

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

山本 芳生*・白井 博己**・宇野 健司***・鷺見 直子****・曾根 照人*****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員
 ** 前 (一財) 沿岸技術研究センター 調査役

*** 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 調査課長

**** 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 技術開発係長

***** (株) ニュージェック 港湾・海岸グループ グループマネジャー

本報告は、独立行政法人(現、国立研究開発法人)港湾空港技術研究所(以下、港空研)の「地震動情報即時伝達システム」から配信される地震動の実測波形等を活用し、即時的に中部地方整備局管内の直轄耐震強化岸壁の地震応答解析の実施及び供用可否判定が可能となる被害度の推定手法の検討を行ったものである。

検討結果より「地震動情報即時伝達システム」から配信されるメール取得から自動で供用可否判定結果が出力できるシステムを構築した。システムにおける係留施設供用可否判定は、FLIPを用いた詳細判定と、予め設定した評価値を用いて瞬時に判断できる簡易判定の2つを採用した。

キーワード：強震計，係留施設，地震，健全度評価，FLIP

1. 概要

本報告は、地震発生直後に港空研より配信される地震動の実測波形等を利用して、中部地方整備局管内の直轄係留施設について、発生した地震に対して即時的に施設の健全性を判断し、地震後の港湾施設の復旧活動に役立てることを目的とした検討を行ったものである。

2. システムの概要

地震発生後から、係留施設の供用可否判定の流れを図-1に示す。作成した方法(システム)は、津波警報等の発令中或いは、夜間等で現地調査が実施できない状況でも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-2に示す。

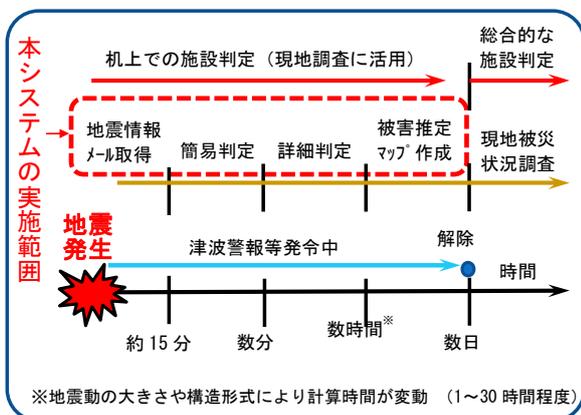


図-1 係留施設の供用可否判定の流れ

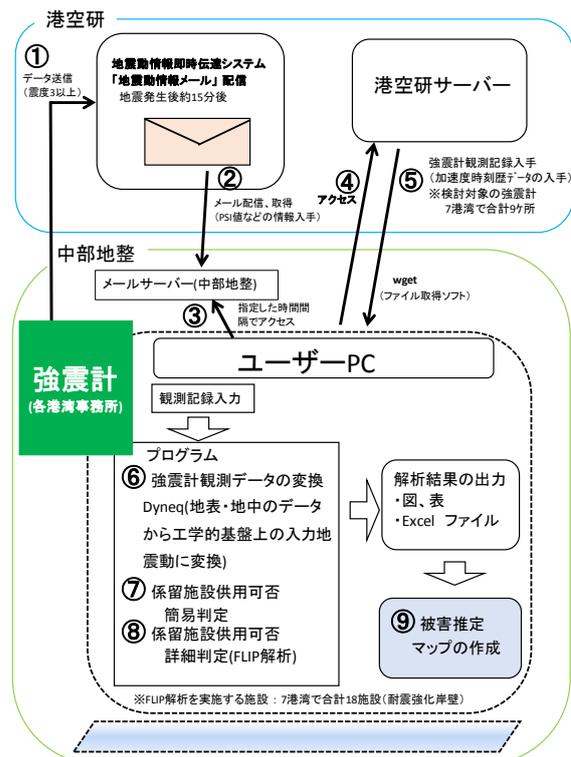


図-2 システムの概要

3. 対象施設

3.1 対象の強震計

対象の強震計を表-1に示す。同一地点で地表と地中双方に設置されている地点については、工学的基

盤上の地震動に変換する際、より精度が高い結果であった、地中の強震計を対象とする。

表-1 検討対象の強震計

港湾名	地点名	設置位置
田子の浦港	田子の浦	地表
清水港	新興津	地中 クレーン上部
	興津	地中
	清水日の出	地表
御前崎港	御前崎	地中
三河港	三河	地中
衣浦港	衣浦	地中
名古屋港	名古屋飛島	地中 クレーン上部
四日市港	霞ヶ浦	地表

3.2 対象の岸壁とクレーン

検討対象の岸壁は、主に中部管内の直轄耐震強化岸壁と鋼部材を使用する構造形式の矢板式及び栈橋式の岸壁とした。耐震強化岸壁については、詳細法 (FLIP を用いた方法) と簡易法 (評価線を用いた方法) の双方が実施できる。なお、クレーン本体に強震計が設置されている施設については、強震計の観測波形で得られる最大加速度と、設計震度及び浮き上がり限界加速度を比較することにより、クレーンの供用可否を判定できるものとした。施設一覧を表-2 に示す。

表-2 検討対象施設一覧表

港湾	地区	施設名称	計画水深	施設延長 (m)	完成年次	構造形式	土留構造形式	施設の種類	強震計 (岸壁照査)	強震計 (クレーン照査)	
田子の浦	中央ふ頭	中央ふ頭岸壁(-12m)	-12.0m	240.0m	2011	栈橋式(JKT)	矢板式(JKT一体構造)	耐震(緊急物資)	田子の浦-U	-	
清水	富士見	富士見4号,5号岸壁(-12m)	-12.0m	480.0m	1990	栈橋式	矢板式	-	清水日の出-U	-	
		日の出4号岸壁(-12m)	-12.0m	240.0m	1986	栈橋式	重力式	耐震(緊急物資)		-	
		日の出5号岸壁(-12m)	-12.0m	240.0m	1986	栈橋式	重力式	耐震(緊急物資)		-	
	興津	興津1号岸壁(-10m)	-10.0m	185.0m	1984	矢板式	-	耐震(緊急物資)	興津-UB	-	
		興津2号,3号岸壁(-10m)	-10.0m	371.0m	1965	栈橋式	重力式(ブロック積み)	耐震(緊急物資)			
		興津11号岸壁(-12m)	-12.0m	220.0m	1973	重力式	-	耐震(緊急物資)			
		興津12号岸壁(-12m)	-12.0m	220.0m	1973	重力式	-	耐震(緊急物資)			
		興津13号,14号岸壁(-10m)	-10.0m	370.0m	1967	栈橋式	重力式(ブロック積み)	-			
	新興津	新興津1号岸壁(-15m)	-15.0m	350.0m	2003	重力式	-	耐震(幹線貨物) コンテナベース	新興津-UB	新興津-UR1 新興津-UR2	
		新興津2号岸壁(-15m)	-15.0m	350.0m		重力式	-	耐震(幹線貨物) コンテナベース			
御前崎港	女岩	西埠頭 10号岸壁(-14m)	-14.0m	280.0m	2003	重力式	-	耐震(緊急物資) コンテナベース	御前崎-UB	-	
三河	神野	神野4号岸壁(-10m)	-10.0m	185.0m	1978	矢板式	-	-	三河-UB	-	
		神野7号岸壁(-12m)	-12.0m	240.0m	1983.88	重力式	-	耐震(緊急物資)			
衣浦	中央西	西3号岸壁(-10m)	-10.0m	185.0m	1970	栈橋式(JKT)	重力式	耐震(緊急物資)	衣浦-UB	-	
		西4号岸壁(-10m)	-10.0m	185.0m	1970	栈橋式	重力式	-			
		西5号岸壁(-12m)	-12.0m	240.0m	1978	栈橋式	重力式	-			
		西6号岸壁(-12m)	-12.0m	240.0m	1978	栈橋式	重力式	-			
	中央東	東4号岸壁(-12m)	-12.0m	240.0m	1983	矢板式	-	耐震(緊急物資)			
名古屋	金城	52号岸壁	-12.0m	247.0m	1973	栈橋式	矢板式	-	名古屋飛島-UB	-	
		53号岸壁	-12.0m	250.0m	1973	栈橋式	矢板式	-			
		54号,55号岸壁	-10.0m	400.0m	1980	栈橋式	矢板式	-			
		56号,57号岸壁	-10.0m	400.0m	1986	栈橋式	矢板式	-			
		58号,59号,60号岸壁	-10.0m	600.0m	1984	矢板式	-	-			
		61号,62号岸壁	-10.0m	400.0m	1983	矢板式	-	-			
		63号,64号岸壁	-10.0m	400.0m	1979	矢板式	-	-			
		65号,66号,67号岸壁	-10.0m	600.0m	1973	矢板式	-	-			
		83号岸壁	-10.0m	200.0m	1972	矢板式	-	-			
		84号岸壁	-10.0m	200.0m	1972	矢板式	-	-			
	飛島	85号岸壁	-12.0m	240.0m	1972	矢板式	-	-			
		93号岸壁	-15.0m	350.0m	1996	栈橋式	重力式	コンテナベース			
		94号岸壁	-15.0m	350.0m	1990	栈橋式	重力式	コンテナベース			
		TS1岸壁(-16m)	-16.0m	350.0m	2005	栈橋式(JKT)	矢板式	耐震(幹線貨物) コンテナベース			
		TS2岸壁(-16m)	-16.0m	350.0m		栈橋式(JKT)	矢板式	耐震(幹線貨物) コンテナベース			
		鍋田	T2岸壁(-14m)	-14.0m	350.0m	2002	栈橋式	矢板式			耐震(幹線貨物) コンテナベース
			T3岸壁(-12m)	-12.0m	250.0m		栈橋式	矢板式			耐震(幹線貨物) コンテナベース
弥富	W6号岸壁(-12m)	-12.0m	240.0m	2002	栈橋式	矢板式	-				
四日市	霞ヶ浦	第2ふ頭13号岸壁(-12m)	-12.0m	245.0m	1969	矢板式	-	-	四日市-U	-	
		22号岸壁(-14m)	-14.0m	280.0m	1988	栈橋式	重力式	-			
		23号岸壁(-12m)	-12.0m	240.0m	2001	栈橋式	重力式	耐震(緊急物資)			
		24号岸壁(-12m)	-12.0m	240.0m	1982	栈橋式	重力式	-			
		25号岸壁(-12m)	-12.0m	240.0m	1976	栈橋式	矢板式(栈橋一体構造)	-			
		26号岸壁(-12m)	-12.0m	240.0m	1995	栈橋式	矢板式	-			
		80号岸壁(-14m)	-14.0m	330.0m	2002	栈橋式	重力式	コンテナベース			

簡易判定のみ 55施設
 簡易判定と詳細判定 (FLIP) 18施設

4. システムによる出力結果

4.1 強震計観測データの変換

強震計観測データを工学的基盤上の地震動(2E成分)に変換する。変換手法は、等価線形解析法に各周波数成分のひずみに応じたせん断剛性、減衰定数を設定できるDYNEQを用いた。変換した波形は、各施設で法線直角方向成分の波形に方向転換した。また、工学的基盤における速度のPSI値を算定した。

2E成分は、入射波の2倍を表し、工学的基盤での設計用地震動は全てこの2E成分で作成されているものである。速度のPSI値は地震動の強さを表す指標の一つであり、岸壁の地震時変形量との相関が高い。

4.2 簡易判定

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、鋼材の塑性率として最大曲率比(発生最大曲率/全塑性モーメント発生時の曲率)の関係を図-3、図-4に示すようにとりまとめ、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ものである。また、通信回線が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した。

簡易判定の出力結果の一例を図-5に示す。

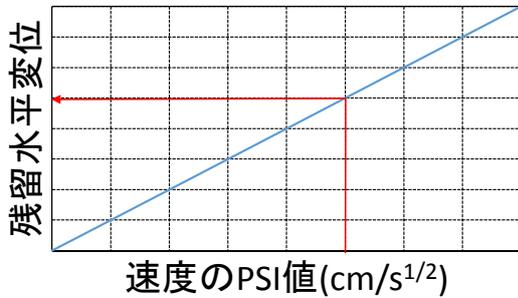


図-3 速度のPSI値と残留水平変位の関係

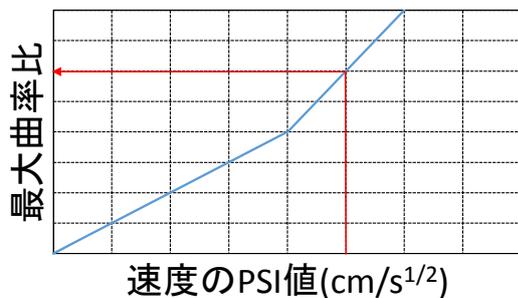
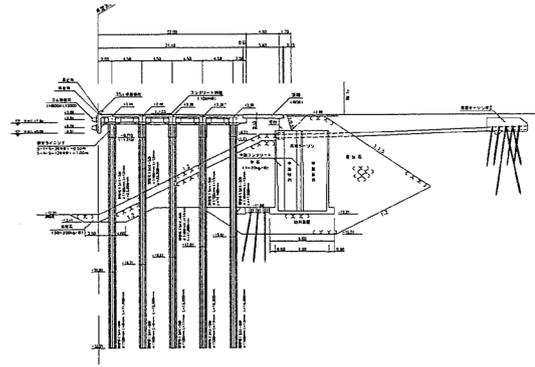


図-4 速度のPSI値と鋼材の塑性率の関係



速度のPSI値を用いた簡易判定

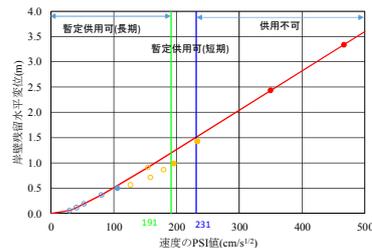
工学的基盤における速度のPSI値(cm/s ^{1/2})	90.0	
残留水平変位(岸壁)	0.44m	
残留水平変位(土留め)	0.49m	
地震中の設計耐力比(上部工コンクリート)	1.60	目視調査が必要
地震中の最大曲率比(栈橋杭)	0.82	全塑性未滿
船舶接岸時の作用耐力比(栈橋杭)	0.65	発生応力は降伏未滿
供用可否判断	上部工の目視調査が良好な場合は、暫定供用可(長期)	

対象船舶: 40,000DWT

計測震度を用いた簡易判定(速度のPSI値が得られない場合等に実施することができる。判定の精度は速度のPSI値を用いた方法には劣る。)

震度階級	5強	
残留水平変位(岸壁)	0.12m	
残留水平変位(土留め)	0.12m	
地震中の設計耐力比(上部工コンクリート)	0.97	設計耐力以下
地震中の最大曲率比(栈橋杭)	0.37	全塑性未滿
船舶接岸時の作用耐力比(栈橋杭)	0.19	発生応力は降伏未滿
供用可否判断	暫定供用可(長期)	

対象船舶: 40,000DWT



左記グラフの閾値は、整数(少数以下切り捨て)で記載しているが、上記の簡易判定では、評価線を数式で評価している。そのため、閾値付近では、簡易判定結果とグラフの数値に差異が生じる場合があるが、簡易判定結果を真値とする。

○ 解析結果(応力状態1)	● 解析結果(応力状態2)
● 解析結果(応力状態3)	● 解析結果(応力状態4)
● 解析結果(応力状態5)	— 評価線
— 残存耐力の閾値	— 暫定供用可(長期)と(短期)の閾値

応力状態	説明
応力状態1	降伏以下
応力状態2	全塑性以下
応力状態3	ダブルヘンジが発生しない
応力状態4	ダブルヘンジとなっていない杭が存在する
応力状態5	全ての杭がダブルヘンジ

図-5 簡易判定結果出力例

また、判定結果の区分を下記に示す。

① 暫定供用可(長期)と判定される施設

地震による変状はあるが、供用中(暴風時を除く)に発生する断面力は、設計耐力以下であり構造

上の問題が無い。そのため、施設変状が供用に問題とならなければそのまま数年程度供用できる。

② 暫定供用可(短期)と判定される施設

地震中に発生する最大断面力は、耐震強化施設(標準)緊急物資輸送対応の要求性能(例えば、発生する最大モーメントが全塑性モーメント以下)を満足できているが、地震後の残留状態あるいは、船舶の接岸・牽引時に発生する断面力が設計耐力(例えば、降伏応力)を上回っており構造上の問題がある。そのため、施設の供用においては、船舶の接岸・牽引時に岸壁天端の変形が進展しないことを確認しながら供用する施設である。

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。

4.3 詳細判定

既存の地震応答解析 (FLIP) モデルを使用して地震発生後一定期間内(概ね 1 日以内)に、係留施設の供用可否判定が可能となる地震応答解析結果を出力するものである。出力項目を以下に示す。

1) 岸壁・護岸の天端変位

天端の変位について、地震時の最大量と残留量を一覧表にて表示する。

2) 2点間の相対変位

栈橋式については、栈橋と背面護岸との相対変位について、地震時の最大量と残留量を一覧表にて表示する。また、コンテナクレーンが配置されている岸壁については、クレーン基礎 2 点間の相対変位について、地震時の最大量と残留量を一覧表にて表示する。なお、設計におけるクレーン基礎間の相対変位の許容値は、0.3~0.7m である。

3) コンテナクレーンに対する照査結果

クレーンの浮き上がり限界加速度及び設計震度に対して照査した結果を一覧表にて表示する。

表-3 に結果一覧の例を示す。

表-3 コンテナクレーン照査結果例

応答加速度 (Gal)	145.55
浮き上がり 限界加速度 (Gal)	175.00
設計震度	0.20
判定	浮き上がらない 応答値は設計震度以上

4) 鋼管杭・鋼管矢板に対する照査結果

押込み力、引抜き力、最大曲率比を一覧表にて表示する。

5) タイロッドに対する照査結果

発生最大引張力と最大抵抗力により判定結果を一覧表にて表示する。

6) 残留変形図

FLIP 解析の結果より、岸壁・護岸の残留変形図を表示する。

7) せん断ひずみの最大値分布図

FLIP 解析の結果より、岸壁・護岸の周辺地盤のせん断ひずみの最大値分布図を表示する。

8) 過剰間隙水圧比の最大値分布図

FLIP 解析の結果より、岸壁・護岸の周辺地盤の過剰間隙水圧比の最大値分布図を表示する。

9) 岸壁・護岸天端での応答波形

FLIP 解析の結果より、岸壁・護岸天端における水平変位、鉛直変位、水平加速度及び鉛直加速度の波形を表示する。

10) クレーン位置での応答波形

クレーン重心位置での応答水平加速度の波形を表示する。

11) 2点間の相対変位波形

栈橋式については、栈橋と背面護岸との相対変位について、その波形を表示する。また、コンテナクレーンが配置されている岸壁については、クレーン基礎 2 点間の相対変位について、その波形を表示する。

12) 鋼管杭・鋼管矢板に対する照査結果

鋼管杭、鋼管矢板及び控え杭については、モーメント比(発生モーメント/全塑性モーメント)の最大値、曲率比(発生曲率/全塑性モーメント発生時の曲率)の最大値、曲率比が最大となる時刻でのモーメントの深度分布図を表示する。

5. 総合的な取りまとめ

係留施設供用可否判定システムにより出力される供用可否判定及び残留水平変位を港湾ごとに地図上に記載した被害推定マップを作成した。

この被害推定は、現地で優先的に被害状況を確認する作業を実施する際の有効な判断材料として用いることができるものである。

謝辞

本報告は、中部地方整備局名古屋港湾空港調査事務所発注の「平成 26 年度 強震計観測情報の活用方策検討業務」の成果を取りまとめたものである。同業務において実施した検討会にて委員を務めていただいた、広島大学大学院 一井准教授、国土技術政策総合研究所 宮田港湾施設研究室長、港湾空港技術研究所 野津地震防災研究領域長、小濱耐震構造研究チームリーダーをはじめとする、関係各位の皆様に感謝する次第である。