

大規模地震後における係留施設の利用可否判断手法及び応急復旧事例について

諏訪 弘明*・石塚 拳紳**・浅井 正***・山本 龍****・江口 拓生*****・山村 雄司*****
細川 浩志*****・下釜 拓斗*****

* 前 (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員
** (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員
*** (一財) 沿岸技術研究センター 審議役
**** (株) ニュージェック 港湾・海岸グループ リーダー
***** (株) ニュージェック 港湾・海岸グループ 主任
***** (株) ニュージェック 港湾・海岸グループ 技師
***** 国土交通省 中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所 調査課長
***** 前 国土交通省 中国地方整備局 広島港湾空港技術調査事務所 調査係長

本稿では、中国地方整備局における係留施設の利用可否判断手法並びに、応急復旧事例集の概要及び得られた知見等を取りまとめた。大規模地震後における鋼構造形式の係留施設の利用可否は、主要鋼部材の応力状態に依存し、外観確認からの判断が難しい。そこで、迅速かつ効率的に係留施設の利用可否を判断するために、工学的基盤の地震波形から求めた速度 PSI 値¹⁾や残留水平変位量等を活用する手法をマニュアルとして取りまとめた。さらに、我が国における大規模地震後の応急復旧事例を収集し、被災後の暫定的な利用にあたっての課題・工夫点等を整理した。

キーワード：大規模地震、係留施設、利用可否判断、速度 PSI 値、応急復旧事例

1. はじめに

国土強靱化基本法²⁾では、「大規模自然災害発生等から国及び国民を守るためには、大規模自然災害等の発生から 72 時間を経過するまでの間において、人員、物資、資金等の資源を、優先順位を付けて大規模かつ集中的に投入することができるよう、事前に備えておくことが必要である」とされている。島国である我が国では、大規模地震の発生後、被災地への資源の輸送手段として、一度に大量輸送できる海上輸送は非常に重要な役割を担っており、港湾施設の利用と機能の早期回復が不可欠である。

港湾施設は広い範囲に点在しており、大規模地震発生の際は、地域特性や被害状況に応じて施設毎の利用可否を判断し、それぞれの被災程度や立地を踏まえた災害対応が求められる。

「令和 6 年能登半島地震を踏まえた港湾の防災・減災対策のあり方（交通政策審議会答申、2024 年 7 月）」³⁾では、「港湾施設の点検・利用可否判断」及び「被災した港湾施設の応急復旧」等が課題として挙げられている。これを踏まえ、今回、中国地方整備局では、大規模地震後における係留施設の利用可否判断手法マニュアルを作成した。

さらに、各地方整備局、北海道開発局から過去の大規模地震において実施した暫定的な利用を目的とした応急復旧事例を収集し、応急復旧事例集を作成し、被災後の暫定的な利用にあたっての課題・工夫点等を整理した。

本稿は、中国地方整備局における利用可否判断手法並

びに、応急復旧事例集の概要及び得られた知見等を取りまとめたものである。

なお、大規模地震後における係留施設の利用可否判断手法マニュアルは、令和 7 年 4 月に国土交通省港湾局が公開した「港湾施設の利用可否判断に係るガイドライン」にも対応したものである。

2. 大規模地震後における係留施設の利用可否判断手法マニュアルについて

本マニュアルは、港湾の施設の技術上の基準・同解説(下巻)⁴⁾に記載の大規模地震・津波後の被災調査の全体手順のうち、初期調査段階の「利用可の候補絞り込み」「緊急復旧工事により利用できる可能性の高い施設の抽出・優先度の設定」を対象に、利用可否判断において必要な情報の収集及び利用可否判断の実施方法・手順等を示すものである。

マニュアルの適用範囲は中国地方整備局管内の係留施設とし、使用対象者は中国地方整備局職員等とした。

なお、大規模地震とは、国土技術政策総合研究所資料 No. 1301⁵⁾より、被災する施設が少なからず生じると考えられる震度 5 弱以上の地震を想定している。

2.1 係留施設の利用可否判断手法

係留施設の利用可否判断は、被災後の現地調査により行うことを前提とし、次の 2 つの観点での判断が求められる。

① 利用上の観点：船舶の接岸や物資の荷役、車両のアクセス性

② 構造上の観点：構造上の最低限の安定性の維持

①は、岸壁法線の凹凸変位量や背後地の段差の発生程度等から判断可能である。

②は、重力式係船岸では、過去の地震における被災事例からの経験則を適用し、現地での目視調査や計測等から判断可能である(図-1 参照)。

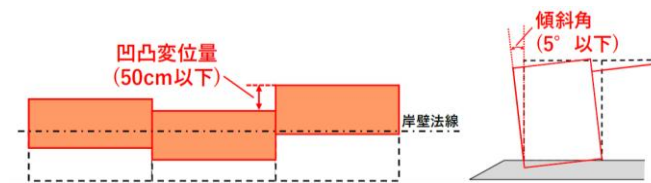


図-1 重力式係船岸の利用可否判断基準(目安)

一方、鋼構造形式(矢板式係船岸(以下、矢板式という))や栈橋等は、構造上の利用可否は主要鋼部材の応力状態に依存するため、目視や計測等の現地調査だけでは判断が難しい。

そこで、鋼構造形式の係留施設については、耐震性能照査手法として広く用いられている二次元地震応答解析(以下、FLIP 解析)⁹⁾により、主要鋼部材の損傷程度の推定を事前に行って判断指標を設定し、現地での計測結果と比較することで判断することとした。

鋼構造形式(矢板式や栈橋等)の構造上の利用可否判断のための検討手順は以下のとおりである。

① 対象施設が位置する港湾エリアの地震特性を踏まえて作成された地震動強さが大小様々な地震動を対象に FLIP 解析を実行する。

② 地震動毎の FLIP 解析結果から式(1)～(8)に示す主要鋼部材の耐力比を算出し、地震動強さの指標である速度 PSI 値¹⁾、及び係留施設天端の残留水平変位量との関係性(以下、評価線)を求め、判断指標となる閾値を設定する(図-2、3 参照)。なお、図-2 に示す速度 PSI 値は、FLIP 解析で想定する工学的基盤の地震動から算出した PSI 値である。

これらをもとに構造上の利用可否判断を行う。なお、今回は中国地方整備局管内の港湾施設のうち、重要度が高い国有港湾施設の 16 施設を対象に閾値を整理した。

● 矢板式の耐力比

最大曲率比

(鋼管矢板)

$$= \frac{\text{地震中の発生最大曲率 } \phi_{\max}}{\text{限界曲率 } \phi_u} \quad (1)$$

(鋼矢板)

$$= \frac{\text{地震中の発生最大曲率 } \phi_{\max}}{\text{全塑性曲率 } \phi_p} \quad (2)$$

$$\text{杭の支持力比} = \frac{\text{地震中の発生最大軸力}}{\text{軸方向(押込 or 引抜)抵抗力} *} \quad (3)$$

(控え工が組杭式、グラウンドアンカー方式の矢板本体の場合)

$$\text{タイ材張力比} = \frac{\text{地震中の発生最大張力}}{\text{設計破断強度}} \quad (4)$$

● 栈橋の耐力比

$$\text{最大曲率比} = \frac{\text{地震中の発生最大曲率 } \phi_{\max}}{\text{限界曲率 } \phi_u} \quad (5)$$

$$\text{杭の支持力比} = \frac{\text{地震中の発生最大軸力}}{\text{軸方向(押込 or 引抜)抵抗力} *} \quad (6)$$

上部工の耐力比

(曲げ)

$$= \frac{\text{地震中の発生最大モーメント}}{\text{曲げ耐力}} \quad (7)$$

(せん断)

$$= \frac{\text{地震中の発生最大せん断力}}{\text{せん断耐力}} \quad (8)$$

*それぞれ軸方向極限支持力 or 最大引き抜き力

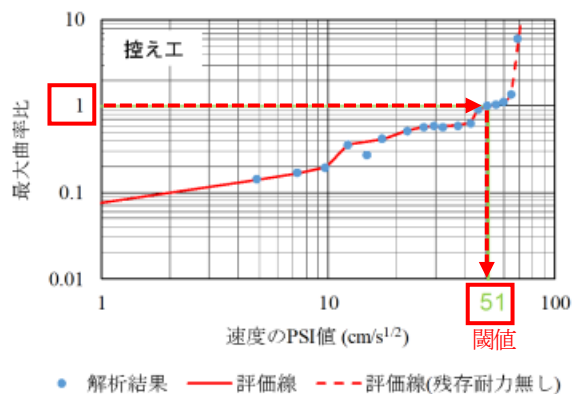


図-2 最大曲率比と速度 PSI 値の評価線(例)

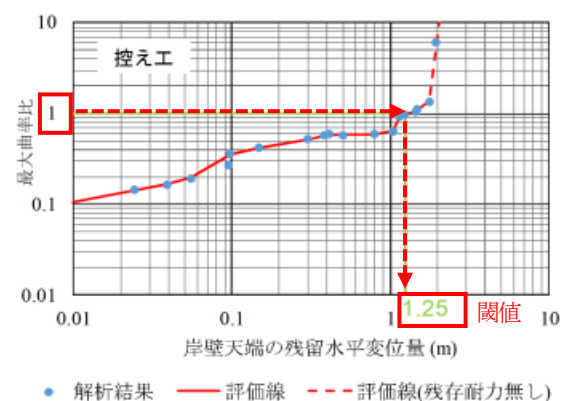


図-3 最大曲率比と残留水平変位量の評価線(例)

表-1 速度PSI値と係留施設の被害有無・程度の関係
(参考文献5)p.5 表-4をもとに作成)

工学的基盤の 速度PSI値 ($\text{cm/s}^{0.5}$)	地表面の 速度PSI値 ($\text{cm/s}^{0.5}$)	係留施設の被害有無・程度
40以上	50以上	甚大な被害が発生している可能性が高い。
20以上 ～40未満	25以上 ～50未満	相当程度の被害が発生している可能性が高い。 ただし、被害が軽微である場合もある。
10以上 ～20未満	10以上 ～25未満	軽微な被害または無被災である可能性が高い。
10未満	10未満	無被災である可能性が極めて高い。

ここで、速度PSI値とは、速度時刻歴の2乗を時間積分し、平方根を取った値であり¹⁾、表-1に示すように地震動のエネルギーの大きさ、港湾構造物の変形量や被害程度と対応関係がある。参考文献5)で扱われている速度PSI値は、強震計設置地点における地表面の観測記録から算出された速度PSI値である。一方、本マニュアルで扱う速度PSI値は、以下の理由により、工学的基盤の速度PSI値を用いる。

- ① 地震発生後、近隣の強震計から観測記録を取得して評価線(図-2参照)を活用する場合、強震計設置地点の地震情報を対象施設地点の値へ変換が必要。
- ② 地表面の観測地震に着目した場合、対象施設地点と強震計設置地点では地盤の堆積土層が異なるため、両地点の観測地震は一致しないことが想定。
- ③ 工学的基盤での地震動は両地点で理論的には同一と考えることができたため、変換が不要。

図-2の評価線は工学的基盤の地震波形から算出した速度PSI値を用いて作成している。表-1には参考文献5)p.6図-7の関係(重要港湾159港湾における強震計の値から求めた関係で、工学的基盤の速度PSI値 $\div$ 地表面の速度PSI値/1.2)を用いて整理した工学的基盤の速度PSI値も併記し、本マニュアルではこの情報を活用する。

地震発生後すぐに公開される近隣の強震計の観測地震情報(国土交通省の港湾地域強震観測網や国立研究開発法人防災科学技術研究所のK-NET等)のデータを“速度PSI値算定プログラム”に取り込み、地表の観測地震動を工学的基盤の地震波形に変換(対象施設と観測地震動を入手する強震計設置地点とサイト増幅特性が異なる場合は、サイト増幅特性の補正処理を実施)し、当該施設が位置する地点の速度PSI値を算定する。速度PSI値算定プログラムの概念図を図-4に示す。

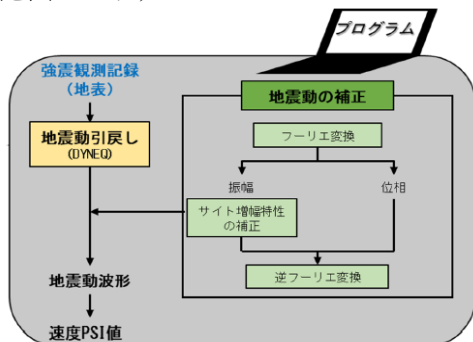


図-4 速度PSI値算定プログラムの概念図

算定値と、図-2に示す評価線をもとに、被害を推定し、現地点検を行う施設の絞り込みや、優先度の設定に活用する。これにより、津波警報等で現地点検が実施できない時間を有効活用できる。

2.2 大規模地震発生直後の利用可否判断フロー

大規模地震発生直後の係留施設の利用可否判断について、重力式係留施設の概略フローを図-5に、鋼構造形式係留施設の概略フローを図-6に示す。

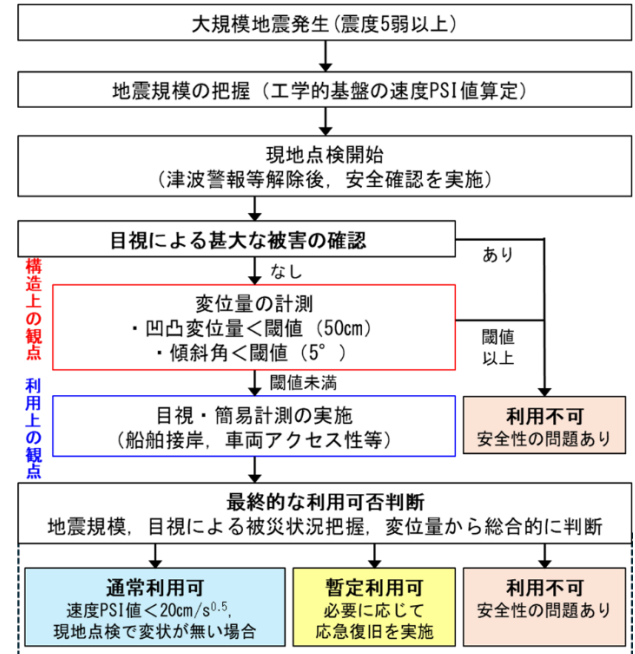


図-5 重力式係留施設の利用可否判断概略フロー

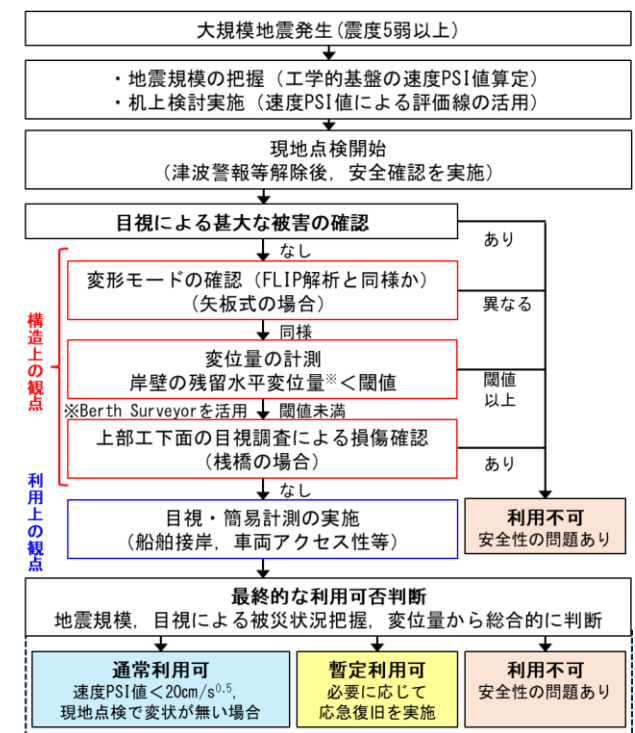


図-6 鋼構造形式係留施設の利用可否判断概略フロー

大規模地震発生直後，“速度 PSI 値算定プログラム”により算出した当該施設位置での工学的基盤の速度 PSI 値と、図-2 に示す評価線により被害を推定する。次に、現地点検を行う施設の絞り込み、優先度の設定等を机上検討し、現地点検対象施設を選定する。津波警報等の解除後、現地点検を実施する。

現地点検における変位量の計測方法及び最終的な利用可否判断の考え方は次のとおりである。

(1) 重力式係留施設の場合

(変位量の計測方法)

巻き尺やスケール、傾斜計等で岸壁の凹凸変位量と傾斜角を計測する。

(最終的な利用可否判断の考え方)

現地点検で段差やひび割れ等の変状がないことを確認できれば「通常利用可」と判断する。変位量が図-1 に示す目安を満足した上で、利用上問題がない、もしくは何かしらの応急復旧を施せば利用できる場合等は「暫定利用可」、明らかに被害が甚大もしくは変位量が多い場合は「利用不可」と判断する。

(2) 鋼構造形式係留施設の場合

(変位量の計測方法)

鋼構造形式の場合は、重力式のような方法では精緻な計測が困難であるため、RTK-GNSS 測量技術を活用した Berth Surveyor⁷⁾を用いて残留水平変位量を計測し、利用可否判断を行う。

ここで、残留水平変位量とは、現地点検で計測する施設法線位置の天端における地震後の法線直角方向水平変位量である。

また、Berth Surveyor とは、基準局と移動局を設置し、地震前後の両地点の相対的な距離を計測し、地殻変動量をキャンセルした残留水平変位量を精緻に計測できる技術である（写真-1, 2）。図-3 に示す評価線を登録でき、計測直後に構造上の利用可否判断を実施できるメリットがある。



写真-1 Berth Surveyor 設置状況



写真-2 Berth Surveyor 測定状況

なお、Berth Surveyor の保有台数には限りがあるため、使用できない場合も想定される。代替計測方法としては、変位量を精緻に計測できるトータルステーションや RTK-GNSS 測量、精密単独測位 (PPP 方式) 等を推奨する。

(最終的な利用可否判断の考え方)

以下のすべてを満足する場合は「通常利用可」とする。

- 算出した速度 PSI 値が $20 \text{ cm/s}^{0.5}$ （表-1 の「軽微な被害または無被災である可能性が高い」場合の工学的基盤の速度 PSI 値の上限）未満かつ速度 PSI 値の閾値（施設毎の FLIP 解析から整理した構造上の観点で利用可否判断を行うための閾値）未満
- 現地点検で施設に変状がないことが確認できた場合
通常利用はできないものの、以下を満足する場合は、必要に応じて追加調査や応急復旧の実施、利用条件を設ける等した上で「暫定利用可」と判断する。

(矢板式)

- 前面矢板・控え工の最大曲率比 < 1.0
かつ杭の支持力比 < 1.0 （控え工が組杭式、グラウンドアンカー方式の矢板本体の場合）
- タイ材張力比 < 1.0

(栈橋)

- 下部工のいずれの杭も最大曲率比 < 1.0
かつ杭の支持力比 < 1.0
- 上部工の耐力比 < 1.0

以下の場合には「利用不可」と判断する。

- 甚大な被害が発生している場合
- 変形モードが想定と異なる場合（矢板式）
- 閾値以上の変位量が発生している場合
- 上部工下面の損傷が認められる場合（栈橋）

3. 応急復旧事例集の作成

3.1 概要

(1) 目的

大規模地震発生後の本復旧事例については、多くの報告等が公表されているものの、被災後の暫定的な利用の

ために行う応急復旧に関する報告は少ない。そこで、表-2に示す4つの地震を対象に、各地方整備局、北海道開発局へのアンケートや、既往文献等から応急復旧事例を収集し、係留施設の構造形式や被災内容、被災度を整理し、応急復旧事例集としてとりまとめた。

表-2 対象とする地震

地震名	発生年月日
令和6年能登半島地震	2024年1月1日
令和4年福島県沖を震源とする地震	2022年3月16日
平成30年北海道胆振東部地震	2018年9月6日
平成28年熊本地震	2016年4月14日

(2) 応急復旧事例集の目次構成

応急復旧事例集の目次構成を表-3に示す。

表-3 応急復旧事例集目次

章	内容
1. はじめに	・背景、目的 ・事例収集の対象
2. 対象とする地震	・対象地震の諸元及び概要
3. 応急復旧事例	・事例の一覧表(地震別/港湾別に、各施設の構造形式、耐震/非耐震、応急復旧の概要) ・応急復旧事例のとりまとめ
4. おわりに	・得られた課題や工夫点 ・事例集の活用について

(3) 主な応急復旧の内容

得られた応急復旧事例の主な作業内容は、大きくわけて3つに分類される。

- ① 施設を利用するにあたっての障害物撤去作業(被災した構造物の破碎・撤去作業、岸壁前面浚渫・啓開作業等)
- ② 施設までのアクセス性を確保するための仮設道路設置作業(仮舗装、沈下・段差解消、う回路設置等)
- ③ 二次災害を防止するための土砂流出防止作業(大型土のう、帆布設置等)

応急復旧に使用する資材は、購入品の場合も多くみられた。中には、背後地の既設舗装を撤去し、その下の路盤材を段差解消用に活用する等、ストックがない状況でも現地にあるもので工夫して調達した事例もあった。

3.2 被災後の暫定的な利用にあたっての課題・工夫点

応急復旧事例の収集・整理から、被災後の暫定的な利用にあたっての課題や工夫点等多様な知見が得られた。計測機器の調達やシミュレーション等、平時からの備えの参考になると考える。

(1) 被災調査における課題や工夫点

- 変位量等の測定のため、メジャーやスタッフ、傾斜計や水深測定用レッドの確保が重要であった
- 施設の断面図や平面図がまとめられた調査票がある

と便利である

- 被災施設特定前は、現地に持参する図面等の選定は困難であるため、図面のデジタル化も有効である
- 地方港湾での被災施設については、直轄では設計図面を所有していないため、維持管理情報データベース(以下、DB)等への施設情報の事前登録が重要である
- 状況写真に位置情報を付与すると、後々場所を特定する作業を省力化できる
- エプロン舗装等が損壊していた場合、測量用の鋺を活用できるかどうかは課題である
- 自衛隊等の移動式基地局等を使用できたので問題なかったが、DB等の活用には通信環境の確保が課題である
- 水中部・地中部は目視確認が困難であるため、遠隔的もしくは電子機器で計測することになると想定される。計測値の正負や測定レンジの記載ミスが起こりやすいが、ミスのチェックは困難である。それを見越した事前対応(システム的な対応、目視調査で利用可否判断ができる施設の選定等)が重要である

(2) 利用可否判断における課題や工夫点

- 海上保安庁、自衛隊の大型船が被災直後から施設を利用したが、これらの船舶に関する事前検討が重要であった
- 重力式の構造物は、目視点検で接岸可否を判断できた
- 係船用の仮設方塊ブロック設置位置をシミュレーションにより決定した。シミュレーションは災害支援協定に基づき、迅速に着手できた

(3) 応急復旧工事における課題や工夫点

- エプロン段差解消用に、背後の駐車場のアスファルト舗装を剥がし、その下の路盤材を転用した。あらかじめストックすることは重要であるが、ストックがない場合は多くの港湾で有効な対応となり得る
- ケーソンとケーソン背後の舗装の境界に目地を設け、段差が発生した場合にも速やかに復旧できるよう配慮した
- 係船柱が損傷したため、仮設方塊ブロックを係船用に設置して利用した。ただし、設置位置の決定に先立ち、シミュレーションが必要である
- 港内の地区ごとに段階的な復旧を実施し、災害支援船等の利用を妨げないよう工夫した
- 発災後、災害協定相手方への連絡に時間を要したケースがあった

4. おわりに

今回、大規模地震発生後において効率的に係留施設の利用可否を判断するためのマニュアル及び、迅速かつ効率的な応急復旧手法の検討に資するための事例集を作成した。

南海トラフ巨大地震や首都直下型地震等の大規模地震の発生が懸念される中、これらは作成して終わりではなく、有効的に活用され、大規模地震発生後、速やかに被災地の安全・安心を取り戻すことが最終的な目的である。目的の達成のためには、マニュアル・事例集の周知、訓練、

シミュレーション等を計画的に実施し、事前の準備を念に行うとともに、必要に応じてブラッシュアップされることが重要である。

本マニュアル及び事例集が、発災後の迅速な支援活動の一助になれば幸甚である。

謝辞

本稿は、国土交通省中国地方整備局広島港湾空港技術調査事務所発注の「管内係留施設の大規模地震後における使用可否判定方策検討業務」の成果の一部をまとめたものである。

検討にあたり、有識者委員会を開催し、各委員（委員長：横田弘北海道大学名誉教授、港湾空港技術研究所より野津厚特別研究主幹、小濱英司地震防災研究領域長、田中敏成メタロボティクス研究グループ長、国土技術政策総合研究所より水谷崇亮港湾新技術研究官、竹信正寛港湾施設研究室長）から貴重なご意見、ご指導をいただきました。また、応急復旧事例集の作成に際し、各地方整備局、北海道開発局から多大なご協力をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 野津厚・井合進：岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察，第28回関東支部技術研究発表会講演概要集，土木学会関東支部，pp.18-19，2001.
- 2) 強くしなやかな国民生活の実現を図るための防災・減災等に資する国土強靱化基本法（平成25年法律第95号）
- 3) 令和6年能登半島地震を踏まえた港湾の防災・減災対策のあり方，交通政策審議会答申，2024.
- 4) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説（下巻），p.1851，2018.
- 5) 宮田正史・菅原法城・野津厚・長坂陽介・小濱英司・大矢陽介・福永勇介・竹信正寛・秋山吉寛：港湾地域強震観測網から得られる速度PSI値を用いた港湾単位での係留施設の被害有無の概略判定手法，国土技術政策総合研究所資料No.1301，pp.2-6，2025.
- 6) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, 1990.
- 7) 伊藤宏高，小濱英司：RTK-GNSSを活用した地震後の係留施設の変位量計測・安定性評価支援システムの開発，港湾空港技術研究所資料No.1370，2020.