

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1410 September 2023

矢板式係船岸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

稲田 滉平, 水谷 崇亮, 野津 厚, 小濱 英司, 大矢 陽介, 川端 雄一郎

竹信 正寛, 近藤 明彦, 田中 豊, 松村 聡, 田渡 竜乃介

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. 岸壁の要求性能、性能規定および性能照査	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. 通常岸壁のL2地震動に対する耐震性能照査	8
4.1 H30基準における通常岸壁に関する課題	8
4.2 要求性能	8
4.3 性能規定	9
4.4 性能照査	9
5. 耐震岸壁のL2地震動に対する耐震性能照査	10
5.1 H30基準における耐震岸壁に関する課題	10
5.2 要求性能	10
5.3 性能規定	11
5.4 性能照査	11
6. 今後検討すべき研究課題	13
6.1 通常岸壁	13
6.2 耐震岸壁	13
6.3 矢板式岸壁の設計に係るその他の課題	14
7. 結論	15
8. あとがき	16
謝辞	16
参考文献	16

Perspective on Seismic Design of Sheet Pile Quay Wall for Level-2 Ground Motions

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

Synopsis

In collaboration with the National Institute for Land and Infrastructure Management (NILIM) and the Japanese Technical Association for Steel Pipe Piles and Sheet Piles (JASPP), we held a seminar in 2022 to identify and share current issues on the seismic design of sheet pile quay walls described in the technical standards and commentaries for port and harbor facilities in Japan, revised in 2018. This technical note summarizes the discussions at the seminar, from the perspective of research aimed at improving seismic design methods for level 2 ground motions.

The main issues identified are: 1) Performance requirements for level 2 ground motions of non-seismic quay (standard quay) have not been defined. 2) The performance requirements for usability and repairability of quay walls, which are seismic strengthening facilities, do not correspond to the actual usability or repairability. 3) The reduction in strength due to exceeding the ultimate curvature cannot be expressed in the current numerical seismic analysis (i.e. FLIP) with the current relationship between bending moment and curvature. In order to assess these issues, it was suggested that safety should be specified as a performance requirement for level 2 ground motions of the standard wharves. It was also suggested that the performance assessment should be carried out for the actual loads corresponding to the expected transport of emergency supplies or freight on a major shipping route that needs to be maintained after the level 2 ground motions. We identified the need for specific research into performance verification methods consistent with the proposed performance requirements.

We will continue research based on these proposed guidelines. We will also discuss other types of berthing facilities, taking into account the issues and guidelines identified, so that we can improve the seismic design method for greater accuracy and efficiency.

Key Words: sheet pile quay wall, seismic design, level-2 ground motion, performance requirements

-
- 1) Member, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department
 - 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) Head of Frontier Technologies for Structures Group, Structural Engineering Department
 - 7) Head of Port Facilities Division, Harbor and Coastal Oceanography of Department, NILIM
 - 8) Senior Researcher, Earthquake and Structural Dynamics Group, Earthquake Disaster Prevention Engineering Department
 - 9) Senior Researcher, Structural Mechanics Group, Structural Engineering Department
 - 10) Senior Researcher, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department
 - 11) Research Trainee, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department (Pacific Consultants, Co., Ltd.)

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan
Phone : +81-46-844-5057 Fax : +81-46-844-0618 e-mail: inada-k849u@p.mpat.go.jp

矢板式係船岸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

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

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、矢板式係船岸の耐震設計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に関する課題の抽出および今後の方針設定を目的とした勉強会を令和4年度から令和5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岸壁（通常岸壁）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岸壁の使用性および修復性に対応する性能規定は、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矢板の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、通常岸壁のレベル2地震動に対する要求性能を安全性とすること、耐震強化施設については、レベル2地震時照査に続いて被災後の緊急物資輸送または幹線貨物輸送を想定した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、矢板式岸壁における課題および解決方針を軸に、他の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：岸壁，矢板式係船岸，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 研究員
 - 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) 構造研究領域 構造新技術研究グループ長
 - 7) 国土技術政策総合研究所 港湾・沿岸海洋研究部 港湾施設研究室長
 - 8) 地震防災研究領域 耐震構造研究グループ 主任研究官
 - 9) 構造研究領域 構造研究グループ 主任研究官
 - 10) 地盤研究領域 基礎工研究グループ 主任研究官
 - 11) 元 地盤研究領域 基礎工研究グループ 依頼研修員（現 パシフィックコンサルタンツ株式会社）

〒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: inada-k849u@p.mpat.go.jp

1. まえがき

矢板式係船岸は港湾における係留施設として広く活用されている構造形式である。施工設備が比較的簡単で工費が安いという点や、基礎工事としての水中工事を必要としない場合が多く、急速施工を行えるという利点を有する。矢板式係船岸は、図-1.1 に示すように、一般に矢板、上部工、タイロッド、控え工で構成され、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。

矢板式係船岸は、矢板壁という比較的柔い壁で背後地盤を支える構造であること、また地震時には矢板の根入れ部分の地盤に多かれ少なかれ変位が生じることなどから、構造断面全体に変形が生じやすい構造形式である。特に大水深の場合や大きな地震動を想定する場合には、部材応力よりも変位が設計の支配要因となる傾向があり、設計・照査時にはこの点にも注意を払う必要がある。

耐震性能照査は、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大きな強度を持つレベル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、この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・同解説は2007年(平成19年)に改訂され³⁾、性能規定型の基準に移行した。性能規定化された港湾の施設の技術上の基準の特性を最大限に生かすためには、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、令和4年度に実施を行った栈橋の設計法に関する勉強会(以下、栈橋勉強会)と同様に、矢板式係船岸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、矢板勉強会)を2022年5月から2023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、最新の研究状況についての分析、関連分野に

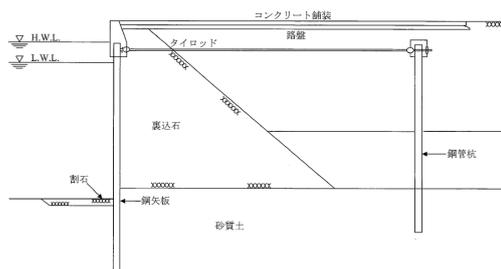


図-1.1 標準的な矢板式係船岸の断面

における研究状況の分析・説明等を行うとともに、議論を行った。本資料はその成果について報告するものである。

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)に改訂された港湾の施設の技術上の基準・同解説⁴⁾における、岸壁の要求性能および性能規定、性能照査法について、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章では通常岸壁について、第5章では耐震強化施設である耐震岸壁について、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、2023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

(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・沖縄総合事務局長・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、省令第一条の六で示される 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) 耐震岸壁

岸壁のうち、省令の第 1 条の七で示される耐震強化施設（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。本稿で定義する岸壁については、物揚場を含んだ係船岸を指す。

(7) 通常岸壁

岸壁のうち、耐震岸壁ではないものを指す。本稿で定義する岸壁については、物揚場を含んだ係船岸を指す。

(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。地盤の液化現象、海水等の流体、矢板や杭頭の構造部材、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。

3. 岸壁の要求性能、性能規定および性能照査

3.1 H30 基準の概要

3.1.1 要求性能

岸壁要求性能は省令の第 26 条において定められている。表-3.1 に示した通り、岸壁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岸壁の要求性能は、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岸壁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岸壁の要求性能については「L2 地震動の作用後に当該岸壁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岸壁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。

3.1.2 性能規定

矢板式係船岸の性能規定は、告示の第 50 条において定められている。なお、耐震強化施設である岸壁については、告示第 48 条の岸壁の性能規定に準ずるものとして、「主たる作用がレベル 2 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、表-3.3 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 等とすることができる。

表-3.1 各状態における岸壁の要求性能

状態	主たる作用	一般の岸壁	耐震強化施設である岸壁
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岸壁）

*1：H30 基準の解説において、「耐震強化施設以外の矢板式岸壁では、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。

表-3.2 矢板式係船岸の耐震強化施設

(特定(緊急物資輸送対応)、特定(幹線貨物輸送対応))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	レベル2地震動	自重、土圧、水圧、載荷重	法線の変形	岸壁天端の残留変形量
				矢板の降伏	設計降伏応力度
				タイ材の破断	設計破断強度
				控え工の損傷*1)	限界曲率
				控え工に作用する軸方向力*2)	控え工の支持力に関する作用耐力比(押し込み、引き抜き)
				控え版の安定性*3)	設計断面耐力
上部工の断面破壊	設計断面耐力				

* 1): 控え工の構造形式が、控え直杭、控え組杭及び控え矢板の場合に限る。

* 2): 控え工の構造形式が、控え組杭の場合に限る。

* 3): 控え工の構造形式が、控え版の場合に限る。

表-3.3 矢板式係船岸の耐震強化施設

(標準(緊急物資輸送対応))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	偶発状態	レベル2地震動	自重、土圧、水圧、載荷重	法線の変形	岸壁天端の残留変形量
				矢板の損傷	限界曲率
				タイ材の破断	設計破断強度
				控え工の損傷*1)	限界曲率
				控え工に作用する軸方向力*2)	控え工の支持力に関する作用耐力比(押し込み、引き抜き)
				控え版の安定性*3)	設計断面耐力
				上部工の断面破壊	設計断面耐力

* 1): 控え工の構造形式が、控え直杭、控え組杭及び控え矢板の場合に限る。

* 2): 控え工の構造形式が、控え組杭の場合に限る。

* 3): 控え工の構造形式が、控え版の場合に限る。

3.1.3 性能照査

H30 基準での、矢板式係船岸の照査としては、①矢板の根入れ長の決定を行い、矢板壁に生じる応力の検討を行う。次に②タイ材に生じる応力の検討、腹起しに生じる応力の検討を行う。①②より、矢板壁、タイ材及び腹起しの諸元の決定を行う。その後、③控え工の諸元を仮定し、控え工の応力、根入れ長及び位置の検討を行い、控え工の諸元を決定する。最後に、動的解析による変形量及び応力の照査、円弧すべりに対する検討を行い、断面諸元の決定を行うといった体系になっている。

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 基準における岸壁以外の構造物に関する要求性能

(1) 部材

省令第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)が示されている。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) 栈橋

省令第 29 条で規定されている栈橋の要求性能は、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、耐震強化施設については、L2 地震動等の偶発作用に対する損傷等が、「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)と示されている。さらに耐震性を必要とされ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。

(4) 橋梁

省令第 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。

(5) H30 基準における L1 および L2 地震動に対する要求性能の整理

(1)から(4)で述べた H30 基準における岸壁及び岸壁以外の構造物等の L1 および L2 地震動に対する要求性能を表-3.4 に整理する。

表-3.4 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	—
岸壁 (26 条)	L1: 使用性		L2: 修復性 L2: 使用性*4
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

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)⁶⁾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 では、永続作用や変動状態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、および構造安全面から致命的な状態でないよう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 では、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が低下しているが、橋として予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-3.5 に整理する。

表-3.5 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）⁷⁾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、構造物の修復の難易度から定まる一定の範囲内に損傷等を収めることにより、短期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-3.6 に整理する。

表-3.6 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. 通常岸壁のL2地震動に対する耐震性能照査

4.1 H30 基準における通常岸壁に関する課題

H30 基準において、変動状態までの設計を行う通常岸壁（L2 地震非対応の岸壁）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 地震動被災時および被災後における岸壁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。具体的には、フェリーターミナルやコンテナターミナルなど港湾利用者の立入りが多い通常岸壁において、利用者の人命の安全を確保しなければならないという意見が矢板勉強会で出された。また、図-4.1 のように安全性には構造上の安全性と機能上の安全性の 2 つの観点がある。前者は岸壁構造の崩壊と対応しており、後者は人命の安全の確保と対応している。以降差別化のため、構造上の安全性については構造安定性と称し、機能上の安全性を単に安全性と称す。勉強会では、構造上の安全性と機能上の安全性について今後は、明確に区別した上で考え方や対応する課題を整理していく必要があることが指摘された。

4.2 要求性能

表-3.1 に示した通り、通常岸壁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-3.5、表-3.6 に示した通り、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

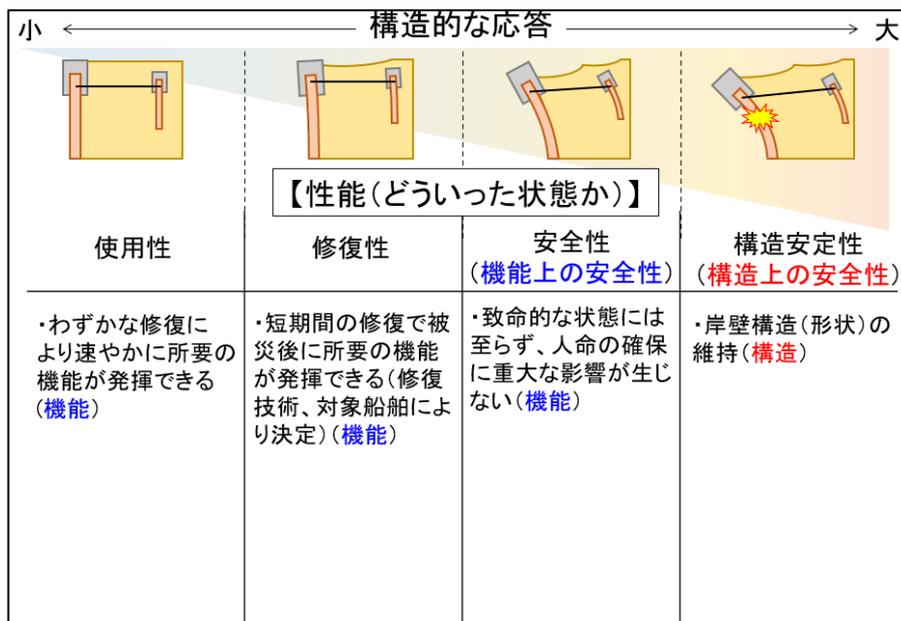


図-4.1 要求性能の分類イメージ

念頭に議論を進め、とりまとめた通常岸壁の偶発状態に対する要求性能一覧を、表-4.1のように示す。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施設や、耐震強化岸壁に隣接する岸壁、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岸壁などについては、その重要性を考慮してL2地震動とその後に発生する作用（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岸壁の性能規定は、前述の要求性能と対応させ、岸壁が構造安定性を失う危険性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、岸壁天端の残留変形量、上部工、矢板、タイ材、控え工、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必要である。

4.4 性能照査

通常岸壁の照査方法については、一般の施設と重要度が高くさらに性能を向上させる必要のある施設により区分することを提案する。

重要度が高い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、地震応答解析（FLIPなど）による照査を想定する。なお、通常岸壁に対して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

階の技術では地震に伴う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。

一方、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には計算負荷が大きいことから、例えば、液状化が生じない場合、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¹⁰⁾¹¹⁾において、通常岸壁であっても液状化・津波によるものを除けば倒壊・水没したような事例は見受けられないことから、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「重要度の高い施設」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る。

表-4.1 通常岸壁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	地盤条件に応じて設定	使用性	損傷無し（弾性範囲内の変形）
	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		
	L2地震動	偶発状態	当該地区において発生が想定される最大級の地震のうち当該施設に最も影響を及ぼすと考えられる地震	安全性	対象事象に対する損傷が、供用中及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 ただし、不特定多数の利用者が頻繁に利用する岸壁や港の利用上重要度が高い岸壁等、更に性能を向上させる必要がある施設にあっては、対象事象に対する損傷が、供用中及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留まること

※赤字は勉強会における提案箇所を示す。

5. 耐震岸壁のL2地震動に対する耐震性能照査

5.1 H30 基準における耐震岸壁に関する課題

H30 基準における岸壁の使用性・修復性に対応する耐震性能照査は、岸壁天端の残留変形量、限界曲率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 においては、鋼管杭の M- ϕ 関係が最大曲げ耐力を折れ点とするパ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についても課題として挙げられており、鋼管矢板でも同様に問題となると想定している⁸⁾。ただし、鋼管矢板岸壁については、鋼管矢板に限界曲率を超える挙動が生じることを許容していないことから、栈橋に比べ、この問題点の影響度は小さいと考えられる。

5.2 要求性能

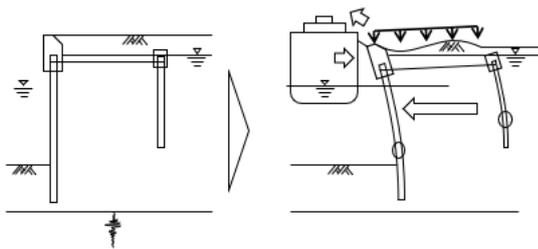


図-5.1 L2 地震時照査 (左) およびポスト L2 照査 (右) の概念図

耐震岸壁の偶発状態における要求性能としては、H30 基準で示されている要求性能 (地震後に必要な機能に対する使用性、修復性) に対して、矢板の残留変位が一定程度以下であることや限界曲率を超えないといった性能規定が定められている。この考え方は、L2 地震後の岸壁の性能を L2 地震動による岸壁の損傷レベルで評価することを意味しており、損傷した岸壁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 に示す通り、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。そのため、L2 地震時照査および被災後の船舶利用に相当する L2 地震時後照査 (以下、ポスト L2 照査) を提案している。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。矢板勉強会での議論を踏まえた要求性能の一覧を表-5.1 に整理して示す。

表-5.1 耐震岸壁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	地盤条件に応じて設定	使用性	損傷無し (弾性範囲内の変形)
	接岸・牽引	変動状態	接岸する船舶の規格に応じて設定		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
	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	当該地区において発生が想定される最大級の地震のうち当該施設に最も影響を及ぼすと考えられる地震	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のように、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) の受け入れが可能のように、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岸壁の性能規定は、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、上部工、矢板、タイ材、控え工、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、現時点における岸壁の修復の技術水準では、矢板式係船岸の撤去を必要とするような矢板の塑性化および座屈ならびに上部工の破壊、タイ材の破断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、矢板式係船岸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、災害時協定や港湾の事業継続計画(港湾BCP)⁹⁾などにおいて被災後に岸壁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 に示す耐震強化岸壁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、過去の港空研資料や被災事例や被災後の取組を整理した文献^{12) 13) 14) 15)}などにに基づき作成したものである。内容については、栈橋勉強会で整理したものを踏襲したものとなっている。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

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 岸壁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荷重 (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) で荷重 (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、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への適用も想定され

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、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、別途算定した岸壁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、岸壁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。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、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種類の手法が考えられる。

FLIP は前述の通り動的解析手法として用いられているが、外力の静的な荷重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の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 耐震強化岸壁（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
		対象港湾の近隣で発生し、大きな揺れを伴う	対象港湾の近隣で発生し、大きな揺れと津波を伴う	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。
各段階で入港する船舶と運搬物資・サービス	1~3 日後	輸送艦, 巡視船	浚渫船, 航路啓開船	浚渫船, 航路啓開船
		人員, 緊急物資	航路啓開	航路啓開
	3~10 日後	輸送艦, 巡視船	輸送艦, 巡視船	輸送艦, 巡視船
		緊急物資, 燃料	人員, 緊急物資, 燃料	緊急物資, 燃料
	10 日~1 か月後	フェリー, RORO 船	フェリー, RORO 船	フェリー, RORO 船
		緊急物資, 被災者支援	緊急物資, 燃料	人員, 緊急物資, 燃料
	1 か月後~	フェリー, RORO 船	フェリー, RORO 船	フェリー, RORO 船, クルーズ客船
		被災者支援	緊急物資, 被災者支援	緊急物資, 被災者支援
	復旧後*	被災前に利用していた船舶	被災前に利用していた船舶	被災前に利用していた船舶
		本来の機能	本来の機能	本来の機能
被害の特徴		<ul style="list-style-type: none"> ・比較的狭い範囲の被害 ・岸壁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 ・岸壁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 ・岸壁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
考えられる被災後の緊急物資輸送および荷役		<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。 ・その後に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。 ・その後に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, 徐々に大型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 船などの比較的大型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		<p>【共通】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 ・耐震岸壁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。 <p>【バルク岸壁】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 <p>【コンテナ岸壁】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 <p>【フェリー岸壁】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ボー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。 	<p>【共通】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 <p>【バルク岸壁】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 <p>【コンテナ岸壁】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ガントリークレーンの電源が津波により喪失し供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。 <p>【フェリー岸壁】</p> <ul style="list-style-type: none"> — 	<p>【共通】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 <p>【バルク岸壁】</p> <ul style="list-style-type: none"> — <p>【コンテナ岸壁】</p> <ul style="list-style-type: none"> — <p>【フェリー岸壁】</p> <ul style="list-style-type: none"> —

※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型復旧を基本とする。ただし, 事情により従前の施設の効用より改良されて復旧の程度を上げる場合はこの限りではない。

6. 今後検討すべき研究課題

各検討課題において今後検討または解決すべき課題を短期課題（2～3年）、中長期課題（5～7年）、継続課題（7年～）に分類した。課題の分類については、短期課題については、早急に検討または解決をしなければならないものである。中長期、継続課題については、検討または解決に向けての難易度が高いものである。

また、栈橋勉強会で整理された課題と共通するものについては、その旨記載をしている。

6.1 通常岸壁

(1) L2地震時照査を変動状態までの照査で代用する簡易手法（短期課題）

要求性能として安全性を求めるすべての通常岸壁について、高精度に構造物の挙動が把握可能な FLIP による照査を現在の設計に追加して行うこととすると、設計負荷が大きくなるものと想定される。そのため、液状化が生じない場合、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、追加の照査は行わないというような簡易手法の適用が考えられる。これは、変動状態までの照査を行い設計された既設の通常岸壁において、L2 地震を受けた際にこれまで液状化・津波によるものを除けば上部工の水没や矢板の折損といった大崩壊を引き起こしておらず、安全な状態であると推定されることを踏まえたものである。

実務の適用に向けては、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。当課題については栈橋との共通課題となっている。

6.2 耐震岸壁

(1) 大変形時における付加曲げの計算方法（短期課題）

軸力を受ける鋼管杭・鋼管矢板が水平力を受け大きく変形した際に、付加曲げが発生すると考えられる。現在標準的に使用される 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に生じる応力を過小評価し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た事例¹⁶⁾があるものの、現在は手法の一般化までには至っていないことから、汎用的計算方法の確立に向けて検討を進める必要がある。当課題

については栈橋との共通課題となっている。

(2) 地震後の液状化による過剰間隙水圧の消散の取扱い（短期課題）

FLIP において加振した液状化層は過剰間隙水圧が発生し、液状化により強度低下しているものとして評価されるが、被災後に緊急物資輸送船が利用するまでの期間で間隙水が排水され液状化層の強度は一定程度回復するものと考えられる。しかしながら、現在の標準的な計算手法では間隙水の排水計算は行われないことから、地盤の強度を過小評価してしまう可能性がある。

現在、カクテルグラスモデル¹⁷⁾を用いれば FLIP 上で排水計算を行うことは可能であるものの、ポスト L2 照査に適した方法であるか検証されていないことに加え、より多くの解析パラメータを精度良く決定する必要が生じるので、L2 地震動に対する被災程度の予測を従来と同程度の信頼性をもって実施できるかは未検証である。従って、排水計算の要否や汎用的計算方法の確立に向けて検討を進める必要がある。当課題については栈橋との共通課題となっている。

(3) FLIP から骨組解析への境界条件受け渡し方法（中長期課題）

ポスト L2 照査を骨組み解析で行うにあたって、L2 地震時照査を FLIP で行った後の状況を再現するために、FLIP の解析結果である残留変形や残留応力といった境界条件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、梁要素の変位の形式でモデルが構成されることから、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設定する必要がある。当課題については栈橋との共通課題となっている。

(4) 鋼管矢板の L2 地震時照査の際に発生した限界曲率超過箇所の骨組解析上の表現方法（中長期課題）

FLIP 上で鋼管杭および鋼管矢板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には、短期的課題でも触れたように耐力低下している状態を表現する必要がある。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ことから、その表現方法を設定する必要がある。

(5) ポスト L2 照査における骨組解析での地盤ばね値の設定方法（中長期課題）

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するため、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、地盤ばね値の設定方法を確立する必要がある。当課題については栈橋との共通課題となっている。

6.3 矢板式岸壁の設計に係るその他の課題

(1) 鋼管杭・鋼管矢板のポストピーク挙動の把握とモデル化の方法（短期課題）

FLIP における鋼管杭および鋼管矢板の $M-\phi$ 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が、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点が課題の一つと考えられる。現在の手法では鋼管のある部分で座屈が生じた場合でも曲げモーメントが維持され、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、実際に座屈箇所において荷重がどのように伝達するか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。

今後さらに、シェル要素を用いた解析や実験から、実際の耐力について検討を進める必要がある。当課題については栈橋との共通課題となっている。

(2) 前面矢板および控え工をクレーン基礎兼用とすることによる軸力の考慮（短期課題）

近年、矢板岸壁の前面矢板や控え工の上部工上にクレーンのレールを設置し、岸壁構造をクレーン基礎として兼用することで、経済性に配慮するような設計がみられる。しかしながら、矢板は土圧に対して主に曲げで抵抗する構造であり、軸力が作用するような矢板壁の使用方法は想定されていないことから、港湾基準において鋼矢板および鋼管矢板における支持力の計算方法は示されていない。実務では、鉛直荷重を考慮する場合に井筒基礎の考え方を転用するなどの計算がなされる場合もあるが、その適用性は十分に検討されていないのが実情である。また、矢板壁の上にクレーンが乗ると矢板には軸力が作用するため、栈橋の基礎杭のように軸力に応じて最大曲げ耐力を低減する必要があると考えられる。ただし、前述の通り設計時に軸力が考慮されていないことから、耐力低減方法については課題である。加えて、矢板が土圧

を受けて曲げが発生した際に、鉛直荷重が偏心して載荷される可能性がある。静的照査を行う場合の計算方法の確立が課題である。

(3) L1 地震時の矢板の根入れ長照査の考え方（短期課題）

現行基準における矢板の根入れ長は、矢板をさらに伸ばしても最大曲げモーメントが大きく変わらなくなるような長さ（収束根入れ長）として設定されており、これは作用を受けても矢板下端がほぼ動かないことを表している。しかしながら、L1 地震時においても矢板下端の海側への水平変位が発生してしまうことが FLIP 解析結果から明らかとなっており、必ずしも下端の固定を伴わない（地盤に対しては固定されているが地盤とともに海側へ変位する）。もし、矢板下端が海側へ動くことと仮定すると、矢板の曲げは緩和されることになり、発生するモーメントも小さくなる。このことから、変動状態の設計において、より小さな規格の矢板を採用することができ、経済的となる可能性がある。したがって、L1 地震時の矢板根入れ長の照査方法については課題であると考えられる。

(4) 安全性照査方法の確立（構造上の安全性）（短期課題）

L2 地震時における通常岸壁の要求性能として安全性を求めることが勉強会にて提案されているが、勉強会では、図 4.1 のような要求性能の分類イメージを提案し、構造上の安全性と機能上の安全性のイメージを提示した。

構造安定性を照査する場合には、岸壁の構造的な極限状態を考える必要がある。矢板式岸壁の構造安定性としては、前面矢板が折損して裏込材が海中に流出するなどの状態を避ける必要があると考えられる。このとき、タイ材および控え工については、機能を喪失していたとしても矢板が自立状態で土圧を支持できていれば岸壁の崩壊は生じない。このように、一部の部材が機能を喪失した後、かつ大変形等の岸壁の挙動に対応した照査方法の構築が課題となる。一案として自立矢板状態での矢板の耐力を照査する方法などが考えられる。

通常岸壁または耐震岸壁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、その限界値は岸壁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、矢板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。

(5) 骨組解析を活用した地震時の簡易照査手法の開発
(地震時土圧の設定) (短期課題)

通常施設の L2 地震時における安全性 (構造安定性) について、FLIP で照査する方法や変動状態までの照査で安全性が確保されているとみなす方法が挙げられる。そのほか、矢板式岸壁については、タイ材および控え工の機能が喪失しても、矢板が自立状態を維持していれば岸壁構造が保持されているものと考えられる。この状態について、骨組解析により照査することも考えられるが、L2 地震時において液化化を伴うような地盤による土圧の設定や、矢板根入れ部の変位、矢板が破断する損傷の限界値設定などについて検討する必要がある。

また、L1 地震時の現行の照査方法として、仮想ばり法で算定した曲げモーメントを、弾性梁解析法の結果と対応させた高橋・菊池らによる近似式で補正する方法が一般的である。この手法は、近似式算定時における地盤条件から外れた場合においては、適用ができないものと考えられる。そのため、骨組解析により L1 地震時照査を行う方法の研究が進められており、実務に適用できるような具体的な設計法への実装方法が課題である。

(6) 安全性照査方法の確立 (機能上の安全性) (中長期課題)

安全性を照査する場合には、どのような現象が人命の安全に重大な影響を及ぼすか明らかにし、その現象が発生しないように限界値を設定する必要がある。人命が失われるような岸壁の変状としては、地震時に岸壁上部を通行する歩行者や車が越えられないような段差やひび割れの発生や、海への転落を伴うようなエプロンの傾斜、ガントリークレーン等の荷役機械が倒壊する程のレールの変形や不同沈下が考えられる。しかしながら、厚生労働省の労働災害データベースの事例を踏まえ、20cm の段差でも死亡事故に繋がる可能性があるなど、具体的にどの要素のどの程度の変状が人命の安全に影響を与えるかは意見が分かれるところである。したがって、安全性の性能規定およびそれに伴う性能照査法については設定することが容易ではないと考えられる。

鉄道構造物等設計標準では、列車が安全に通行できるための安全性として走行安全性を定めており、人命に関する照査は重要であるものと考えられる。以上より、港湾基準においても人命の安全に係る性能規定および性能照査方法の確立が課題となる。

(7) 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 (継続課題)

特定 (幹線貨物輸送対応) の矢板式岸壁においては、岸壁天端の残留変形量や矢板の降伏、タイ材の破断、控え工の損傷について性能規定が設定されている。しかしながら、部材の修復は掘削を伴うなど、被災後の緊急利用までの期間では大規模な修復は困難である。実際には応急復旧として砕石の敷き均しを行う程度の対応が想定されるため、設計で考慮する部材の損傷程度と構造物の利用可能性が直接対応しているわけではない。

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、より経済的・合理的な設計になるものと考えられる。当課題については栈橋との共通課題となっている。

(8) 施工手順 (裏埋土の段階施工、施工の平面展開) の考慮 (継続課題)

矢板式係船岸について FLIP で地震時照査を行う場合、矢板の築堤過程を複数の自重解析段階と動的解析段階で模擬する 4 段階法 (埋立型) あるいは 3 段階法 (堀込型) が一般的に用いられる。これは、ステップを分割することで地盤の初期応力状態を考慮することができ、被災事例の再現結果が妥当となるため採用されている。一方で、静的照査については完成断面を 1 段階で解析することが基本となるものの、既往研究における築堤過程や平面展開を考慮した骨組解析では、1 段階で解析した結果とは異なる変位やモーメントが生じることが明らかとなっている。

実施工においては、タイ材を裏込め石投入前に設置する場合や、裏込め石をある程度投入してから設置する場合も見られることから、前面矢板が自立状態で土圧を受ける期間も異なるため、矢板の変位や応力の分布も 1 段階解析とは異なる可能性がある。以上より、静的照査においても施工手順の考慮をすべきか検証することが課題であると考えられる。

7. 結論

現行の H30 基準における岸壁の耐震性能照査では、L2 地震動の作用を受けた岸壁の残留変形量が許容値を超えないことや矢板の曲率が限界曲率に達しないことが照査されるが、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岸壁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

する場合は考えられるなど、合理的な岸壁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4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矢板式係船岸の設計法に関する勉強会を開催した。勉強会では現行の矢板式係船の岸耐震性能照査に関する知見を整理し、H30基準における矢板式係船の要求性能、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解決方針を設定した。

8. あとがき

本検討で挙げられ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。並行して、技術基準の関連WG等の機会を活用し、実務者との意見交換も進めていきたい。なお、ここで示した課題および解決方針についてはまだ検討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。

本勉強会では、施設の維持管理に関わる事項や、既設構造物の点検診断技術に関する議論は実施しなかった。矢板式係船岸は控え工やタイ材など地中部分に存在する構造部材が多く、維持管理、点検診断等についても課題が多い。今後の検討課題としたい。

本勉強会で得られた知見は、矢板式係船岸のみならず他の岸壁構造形式においても同様に参考となる考え方である。今後は矢板式係船岸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。

(2023年8月3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、公益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) 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
- 7) 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
- 8) 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棧橋の二次元有効応力解析、土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)、Vol.71, No.4 (地震工学論文集第34巻)、2015年
- 9) 国土交通省港湾局：港湾の事業継続計画策定ガイドライン (改訂版)、2020年
- 10) 稲富隆昌、上部達生、井合進、風間基樹、山崎浩之、松永康男、関口信一郎、水野雄三、藤本義則：1993年北海道南西沖地震による港湾施設被害報告、港湾技研資料、No.791、1994年
- 11) 宮島正悟、小泉哲也、宮田正史、竹信正寛、坂田憲治、浅井茂樹、福田功、栗山善昭、下迫健一郎、山崎浩之、菅野高弘、富田孝史、野津厚、山路徹、鈴木高二朗、有川太郎、中川康之、佐々真志、森川嘉之、水谷崇亮、小濱英司、加島寛章、高橋英紀、大矢陽介、遠藤仁彦、原田卓三、青木伸之、佐瀬浩市、山本貴弘、早川哲也、林誉命、西谷和人、白井正興：平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による港湾施設等被害報告、国土技術政策総合研究所資料、No.798、港湾空港技術研究所資料、No.1291、2015年
- 12) 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、稲田混平：棧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、港湾空港技術研究所資料、No.1405、2022年
- 13) 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
- 14) 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
- 15) 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
- 16) 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：楡形鋼矢板壁工法マニュアル(案)、2022年
- 17) 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

港湾空港技術研究所資料 No.1410

2023.9

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. <https://www.pari.go.jp/>

Copyright © (2023) 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。