

# 強震計観測情報を活用した港湾施設診断システムの簡易判定評価について

海老名 正裕\*・恩田 充\*\*・村上 裕幸\*\*\*・高須 貴子\*\*\*\*・曾根 照人\*\*\*\*\*

\* (一財)沿岸技術研究センター 企画部 主任研究員

\*\* 前 国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所 所長

\*\*\* 国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所 技術課長

\*\*\*\* 前 国土交通省 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所 技術開発係長

\*\*\*\*\* 株式会社 ニュージェック 港湾・海岸グループ グループマネジャー

中部地方整備局で運用している強震計観測情報を活用した港湾施設診断システムについて、システムに組み込まれている簡易判定用の評価線の内、鋼管部材を有する施設の評価線を対象に「港湾の施設の技術上の基準(平成30年4月改定)」(以下、新基準という)に基づいた判定評価線に更新するとともに、新たな診断対象施設の追加及び管内港湾の診断結果を集約する機能の付加を行いシステムの拡充を図った。

キーワード：被害予測 FLIP プログラム 防災 設計基準改訂 耐震性能照査

## 1. はじめに

中部地整では管内7港湾の国有係留施設を対象として地震発生後に強震計で観測された地震動情報を活用し係留施設の供用可否判定を行うシステム(以下、施設診断システム)を構築している<sup>1)</sup>。施設診断システムでは、二次元有効応力地震応答解析FLIP(以下、FLIP解析)<sup>2)</sup>を用いて施設の供用可否判定を行っている。一方、平成30年4月改訂の港湾の施設の技術上の基準・同解説(以下、新基準)では、径厚比 $D/t$ (杭径/板厚)を考慮した鋼管の耐力特性が採用されている。そこで、鋼管を主部材とする栈橋式、矢板式係船岸のうち重要度の高い25施設を対象に新たなモデル化法でFLIP解析を行い、供用可否判定基準(以下、閾値)の更新を行うとともに、管内港湾の診断結果を集約する「Flip-Auto Summary システム」を追加した。

## 2. 施設診断システムの拡充

### 2.1. システムの概要<sup>3)</sup>

施設診断システムは、津波警報発令中あるいは、夜間等で現地調査が実施できない状況でも、地震発生直後に係留施設の供用可否判定ができるものである。システムの概要を図-1に示す。

### 2.2. 簡易判定について

既往の地震応答解析結果を基に、各施設において地震動の速度のPSI値と残留水平変位、鋼材の塑性率の関係をとりまとめ、瞬時に施設の地震後の状態を把握可能とし、供用可否判定ができるようにした(図-2、図-3参照)。また、通信回線不通時への対応として、震度階級による供用可否の判定もできるものとなっている。

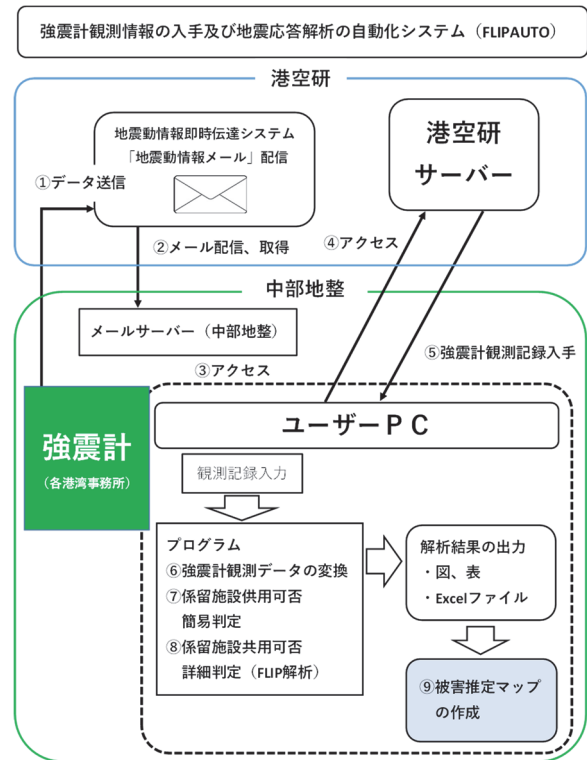


図-1 システムの概要

### 2.3. 評価線と供用可否判定基準 (閾値)

#### (1) 評価線の設定方法

地震応答解析結果から、速度のPSI値及び震度階級より施設の供用可否判定ができる評価線を設定する。この評価線を用いて瞬時に施設の地震後の状態を把握できる港湾施設診断システムを作成した。作成する評価線は、構造形式毎に表に示す項目とし、以下に示す設定方針とする。栈橋式の各応力状態の閾値は、有効数字2桁で設定する。施設によっては、最大曲率比が1を越えても、応力状態4の

施設が存在する。しかし、最大曲率比が大きくなると局部座屈が発生する等構造上の不具合が発生することにより上限を設けるべきである。本システムでは文献<sup>4)</sup>を参考に、応力状態4と応力状態5の閾値の上限は20に設定した。

- ・速度のPSI値に対する残留水平変位：すべての解析結果を包絡するかたちで設定する。
- ・速度のPSI値に対する残留傾斜角：すべての解析結果を崩落するかたちで設定する。
- ・速度のPSI値に対する最大曲率比，設計耐力比，力比：速度のPSI値を大きくしていったときに初めて値が閾値（例えば1.0）を超える点と値が閾値未満の点を結び、最大曲率比等の値が閾値となる速度までPSI値が工学的に判断して小さくなるように設定する。

計測震度と各項目：地震後に発表される震度階級によって供用可否判定ができるように、計測震度の値を0.5刻みに区切った階段状とし、すべての解析結果を包絡するかたちで設定する。なお、評価線は計測震度7.0間で設定することとし、解析結果で得られている最大の震度階級の値を計測震度7.0まで延長する形で設定する。

表-1 構造形式毎に設定する評価線

構造形式	評価線
重力式	・残留水平変位 ・残留傾斜角
矢板式	・残留水平変位 ・最大曲率比 <sup>※1</sup> ・控え組杭の力比 ・船舶接岸時の設計耐力比 <sup>※1</sup>
栈橋式(土留が重力式)	・残留水平変位 ・栈橋杭の最大曲率比 ・栈橋杭の力比 <sup>※2</sup> ・上部工の設計耐力比 ・栈橋杭の船舶接岸時の設計耐力比
栈橋式(土留が矢板式)	・残留水平変位 ・栈橋力の最大曲率比 ・栈橋杭の力比 <sup>※2</sup> ・上部工の最大曲率比 <sup>※1</sup> ・栈橋杭の船舶接岸時の設計耐力比

注) 最大曲率比=発生最大曲率/全塑性モーメント発生時の曲率

設計耐力比=発生最大断面力/設計耐力

杭の力比=発生最大軸力/地盤の破壊に基づく抵抗力の限界値

※1：矢板と控え工で供用可否判定に影響が大きい方を記載

※2：組杭の様に軸力が供用可否判定に影響する場合に記載

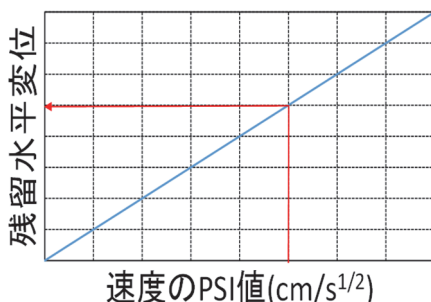


図-2 速度のPSI値と残留水平変位の関係

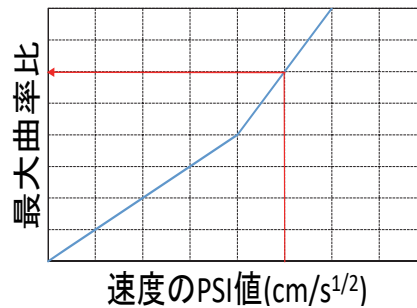


図-3 速度のPSI値と鋼材の塑性率の関係

## (2) 供用可否判定基準

判定結果の区分を以下に示す。

- ① 暫定供用可(長期)と判定される施設  
構造上の問題が無く、施設変状が供用に問題とならない場合は、数年程度供用できる施設(ただし、暴風時を除く)。
- ② 暫定供用可(短期)と判定される施設  
構造上に問題があるが、水平変位の進展が無いことを確認しながら供用できる施設(緊急物資輸送を想定)。
- ③ 暫定供用不可と判断される施設  
供用できない施設である。

## 2.3. 二次元地震応答解析プログラムの更新

### (1) 地震応答解析に係る検討方針

近年、杭式構造物では大径厚比 ( $D/t=100$  程度) の鋼管杭が採用されることが多くなってきている。しかし、径厚比が大きな鋼管杭は、断面計算から算定される全塑性モーメントに達する前に局部座屈が生じて耐力低下が起こる。このため非線形地震応答解析に用いる鋼管杭のモデル化は杭の径厚比を考慮して設定する必要がある。

径厚比に応じて軸圧縮方向の降伏応力を下式より低減する。

$$\sigma_y' = \sigma_y (0.86 + 5.4t/D) \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_y'$ ：低減後の降伏応力、 $\sigma_y$ ：降伏応力、 $t$ ：鋼管杭の肉厚、 $D$ ：鋼管杭の外径

新技術基準対応の二次元地震応答解析プログラムは、下式に示すとおり発生軸力による曲げ耐力の低減を考慮する際に、軸力比のべき乗数が入力できる FLIP ROSE Ver. 7.4.3 を用いた。

$$M_{\max} = M_{p0}' \left( 1 - \left( \frac{N}{N_{yc}'} \right)^n \right) \quad (2)$$

ここに、

$M_{\max}$ ：最大曲げ耐力

$M_{p0}'$ ：軸圧縮方向の降伏応力低減を考慮した軸力ゼロ時の全塑性モーメント

$N$ ：軸力

$N_{yc}'$ ：軸圧縮方向の降伏応力低減を考慮した降伏軸力

$n$ ：べき数(軸力依存性)

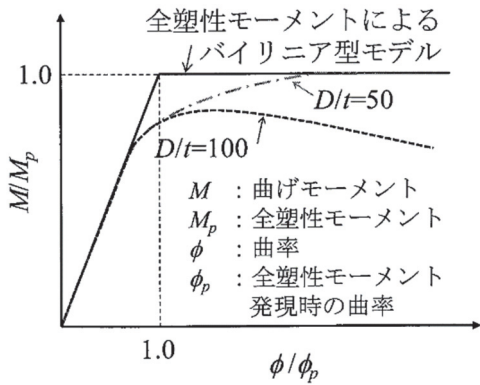


図-4 径厚比が異なる鋼管杭の耐力特性の概念図  
(新基準 下巻 p. 1953)

(2) 地震応答解析の実施

新基準に対応した二次元応答解析プログラムを使用し、診断システムに新たに追加登録する5施設、及び既に施設診断システムに登録されている13施設(表-2参照)の計18施設に対して新基準に基づき地震応答解析を実施し、簡易評定用の評価線の作成・更新を行った。地震動波形は、再現期間の異なる6波(再現期間50年, 75年, 100年, 150年, 200年, 500年), レベル2地震動4波程度(過去最大の地震, M6.5の直下型地震, 活断層地震, 南海トラフ巨大地震等)を対象とした。

表-2 鋼部材の照査方法の更新及び新たに追加する施設 (13施設)

港湾	地区	施設名称	構造形式	土留構造形式
清水	袖師	袖師11号岸壁	重力式	—
衣浦	中央西	西5号岸壁	直杭式栈橋	重力式
	中央東	東3号岸壁	控え版式矢板	—
名古屋	金城	金城56, 57号岸壁	直杭式栈橋	控え直杭式矢板
		金城58, 59号岸壁	控え直杭式矢板	—
		金城85号岸壁	控え版式矢板	—
	稲永	25号岸壁	セル式	—
弥富	W6号岸壁	直杭式栈橋	控え直杭式矢板	
四日市	四日市	第3ふ頭14号岸壁	セル式	—
	霞ヶ浦	南ふ頭22号岸壁	組杭式栈橋	重力式
		南ふ頭24号岸壁	直杭式栈橋	重力式
		南ふ頭25号岸壁	土留兼用直杭式栈橋	
		南ふ頭26号岸壁	直杭式栈橋	前方斜め杭式矢板

図-5に閾値となる速度のPSI値の新基準と旧基準の比率と径厚比D/tの関係を示す。閾値となる速度のPSI値の新基準と旧基準の比率は1.0を下回る施設が多く、径厚比D/tを考慮することで安全側の評価となる。径厚比D/tとの関係は、閾値の決定部材やクレーン荷重が変わった施設があるため、ばらついたと考えられる。

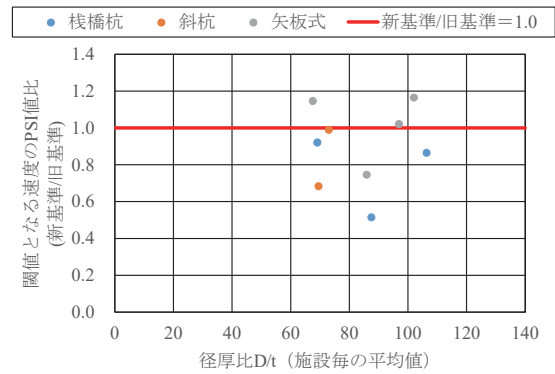
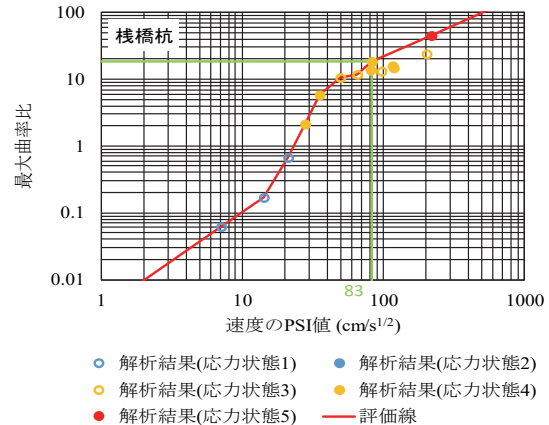


図-5 閾値となる新基準と旧基準の速度PSI値比と径厚比D/tの関係

(3) 名古屋港弥富地区W6号岸壁(-12m)

以下に、評価線の更新を行った施設の内、名古屋港弥富地区W6号岸壁(-12m)についての結果を示す。地震応答解析結果より、栈橋杭の応力比、矢板の最大曲率比、控え杭の最大曲率比、タイロッドの力比は全ての地震動で1.0未満であり供用可否判断に影響を与えないため、栈橋杭の最大曲率比を整理して地震中の鋼部材の評価を行った。速度のPSI値と栈橋杭の最大曲率比の関係を整理し、評価線を設定した結果を図-6に示す。栈橋杭の応力状態の閾値(最大曲率比)は、応力状態4(残存耐力有り)と応力状態5(残存耐力無し)の境界であり、解析結果として応力状態4の最大値(18.1)と設定した。この結果より、速度のPSI値が83(cm/s<sup>1/2</sup>)を上回ると残存耐力無しの状態となり、供用不可となる。なお、応力状態2と3の閾値は、速度のPSI値が23(cm/s<sup>1/2</sup>)の時である。

応力状態2, 応力状態3の閾値: 最大曲率比=1.0  
 応力状態4, 応力状態5の閾値: 最大曲率比=18.1



応力状態	説明
応力状態1	降伏未満
応力状態2	最大曲率耐力未満
応力状態3	ダブルヒンジ(杭1本につき2箇所以上で限界曲率に達している)が発生していない
応力状態4	ダブルヒンジとなっていない杭(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)が存在する
応力状態5	全ての杭がダブルヒンジ(杭1本につき2箇所以上、限界曲率に達している)

図-6 速度のPSI値と栈橋杭の最大曲率比

速度のPSI値と船舶接岸時の栈橋杭の設計耐力比の関係を整理し、評価線を設定した結果を図-7, 図-8に

示す。船舶接岸時の鋼部材の設計耐力比に関する整理は、安全側の供用可否判定ができる牽引時の栈橋杭の設計耐力比の評価線から設定する。設計耐力比が1.0となる速度のPSI値は21 (cm/s<sup>1/2</sup>)となり、暫定供用可(長期)と(短期)の閾値として設定する。

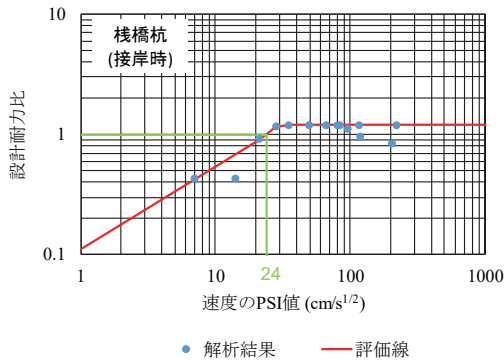


図-7 速度のPSI値と船舶接岸時の設計耐力比

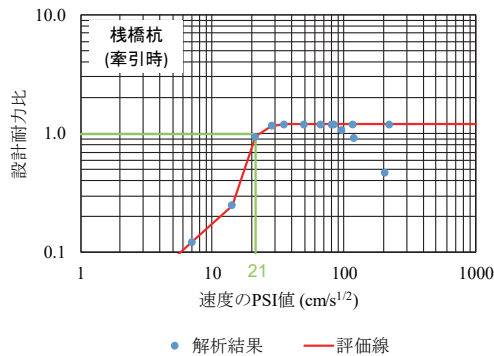


図-8 速度のPSI値と船舶牽引時の設計耐力比  
地震中の鋼部材の最大曲率比等に関する供用可否の閾値(速度のPSI値(83cm/s<sup>1/2</sup>)), 残留水平変位に関する供用可否の閾値(速度のPSI値(327cm/s<sup>1/2</sup>))より、供用可否の閾値を速度のPSI値を83cm/s<sup>1/2</sup>と設定した。また、速度のPSI値と栈橋杭の設計耐力比の関係より設計耐力比が1.0となる速度のPSI値は21cm/s<sup>1/2</sup>となり、暫定供用可(長期)と(短期)の閾値として設定した。速度のPSI値と岸壁残留水平変位の関係に供用可否の範囲を付記したものを図-9に示す。

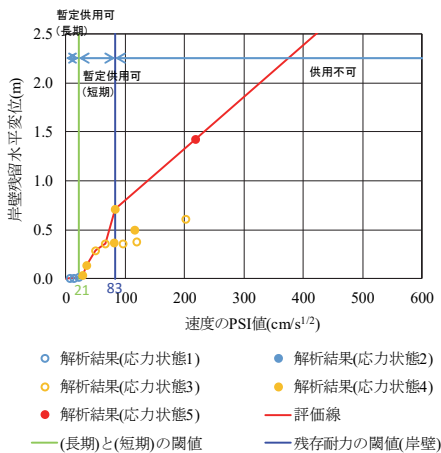


図-9 速度のPSI値と岸壁残留水平変位、供用可否

## 2.4. プログラム修正

### (1) 簡易判定用の評価線の追加・更新

2.3(2)で作成した簡易判定用の評価線を施設診断システムに追加・更新した。併せて、詳細判定の優先度等の見直し・検討を行った。本業務で評価線を追加・更新した施設を含め、施設診断システムで対象とする施設数は表-3に示す通りである。

表-3 施設診断システム対象施設数

	施設診断システム対象施設数	
	H30d版	今年度版
簡易判定	53施設	61施設
詳細判定	51施設	59施設

### (2) 診断結果の自動集約等の機能追加

全港湾の施設診断システムによる判定結果を集約するシステム機能「FlipAuto Summaryシステム」を導入した。このシステムは、従来の施設診断システム「Flip Auto」と独立したシステムで、気象庁サーバーから地震情報を取得してデータベース上に情報蓄積し、施設診断システムの診断結果およびその地震情報を気象庁の地震情報と紐づけを行い地震情報と診断結果を集約するシステムである(図-10)。集約結果資料は、「簡易判定」、「詳細判定」、「現地判定」の各終了段階で作成され、図-11に示すようにpptxファイル上の所定箇所を地震情報および診断結果で埋めるようにして自動作成する。

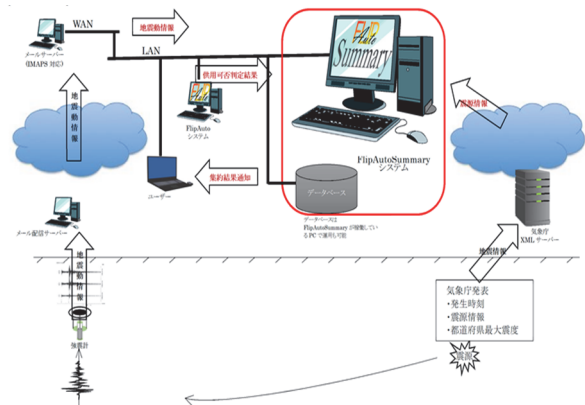


図-10 全体概要図

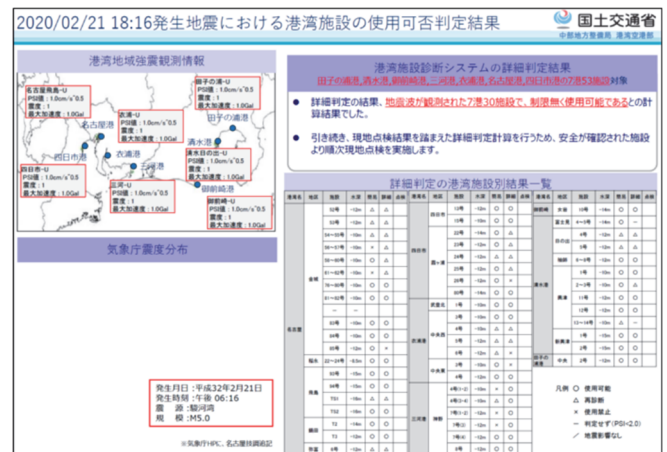


図-11 出力ファイル例：詳細判定集約後

### 3. 今後の課題等

#### 3.1 新基準に対応した施設診断システム対象施設の更新及び追加

新基準対応への更新の観点では、径厚比  $D/t$  が大きな施設は、旧基準による評価線による判断基準と同等あるいは下がる傾向にあることから、新基準対応への更新を行う施設は、径厚比  $D/t$  が大きな施設を優先的に選定することが望ましいと考えられる。

#### 3.2 強震計が未設置の地区に位置する施設への対応

将来的に施設診断システムへの登録が検討されている施設のうち、三河港蒲郡地区蒲郡ふ頭9号岸壁が位置する地域には、港湾地域強震観測網に組み込まれている強震計がないため、現状のままでは施設診断システムでの診断ができない。そこで、四日市港において導入されているように、同じ港湾内でサイト特性が異なる場合、一方の地点の強震計で観測された地震動をもう一方の地点(強震計が未設置の地点)のサイト特性に置き換えて地震動を推定する方法の採用が必要である。そのような施設をシステムに組み込む場合には、予め「各地点のサイト特性」および「推定地点の地盤条件」を収集しておく必要がある。

#### 謝辞

本稿は、国土交通省中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所発注の「平成31年度 施設診断システム簡易判定評価線更新検討業務」での成果の一部をまとめたものである。本業務の検討にあたっては、海上・港湾・航空技術研究所 地震防災研究領域 耐震構造研究グループ小濱グループ長、大矢主任研究官、伊藤研究官、整備局関係者から貴重なご意見・ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 曾根照人, 宇野健司, 淵ノ上篤史, 山本芳生: 強震計観測情報を用いた係留施設の供用可否判定システムの開発, 地盤工学会誌Vol. 64, No. 7, pp. 16~19, 2016.
- 2) Susumu Iai, Yasuo Matsunaga, Tomohiro Kameoka: Space Plasticity Model for Cyclic Mobility, Report of Harbour Research Institute, Vol. 27, No. 4, pp. 27-56, 1990.
- 3) 山本芳生, 白井博己, 宇野健司, 鷺見直子, 曾根照人: 強震計観測情報を用いた係留施設の健全度判定手法について, 沿岸技術研究センター論文集, No. 15(2015)
- 4) 長尾毅, 田川辰也, 西村大司, 木全啓介, 曾根照人, 楠謙吾: 栈橋構造の残留水平変位と応力状態の関係について, 第64回土木学会年次学術講演会, II-96, 2009

