

国内初！強震計観測情報を活用した港湾施設 診断システムの開発 ～地震時初動体制支援の新たな取り組み～

淵ノ上篤史¹

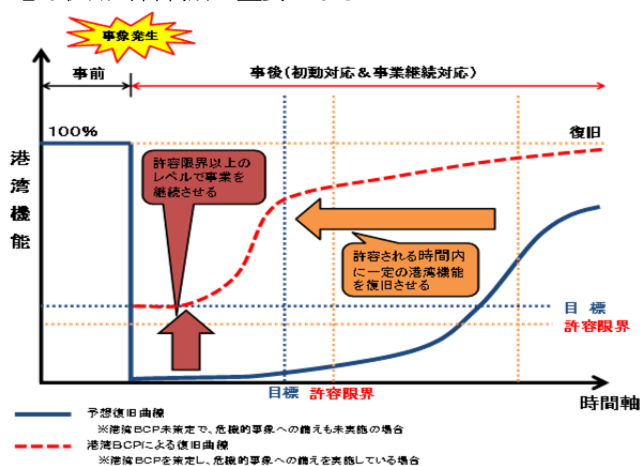
¹名古屋港湾空港技術調査事務所 調査課（〒457-0833 名古屋市南区東又兵ヱ町1-57-3）

全国に先駆けて「強震計観測情報を活用した港湾施設診断システム」を開発した。このシステムは、地震発生時に強震計で観測された地震動情報を用いて係留施設（岸壁）の供用可否判定を行い、判定結果を基に被害推定マップを作成するものである。供用可否判定は、簡易判定と詳細判定の二通りの判定手法を備えており、地震動情報の入手から判定まで全て自動計算される。作成された被害推定マップは、現地の被災状況調査箇所の選定に活用でき、発災後の初動体制を支援する有効なツールとなる。

キーワード：大規模地震、強震計観測情報、係留施設の供用可否、初動体制支援

1. はじめに

中部地方では、今後30年以内の発生確率が極めて高いと想定される南海トラフを震源とする巨大地震による甚大な被害が懸念されている。このような大規模地震が発生した場合、港湾施設は被災地への緊急物資輸送の拠点として重要な役割が期待されている。また、図-1に示すような港湾背後圏の経済活動をいち早く回復させることを目的として、港湾BCP（事業継続計画）の作成も進められ、港湾機能を早期に復旧させる必要がある。そのため、地震発生後の港湾施設、特に係留施設（岸壁）の早急な供用可否判断が重要となる。



一方で、地震後に津波警報・注意報が発令された場合は、解除されるまで沿岸域への立ち入りが出来ないことや、夜間に地震が発生した場合など、現地調査に入るまで数時間～数十時間程度要することも想定され、岸壁の供用可否判断に時間を要する可能性がある。

そこで、中部地方整備局管内7港湾の国有港湾施設を対象に、地震発生後に臨海部に設置された強震計で観測された地震動情報を活用することにより、短時間で岸壁の供用可否判定を行うシステム「強震計観測情報を活用した港湾施設診断システム」（以下、「港湾施設診断システム」）を構築した。本論では、港湾施設診断システムの主な開発項目とシステムの稼働実績を取りまとめるとともに、今後の取り組みについて報告する。

2. 港湾施設診断システムの概要

(1) 港湾施設診断システムの地震後の時間的流れと構成

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（以下、「港空研」）では、全国の港湾に設置された強震計（港湾地域強震観測網）で観測された地震動情報をメール配信する「地震動情報即時伝達システム」を構築している。このシステムは地震発生後約15分以内にPSI値、計測震度相当値、最大加速度の観測情報をメールにて配信するものであり、メール画面の最下段には港空研サーバーにおける地震動波形データの在

処が記載されている。(図-2)

この「地震動情報即時伝達システム」と連携することで、短時間に岸壁の供用可否判定を行う港湾施設診断システムを開発した。

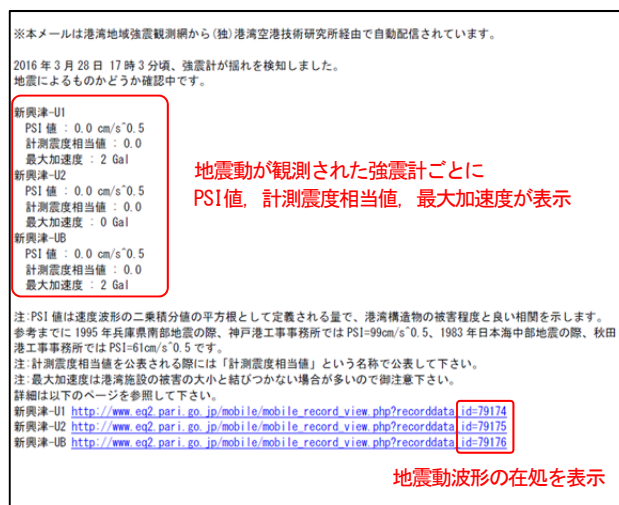


図-2 地震動情報即時伝達システムの配信メール

なお、速度のPSI値とは、野津ら²⁾により式(1)で定義され、地震動の速度の二乗値を、時間方向に積分して平方根を計算した値であり、港湾構造物の被災程度と相関が高い地震動指標の一つである。

$$\text{速度の PSI 値} = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} v^2(t) dt} \quad (1)$$

開発した港湾施設診断システムは、「地震動情報即時伝達システム」からのメール受信をトリガーとして、地震動波形データの入手から岸壁の供用可否判定、被害推定マップの作成までを自動処理で行うことを可能とした。このため、津波警報・注意報の発令中や夜間等で現地確認が困難な状況でも岸壁の供用可否を早期に判定できる。その時間的な流れの関係を地震発生後の経過時間と対比して図-3に示す。また、システム構成の概要を図-4に示す。

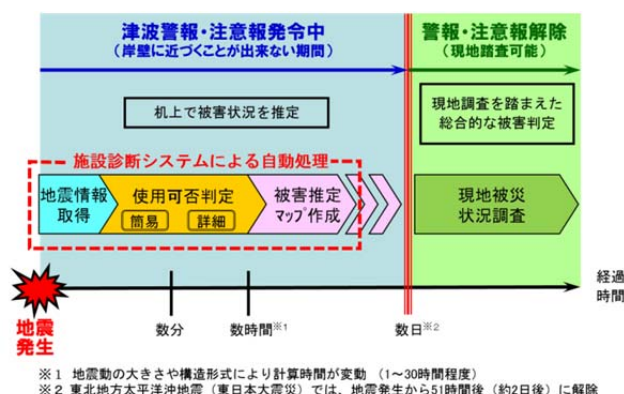


図-3 システムの供用可否判定の流れ

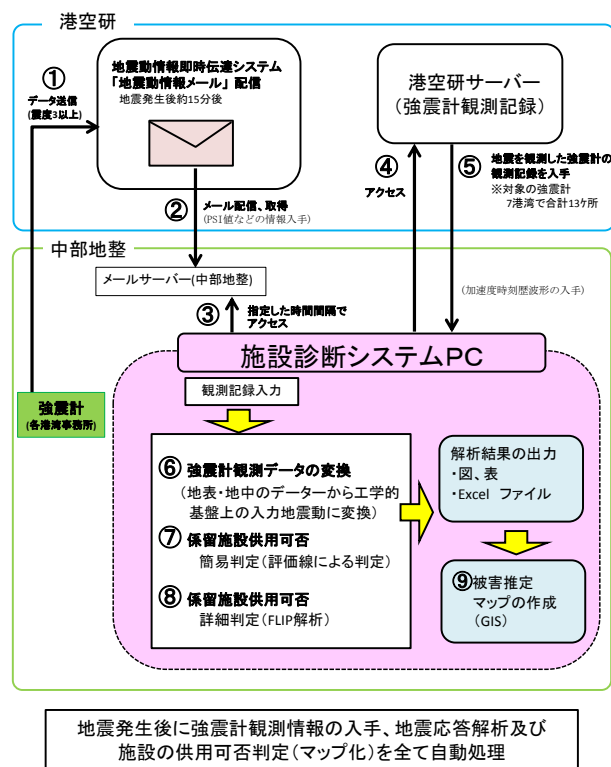


図-4 システム構成の概要

(2) 対象の強震計と対象施設

港湾施設診断システムで対象とする強震計は、中部地方整備局管内7港湾にある13箇所の強震計とした。また、対象施設は国有港湾施設のうち、主に耐震強化施設とコンテナバース（矢板式係船岸、栈橋式係船岸および重力式係船岸）の計50施設とした。

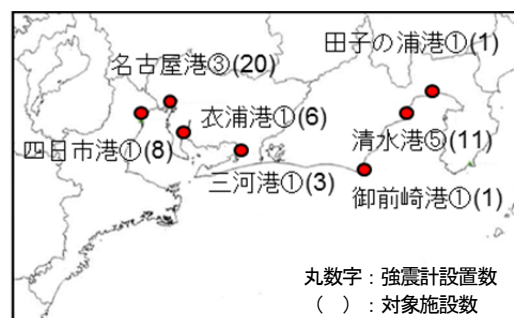


図-5 港湾施設診断システム対象港湾

3. 係留施設供用可否判定手法の構築

(1) 強震計観測データの変換

港空研サーバーから入手する地震動波形は、地表もしくは地中で観測されたものである。供用可否判定では、工学的基盤上の地震動波形を利用するため、吉田³⁾が提案する周波数依存性を考慮できる等価線形化法を採用し、観測波形データを工学的基盤上の地震動波形に変換した。

(2) 簡易判定手法

簡易判定手法は、係留施設の被害と相関性が高い速度のPSI値をパラメータとして、各施設における残留水平変位及び式(2)に示す鋼部材の最大曲率比の評価線から行うこととした。

$$\text{最大曲率比} = \frac{\text{発生最大曲率}}{\text{全塑性モーメント発生時の曲率}} \quad (2)$$

各施設の評価線は、対象施設が位置する地域で想定されているレベル2地震動（海溝型地震、内陸活断層型地震、M6.5直下型地震、南海トラフ巨大地震）及び再現期間（50～500年）を考慮した確率波の計10波程度を対象に、FLIP⁴⁾による地震応答解析を行い、その結果を用いて設定した。評価線の例として、ある施設における速度のPSI値と残留水平変位、鋼部材の最大曲率比との関係から設定された評価線を図-6および図-7に示す。

なお、FLIPとは二次元地震応答解析を行うプログラムであり、兵庫県南部地震等における係留施設の被災事例を再現できているとして、特に港湾施設の耐震性能照査で用いられるプログラムである。

最大曲率比は、地震中の鋼部材の状態を表す指標である。例えば、矢板式係船岸においては、港湾の施設の技術上の基準・同解説⁵⁾によると、最大曲率比が1.0未満であれば、構造的な安定が保たれており、残存耐力有りと判定できる。しかし、地震後に係留施設に船舶が接岸した際に作用する接岸力や牽引力に対して鋼部材に発生する応力状態も評価する必要がある。このため FLIP解析では、地震後の10秒間に設計対象船舶の接岸力や牽引力相当の節点集中荷重を作用させ、地震後の船舶接岸時の応力状態も把握した。

設計では船舶接岸時（作業時）に、発生断面力が設計耐力以下（発生する応力が降伏以下）であることを照査する。地震後の接岸時の応力状態を示す指標に設計耐力比（発生応力／降伏応力）を用い、速度のPSI値との関係を整理すると、図-8に示すように地震後の船舶接岸時の設計耐力比が速度のPSI値と比較的高い相関性を示すことが明らかとなった。

以上に示したとおり、速度のPSI値と残留水平変位、最大曲率比および設計耐力比の関係を示す評価線（図-6～図-8）を用いることで、供用可否判定を実施する。

図-9に簡易判定における供用可否判定フローを示す。予め評価線（図-6～図-8）を作成しておくことにより、実際の地震発生時には、速度のPSI値が算出されると瞬時に係留施設の供用可否を判定することが可能となった。なお通信網が不通になった時の対応として、気象庁発表の震度階級に対する供用可否判定機能も備えた。

評価線が図-6～図-8の係留施設では、図-6および図-7より速度のPSI値が61cm/s^{1/2}未満で供用可能となり、図-8より速度のPSI値が57cm/s^{1/2}未満では暫定供用（長期）と区分される。これらをまとめると表-1に示す供用可否分

となる。

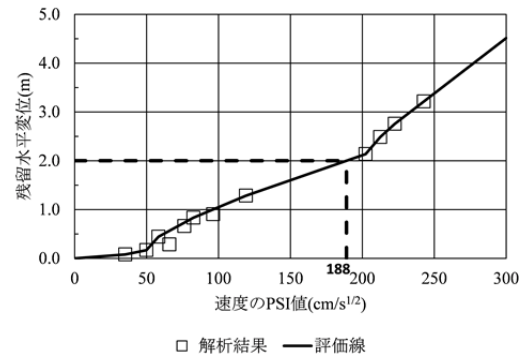


図-6 速度のPSI値と残留水平変位の関係

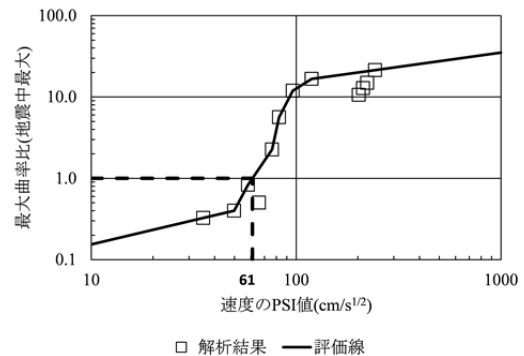


図-7 速度のPSI値と最大曲率比の関係

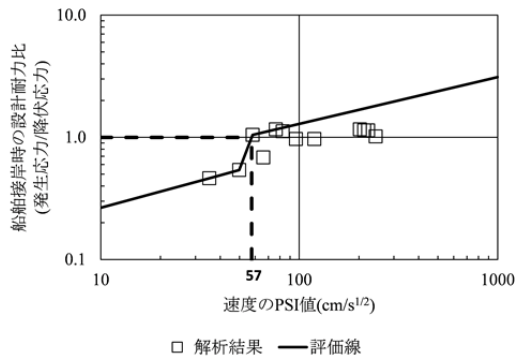


図-8 速度のPSI値と船舶接岸時の設計耐力比の関係

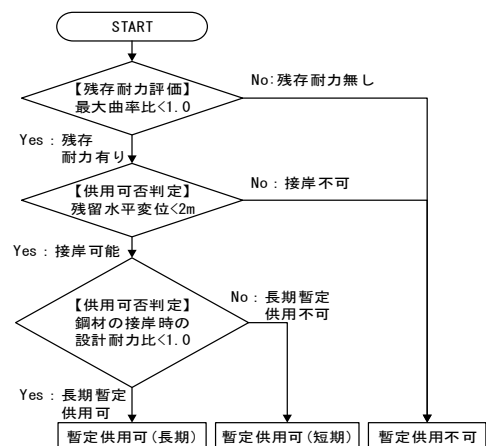


図-9 供用可否判定フロー

表-1 供用可否区分

速度のPSI値(cm/s ^{1/2})	供用可否
57未満	暫定供用可 (長期)
57以上 61未満	暫定供用可 (短期)
61以上	暫定供用不可

ここで、暫定供用可 (長期) とは、構造上の問題が無く、地震後であってもほぼ通常時と同じような供用が可能な施設である。また、暫定供用可 (短期) とは、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状態であり、緊急物資輸送等の一時的かつ短期的な供用を想定している。

簡易判定手法による判定結果の例を図-10示す。

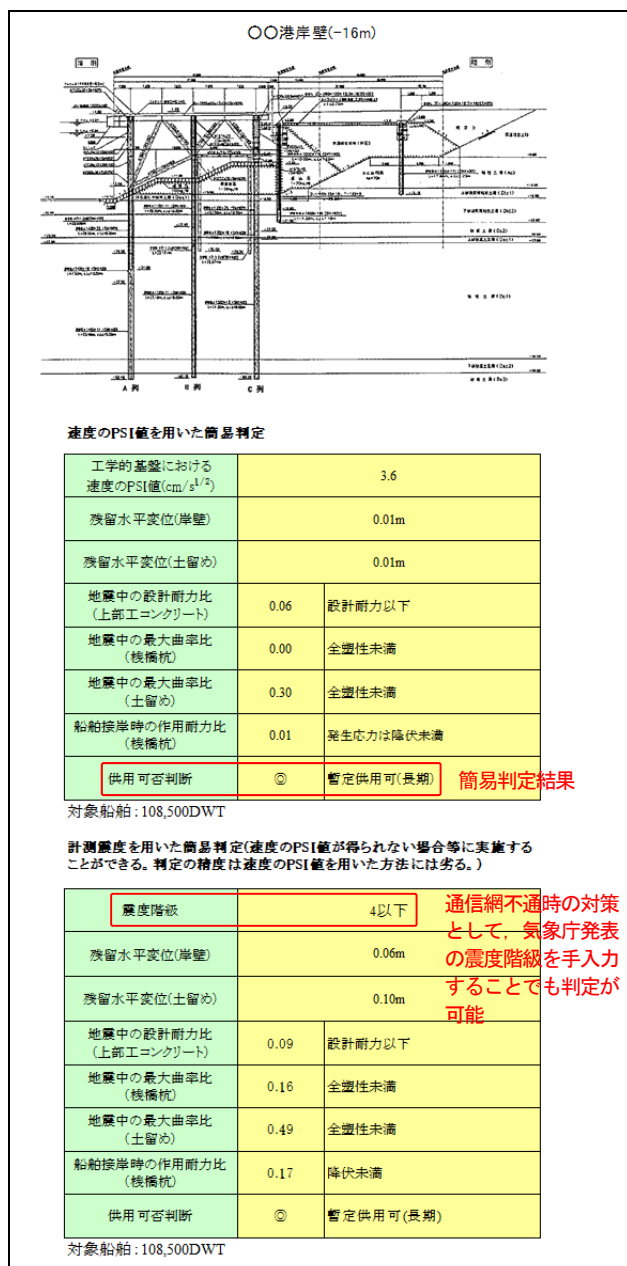


図-10 簡易判定結果の例

(3) 詳細判定手法

詳細判定には、二次元地震応答解析FLIPを用いて計算するものとした。

まず、予め作成しておいた解析モデルに、観測された地震動波形データから工学的基盤上の地震動波形に変換した波形を入力し、FLIP解析を行う。続いて解析結果(結果一覧、残留変形図、応答時刻歴波形、曲げモーメント図等)を出力し、供用可否の判定までを自動で行う。

また、残留水平変位と船舶接岸時の設計耐力比の関係から相関性を把握し、図-11に示す評価線を設定した。観測地震動を用いたFLIP解析から得られる残留水平変位と図-11を用いることで、船舶接岸時の鋼材の応力状態を考慮した供用可否判定を行うこととした。評価線が図-11の施設では、残留水平変位が0.41m未満であれば、接岸時の設計耐力比が1.0未満となり、暫定供用可 (長期) の判定となる。

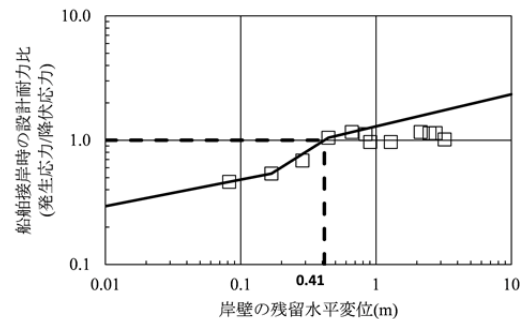


図-11 岸壁の残留水平変位と接岸時の設計耐力比の関係

また、コンテナクレーンが搭載されている岸壁については、コンテナクレーンを固有周期、重心位置および減衰定数を考慮したはり要素と質点要素を用いてモデル化し、岸壁上部工に搭載した。これにより、FLIP解析でクレーン重心質点における応答最大加速度が得られる。この応答最大加速度を用いて、クレーンの浮き上がり限界加速度および設計震度に対する照査を可能とした。解析結果(判定結果一覧、残留変形図、曲げモーメント図)例を図-12および図-13に示す。

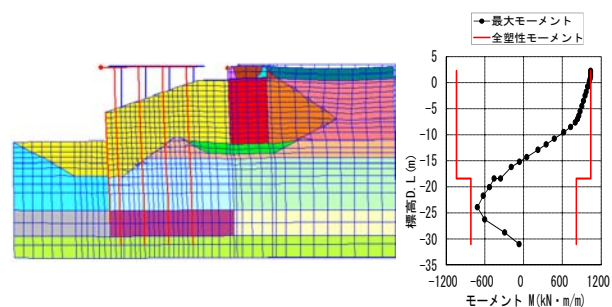


図-12 解析結果の例 (左: 残留変形図, 右: 鋼管杭のモーメント分布図)

〇〇岸壁（-14m）（荷役機械有り）

(1) 棧橋・護岸の天端変位 [〇〇岸壁（-14m）：荷役機械有り]

位置	変位	水平 (m)	鉛直 (m)	備考
岸壁天端	残留変位	-0.86	-0.13	暫定供用可（長期）と暫定供用可（短期）の関値（岸壁天端の残留水平変位）
	最大変位	-1.05	-0.15	
護岸天端	残留変位	-1.12	0.07	0.23m
	最大変位	-1.39	0.10	

*) 水平 正=陸側, 負=海側
*) 鉛直 正=上向き, 負=下向き

(2) コンテナクレーンに対する照査結果 [〇〇岸壁（-14m）：荷役機械有り]

クレーンに対する照査	
応答加速度 (Gal)	221.9
浮き上がり	256.0
限界加速度 (Gal)	0.25
設計震度	0.25
判定	浮き上がり ○ 浮き上がらない ○ 応答値は設計震度以下

(3) 鋼管杭・鋼管矢板に対する照査結果 [〇〇岸壁（-14m）：荷役機械有り]

杭	最大曲率比	塑性ヒンジ箇所数	評価	備考	
杭1	0.94	0	○	ダブルヒンジとなつていない杭が存在する。	
杭2	2.88	1		暫定供用可（短期）となる最大曲率比の上限値 6.80	
杭3	0.97	0		○	暫定供用可（長期）となる最大曲率比の上限値 0.32
杭4	0.82	0			
杭5	0.93	0			
矢板	0.33	0	○	全塑性モーメントが発生していない。	
控え直杭	0.89	0			

押込み力 (kN/本)			引抜き力 (kN/本)			
応答値の最大値	抵抗力の最大値	判定	応答値の最大値	抵抗力の最大値	判定	
杭1	6595.0	16130.8	○	—	11064.2	○
杭2	1522.0	16846.2	○	51.9	11779.6	○
杭3	1163.5	17561.6	○	—	12495.0	○
杭4	1478.5	18277.0	○	46.6	13210.4	○
杭5	5405.0	18326.0	○	1731.0	13259.4	○
矢板	—	—	—	—	—	—
控え直杭	—	—	—	—	—	—

*) 杭の番号は、海側からの番号である。

(4) タイ材に対する照査結果 [〇〇岸壁（-14m）：荷役機械有り]

	発生最大引張り力 (kN/本)	抵抗力の最大値 (kN/本)	判定
タイ材	894.4	4292.4	○

(5) 上部工に対する照査結果 [〇〇岸壁（-14m）：荷役機械有り]

	発生曲げモーメント (kN・m)	設計曲げ耐力 (kN・m)	判定
上部工	2935.0	3130.6	○

*) 発生モーメントと設計曲げ耐力の比が最も大きくなる部材位置での値

	発生せん断力 (kN)	設計せん断耐力 (kN)	判定
上部工	968.3	1868.4	○

*) 発生せん断力と設計せん断耐力の比が最も大きくなる部材位置での値

(6) 供用可否の判断 [〇〇岸壁（-14m）：荷役機械有り]

暫定供用可（短期）。

詳細判定結果

(7) 2点間の相対変位 [〇〇岸壁（-14m）：荷役機械有り]

位置	相対変位 (m)	最大変位 (m)
棧橋-護岸間の相対変位	-0.21	-0.27
クレーン基礎間の相対変位	0.00	0.00

*) 正=拡幅, 負=縮まり

図-13 解析結果の例（判定結果一覧）

(4) 被害推定マップの作成

簡易判定および詳細判定の結果を被害推定マップとして出力した例を図-14に示す。供用可否判定の区分別に色分けされ、発災時には災害対策本部への報告に使用されることを想定している。また、総合的な災害対策マップとしての活用も想定し、追加情報にも対応できるよう、地図ソフトはGISを採用した。

4. システムの稼働実績と結果

平成28年4月1日、三重県南東沖を震源とするM6.1の地震が発生した。この時強震計で観測された地震動データを基に、4港の36施設について港湾施設診断システムによる供用可否判定が行われた。港湾施設診断システム開発後、比較的広域の揺れを観測した初めての地震であり、貴重な稼働実績であることから以下に取りまとめる。

(1) 稼働実績

4月1日

- 11:39 ・地震発生（震源三重県南東沖、M6.1）清水港、三河港、衣浦港、名古屋港の強震計で地震動を観測
- 11:49 ・港湾地域強震観測網（港空研）より地震動情報のメール配信
- 12:02 ・港湾施設診断システムによる地震動情報のメールチェック
- ・システム稼働開始【地震発生23分後】
- ・判定対象施設36施設（清水港7、三河港3、衣浦港6、名古屋港20）

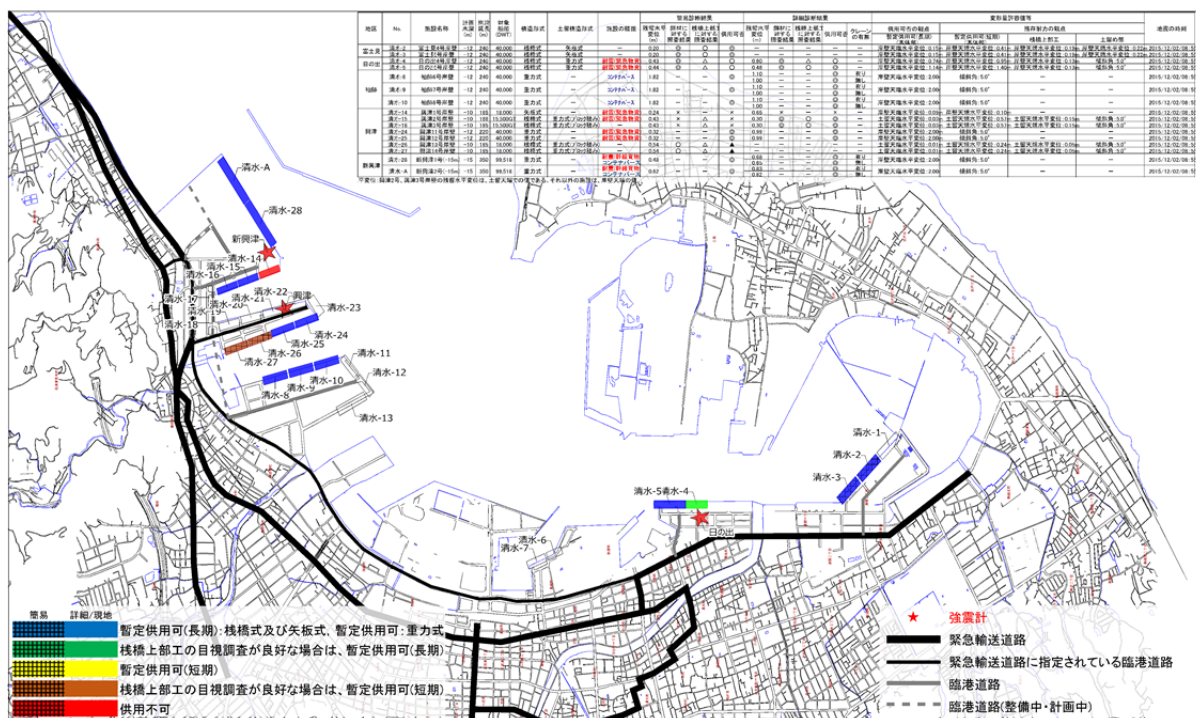


図-14 被害推定マップの例

- 12:05 ・簡易判定 1 施設目完了
- 12:08 ・詳細判定開始
- 12:09 ・簡易判定全施設終了【地震発生30分後】
- 12:12 ・簡易判定結果のマップ化 1 港目終了
- 12:19 ・全港の簡易判定結果のマップ化終了
- 12:54 ・詳細判定 1 施設目完了
- 4月2日
- 02:16 ・詳細判定全施設終了
【地震発生14時間37分後】
- 02:36 ・全港の詳細判定結果のマップ化終了

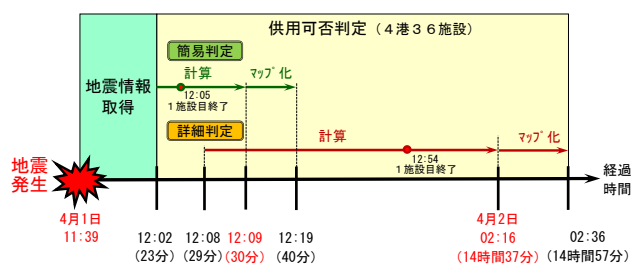


図-14 港湾施設診断システムの稼働実績

(2) 結果

判定結果は全施設「供用可」であり、施設の変状等もなかったが、地震発生から全施設の詳細判定が完了するまでに15時間弱を要した。港湾施設診断システムでは、詳細判定を行う際のFLIP解析でパソコンに相当な負荷がかかることから、1台で同時に実行できるFLIP解析数は6ケースと設定している。解析を行う優先順位も設定しており、①観測された地震動の速度のPSI値の大きい施設、②施設の位置づけ（耐震強化岸壁かどうか）③取扱貨物量の3点より設定した優先順位を基に、優先度が高い施設から順次FLIP解析が実行されていく。現在は1台体制であり、計算待ちの状態の施設が多かったことから全施設解析までに時間を要した。また、システム開発後初めての地震であり、様々な課題も見受けられたことから、逐次改善を進めているところである。

5. 結論

(1) 港湾施設診断システムの開発

総合的な供用可否判定は、現地の被災状況を確認した後に行う必要があるが、この港湾施設診断システムを活用することで、津波警報・注意報発令中や夜間等、現地調査に入ることができない期間に、多くの施設の中から供用できる可能性が高い施設を、予め机上で絞り込むことができる。特に、出力結果の被害推定マップは、現地

の被災状況調査箇所の優先度を検討する判断材料となり、効率的・効果的な初動体制構築のための一助になるものとする。

(2) 今後の取り組み

平成28年熊本地震のように、最初の地震発生以降、同規模の後震が散発的に発生する場合において、後震の地震動レベルに応じた詳細判定実施の判断基準を設けることや、前震による変位や部材の応力状態を考慮した後震の施設診断手法の検討を進めていきたい。また、各港湾事務所に港湾施設診断システムを導入し、機動的かつ冗長的に供用可否判定が行える体制を構築していくとともに、当事務所においてはパソコンを増台し、総解析時間の短縮を図る。

港湾施設診断システムの一応の完成により、発災時の初動体制支援が可能となった。しかし、現地の被災状況調査では、人的な制約や資機材等の制約があることから、岸壁を全て隈無く調査することは、現実的に困難な状況が想定される。今後は効率的・効果的に点検・診断ができる技術、あるいは港湾施設診断システムと連携した点検システムの開発など、災害発生時の初動体制支援をより充実させるような取り組みを進めていきたい。

謝辞：本システムの開発に当たっては、広島大学大学院一井准教授、京都大学防災研究所 飛田准教授、国土技術政策総合研究所 宮田港湾施設研究室長、海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所 野津地震防災研究領域長、小濱耐震構造研究グループ長にご指導をいただきました。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：港湾の事業継続計画策定ガイドライン,2015.3
- 2) 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
- 3) 吉田望：DYNEQ A computer program for DYNameic response analysis of level ground by EQuivalent linear method,東北学院大学工学部, <http://boh0709.ld.infoseek.co.jp/>,2008
- 4) 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
- 5) (社) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説,2007.