

大規模地震時における係留施設の使用可否判定手法について

大霜 和倫¹・安武 輝征¹・鬼童 孝¹

¹九州地方整備局 下関港湾空港技術調査事務所 設計室 (〒750-0025 山口県下関市竹崎町4-6-1)

大規模地震発生時、海上ルートによる緊急物資輸送は有効な手段となる。そのためには、船舶の接岸および荷役を行う係留施設が安全に使用できるか否かを速やかに判断する事が肝要である。そこで、九州の港湾における係留施設を対象に大規模地震が発生した場合を想定して、迅速に係留施設の使用可否判定する手法を検討した。本論文では、使用可否の考え方およびそれを基にした被災後の現地点検手法について報告する。

キーワード 大規模地震、使用可否判定、現地点検、FLIP解析、係留施設

1. はじめに

大規模地震により幹線道路が寸断された場合、海上ルートを通じた支援物資やインフラ復旧のための資機材の輸送は有効な手段となる。迅速な物資輸送を可能とするためには、物資の荷役を行う係留施設が安全に利用できることを被災後の現地調査から判断する必要がある。そのため、地震後の施設点検により得られるデータから係留施設の使用可否を判断する手法を予め設定しておくことが肝要である。

使用可否を判断する上では、以下を満足することが求められる。

①船舶の接岸や物資の荷役、車両のアクセスが可能であること（使用上の観点）

②被災した施設自体が構造上の安全を維持していること（構造上の観点）

係留施設の中には鋼材を主体とする構造形式のものもあり、それらは地震後の鋼材の応力状態を推定して使用可否を判断する必要がある。しかしながら目視調査より鋼材の応力状態を推定することは困難である。

本研究は、被災後の緊急物資の速やかな輸送を可能とすることを目的として、被災後係留施設の点検フローお

よび点検データより使用可否判定する手法を検討したものである。本論文では、使用可否の考え方および手法について報告する。

2. 使用可否判定の考え方

(1) 使用可否判定の全体方針について

係留施設の使用可否の判定は、2つの観点より行った。1つは、岸壁法線の凹凸状態や背後地の段差等から船舶の係留・物資の荷役を安全に実施できるかという使用上の観点である。もう1つは、被災した係留施設自体が船舶の接岸や上載荷重に耐えられるかという構造上の観点である。

なお、使用可否の判定は、地震により被災した施設の復旧工事が開始されるまでの間の緊急物資輸送を行うための暫定的な判断基準である。本論文では、「暫定的に使用可」を「使用可」と表記している。

(2) 構造形式による判定方針について

係留施設は、構造形式によって重力式係船岸、矢板式係船岸（以下、重力式、矢板式）および栈橋に大別される（図-1）。

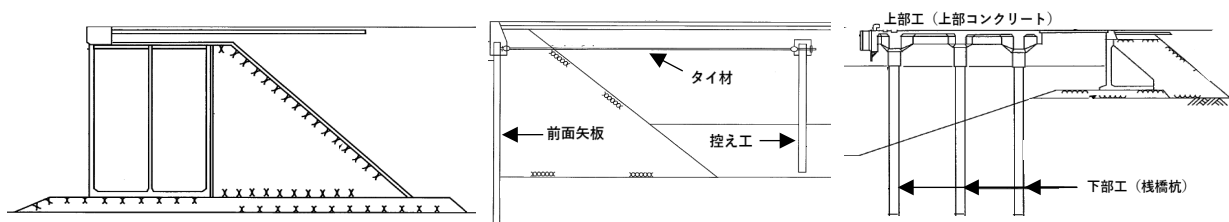


図-1 係留施設の構造概略図（左：重力式 中：矢板式 右：栈橋）

重力式においては、過去の被災事例より堤体自体の損傷が問題となった事例は報告されていない。従って、構造上の判定は行わず、使用上の観点による判断で十分であるとした。

一方、矢板式および栈橋は鋼材が主部材の鋼構造物であり、部材の損傷により構造上の安定が失われた事例が報告されている。そのため使用上の観点に加えて、部材の変形・損傷状態をふまえた構造上の観点から判定を行うこととした。

(3) 鋼構造施設における構造上の判定方針について

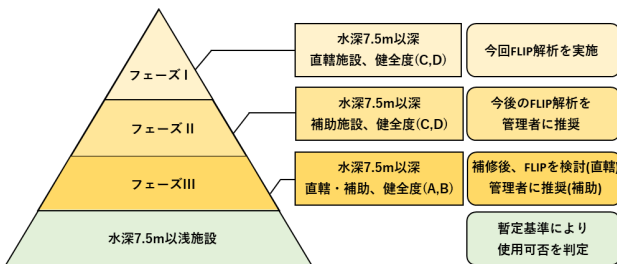
鋼構造施設の過去の被災事例の中には、鋼材が地中部や水中部で損傷しているものも報告されている。ゆえに、目視調査による鋼材の応力状態の評価は困難である。

このことを克服する方法として、対象施設の岸壁天端の残留水平変位量（以下、残留水平変位量）と部材の変形・損傷状態の関係を事前に整理しておき、被災後の残留水平変位量の調査結果から、部材の状態を把握できるようにしておくことが有効である。これらの関係を明らかにする手法に二次元有効応力解析（FLIP解析）がある。

FLIPは有限要素法に基づくプログラムであり、地震動による地盤や構造物の残留変形、構造部材の損傷状態といった施設の被災状況を推定できる解析手法である。また、複数の強さの地震動を作用させることにより耐震性能の低い部材から順に破壊される状況を把握することが可能である。

全ての鋼構造施設にFLIP解析を行うことは時間、コスト面で制約がある。そこで施設の健全度、港湾BCPの位置づけといった観点より地震時の緊急物資輸送での利用優先度を考慮し、施設規模、所有者、健全度を要素として施設を区分けた（図-2）。その中で、優先度の高いと判断したフェーズI期施設（水深7.5m以深かつ直轄施設かつ健全度C～D評価）に対し、FLIP解析を実施した。

FLIP解析を実施した施設は、解析結果より作成した残留水平変位量と鋼材応力の関係図から判定する。一方、FLIP解析を実施しない水深7.5m以深の施設は今後のFLIP解析の実施を検討、推奨するものとし、実施までは暫定基準を設定してそれを基に判定することとした。また、水深7.5m以浅施設については、暫定基準により判定する。



※健全度はDに行くほど劣化が少なく健全である

図-2 鋼構造施設の使用可否判定方針図

3. 判定手法

(1) 重力式の判定について

北陸地方整備局において設定されている使用可否判定基準¹⁾に準拠する。これは、過去の被災事例による経験則より判断するものである。

岸壁の凹凸変位量、岸壁の傾斜角に基づき、船舶が接岸可能な範囲で使用可とする。凹凸変位量0.5m以下、傾斜角5°以下を目安に判断する（図-3）。

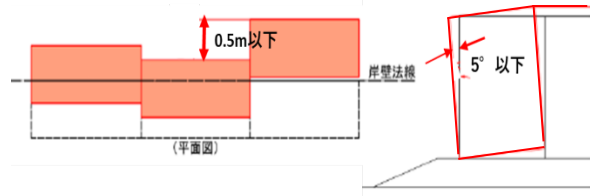


図-3 重力式における使用可否判定の概略図

(2) 鋼構造施設の判定基準について

矢板式において構造上使用可と判断するためには、前面矢板、控え工、タイ材の全てが構造上の安定を維持していることを確認する必要がある。

栈橋においては、下部工（栈橋杭）と上部工（上部コンクリート）について確認する。これらの判定基準（表-1）と表記載の語句定義を以下に示す。

$$\text{最大曲率比} = \frac{\text{発生最大曲率}}{\text{限界曲率}} \quad \text{タイ材力比} = \frac{\text{発生最大張力}}{\text{設計破断強度}}$$

$$\text{杭力比} = \frac{\text{発生最大軸力}}{\text{軸方向（押込or引抜）抵抗力}}$$

$$\text{設計耐力比} = \frac{\text{発生最大モーメント（せん断力）}}{\text{曲げ（せん断力）耐力}}$$

表-1 構造上の判断基準（上：矢板式 下：栈橋）

| 構造形式 | 判定基準（構造上の使用可否判定） | | |
|---------------------------------------|------------------|----------------|----------------|
| | 判定 | 判定条件 | |
| | | 前面矢板・控え工 | タイ材 |
| 矢板式 | 使用可 | ①地震時の最大曲率比<1.0 | ②地震時のタイ材力比<1.0 |
| | 使用不可 | ③地震時の最大曲率比≥1.0 | ④地震時のタイ材力比≥1.0 |
| ・使用可→①と②の両方を満足 ・使用不可→③と④の両方またはいずれかに該当 | | | |

| 構造形式 | 判定基準（構造上の使用可否判定） | | |
|---------------------------------------|------------------|--------------------------------|----------------|
| | 判定 | 判定条件 | |
| | | 下部工（栈橋杭） | 上部工（上部コンクリート） |
| 栈橋 | 使用可 | ①地震時にいずれの杭も最大曲率比<1.0かつ杭力比<1.0 | ②地震時の設計耐力比<1.0 |
| | 使用不可 | ③地震時にいずれかの杭が最大曲率比≥1.0かつ杭力比≥1.0 | ④地震時の設計耐力比≥1.0 |
| ・使用可→①と②の両方を満足 ・使用不可→③と④の両方またはいずれかに該当 | | | |

(3) 矢板式における変形モードについて

矢板式においては、前面矢板の天端が海側に傾斜する場合（変形モードA）と陸側に傾斜し、矢板中腹部がはらみ出す場合（変形モードB）がある（図-4）。

変形モードBでは、岸壁天端の変位が小さいにもかかわらず海中中部で矢板が損傷している恐れがあり、水平変位から応力状態を判断する事が難しい。FLIP解析よりモードBと想定されている施設については、傾斜角と前面矢板の最大曲率比の関係を整理している。現地点検よりモードBと推定された施設については、残留水平変位量と傾斜角の両方により使用可否判定を行う。

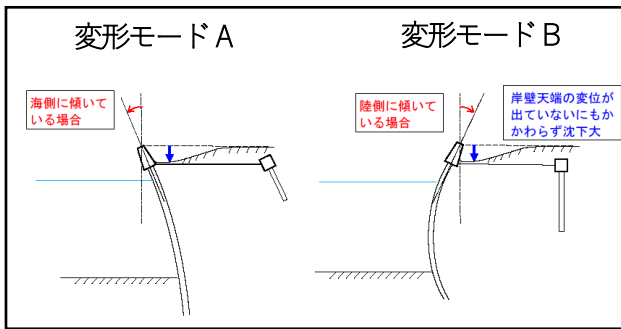


図-4 矢板式における変形モード

(4) 栈橋における上部工の判定について

FLIP解析より多くの場合において、小さな変位により下部工より先に上部工が設計耐力を超過してしまうことが判明した。

上部工は目視調査が可能であることから、上部工のみ判定基準を満足しなかった場合は、上部工下面の目視調査を行い、構造上問題となるような損傷の有無を確認することとした。

ひび割れや亀裂といった変状が認められなければ、使用可と判断する。これらが地震により生じたものか否かを判断できない場合は、ひび割れ等が認められた時点で使用不可と判断する。

(5) フェーズI施設の判定について

FLIP解析により作成した評価線を基に判定を行う。評価線は、FLIP解析を行い、地震動から残留水平変位量と最大曲率比（またはタイ材力比、杭力比、設計耐力比）の関係性を示した線である。評価線において、最大曲率比等が1.0を超過するときの残留水平変位量を閾値（超過した場合に使用不可と判断する値）とした。

判定条件に関わる各部材でそれぞれ評価線を作成しており、その中で残留水平変位量の閾値が最も小さいものと測定値を比較し、構造上の使用可否を判定する。矢板式の控え工の評価線を一例として図-5に示す。

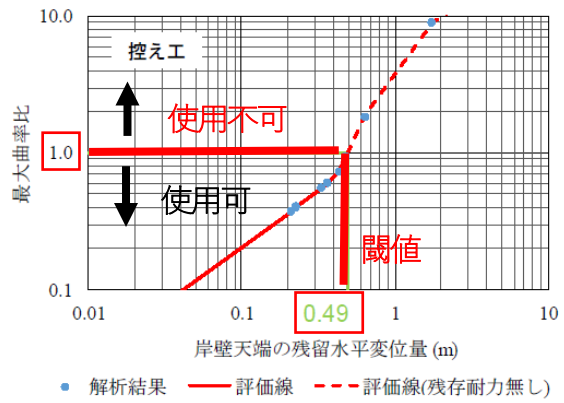


図-5 最大曲率比と残留水平変位量の評価線

(6) 矢板式（FLIP未実施施設）の判定について

今後、FLIP解析を実施して閾値を設定し、判定することを前提とする。実施までは下記の暫定的な判定手法により判断を行う。

水深7.5m以浅の施設については、残留水平変位量10cmを閾値として、使用可否の判定を行う。これは水産庁の検討結果²⁾に基づくものである。その中では控え工が直杭の矢板断面（水深2.1m, 4.1m, 5.1m）に対してFLIP解析が実施されている。変位量限界値10cmで実施したFLIP解析の結果より10cmを暫定基準の閾値とした。

フェーズIIおよびIII施設については、控え工の構造に依存して、15cm（控え組杭式）または35cm（控え直杭・控え矢板式）を閾値として判断する。

前者は、国総研が実施した控え組杭式矢板岸壁に対するFLIP結果³⁾に基づくものである。その中で、水深11m岸壁において変位量が15cm程度以下の範囲では、部材の安定性に余裕がある場合がほとんどであることが示されている。従って、15cmを暫定基準の閾値とした。

後者は長尾らが実施した控え直杭式矢板岸壁に対するFLIP解析の結果⁴⁾に基づいている。その中で、いずれの部材・ケースにおいても水平変位量が35cm時に部材の安定性が維持されることが示されている。従って、35cmを暫定基準の閾値とした。

(7) 栈橋（FLIP未実施施設）の判定について

矢板式と同様に今後、FLIP解析を実施して閾値を設定し、判定することを前提とする。

栈橋では、矢板式とは異なり閾値設定に適した先行研究結果がなかったため、栈橋杭が降伏に至る際の岸壁天端の変位量を簡易な構造計算により算出し、閾値とすることとした。計算の考え方の基本となる栈橋杭の簡易モデル化したものを次頁の図-6に示す。

栈橋杭の仮想固定点を固定端とし、それより上部が変形するモデルを考えた。この場合、端部（岸壁天端）が最大モーメントとなる。構造力学に関する公式において、最大モーメントを算出する式があり、それを変位量 δ_y に変換した式(1a)より閾値を設定することとした。

式(1a)の M_y については、式(2a)を用いて算出する。

本計算は、設計計算書に記載の数値を用いることで簡易に閾値を算出することができる。また、エクセル表を作成しており、設計計算書を基に必要な数値を入力することにより閾値の設定が可能となっている。

$$\delta_y = \frac{M_y \cdot l^2}{6EI} \quad (1a)$$

$$M_y = Z_e \left(\sigma_y - \frac{N}{A} \cdot \frac{1}{red} \right) \quad (2a)$$

δ_y : 降伏変位 (m) EI : 鋼材の曲げ剛性 (kN・m²)
 M_y : 鋼材の降伏モーメント (kN・m)
 l : 仮想固定点から岸壁天端までの長さ (m)
 Z_e : 鋼材の断面係数 (m³) σ_y : 鋼材の降伏応力 (kN/m²)
 N : 鋼材に作用する軸力 (kN) A : 鋼材の断面積 (m²)
 red : 軸方向圧縮応力度/ σ_y

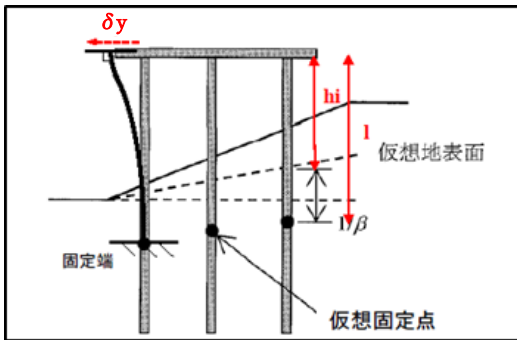


図-6 棧橋杭の簡易的モデル図

4. 発災時における点検・診断の考え方

(1) 施設点検診断の方針および概略フローについて

地震発生後の使用可否判定における行動フローの概略図を図-7に示す。施設点検が安全に行えることを確認した上で、現地点検を実施する。

現地点検では、係留施設の使用可否判定に必要な残留水平変位量や傾斜角の測定および目視調査等を実施し、点検記録を現地点検診断カルテにまとめる。

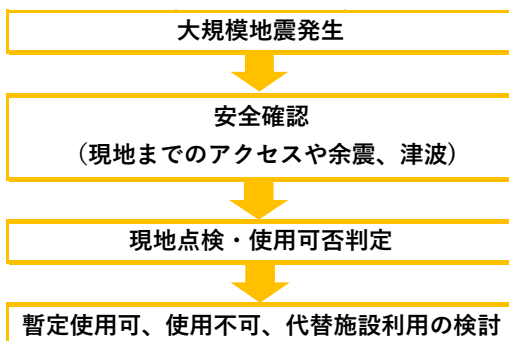


図-7 使用可否判定の行動フロー概略図

その後、調査結果から使用可否を判定し、点検施設の使用可否や代替施設の利用を検討する。

また、判定については全延長を通じて必要な範囲ごとに判定を行い、一部使用不可な状況においても使用可能な範囲があれば、その範囲は使用可とする。

(2) 目視による甚大な被害の確認について

現地点検診断の実施に際して、始めに施設全体を眺望し、甚大な被害が生じていないかを確認する。

甚大な被害とは、立ち入りが危険、大部分が崩壊しているなど一見で使用不可と判断できる大きな変状が発生していることである。この確認はいずれの構造形式においても実施する。

甚大な被害が生じている場合は使用不可と判断し、生じていなければ可否判定に必要なデータの測定に移行する。甚大な被害例を写真-1に示す。次項以降では各構造形式における点検フローについて記載する。



写真-1 甚大な被害の事例

(3) 重力式の現地点検について

図-3に示す判定基準より、凹凸変位量および傾斜角について計測する。凹凸変位量は、巻き尺やスケールを使用して隣接したブロックとの出入りを測定する。傾斜角は傾斜計を用いて測定する。

(4) 鋼構造施設（矢板式・棧橋）の現地点検について

岸壁天端の残留水平変位量を測定する。地震後残留変位計測システム (Berth Surveyor) を用い、岸壁上の予め設定しておいた測定点で計測し算出する⁹⁾。

また、矢板式においてFLIP解析でモードBと想定される施設では前面矢板傾斜角と残留水平変位量の両方で可否判定を行うことから前面矢板の陸側傾斜角も測定する。

傾斜角は初期値との比較によって傾斜方向と大きさを算出するので、予め傾斜角を測定しておく必要がある。

(5) Berth Surveyorによる残留水平変位量の測定について

鋼構造施設の使用可否判定では、残留水平変位量を正確に測定することが要求される。

本使用可否判定においては、RTK-GNSS測量技術を活用したシステムであるBerth Surveyorにより測定すること

を想定している。このシステムは、港湾空港技術研究所が開発したものである。係留施設背後に設けた基準点（基準局）と係留施設に設けた測定点（移動局）の相対的な位置関係を本システムに予め計測、記憶させておき、地震後の計測によって係留施設の残留水平変位量が自動的に計算されるものである。

現地においても残留水平変位量を確認することができるように専用のアプリケーションが開発されており、スマートフォンによりリアルタイムに正確な位置情報を取得することが可能となっている。基準局および移動局の設置イメージを写真-2および写真-3に示す。



写真-2 Berth Surveyor (基準局) 設置イメージ



写真-3 Berth Surveyor (移動局) 設置イメージ

(6) 目視による使用性の点検について

(3) または(4)の後、背後地の使用性や付帯設備（防舷材や係船柱）の損傷、施設前面の漂流物を確認し、船舶の接岸や荷役に支障がないかを点検する。

(2)～(4)の調査を行い、調査結果を現地点検診断カルテにとりまとめるまでを一連の点検フローとする。

最後に各構造形式における判定基準・現地点検フローをまとめた被災直後現地判定フローを示す（図-8～10）。

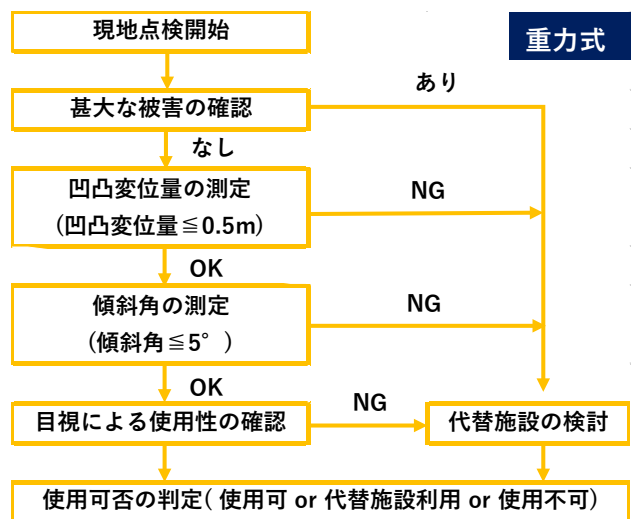


図-8 被災直後現地判定フロー概略図(重力式)

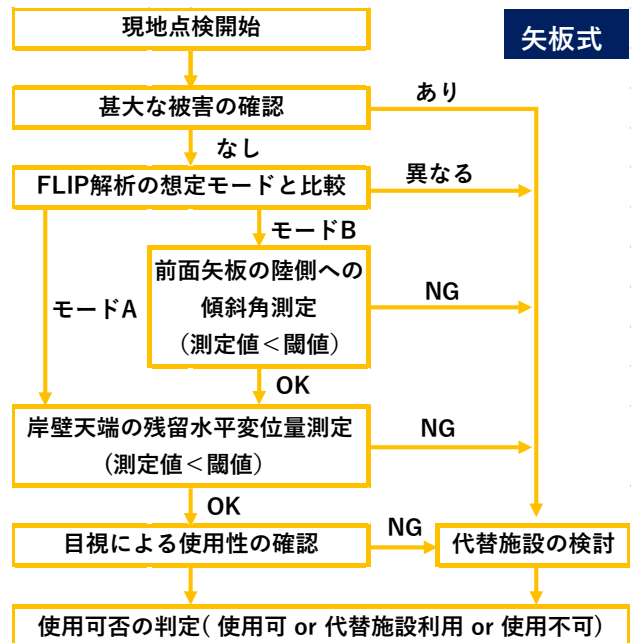


図-9 被災直後現地判定フロー概略図(矢板式)

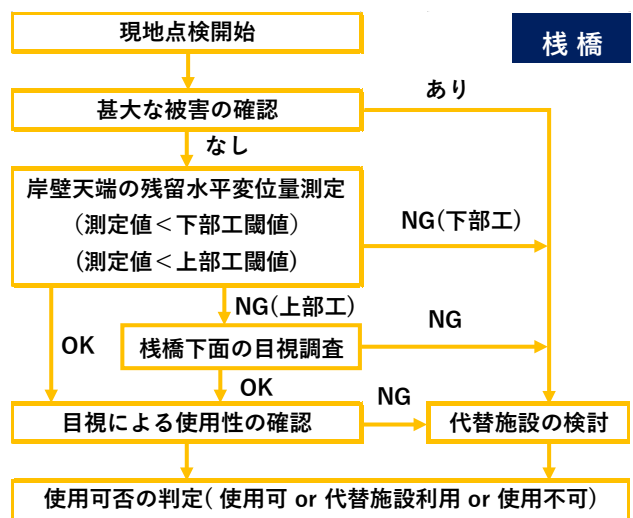


図-10 被災直後現地判定フロー概略図(栈橋)

5. 現地点検診断カルテについて

使用可否判定においては、診断施設の被災状況を適切に診断することが肝要である。しかしながら、診断者によっては、点検項目の見落としやどのような項目を調査しなければならないか十分に把握出来ていないために適切な診断が行われない事態が想定される。

適切な診断を可能とするために点検項目等を整理した現地点検診断カルテを作成した。カルテの一部を図-11に例示する。

図-11 現地診断カルテの一部資料
(栈橋・被災状況取りまとめカルテ)

6. 実施に向けた課題

本論文では、大規模地震時における係留施設の使用可否判定の手法および現地点検診断フローについて報告した。これらについては別途、使用可否判定手法マニュアル(案)および地震後係留施設点検マニュアル(案)としてまとめている。

しかしながら、本判定手法は近日取りまとめられたものであり災害時の活用実績がなく、実際に災害が生じた際に有効活用できるかといった課題がある。

この点については、今後の防災訓練等で実際に運用し、適宜ブラッシュアップしていくことが望まれる。

参考文献

- 1) 新潟港湾空港技術調査事務所：平成 28 年度港湾施設の設計等に関する技術支援業務報告書。
- 2) 水産基盤整備調査委託事業年度報告書：平成27年度漁港・漁場の施設の設計手法の高度化検討調査
- 3) 国土技術総合研究所資料 No.310：レベル1地震動に対する重力式および矢板式岸壁の耐震性能照査用震度の設定手法
- 4) 土木学会地震工学論文集(2005)：控え直杭式矢板式岸壁のレベル1地震動に対する性能規定化に関する研究
- 5) 港湾空港技術研究所資料 No.1370：RTK-GNSSを用い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