

港湾施設被害度診断システムの開発と運用

六ツ名 俊輝¹・村上 裕幸¹

¹名古屋港湾空港技術調査事務所 技術開発課（〒457-0083 名古屋市南区東又兵衛町一丁目57-3）

港湾施設被害度診断システムは、大規模地震発生後の海上輸送の早期再開に向けた岸壁の現地調査や応急復旧活動の効率化を目的として、名古屋港湾空港技術調査事務所が開発し、2016年度より運用を開始している。本論文は、システムの開発経緯及び岸壁の診断方法について詳述するとともに、システムによる想定地震発生時の岸壁被害規模の推定、システムの稼働実績及び訓練の状況などの運用状況について具体的に述べる。

キーワード：港湾施設被害度診断システム、供用可否診断、FLIP

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。このような大規模な地震被害が発生した場合、港湾は、被災地への緊急物資や燃料の受け入れ拠点、或いは救援・復興活動の拠点として、速やかに役割を果たすことが求められる。

中部の港湾では、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する港湾BCP（港湾機能継続計画）が策定されており、経済活動再開までに一定の港湾機能を実際に復旧させるため、各港湾において計画のブラッシュアップが続けられている。

この経済活動の復旧に向けた海上輸送早期再開を実現するためには、陸上輸送と海上輸送の結節点となる岸壁の供用可否の確認が最も重要な課題の一つになる。

しかし、東北地方太平洋沖地震では、港湾施設にも多大な被害が生じたが、地震発生から津波警報等が解除されるまでの約51時間²⁾にわたり、被害状況についての現地調査や応急復旧に着手することができなかった。

この教訓を踏まえ、名古屋港湾空港技術調査事務所（以下「名古屋技調」と表記）では、大規模地震発生後の岸壁の現地調査や応急復旧活動の効率化を目的として、津波警報等により現地調査ができない時間帯に、観測地震動データにより岸壁の供用可否を診断し、現地調査着手の優先順位決定をサポートする「港湾施設被害度診断システム」（以下「診断システム」と表記）を開発し、2016年度より運用を開始している。

診断システムは、巨大地震後の陸上輸送路と海上輸送

路をどこで結ぶのかを災害対策本部等が検討する際に、岸壁の早期供用の観点から現地調査の優先順位の決定をサポートすることにより、緊急物資輸送や海上輸送の早期再開に貢献できる。

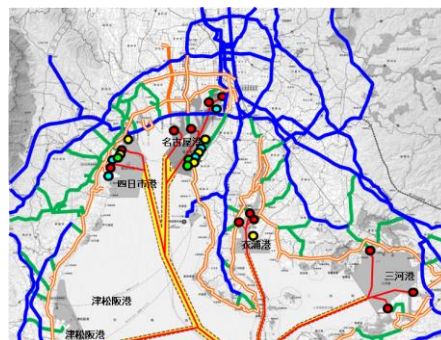


図-1 道路啓開と航路啓開のオペレーション計画

2. 診断システムの開発

（1）開発の経緯

地震災害後において、港湾施設の被災状況を把握するための現地調査を行う場合、次のような3つの大きな課題がある。一つ目は、先に述べたように、津波警報等が発令されている間は調査に着手できないことである。二つ目は、鋼材を主部材とする岸壁（栈橋式岸壁や矢板式岸壁）は、水中部や地中部の被災程度の把握が非常に困難であることである。三つ目は、名古屋港のような大規模港湾における現地調査には、多くの時間とマンパワーが必要になることである。

名古屋技調では、2010年頃より上記の課題解決に向けた検討を進めていた。また、長年にわたり二次元地震応

答解析（以下、「FLIP解析」と表記）を用いた設計を実施しており、このFLIP解析モデルを地震被災後の係留施設の供用可否判定に活用する手法を模索していた。

このような背景から、本システムの開発が計画され、蓄積された成果を踏まえて2014年から本格的に本システムの開発に着手し、2016年より本運用を開始している。

（2） 診断システムの概要

診断システムは、国立研究開発法人港湾空港技術研究所が運用している「地震動情報即時伝達システム」から地震情報メールを受け取ると、自動的に観測された地震動データ（＝地震加速度の時刻歴波形）を用いた診断を開始する。まず、登録されている岸壁毎に、地震動データについて工学的基盤への引き戻しと岸壁法線直角方向への方位変換の補正を行い、補正後の地震動データを用いて岸壁各部の変位や各部材の応力状態（以下、「判定指標」と表記）（表-2）を算出すると共に、判定指標を基に地震後の岸壁の供用可否を判断し、診断結果を関係部署に配信するものである。

表-2 岸壁の構造形式別の判定指標

岸壁の構造形式		判定指標
重力式	残留水平変位	
	残留傾斜角	
矢板式	残留水平変位	
	矢板の最大曲率比（地震中の応力状態）	
	矢板の設計耐力比（船舶接岸時の接岸力、牽引力作用時）	
栈橋式	残留水平変位	
	栈橋杭の最大曲率比（地震中の応力状態）	
	栈橋杭の設計耐力比（船舶接岸時の接岸力、牽引力作用時）	
	栈橋上部工の設計耐力比（地震中の曲げモーメント、剪断力）	
	土留部	重力式または矢板式と同じ

最大曲率比：（発生曲率/限界曲率）の最大値
設計耐力比：（発生側面力/設計耐力）の最大値

診断システムは、2種類の診断を行う仕様になっている。

最初に、地震動データから算出した「速度のPSI値」

（港湾構造物の地震時変形量との相関が高い指標）と評価線（図-2）を用いて短時間で判定指標を算出し、岸壁の供用可否を診断する「簡易診断」が実行される。

評価線は、事前に大小様々な確率地震動や各種レベル2地震動によるFLIP解析を実施して、速度のPSI値と様々な判定指標との関係を整理したものである。地震動データから速度のPSI値が算出されれば、評価線から判定指標の値を即時に求めることができる。

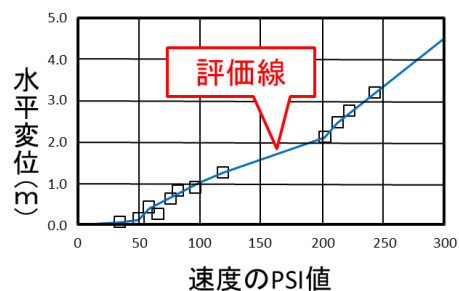


図-2 評価線の例（残留水平変位の場合）

次に、地震動データによるFLIP解析により判定指標を数時間かけて精緻に算出し、岸壁の供用可否を診断する「詳細診断」が実行される。なお、現在の診断システムに組み込まれているFLIPプログラムは、平成30年に改訂された「港湾の施設の技術上の基準」（以下「H30基準」と表記）に対応した最新バージョンに更新されている。

簡易診断及び詳細診断の各診断結果は、それぞれ各港湾の診断マップ（図-3）にまとめられ、関係部署にその都度メール配信される。なお、これらの処理は人の手を介すことなく、地震動データの入力から診断結果のメール配信まで全て自動で行われる。

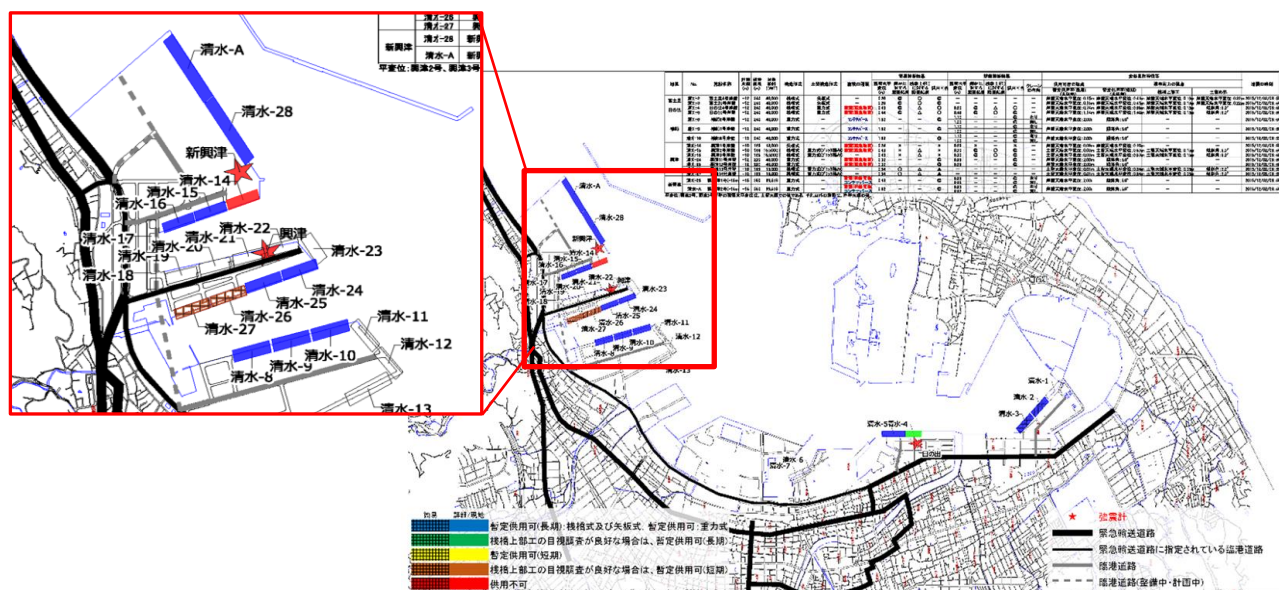


図-3 診断マップの例（清水港）

(3) 岸壁の供用可否判定方法

診断システムの供用可否判定方法は、簡易診断及び詳細診断ともに同じである。ただし、岸壁の構造形式毎に判定指標が異なるため、判定方法も異なる。本稿では、矢板式岸壁の判定方法を例として述べる。

図-4のフローに示すように、まず鋼矢板や鋼管矢板或いは控え杭といった鋼部材の最大曲率比により残存耐力の有無の判定を行う。次に残存水平変位による判定、さらに船舶接岸時及び牽引時の鋼部材の設計耐力比による判定を経て「暫定供用可（長期）」、「暫定供用可（短期）」及び「暫定供用不可」の3種類の判定を行う。

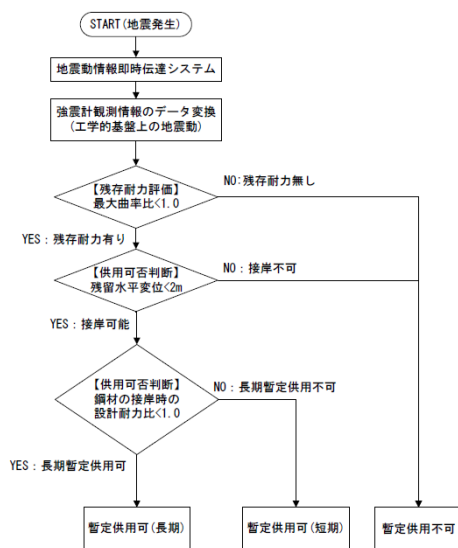


図-4 矢板式の判定フロー

なお、「暫定供用可（短期）」とは、緊急物資輸送などの短期の使用を想定し、岸壁構造上に問題があるものの水平変位の進展がないことを確認しながらであれば供用可能だと判断し、設定したものである。

このように、岸壁の構造形式毎に適切な判定指標と判定フローによる判定方法を採用することにより、単純な暫定供用の可否だけではなく、緊急物資輸送に必要な短期的供用の可否判断も可能にしている。

(4) 診断システム開発の効果

本システムを活用することで以下の効果がある。

- ① 目視調査ができない栈橋式岸壁や矢板式岸壁の土中部、水中部の部材の損傷程度の算定。
- ② 津波警報等で現地調査ができない時間帯に、簡易診断や詳細診断を行うことによる、タイムロスの縮減。
- ③ 早期供用の観点から現地調査着手の優先順位決定をサポートすることによる、現地調査の効率化、時間短縮及び省力化。
- ④ 津波警報等解除後の現地調査結果（残留水平変異）の手動入力による、担当者の技術経験やスキルに係わらない供用可否最終判定の実現。

診断システムにより、暫定供用が可能な岸壁の特定に要する時間が短縮され、緊急物資輸送等の海上輸送の早期再開を実現することができる。（図-5）

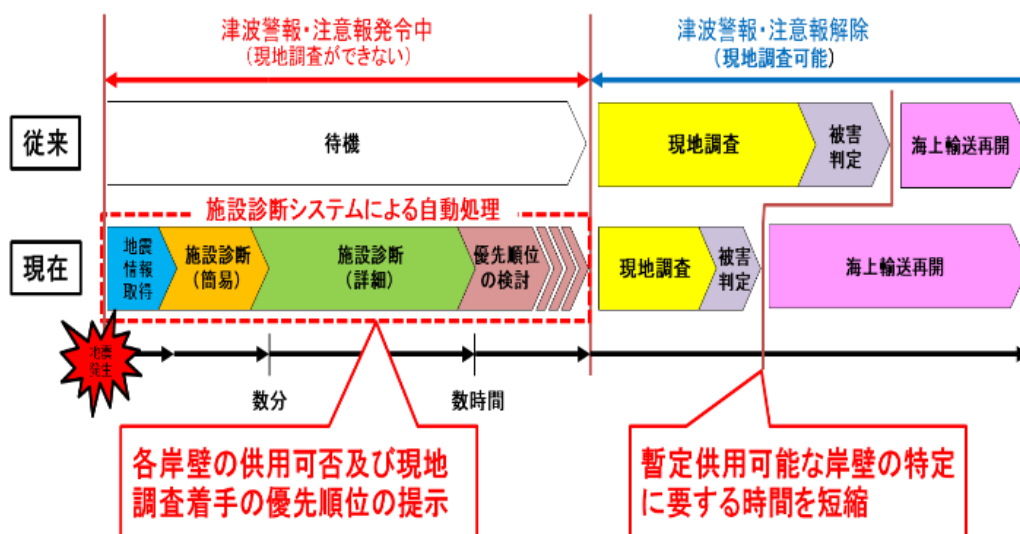


図-5 診断システム開発の効果のイメージ

3. 診断システムの運用

(1) 防災計画における運用

診断システムは、任意の地震動を入力することにより港湾毎に岸壁の供用可否を診断するデモンストレーション機能（以下「デモ機能」と表記）を有している。

名古屋技調では、災害対応の検討に役立てるため、デモ機能を用いて、中部地域の地域防災計画の想定地震が発生した場合の岸壁被害規模を推定した。

対象は、診断システムに登録されている53岸壁とし、詳細診断の結果、供用不可と推定される岸壁の割合と傾向について検討を行った。

a) 診断対象岸壁及び入力地震動の概要

診断対象の53岸壁は、全て水深-10m以深の直轄岸壁であり、昭和40年度～平成26年度に設計されたものである。また、53岸壁のうち20岸壁は耐震強化岸壁（以下、「耐震岸壁」と表記）であり、33岸壁は、通常岸壁である。診断対象岸壁の構造形式の内訳を表-3に示す。

表-3 登録岸壁の構造形式の内訳

構造形式	通常岸壁	耐震岸壁	計
矢板式	13	3	16
栈橋式	15	6	21
ジャケット式	0	4	4
重力式	3	7	10
セル式	2	0	2
計	33	20	53

入力地震動は、各港湾において設計用に算定されたレベル1地震動（発生確率75年）、東海・東南海地震動（旧レベル2地震）、宝永地震動（過去最大）、及び南海トラフ巨大地震動（SPGA50%）の4種類である。

b) 地震動による診断結果

各想定地震動における診断結果を以下に示す。

なお、分析対象岸壁のうち供用不可と診断された岸壁の割合を「供用不可率」と定義する。

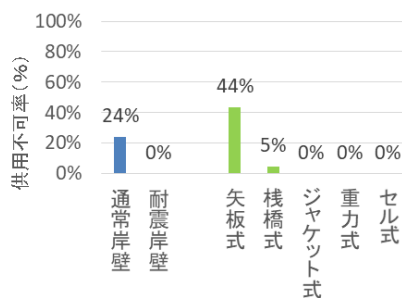


図-6 レベル1地震動発生時の供用不可率

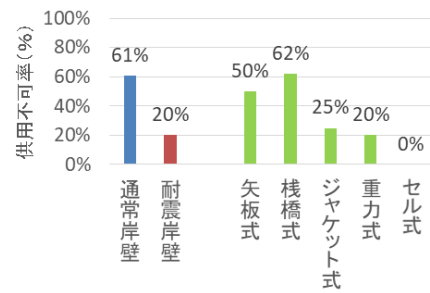


図-7 東海・東南海地震動発生時の供用不可率

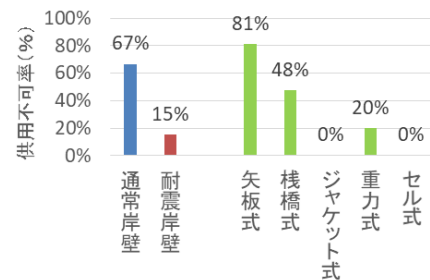


図-8 宝永地震動発生時の供用不可率

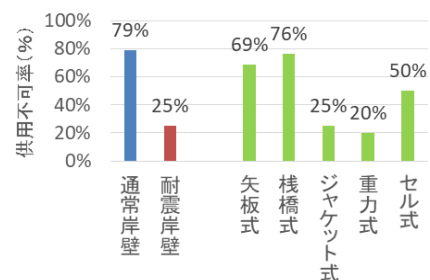


図-9 南海トラフ巨大地震動発生時の供用不可率

c) 診断結果の考察

レベル1地震動での全岸壁の供用不可率が1割程度に収まり、さらに供用不可となった耐震岸壁が皆無と診断された。また、東海・東南海地震動、宝永地震動、南海トラフ地震動での全岸壁の供用不可率は4割～6割と診断されており、各想定地震動の岸壁被害規模が明らかとなった。

表-4 岸壁種類別の供用不可率

岸壁種類別	レベル1	東海・東南海地震動	宝永地震動	南海トラフ巨大地震動
通常岸壁	24%	61%	67%	79%
耐震岸壁	0%	20%	15%	25%
全岸壁	15%	45%	47%	58%

各想定地震動の地震波は港湾毎に異なるが、各想定地震動のエネルギーの大きさと供用不可率の関係を比較するため、名古屋港の工学的基盤における速度のPSI値と供用不可率を図-10に例示する。

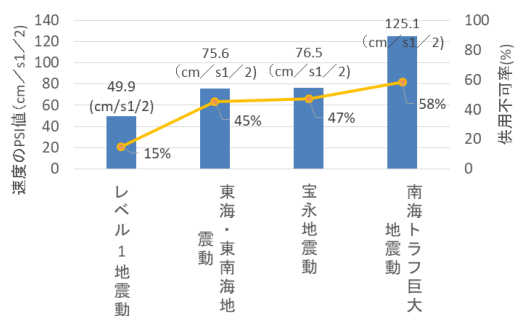


図-10 地震動別の供用不可率（全岸壁）

（※グラフ内の数字は名古屋港の工学的基盤における速度のPSI値を示す）

速度のPSI値が大きいくほど供用不可率が大きくなっており、地震動のエネルギーの大きさが岸壁の供用不可率に関係していることが判明した。

また、中部地方整備局管内の直轄岸壁における各構造形式別の供用不可率は、矢板式・栈橋式が大きく、セル式・ジャケット式・重力式が小さい結果となった。

表-5 構造形式別の供用不可率

構造形式	レベル1	東海・東南海地震動	宝永地震動	南海トラフ巨大地震動
矢板式	44%	50%	81%	69%
栈橋式	5%	62%	48%	76%
ジャケット式	0%	25%	0%	25%
重力式	0%	20%	20%	20%
セル式	0%	0%	0%	50%

これらの供用不可と診断された岸壁は、その他の岸壁と比較して設計年度が古い傾向にある。図-11に各地震動別に供用不可と診断された矢板式・栈橋式岸壁数を設計基準年毎にまとめたグラフを示す。

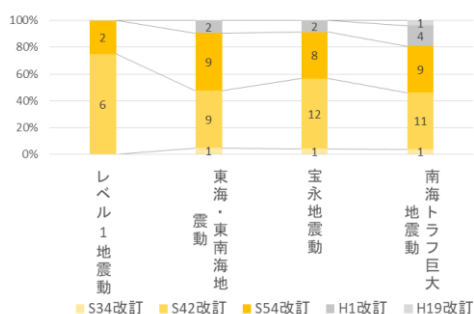


図-11 供用不可と診断された矢板式・栈橋式岸壁の設計年度

供用不可矢板式・栈橋式岸壁がその他の岸壁と比較して供用不可率が大きくなっているのは、供用不可と診断された矢板式・栈橋式の多くが、液状化予測手法が充実した平成元年の設計基準改定前に設計されており、背後地盤の液状化による土圧の増加が主な要因として考えられる。

(2) 診断システムの稼働及び訓練の状況

診断システムは、運用開始以降100回以上稼働してい

るが、東海地方を中心とした大規模な地震が発生していないこともあり、供用不可と診断された岸壁及び実際に供用不可となった岸壁は皆無である。

具体的な稼働事例として、平成30年6月18日に発生した大阪府北部地震の診断状況を示す。本地震においては、図-12に示す6港湾の内、四日市港（8施設）、名古屋港（31施設）、衣浦港（6施設）、三河港（3施設）の計4港48施設で供用可否を判定している。

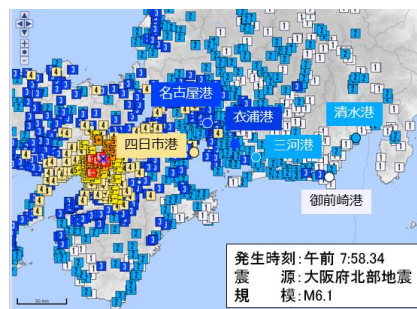


図-12 大阪北部地震の震度マップ（気象庁より引用）

図-13にその時の診断システムの稼働状況を示す。地震発生45分後には、簡易判定診断マップの配信が完了し、地震発生8時間29分後には詳細判定診断マップの配信が完了した。

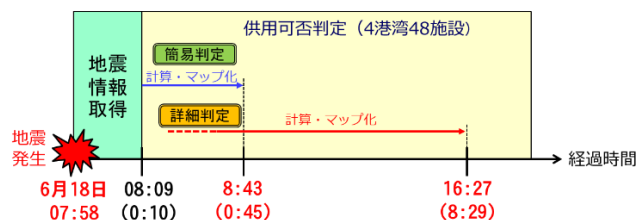


図-13 大阪北部地震における診断システムの稼働状況

判定の結果は、全施設「供用可」であり、施設の現地調査確認の結果、いずれの施設にも変状がないことが確認されている。図-14に、最も震源に近い四日市港の簡易判定マップを例示する。

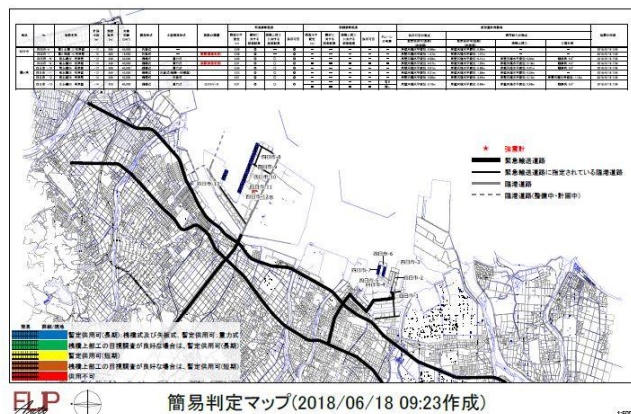


図-14 大阪北部地震の診断マップ（四日市港）

※全ての岸壁が青表示（供用可）

その他の稼働実績についても、開発当初の想定時間通りに、簡易判定は概ね数十分、詳細判定は概ね十数時間までに診断マップの配信が完了している。この結果より、東北地方太平洋沖地震のように、津波警報等の解除に時間がかかり、現地調査に着手できない場合にも、診断システムが津波警報等発令中に岸壁の供用可否を診断し、現地調査の効率化に貢献することができると考えられる。

名古屋技調では、地震災害発生時に診断システムを確実に運用するために、診断システムの操作の習熟のための講習会や、防災訓練等における診断システムの稼働訓練などを実施している。



図-15 防災訓練での診断システム操作と講習会の様子

訓練の結果、災害対策本部には各港湾の診断マップだけではなく、全岸壁の診断結果を集約した一覧表で報告する必要があることが判明したため、令和元年度に診断システムに集約機能を追加した。

(3) 今後の課題

診断システムの日々の稼働確認は、現在、名古屋技調職員が実施している。しかし、システムを構成する機器の点検方法やデータを蓄積するハードディスクの整理・メンテナンス方法についてのマニュアル類が整備されておらず、今後の診断システムの維持管理の効率化・省力化に向けた検討を進めていく必要がある。

また、巨大地震発生時を想定した場合、港湾管理者や民間企業に診断システムの普及が進めば、被災地域における初動体制確立の迅速化や支援部隊・物資受け入れ等の効率化が期待できる。その一方で、診断システムの導入には、機器及びソフトウェアの購入費用及びFLIP解析費用など、多くのインニシャルコストが必要である他、地震動情報をリアルタイムで入手する必要がある等の課題があり、普及促進に向けた検討が必要である。

4. おわりに

診断システムは、港湾地域強震計観測網と地震動情報即時伝達システム、これまでに蓄積されてきた港湾施設の被災記録、港湾施設の損傷程度を精度よく再現できる二次元地震応答解析プログラム（FLIP）、港湾施設被害に関する最新の研究成果など、現在の最高レベルの港湾技術を結集して構築した最先端のシステムである。H30基準にも「大規模地震直後の津波警報発生時や夜間等の現地調査ができない状況において被災状況の概略把握を行うための手法としては最も効果的な方法の一つである。」と紹介されている。

また、大規模地震災害時における初動体制の支援の他、各地域の防災計画における想定地震発生時の岸壁被害規模の推定等、防災・減災活動等に活用できる新しい技術として注目を集めており、国土交通省港湾局でも全国展開が検討されている。

名古屋技調は、診断システムの診断精度と機能向上に努めると共に、様々な機会に診断システムの有効性を発信し、導入を検討している他機関からの問い合わせに対して積極的に対応するなど、診断システムの導入促進に努めていく所存である。

謝辞：本論文の執筆に当たり、ご指導・ご協力を頂いた株式会社ニュージェックの曾根照人様、山本龍様をはじめとする関係者の方々に深く感謝し、御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省港湾局：東日本大震災における港湾の被災から復興まで～震災の記録と今後の課題・改善点～、交通政策審議会 第48回港湾分科会資料 4,第54巻,pp.3-14, 2012.
- 2) 気象庁：東北地方太平洋沖地震への気象庁の対応について（報告）、気象業務の評価に関する懇談会資料, p.9, 2011.
- 3) 山本龍,宇野健司,大塚尚志,淵ノ上篤史,曾根照人：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,土木学会第71回年次学術講演会講演概要集,pp.655-656, 2016.
- 4) 若井淳,野津厚,菅野高弘,長坂陽介：港湾地域地震観測におけるデータ伝送方法の改良－地震動情報即時伝達システムの開発－,港湾空港技術研究所資料, No.1310,pp.4-18, 2015
- 5) 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.
- 6) 西園勝秀：港湾技術の変遷と技術基準の主な改正点,港湾2月号,公益社団法人日本港湾協会,pp.10-15, 2018.