福岡県西方沖地震における港湾施設の 被災について

STUDY ON THE DAMAGE CHARACTERISTICS OF HAKATA PORT FACILITIES BY THE FUKUOKA WESTERN OFFSHORE EARTHQUAKE

元野 一生¹・今永 繁²・藤田 浩一³・島野 好⁴
Ichio MOTONO, Shigeru IMANAGA, Kouichi FUJITA and Yoshimi SHIMANO

¹正会員 国土交通省 九州地方整備局 博多港湾・空港整備事務所

(〒810-0074 福岡市中央区大手門 2-5-33)

²(財) 港湾空港建設技術サービスセンター (〒812-0011 福岡市博多区博多駅前 2-3-23)

³(株) 五省コンサルタント (〒812-0029 福岡市博多区古門戸町 1-1)

⁴正会員 ジオ・サーチ (株) (〒703-8255 岡山市東川原 242-1)

On March 20th, 2005 an earthquake with a magnitude of 7.0 struck the port of Hakata in the northern Kyushu. A design seismic force of the earthquake motion is estimated 0.2 while the present design seismic force is 0.05 for a many of facilities at the port. The damage has been found throughout the port.

This paper presents a comprehensive review of damage of Hakata port. The facility damage is analyzed in terms of structural design, construction age and level of availability of the facility. As the result, the facility displacement has a close relationship with the structural design. An occurrence of apron holes is resulted in the structural design and the construction age. This study also shows that the damaged facilities over 30cm displacement and 10% of apron hole are out of use.

Key Words : earthquake, disaster prevention, port facilities, facility displacement, apron hole, availability of port facility, construction age, structural design,

1. はじめに

2005年3月20日10時53分頃、福岡県西方沖を震源(深さ9km)とするマグニチュード(M)7.0(最大震度6弱)の地震が発生した。この地震により、図-1に示すように、九州北部では震度4～5強を観測した。博多港のある福岡市中央区、東区では震度6弱を観測した。

この地震で、博多港の国有港湾施設61施設のうち38施設が被災した¹⁾。これまでの地震活動が少ないため「港湾の施設の技術上の基準」においても福岡県は地域別震度が最も低位であり、博多港の港湾施設は設計震度が全国的にみて低いレベルで設計されていたことが港湾施設の被災の拡大を助長したのではと推察される。

本研究では、博多港の港湾施設の被災形態を構造形式や築造経過年数との関連について分析し、地震発生直後の港湾施設について被災形態とその供用の可否との関係の整理も試みた。

特に今回の地震は震度6弱と国内での発生頻度が

高い中規模クラスであったこと、港湾施設の設計の概念についても利用を意識した性能規定型に変更されていくことから、被災形態と供用の関連については合理的な港湾施設の計画や設計の一助になるものと考えられる。

図-1 震源(×印)と各観測点の震度分布

2. 地震の規模と作用加速度の推定

(1) 地震の規模^{2), 3), 4)}

福岡県西方沖地震の規模を表-1に示す。九州地方で震度6弱を観測したのは1997年に鹿児島県川内市（現薩摩川内市）で観測して以来7年9ヶ月ぶりであり、九州北部に限ると(M)7.0クラスの地震は1700年に壱岐・対馬で発生して以来約300年ぶりとなり、1890年の観測開始以来初めてであった。

しかし、表-2に示す通り過去の国有港湾施設に対する直轄災害復旧事業の実施状況を見ると、震度6弱クラスの中規模地震による被災が多いことが確認できる。この中規模地震クラスは今後も発生確率が高いものであり、多くの国有港湾施設の被災が懸念される。

表-1 (2005年) 福岡県西方沖地震の諸元

地震発生時間	平成17年(2005年)3月20日 10時53分
震央位置	福岡市の北西約40km (北緯33度44.3分、東経130度10.6分)
震源の深さ	9km
地震の強さ	マグニチュード7.0
各地の震度	震度6弱: 福岡市東区・中央区、前原市、佐賀県みやき町 震度5強: 福岡市西区・早良区、新宮町、志摩町、春日市等 佐賀県上峰町、七山村、長崎県壱岐市等 震度5弱: 福岡県大野城市、宗像市、直方市、柳川市等 佐賀県、鳥栖市、唐津市、多久市等、大分県・中津市

表-2 直轄港湾施設被災地震記録(昭和50年～)

発生年月日	地震名	主な被災港湾名	最大震度
昭和57年3月	浦河沖地震	浦河港	6弱
昭和58年5月	日本海中部地震	秋田港	5弱
平成5年1月	釧路沖地震	釧路港	6弱
平成6年10月	北海道東方沖地震	釧路港・根室港	6弱
平成6年12月	三陸はるか沖地震	八戸港	6弱
平成7年1月	兵庫県南部地震	神戸港	7
平成12年10月	島根県西部地震	境港	6強
平成13年3月	芸予地震	今治港	6弱
平成15年9月	十勝沖地震	十勝港・釧路港	6弱
平成17年3月	福岡県西方沖地震	博多港	6弱

(2) 港湾施設に作用した加速度⁵⁾

K-Net, FK0006(福岡市中央区天神)で観測された福岡県西方沖地震(2005年3月20日)の地表面での加速度記録(ERS型強震計観測)をSMAC型データに変換して、引き戻した波形を用いて対象地盤のモデル底面での加速度波形(2E)を用い地震応答解析を行った。

図-2, 3に地表面での加速度時刻歴および減衰5%の加速度応答スペクトルを示す。これより、最大作用加速度は、222.80galとなり、静的震度に換算すると作用震度は式(2)より $K_h=0.2$ となる。

被災した博多港の港湾施設は、地震時の設計震度は0.05で設計されており、このときの水平加速度は、式(1)から $\alpha=49$ galと計算できる。したがって、本地震では、設計時に想定した加速度の4.5倍程度の加速度が作用した計算となる。

式(1), (2)に地盤加速度と水平震度の関係を示す。

$$K_h = \alpha/g, \quad \alpha \leq 200 \quad (1)$$

$$K_h = 1/3 \cdot (\alpha/g)^{1/3}, \quad \alpha > 200 \quad (2)$$

ここに、

K_h : 水平震度

α : 地表面における地盤の最大加速度(gal)

g : 重力加速度(gal)

$$\alpha_{\max} = 222.80 \text{ gal}$$

$$K_h = 1/3 \cdot (\alpha/g)^{1/3} = 0.203$$

$$\text{加速度の比 } N = 222.80 \div 49 = 4.55$$

図-2 地表面での加速度時刻歴

図-3 加速度応答スペクトル

3. 港湾施設の被災特性

(1) 被災概要及び分析アプローチ

港湾施設の被災は、数々の構造タイプに渡り、その被災形態も、岸壁のはらみだし、エプロンの沈下、隆起、液状化など広域に渡り確認された。大規模な被害を受けた施設では、写真-1に示すような法線のはらみ出しや背後地の陥没が発生し、岸壁も5施設が供用不能となり、荷役等にも大きな影響を与えた。

写真-1 中央ふ頭岸壁(-5.5m)での被災状況

ここでは、①構造形式、築造経過年数の相違による被災形態の分析、②被災直後の港湾施設の利用の可否について、被災形態との関係の分析を試みた。被災形態については、岸壁、護岸などの施設法線での全面変位量とエプロンの空隙発生率をパラメータとする。

(2) 施設の変位量からみた被災特性

a) 水平変位と鉛直変位

被災施設の変位量について、水平変位、鉛直変位の関係を見る。データは、最も施設数の多いL型ブロック式 29 施設としている。変位量は、その施設の相対的な最大変位とした。

図-4 に示すようにばらつきはあるものの、水平方向のはらみ出しと鉛直方向の沈下には幾何学的な因果関係があることから、本分析では変位については便宜上施設の水平変位で代表させて分析を行っている。

図-4 被災施設 (L 型ブロック式) の水平変位と鉛直変位の関係

b) 構造形式と水平変位量

図-5 は、構造形式と水平変位量についての関係を示す。図中の () はデータ数である。ケーソン式、L型ブロック式、方塊式、セルラー式および矢板式は平均して 20cm 前後の変位量を示し、栈橋構造は 3cm 前後と小さな変位であった。

また変位量の範囲も、施設数の多いL型ブロック式は最大 160cm 変位量を示し、方塊式、セルラー式、矢板式は 50cm 前後の変位を示すが、ケーソン式や栈橋式の変位の範囲は少ない。

図-5 被災施設の構造形式と変位量の関係

c) 施設築造年数と水平変位

最も施設数の多いL型ブロック式について、図-6 に築造経過年数と変位量についての関係を示す。築造経過年数が大きいほど変位量が高い傾向にあることがわかる。

図-6 重力式 (L 型) の築造経過年数と変位量の関係

d) 震源域の方向と被災施設の変位との関係

次に、被害の大きかった須崎・中央・箱崎ふ頭について、震源域に対する施設の方向(配置)と変位量に着目して分析した。

本地震の震源は、図-7 に示すように福岡市内を北西から南東に走る警固断層の延長線上であり、図-8 に示すような北西～南東に断層がずれたことによる地震である。

分析方法として、図-9 に示すように施設の変位(移動方向)を 16 方位に分類し、最終的に震源域に対する方向(配置)として垂直方向と平行方向にグループ分けを行った。

なお、変位量は各施設の最大値をふ頭毎に平均して用いており、変位は全て施設法線に対して垂直方向に起こると仮定している。

図-7 警固断層の位置図 (想定)

図-8 左横ずれ断層イメージ

図-10 に示すように各ふ頭で、震源域に対し垂直に配置された施設の変位量が大きい傾向にある。特に須崎ふ頭・中央ふ頭についてはその差が顕著であった。

地震波が施設の法線直角方向に入射した場合、変位が大きくなり、断層の方向と施設の方向の相違により、被災程度に差が出ることを示している。

このことは、港湾施設を計画・設計する際に断層の方向と施設の位置関係により合理的に設計震度を設定できる可能性を示唆している。

図-9 震源方向と施設の分類方法

図-10 震源方向と施設方向と変位の関係

(3) 施設の空洞発生率からみた被災特性⁶⁾

被災直後の港湾施設では写真-2に示すように岸壁エプロンやヤードに陥没が相次いで発生した。また岸壁被災部分からの裏込土の吸い出しによる陥没の拡大もみられた。ユニットロード貨物が主流になりつつある博多港は、トレーラやストラドルキャリアに安全走行の早期確保が求められた。

このため、電磁波地中レーダによる安全確認および更なる陥没発生防止のための早急な空洞化点検を実施した。

写真-2 岸壁に発生した陥没

a) 空洞化調査の方法とその精度

空洞化調査は、写真-3に示すような電磁波地中レーダを7基搭載した自走式空洞探査車と3基搭載した小型探査機を用いて、迅速に実施した。

地震発生から9日後に自走式空洞探査車を用いた空洞化調査を開始し、約2週間でほぼ全域の調査を完了した。ただし、須崎ふ頭はその被災状況から一部の施設のみ実施している。

電磁波地中レーダより検出された異常(空洞)信号については、各施設の任意箇所では簡易ボーリングと特殊カメラによる撮影調査を行い、図-11のような精度確認を行っている。また、アイランドシティ岸壁(-11m)において、精度確認の検証実験を行った結果、図-12に示すように異常信号箇所でのみ空洞が確認され、地中レーダは良好な精度であることを立証した。

表-3に電磁波地中レーダによる調査結果の概要を示す。なお、ここでは異常信号箇所(空洞の可能性)を空洞箇所と仮定する。また、傾向分析に用いた調査数量は岸壁から20m以内とし、コンテナヤード等は整理の対象から除いた30件とした。

写真-3 自走式空洞探査車による調査状況

図-11 特殊カメラによる精度確認

図-12 電磁波レーダによる異常信号箇所と特殊カメラによる精度確認地点

表-3 空洞化調査 結果概要

管轄	国土交通省	福岡市
対象施設	16 施設	15 施設
調査面積	80,734 m ²	23,670 m ²
異常信号面積	3135 m ²	479 m ²
空洞発生率	3.88%	2.02%

b) 構造形式と空洞発生率

図-13 に構造形式と空洞発生率についての関係を示す。なお、空洞発生率は 100 m²あたりの空洞面積を示し、空洞(異常信号)面積を調査面積で除して算出したものである。

セルラブロック式が平均で 17%の空洞発生と他の構造形式と比較して大きい傾向であることが分かる。次いでケーソン式、L型ブロック式や方塊が 4%で続く。矢板式や栈橋式の空洞発生は少なく、全体的にも重力式の施設が高い傾向にあることが分かる。地震による挙動を起こしやすい重力式の構造が空洞発生に大きく影響していると考えられる。

図-13 構造形式と空洞発生率

c) 構造形式と空洞発生位置

4種類の構造形式について、空洞発生位置(法線からの距離)を模式的に比較したものを図-14に示す。

図-14 構造形式(断面)と空洞発生位置

方塊式やL型ブロック式は背後 20mにわたり一様に空洞発生が見られた。海側の近い部分の空洞はブロック本体の傾斜・滑動による裏埋材の移動、目地部からの裏埋材の吸出しなど空洞発生につながったと考えられる。陸側の空洞は築造年数が比較的古いことから長年の裏込材の自然の締まりなどが原因ではないかと推察される。

ケーソン式については、ケーソン背面に集中して空洞が発生していることから、ケーソンの海側への移動によるケーソン直背後に空洞が発生したことや、ケーソンの継ぎ目からの裏込材の吸い出しが考えられる。なお築造年数も比較的新しいことから、陸側

の空洞の発生はなかったものと推察される。

矢板式について、陸側の空洞発生に特化しているが、地震による損傷形態が他の構造形式と異なり矢板および控え矢板が一体となって海側に押し出されスラブ面と背後地盤との間に段差が生じたと考えられる。また、この部分からの液状化跡も多く確認されている。

d) 築造経過年数と空洞発生率

最も施設数の多いL型ブロック式について、図-15に築造経過年数と空洞発生率についての関係を示す。ばらつきはあるが、経過年数が大きいほど空洞発生率が高い傾向であることがうかがえる。

これは長期的な裏込め材の目地部からの吸い出しや自然締め固めなどにより、空洞の発生が顕著になるものと推察される。

図-15 重力式(L型)の築造経過年数と空洞発生率の関係

(4) 施設の被災程度と供用の可否の関係

最後に、港湾施設の被災状況と施設の供用の可否についての図-16に整理した。

横軸を空洞発生率、縦軸を水平変位量とし、施設の供用の可否をプロットした。供用の可否は、被災直後目視により岸壁法線の凸凹などから船舶接岸の可否を判断したものである。

図-16 被災の程度と施設供用の可否

水平変位量が小さいと空洞発生率も小さい傾向にある。また、水平変位量から見ると30cmをこえると供用できなくなり施設がでてくる。空洞発生率からは10%をこえると供用できない施設が出てくることがわかる。

4. まとめ

博多港の港湾施設の被災形態を構造形式や築造経過年数との関連について分析し、また地震発生直後の港湾施設の被災程度と供用の可否について分析を行った。

施設の水平変位量について、L型ブロック式が大きく変位し、ケーソン式やセルラー式は中位に、また栈橋式はほとんど見られない。L型ブロック式について、築造経過年数が大きいほど変位量が高い傾向であった。また、震源域に対し垂直に配置された施設が、平行に配置された施設に比べ水平変位量が高い傾向にあることもわかった。

空洞発生率について、セルラーブロック式の変位が他の構造形式と比較して大きい傾向である。ケーソン式、L型ブロック式など重力式の施設がつづく。栈橋式は水平変位量と同じく空洞発生はなかった。L型ブロック式について、築造経過年数が長いほど空洞発生率が高い傾向にあった。また、岸壁法線からの距離と空洞発生率について分析を行った結果、築造経過年数の差も考慮すべきではあるが構造形式による発生の特徴も整理できた。

施設の被災程度と供用の可否について、変位量が30cm程度、また空洞発生率が10%程度に達すると供用不可となる傾向が読みとれた。

博多港では耐震強化岸壁は未整備で、既存施設の耐震補強もなされていない状況である。今回の地震データや被災特性をもとに、想定地震外力の再検討や既存施設の補強など地震に対して粘り強い港湾施設の取り組みが必要と考える。

謝辞：中村真氏（(株)五省コンサルタント）には、データの整理にご協力頂くとともに多くの議論をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 福岡県西方沖地震による博多港の被害と復旧について（中間報告）：「福岡県西方沖地震から一年記録誌」平成18年3月福岡市
- 2) 平松浩三、善功企、岩瀧清治：「福岡県西方沖地震による博多港域の被害状況」平成18年土木学会地震工学論文集
- 3) 地盤工学会：福岡県西方沖地震における被害調査報告
- 4) 土木学会西部支部：2005年福岡県西方沖地震被害調査報告書
- 5) 気象庁震度データベース
- 6) 石渡 崇泰、福手 勤、雑賀 正嗣：「港湾地域における地表面下の空洞発生傾向について」平成18年土木学会関東支部第33回技術研究発表会