといった追加検討を行うことが想定される。

6.2 耐震栈橋

6.2.1 L2 地震時照査とポスト L2 照査を FLIP により実施する方法

(1) 鋼管杭のポストピーク挙動の把握とモデル化方法

FLIP における鋼管杭の $M-\phi$ 関係は最大曲げ耐力に達した点を折れ点とするバイリニア型のモデルで表現される。しかしながら、実際には限界曲率を超過すると曲げモーメントの低下が生じる。鋼管杭のある部分で限界曲率を超過または座屈が生じた場合、現在の手法では塑性ヒンジとしてモーメントは維持され、鉛直荷重および水平荷重はすべて伝達されることになる。しかしながら、座屈箇所において実際上どのように荷重およびモーメントを伝達するかは明らかでないことから、耐荷力を過大評価してしまっている可能性がある。このような鋼管杭のポストピーク挙動をどのようにモデル化するのがよいかという点が課題の一つとして挙げられる。

これまで、ポストピーク挙動の把握およびモデル化に向けていくつかの模型実験が行われている¹³⁾¹⁴⁾。今後はさらに、シェル要素を用いた解析や実験から、鋼管杭の実際の耐力について検討を進める必要がある。

(2) 大変形時における付加曲げの計算方法

軸力を受ける鋼管杭が水平力を受け大きく変形した際に、軸方向圧縮力による曲げ（付加曲げ）が発生するものと考えられる。現在標準的に使用されている FLIP では、限界曲率までの変形については付加曲げが考慮されるものの、限界曲率以降は付加曲げが考慮できないことから、現在の手法においては大変形時に鋼管杭に生じる

応力を過小評価してしまっている可能性がある。

限界曲率超過後の付加曲げモーメントについて考慮する方法が設計に用いられている事例¹⁵⁾はあるものの、計算手法の一般化までには至っていない。そのため、汎用的な計算方法の確立に向けて検討を進める必要がある。

(3) 地震後の液状化層の過剰間隙水圧の消散の取扱い

FLIP において液状化層は地震により過剰間隙水圧が発生し、強度低下している状態となるが、被災後に緊急物資輸送船が利用するまでの期間に過剰間隙水圧が消散し液状化層の強度は回復するものと考えられる。しかしながら、現在の計算手法では間隙水の排水過程は表現されておらず、過剰間隙水圧の消散も考慮できないことから、L2 地震に引き続きポスト L2 照査で荷重を作用させる際の地盤の強度を過小評価してしまう可能性がある。

FLIP で排水を考慮する方法として、過剰間隙水圧の消散やその際に発生する地盤沈下を表現可能なカクテルグラスモデル¹⁶⁾を用いる方法が開発されているものの、実務への適用は進んでおらず、また、ポスト L2 照査に適した方法であるかは検証されていない。今後、FLIP における液状化層の過剰間隙水圧の消散について考慮する必要があるか、考慮する場合どのような計算方法を用いるのがよいか等について検討を進める必要がある。

(4) 杭と上部工の接続部のモデル化の方法

FLIP では、上部工に埋め込まれた鋼管杭は剛域として設定されるが、実際の鋼管杭-上部工接続部は鋼材あるいは RC 上部工の変形・破壊に伴い回転する。さらに破壊が進行するにつれ接続部の回転に対する抵抗は小さく、回転量は大きくなっていく。このような挙動を表現するため、杭と上部工の接続部のばね値設定方法、また接続部の塑性化や上部工の破壊の進展による水平耐荷重の低減の表現方法を検討する必要がある。

過去には、栈橋上部工と鋼管杭を模擬した数値解析¹⁷⁾および模型実験¹⁸⁾が行われており、その荷重-変形特性が明らかになりつつある。ただし、上部工の配筋や経時的な劣化、材料の設計基準強度と実強度との違いなどによる上部工と鋼管杭の耐力バランスの変化に起因して破壊過程が変化することから、杭と上部工の複合的な挙動を考慮した接続部の汎用的なモデル化方法の確立が今後の課題である。

6.2.2 L2 地震時照査を FLIP でポスト L2 照査を骨組解析で実施する方法

(1) FLIP から骨組み解析への境界条件受け渡し方法

ポスト L2 照査を骨組み解析で行うにあたって、FLIP による L2 地震時照査により得られた構造物の残留状態を再現するために、構造物の残留変位や残留応力を骨組み解析に受け渡すことになる。骨組み解析においては、梁要素に対する外力やばね、梁要素の変位等を用いるため、FLIP による結果と骨組み解析における表現方法とを対応させるための方法を確立することが望ましい。

(2) L2 地震時照査の際に発生した限界曲率超過箇所の骨組み解析上の表現方法

FLIP 上で鋼管杭が限界曲率を超過した箇所について骨組み解析でモデル化する場合、鋼管杭の耐力が低下している状態を表現することになる。モデル化にはピンや回転ばねのような方法が考えられるものの、実際の耐力低下状況や FLIP による結果との対応については不明確であるため、表現方法を確立することが望ましい。

(3) L2 地震時照査後の地盤における地盤ばね値の設定方法

FLIP による L2 地震時照査によって液状化や地盤の流動が発生し、骨組み解析でポスト L2 照査を行う際には、緊急物資輸送船が利用する時点における地盤状態を考慮した地盤条件を設定することになる。しかしながら、変状した地盤の地盤ばねや地盤の強度が回復する期間についても不明確であることから、ばね値の設定方法を確立することが望ましい。

6.3 栈橋全体その他の課題

(1) 性能規定に対応する限界値の設定

4.3 および 5.3 で性能規定について示したとおり、通常栈橋または耐震栈橋における性能規定は、L2 地震の被災時または被災後に想定される作用に対する損傷の程度が限界値以下であることとし、その限界値は栈橋が構造的安定性を失わないことを念頭に設定することが考えられる。しかしながら、その際の具体的な限界値（例えば、杭の許容応力度や限界曲率、上部工の損傷、法線の出入りなど）については、今後の性能照査法に関する検討の結果によって変わるものと考えられることから、併せて検討を進めていくことが望ましい。

(2) 栈橋構造以外におけるポスト L2 照査法の設定 勉強会においては栈橋構造について議論したが、L2 地

震時照査およびポスト L2 照査の考え方は栈橋のみならず他の構造形式にも同様に適用する必要があると考えられる。今後、栈橋構造以外の構造形式（主に重力式および矢板式）についても、要求性能や性能規定、性能照査法の課題について議論を進める必要がある。

(3) 破壊箇所および修復に要する期間・コストをコントロールした設計手法

特定（幹線貨物輸送対応）の栈橋においては、杭一本について限界曲率超過箇所が 2 箇所以上となる杭が断面内に存在しないことをもって、要求性能である修復性を満たすものとして性能規定が設定されている。しかしながら、地中部で塑性化または座屈した鋼管杭の修復は困難であり実際には杭の引き抜き撤去が必要であるなど、修復することで既設構造物が利用可能であることと完全に対応しているわけではない。一方で、仮に杭頭部のみに損傷が集中すれば、上部工と杭損傷部の補修による修復も可能であるものと想定される。このように、損傷箇所や損傷程度、それらの修復に要する期間やコストをコントロールすることで、多少の損傷を許容するような設計が可能となることから、このことを踏まえた経済的・合理的な設計とすることが望ましい。

(4) 免震支承による杭-上部工接続部挙動の一般化

橋梁の設計では、下部工と上部工の間に免震支承を設けることで構造物固有周期の長周期化や減衰効果を期待し、下部工の損傷を低減させるような設計が行われている。これと同様な港湾の栈橋における免震技術は過去に報告されており¹⁹⁾、現地適用が可能であるものと考えられるものの実際に現地適用された例はない。今後、鋼管杭の損傷をコントロールするなどといった経済的・合理的な設計を進める際には、免震構造についても合わせて検討することも考えられる。

7. 結論

現行の H30 基準における栈橋の耐震性能照査では、L2 地震動の作用を受けた栈橋基礎杭に生じる塑性ヒンジの個数による規定が標準とされており、被災時および被災後の緊急物資輸送段階や幹線貨物輸送段階で実際に栈橋が置かれる具体的な状況を反映できていないものと考えられる。そのため、設計上は要求性能および性能規定を満たした構造であったとしても被災後の支援船利用時には想定と異なる外力が作用する場合が考えられるなど、合理的な栈橋の設計を行うことができていない可能性が

ある。

これを始めとした諸課題について、令和3年度に港空研および国総研、一般社団法人鋼管杭鋼矢板技術協会の合同で栈橋の設計法に関する勉強会を開催した。勉強会では現行の栈橋耐震性能照査に関する知見を整理し、H30基準における栈橋の要求性能、性能規定、性能照査法に関する課題を抽出および整理した。また、これらの課題に対して設計法の高精細化に向けた今後の検討方針を設定した。主な課題と検討方針を以下に示す。

○課題

- 1) 栈橋の要求性能として、すべての栈橋のL1地震動に対する使用性、および耐震強化施設である栈橋（耐震栈橋）のL2地震動に対する使用性および修復性が設定されているが、耐震強化施設でない栈橋（通常栈橋）のL2地震動に対する要求性能が設定されていない。
- 2) 耐震強化栈橋の使用性および修復性に対応する性能規定として、残留変位の大きさや限界曲率超過箇所の個数を数える方法が標準となっているが、実際の使用可否や修復可否に即した設定となっていない。
- 3) FLIPによる栈橋の地震時照査において、鋼管杭のM- ϕ 関係をバイリニア型で表現しており、限界曲率超過に伴う耐力の低下が表現できていない。

○検討方針

- A) 通常栈橋のL2地震動に対する要求性能を安全性とし、構造安定性を失わない程度の損傷に留まる必要があることを示した。特に、一般の利用者が立ち入る栈橋等にあつては、人命の安全確保に重大な影響が生じない範囲の損傷に確実に留めるべきであることを別途示した。
- B) 栈橋被災後の性能を具体的に照査するため、被災後の緊急物資輸送や幹線貨物輸送に対応する荷重により、L2地震時照査の後にポストL2照査と称す付加的な照査を行い、実際の使用可否に準じた判定をすることを提案した。
- C) FLIPによるポストL2照査も含めた性能照査法の高精度化に対する研究課題として、①鋼管杭のポストピーク挙動の把握とモデル化方法、②大変形時における付加曲げの計算方法、③地震後の液状化層の過剰間隙水圧の消散の取扱い、④杭と上部工の接続部のモデル化の方法、が主な課題として挙げられた。

8. あとがき

第7章に示した検討方針に基づき、港空研および国総研内で検討が継続される予定である。ただし、ここで示した課題および解決方針についてはまだ研究が始まったばかりであり、詳細の検討を進めるにつれ細部の内容は変更になる可能性があることに留意されたい。

また、本勉強会で得られた知見は、栈橋のみならず他の構造形式においても同様に参考となる考え方である。今後は栈橋における課題および解決方針を軸に、構造形式ごとの類似点や相違点について関係者の間で議論を重ねることにより、より高精度かつ効率的な設計法へと改善できるよう取り組みを進めていく。

(2022年8月5日受付)

謝辞

本検討は、筆者らのほか一般社団法人鋼管杭・鋼矢板技術協会と共同開催した勉強会に基づき実施されたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，社団法人日本港湾協会，1989年
- 2) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，社団法人日本港湾協会，1999年
- 3) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，社団法人日本港湾協会，2007年
- 4) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，公益社団法人日本港湾協会，2018年
- 5) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of the Port and Harbor Research Institute, Vol. 29, No.4, pp.27-56, 1990
- 6) 横田弘，川端規之，芥川博昭，黒崎和保，津嶋敏明，原田典佳，矢頭明子：鋼直杭式栈橋の弾塑性解析による耐震性能照査および簡便照査法の提案，港湾技研資料 No.943，1999年
- 7) 塩崎禎郎，長尾毅，小堤治，宮下健一朗：二次元有効応力解析による直杭式横栈橋の被災事例の再現計算，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，Vol.65，No.1 (地震工学論文集第30巻)，2009年
- 8) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，2017年
- 9) 公益財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，2012年

- 10) 国土交通省港湾局:臨海部防災拠点マニュアル【改訂版】, 2016年
- 11) 国土交通省海事局内航課:大規模災害時の船舶の活用等に関する調査検討会最終報告, 2014年
- 12) 赤倉康寛, 小野憲司:大規模災害時の緊急支援船の船型・対応係留施設の分析, 国土技術政策総合研究所資料, No.942, 2017年
- 13) 中村駿太, 大矢陽介, 川端雄一郎, 水谷崇亮, 松村聡, 森川嘉之:高軸力でのスパイラル鋼管の曲げ挙動に関する載荷試験(その1), 土木学会第76回年次学術講演会講演概要集, 第I部門, 論文番号I-149, 2021年
- 14) 大矢陽介, 川端雄一郎, 中村駿太, 水谷崇亮, 松村聡, 森川嘉之:高軸力でのスパイラル鋼管の曲げ挙動に関する載荷試験(その2), 土木学会第76回年次学術講演会講演概要集, 第I部門, 論文番号I-150, 2021年
- 15) 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所:楕形鋼矢板壁工法マニュアル(案), 2022年
- 16) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K.
Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35(3): 360-392
- 17) 大矢陽介, 川端雄一郎:余震時耐震性能評価でRC上部工の損傷を考慮するための栈橋のモデル化手法, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 72, No.4(地震工学論文集第35巻), I_777-I_789, 2016年
- 18) 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栈橋RC上部工の残存性能照査, 港湾空港技術研究所資料, No.1267, 2013年
- 19) 三藤正明, 上部達生, 北澤壮介, 眞壁知大, 中原知洋:免震式栈橋の免震効果に関する模型振動実験と地震応答解析, 海洋開発論文集第16巻, pp.469-474, 2000年

港湾空港技術研究所資料 No.1405

2022.9

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2022) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。