

## 港湾BCPのための港湾施設の脆弱性評価手法

### Fragility Assessment Methods of Port Facilities for Port-BCP

赤倉康寛・小野憲司

Yasuhiro AKAKURA and Kenji ONO

#### Synopsis

For making the port-BCP, fragility assessment of port facilities is needed. Without fragility assessment, PRT (Predicted Recovery Time) and PRL (predicted Recovery Level) cannot be quantified. On the other hand, detailed fragility assessment such as finite element method requires much time and money. Against this background, this paper developed and collected the simplified fragility assessment method against large earthquakes and tsunamis. Many of these assessment methods were expressed as fragility curves against seismic intensity or tsunami inundation depth. The figures of these intensity and depth have been quantified in the earthquake and tsunami damage estimations by national and local government. Compound damage of an earthquake and a tsunami was considered in the assessment of the berth and the cargo crane.

**キーワード:** 港湾BCP, 航路泊地, バース, 防波堤, 荷役クレーン

**Keywords:** port-BCP, fairway and basin, berth, breakwater, cargo crane

#### 1. 基本的考え方

港湾BCPの作成においては、港湾施設の脆弱性評価が必要不可欠である。脆弱性評価なしには、PRT（復旧予想時間）やPRL（復旧予想水準）を定量化できない。一方、精緻な脆弱性評価には多くの時間と労力が必要となる。典型的な例は、岸壁や防波堤のFEMによる耐震診断であるが、施設設計にも使用されるこの方法は、港湾機能継続の検討との港湾BCPの目的に照らして、適切であるとは言い難い。

すなわち、港湾BCPのための脆弱性評価は、以下の要件を備えることが望ましい (Akakura et al. 2014)。

- ・ 都道府県等の被害想定「震度」「津波浸水深」から簡易に推計できること
- ・ 被害の程度を、復旧までに要する期間で予測できること
- ・ 予測結果を、確率的、あるいは、幅を持って表現できること

極論すれば、いずれの重要施設も被災により供用

不可能となる可能性が皆無ではないため、港湾BCPとしては、当該重要施設が使用可能な場合と、使用できない場合の両方を想定しておく必要がある。ただし、供用できる可能性がどの程度あるのか、さらには供用再開までにどのくらいの期間を要するのかの見積もりは重要であり、その範囲において、脆弱性評価が必須となる。したがって、本稿では、港湾BCPに使用可能な、できる限り簡易な脆弱性評価手法、すなわち、地震・津波被害推定手法について述べる。もちろん、より精緻な脆弱性の評価手法は、港湾BCPを高度化させ、港湾機能の耐災害性能を向上させる上で、非常に有効である。

#### 2. 水域施設

東日本大震災においては、各港の航路・泊地等の水域施設に、コンテナや自動車が沈下し、木材や漁網が浮遊した。そのため、港湾機能の回復のためには、まず航路啓開が必要となった。ここでは、その中で、特に、流出・沈下の多かったコンテナの流出

個数の簡易推計について述べる。

Kumagai (2013)は、東日本大震災における被災各港のコンテナ蔵置個数や流出個数を整理している。さらに、同論文では、空コンテナと実入コンテナは重量に差があるため、流出危険性に大きな差があることも示されている。そこで、被災各港のコンテナターミナルのうち、被災当時の実入・空コンテナの蔵置個数が判明していた仙台塩釜港及び鹿島港の蔵置コンテナの実入率と、通年のコンテナ取扱における実入率（平成22年港湾統計）とを比較したのが、Table 1である。両港とも、取扱量に比べて、蔵置量の実入率が低かった。これは、一般的に、船社が空コンテナより実入コンテナの輸送を優先するため、空コンテナがターミナルに滞留する傾向にあることが原因と考えられる。

Table 1 Proportion of laden containers at Sendai and Kashima Port

Port	Proportion of Laden Containers		B/A
	(A) 2010 Throughput	(B) Storage at the Disaster	
Sendai	0.719	0.436	0.606
Kashima	0.502	0.444	0.885

本稿では、Kumagai (2013)による各港のコンテナ流出率データ（付録Table A.1）に対して、実入・空コンテナの流出率が、それぞれ、対数正規分布が当てはまると仮定して、推計誤差が最小となるようにパラメータを推計した。ここで、推計に用いた各港の蔵置コンテナの実入率は、各港の取扱量実績（平成22年港湾統計）と、Table 1の取扱量実入率と蔵置実入率との平均的な倍率（B/A）により設定した（仙台塩釜港と鹿島港を除く）。

パラメータ推計の結果、津波浸水深  $H_T$  (m) に対する実入コンテナ流出率  $LR_{Laden}$  及び空コンテナ流出率  $LR_{Empty}$  は、(1)式となった。Fig. 1には、推計曲線を、仙台塩釜港の実績と共に示す。実入コンテナに比べて、空コンテナが流出しやすいとの傾向が表現されている。さらに、この推計曲線による東日本大震災の各被災港の流出率の再現精度を、Fig. 2に示す。鹿島港が過小評価、茨城港と石巻港が過大評価となっているが、その他は、概ね傾向を再現できている。

$$\begin{aligned} LR_{Laden} &= \Phi \left[ \frac{\ln(H_T/6.40)}{0.192} \right] \\ LR_{Empty} &= \Phi \left[ \frac{\ln(H_T/2.07)}{0.192} \right] \end{aligned} \quad (1)$$

実際の脆弱性評価に当たっては、コンテナ蔵置個数が時々刻々変化する上、想定津波による浸水深もターミナル内の地点により変化がある。そのため、

これらの変化の幅を踏まえて、ある程度の範囲を持って流出個数を推計することが望ましい。また、航路啓開作業の効率については、東日本大震災の被災港においては、平均して5個／船団・日との実績があり、これを目安として、投入船団数から啓開に要する日数を算定することができる。

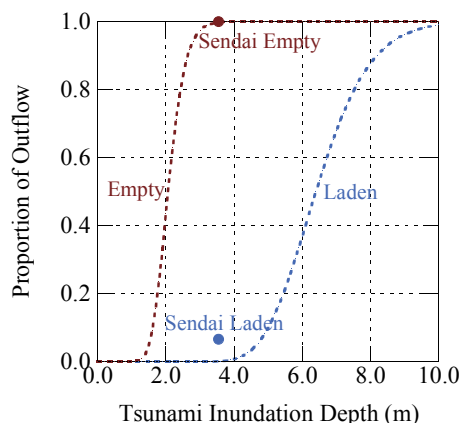


Fig. 1 Estimation curve for container outflow

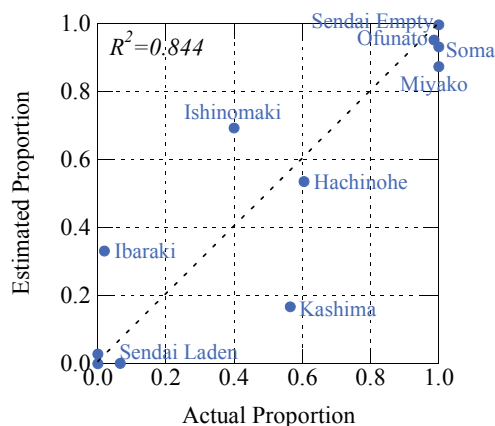


Fig. 2 Reproducibility of estimation curve for container outflow

コンテナ以外の流出については、定量的な被災データが無い場合、定式化には至っていない。既往の研究では、木材、自動車、小型船舶、養殖筏について、Table 2のような流出開始条件が見られる。

また、津波により航路や泊地に土砂が堆積し、所要の水深を確保するために浚渫が必要となる場合もある。

### 3. 係留施設

船舶を係留するための係留施設（岸壁、バース）の地震による被災については、複数の例がある。例えば、阪神・淡路大震災においては、神戸港の係留

Table 2 Inception condition of outflow by tsunami

Object	Inception Condition of Outflow	References
Log	Inundation Depth $\geq$ Diameter of Log	Goto (1983)
Car Track	Inundation Depth $\geq$ 0.5m	Suga (1995)
	Inundation Depth $\geq$ Half of the Hight of Car	Tanji <i>et al.</i> (2012)
Trailer Chassis	Inundation Depth $\geq$ 1.43m	MLIT (2012)
Small Ship at port	Current Velocity $\geq$ 2.0m/s	Kawata <i>et al.</i> (2007)
Small Ship at land	Inundation Depth $\geq$ 1.5m	Kawata <i>et al.</i> (2007)
Raft for Farming	Current Velocity $\geq$ 1.0m/s	Nagano <i>et al.</i> (1989)

施設が大きな被害を受けている。しかし、地震と津波の両者による本格的な複合被害は、東日本大震災しか見当たらない。そのため、本稿では、まず過去の地震被害により、地震単独の場合の脆弱性評価手法を策定し、さらに、津波襲来が追加された場合について考慮する。

地震による脆弱性評価式は、Table 3に示す地震・被災港のデータを使用して定式化した。それぞれの被害状況は、港湾技術研究所（現港湾空港技術研究所）における被害調査報告：上田ら（1993）、外山・松永（1995）、上部ら（1995）、稲富ら（1997）、井合ら（2001）、菅野ら（2007）より、岸壁（水深4.5m以深）を対象として整理した（付録Table A.2～A.6）。これらの被害報告においては、岸壁の被害状況が、以下の5つの被災程度に分類されている（菅野ら（2007）を除く）。

Table 3 Analyzed Earthquake and Damaged Port

Year	Earthquake	Damaged Port
1993	Kushiro-oki	Kushiro, Nemuro
1994	East Off Hokkaido	Nemuro, Kushiro
1995	Hyogoken-nanbu	Kobe
2000	Tottori-ken-seibu	Sakai
2005	West Off Fukuoka-ken	Hakata

- 0：無被害
- I：本体に異常はないが付属構造物に破壊や変状が認められるもの
- II：本体にかなり変状の起こったもの
- III：形はとどめているが構造体に破壊が起こったと認められるもの
- IV：全壊して形をとどめていないもの

一方、港湾BCPの脆弱性評価においては、施設の供用が再開できるまでの期間が重要となる。そのため、

評価する被災ランクは、以下のように分類する。

- 1：無被害及び1～2週間程度以内に供用再開可能（被災程度0 & I）
- 2：応急復旧により、1～2ヶ月程度以内に供用再開可能（被災程度II）
- 3：本格復旧が必要で、供用再開までに3ヶ月程度以上を要する（被災程度III&IV）

地震動強度の指標には、都道府県の地震被害想定で気象庁震度階が使用されていることを踏まえ、計測震度を採用する。各地震での被災港の計測震度  $I_{JMA}$  は、港湾地域強震観測結果の最大速度  $PGV$ 、もしくは、最大加速度  $PGA$  より、(2)式を用いて換算した（Karim and Yamazaki, 2002）。なお、最大速度データが入手できた場合には、最大速度を優先させた。

$$\begin{aligned} I_{JMA} &= 2.42 + 1.82 \log_{10} PGV \\ I_{JMA} &= 0.63 + 1.81 \log_{10} PGA \end{aligned} \quad (2)$$

以上のデータのうち、通常の岸壁（すなわち、兵庫県南部地震・神戸港及び鳥取県西部地震・境港の耐震強化岸壁を除く）を対象として、各地震・被災港の被災ランク超過確率（ $P_{Rank2}$  及び  $P_{Rank3}$ ）を用いて、フラジリティ・カーブのパラメータ推計を行った結果が、(3)式である。ランク2と3の被災確率の逆転を防ぐため、対数正規分布の分散は同一とした。また、このフラジリティ・カーブによる推計値と、実際の被害状況とを比較した結果が、Fig. 3である。全般的に、フラジリティ・カーブは、被災状況を精度良く再現した。

$$\begin{aligned} P_{Rank2} &= \Phi \left[ \frac{\ln(I_{JMA}/5.47)}{0.0546} \right] \\ P_{Rank3} &= \Phi \left[ \frac{\ln(I_{JMA}/5.83)}{0.0546} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

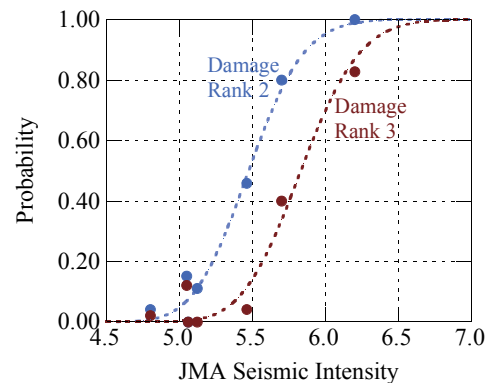


Fig. 3 Fragility curve of berths for earthquake damage

このFig. 3のフラジリティ・カーブでは、被災施設の耐震性能を全く考慮していない。実際には、被災施設の設計震度は、通常の岸壁で0.05（博多港）から0.20（釧路港・根室港）まで幅がある。しかし、



と津波被災の両者を考慮した被災ランク推計値を、実績値と比較した結果が、Fig. 6である。実績値の再現精度は決して高くはないが、推計値は実績値とほぼ同じレベルかそれ以上との安全側であり、簡易な手法として利用可能である。

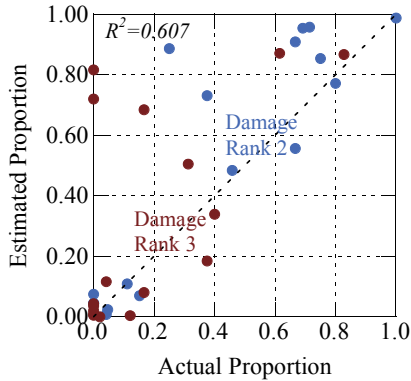


Fig. 6 Reproducibility of fragility assessment of berth

これまで検討してきたのは、通常の岸壁を対象とした脆弱性評価であり、耐震強化岸壁は含めていなかった。これは、耐震強化岸壁は被災事例数が少なく、単独での評価手法の確立が困難であることに依る。そこで、耐震強化岸壁は、通常の岸壁の被災式(3)のうち、対数正規分布の計測震度に係るパラメータのみが変化すると考え、ランク2とランク3の関係線を維持したまま、過去の3地震・津波、7被災港の10岸壁の被災状況全体に合うようパラメータを推計した結果が、式(6)及びFig. 7である。通常の岸壁に対して、フラジリティ・カーブが右に平行移動した形として、耐震性が強化された状況が表現できた。

$$P_{Rank2} = \Phi \left[ \frac{\ln(I_{JMA}/6.06)}{0.0546} \right]$$

$$P_{Rank3} = \Phi \left[ \frac{\ln(I_{JMA}/6.42)}{0.0546} \right] \quad (6)$$

以上の脆弱性評価手法により、気象庁震度階に対する大まかな被災確率を整理すると、Table 4のとおりとなる。なお、この表の数値は、あくまで平均的な状況であり、その再現精度はFig. 6のとおり高くはないため、この数値よりさらに上下する可能性も想定しておく必要がある。なお、この評価手法は地震被災を基本として策定しており、津波のみや、震度4以下の地震動における津波被災への適用のためには、実被害による検証が必要である。

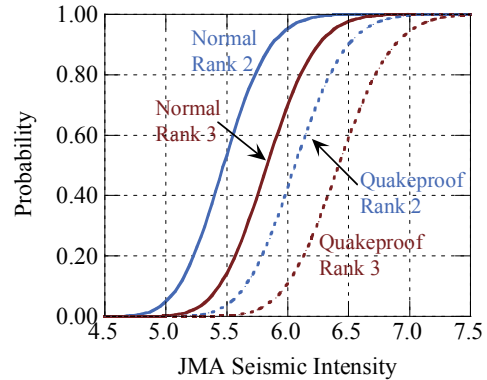


Fig. 7 Fragility curve for quakeproof berth

また、係留施設の地震に対する脆弱性評価については、Iai *et al.* (1990) によるFLIP (Finite Element Analysis of Liquefaction Program) の算定結果をデータベース化し、簡易に使用可能なチャート式耐震診断システム (国土交通省, 2008) がある。現時点で、重力式、矢板式及び栈橋式の岸壁に対応しており、

Table 4 Estimated probability of each damage rank of berth by earthquake and tsunami

JMA Seismic Intensity		5 Upper	6 Lower	6 Upper	7	
Normal Berth	Earthquake Only	Rank 1	95~47%	47~5%	5~0%	0%
		Rank 2	5~39%	39~25%	25~2%	2~0%
		Rank 3	0~14%	14~70%	70~98%	98~100%
	Tsunami Inundation 4 (m)	Rank 1	53~26%	26~3%	3~0%	0%
		Rank 2	43~22%	22~14%	14~1%	1~0%
		Rank 3	4~52%	52~83%	83~99%	99~100%
Tsunami Inundation 8 (m)	Rank 1	17~8%	8~1%	1~0%	0%	
	Rank 2	76~7%	7~5%	5~0%	0%	
	Rank 3	7~85%	85~95%	95~100%	100%	
Quakeproof Berth	Earthquake Only	Rank 1	100~96%	96~57%	57~10%	10~0%
		Rank 2	0~4%	4~32%	32~31%	31~0%
		Rank 3	0%	0~11%	11~59%	59~100%
	Tsunami Inundation 4 (m)	Rank 1	96~53%	53~32%	32~6%	6~0%
		Rank 2	0~42%	42~18%	18~17%	17~0%
		Rank 3	4~4%	4~50%	50~77%	77~100%
	Tsunami Inundation 8 (m)	Rank 1	93~17%	17~10%	10~2%	2~0%
		Rank 2	0~75%	75~6%	6~5%	5~0%
		Rank 3	7~7%	7~84%	84~93%	93~100%

構造諸元値や周辺地盤の諸元値等と、地震動強度の入力により、変形量が算定される。

FLIPを活用した、港湾BCPにも活用可能と考えられる耐震診断手法には、Ichii (2002) や竹信ら (2014) が見られる他、中部地方整備局でも分析を行っている。Ichii (2002) は、重力式岸壁を対象に、被災ランク0~IVの5段階に対して、地震動強度の指標に基盤最大加速度 (gal) を、構造物の耐震性の指標に等価N値： $N65$ 、ケーソンのアスペクト比： $W/H$ 及び基礎地盤の液状化層厚の無次元値： $D1/H$ を採用したフラジリティ・カーブを定式化している。この式は、中央防災会議 (2013) の南海トラフ地震被害想定、さらには、都道府県の被害想定においても採用されている。しかし、Ichii (2002) のフラジリティ・カーブは、重力式岸壁のみを対象としたものであり、さらに、各岸壁の耐震性パラメータを整理する必要がある点に留意が必要である。Fig. 8に、同論文中に示されているフラジリティ・カーブの図を掲載するが、これは、あくまで $N65=10$ 、 $W/H=0.9$ 、 $D1/H=0.5$ の場合の例であり、当然のことながら、パラメータの値により、フラジリティ・カーブは大きく異なるものとなる。また、同じ考え方により、吉川・一井 (2009) では矢板式岸壁のフラジリティ・カーブが定式化されているが、こちらでは、地震動強度に野津・井合 (2001) による速度のPSI値 ( $\text{cm/s}^{1/2}$ ) が採用されている。

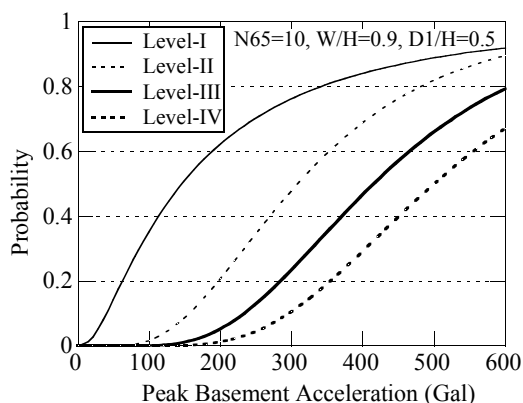


Fig. 8 Fragility curve for gravity type berth (Ichii, 2002)

竹信ら (2014) は、團村ら (2013) による変形量推計モデル (重力式及び矢板式) を用いた被害推定手法を提案している。この手法では、地盤条件 (土層構成、残留水位、各層の地盤種別・物性、等価N値)、岸壁の設計震度に加え、フィルター処理後の地震加速度最大値等のデータを使用し、地震による残留変形量を推計値し、さらに、復旧工費・工期を直接推計している。すなわち、地震動や地盤のサイト特性を十分に考慮して、復旧に要する期間を見積

もることが可能となっている。

上述の手法は、いずれも、本稿にて提案した方法より精度が高いが、一方で、各岸壁の詳細パラメータを整理する必要があることや、構造形式により適用できない場合があること、津波被害を考慮できないことといった点に留意が必要である。

また、中部地方整備局名古屋港湾空港技術調査事務所では、管内の主要な岸壁を対象に、地震の被害を予測し、さらに被災後の迅速な対応に活かすため、FLIPを用いた地震被害予測を数多く実施してきた。その結果を用いて、構造形式毎の通常・耐震パースの、計測震度に対する、残留水平変位と曲率比 (矢板式：最大曲率/全塑性モーメント、栈橋式：最大曲率/限界曲率) を整理した結果がFig. 9及びFig. 10である。

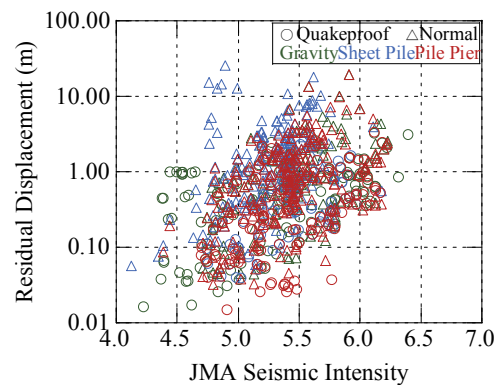


Fig. 9 Estimated displacement of berth

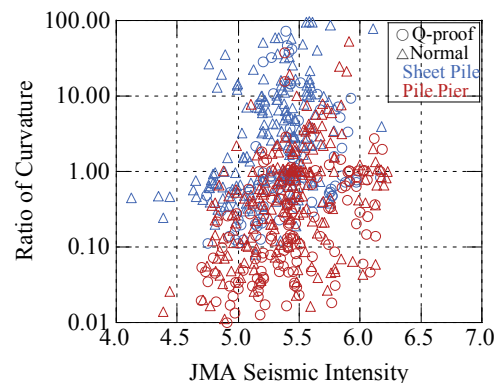


Fig. 10 Estimated ratio of curvature of berth

これらの結果を基に、残留水平変位が2.0mを超える、もしくは、曲率比が1.0を超えた場合に供用不可となると判定して、計測震度  $I_{JMA}$  に対する被災確率  $P_f$  に対して対数正規分布 (7式) を当てはめた結果がTable 5であり、これを図示したのが、Fig. 11である。

$$P_f = \Phi \left[ \frac{\{\ln(I_{JMA}) - \lambda\}}{\xi} \right] \quad (7)$$

Table 5 Estimated parameter of log-normal distribution

Estimated Parameter		Gravity Type	Sheet Pile Type	Pile Pier Type
Normal	$\lambda$	1.61	1.86	1.73
Berth	$\zeta$	0.095	0.176	0.131
Qakeproof	$\lambda$	2.03	1.79	1.76
Berth	$\zeta$	0.207	0.103	0.194

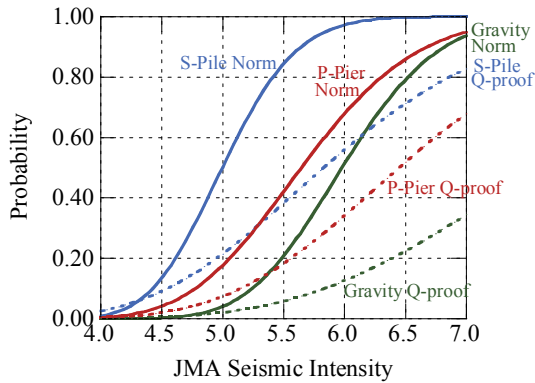


Fig. 11 Fragility curve for three types of berths

この中部地方整備局による分析結果は、計測震度により容易に被災確率を算定可能であり、さらに、構造形式による相違も考慮できる点で、港湾BCPに活用しやすいものである。Fig. 11の推計曲線を、実際の地震被害結果から導いたFig. 7（被災ランク3）と比較すると、全般的にカーブの傾きが小さく、矢板式は被災確率が大きめ、重力式は被災確率が小さめとなっていた。

#### 4. 外郭施設

通常、外郭施設（防波堤）の地震に対する脆弱性評価は、省略可能である。これは、防波堤は、地震時の地盤の支持力不足による破壊等に伴う被災例が少なく、また、被害の程度も小さい（沈下するのみ）（日本港湾協会，2007）ことに依る。

一方、東日本大震災においては、防波堤の津波被害が多く見られた。この津波被害に対しては、Honda and Tomita (2014) が、被災の有無を推計するフラジリティ・カーブを提案している。高い精度が確保出来るのは、被災確率： $P_f$  を津波波高： $\eta_{max}$  (m) と設計有義波高： $H_{1/3}$  (m) の比により推計する(8)式及びFig. 12であるが、同論文では、簡易な方法として津波波高のみの(9)式及びFig. 13も示されている。これらの式を用いることにより、簡易に、被災確率を求めることが出来る。この(8)式は、中央防災会議（2013）の南海トラフ地震被害想定や都道府県の被害想定で使用されている。

$$P_f = \Phi \left[ \frac{\{\ln(\eta_{max}/H_{1/3}) - 0.0386\}}{0.279} \right] \quad (8)$$

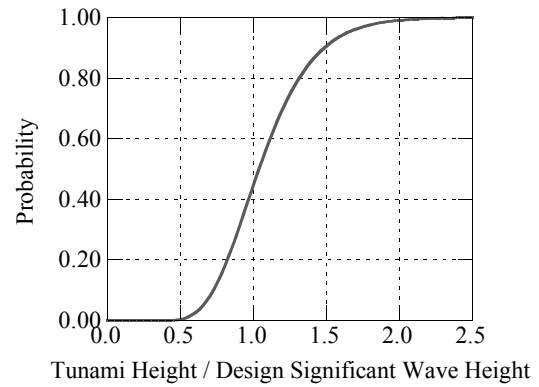


Fig. 12 Fragility curve for breakwater by height ratio

$$P_f = \Phi \left[ \frac{\{\ln(\eta_{max}) - 2.11\}}{0.115} \right] \quad (9)$$

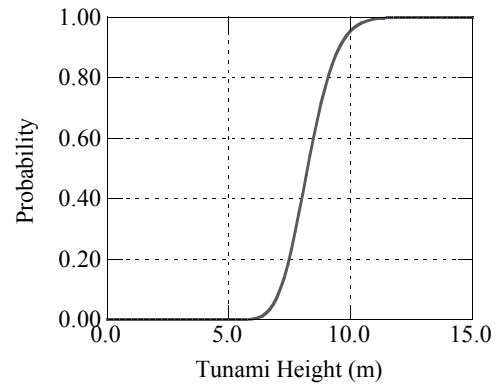


Fig. 13 Fragility curve for breakwater by tsunami height

防波堤の破損は、港内の静穏度の低下を導き、その結果として、係留施設の使用可能時間帯が短くなる。東日本大震災においては、八戸港では、八太郎北防波堤の被災により静穏度が確保出来ず、うねりの影響を受けて荒天時に接岸が不可能となる、荷役作業中にタグボートの補助が必要となる等の事例が発生した（国土交通省，2012）。この防波堤破損による利用率低下の評価は、基本的には、防波堤整備プロジェクトのB/C評価と同じ手法が利用可能である。港湾投資の評価に関する解説書2011（港湾事業評価手法に関する研究委員会，2011）では、①防波堤延長と静穏度の関係例及び②静穏度と利用率の関係例を示している（Fig. 14）。これらを活用し、防波堤破損による利用率の低下を簡易に評価可能である。ただし、Fig. 11は、波向きや防波堤・係留施設の位置の限られた例である点に留意が必要である。

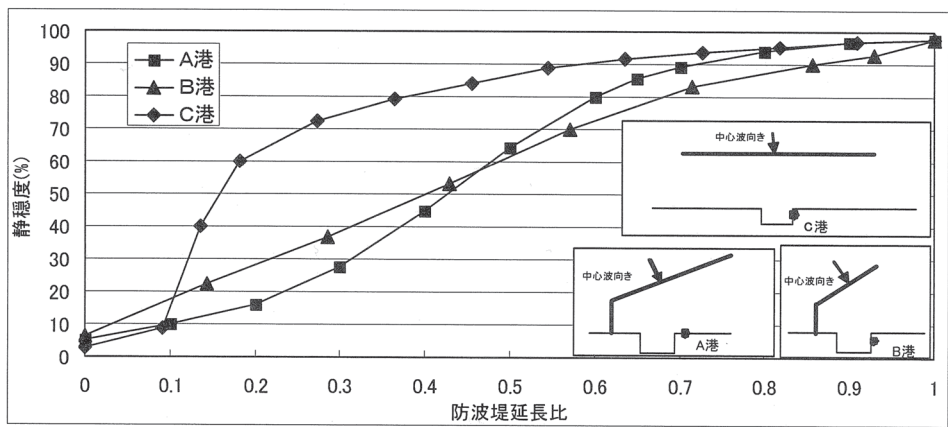


図 2-6-4 防波堤延長と静穏度の関係 (例)

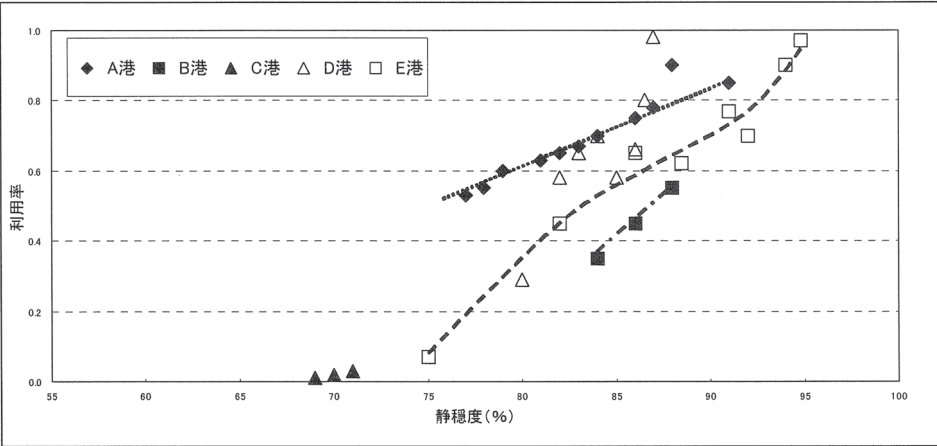


図 2-6-5 静穏度と利用率の関係 (例)

Fig. 14 Length of breakwater vs. utilization factor (Committee for method of port project evaluation, 2012)

5. 荷さばき施設

荷さばき施設の荷役施設 (クレーン, アンローダ) については, 係留施設等に比べて, 過去の被災事例が整理されていない. しかし, 荷役を行う上で荷役施設は不可欠であることから, 本稿では可能な範囲で, 被災事例を収集し, その結果を整理した.

収集できた被災事例は, 阪神・淡路大震災 (神戸港埠頭公社, 1998 ; 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会, 1998) 及び東日本大震災 (東本大震災合同調査報告書編集委員会, 2014 ; 日本クレーン協会, 2012 ; 新日本製鐵, 2011 ; 等) の2つの地震で, 被災港は7港湾, 荷役施設はコンテナ用ガントリークレーンとバルク (石炭及び鉄鉱石) 用アンローダである (付録Table A.8及びA.9). 荷役施設の被災ランクは, 係留施設との関係性を重視して, 係留施設の被災ランク設定をそのまま使用した. 被災7港湾の, 荷役施設の平均被災ランクと, 当該荷役施設が設置されていた係留施設の被災ランクを比較した結果が, Fig. 12である. 阪神・淡路大震災の神戸港及び東播磨港

では, 係留施設の平均被災ランクと荷役施設の平均被災ランクは同じレベルにあり, ほとんど差が無かった, これに対して, 東日本大震災では, 荷役施設の被災ランクが, 係留施設の被災ランクより大きくなる傾向が見られた (ただし, 仙台塩釜港と釜石港では, 全係留施設・荷役施設が, 被災ランク3). この結果からは, 地震と津波の両方を被災した場合, 荷役施設の被災は, 係留施設の被災より, 被害が大きくなる傾向があると言える. これは, 津波による電気施設の水没, 漂流コンテナ等による走行給電ケーブルの切断損傷, 漂流船舶等の衝突による構造被害, 津波水圧による転倒, 荷役中の船舶によるアンローダの破損等, 津波による追加的な被害が発生したことが原因である. ここで, 各荷役施設での津波浸水深は, 0.6~8mと推測されており, 浸水深が小さくても, 荷役施設の被災は, 地震だけの場合に比べて大きいことが見込まれた. そこで, Fig. 15には, 東日本大震災の5港湾の平均被災ランクの帰帰直線も併記した. この直線と, 地震のみの場合の直線 (Y=X) により, 係留施設平均被災ランクから, 荷



役施設の平均被災ランクを推計すると、その再現精度は、決定係数 ( $R^2$ ) : 0.828であり、妥当な精度で、両者の関係性を再現できた。

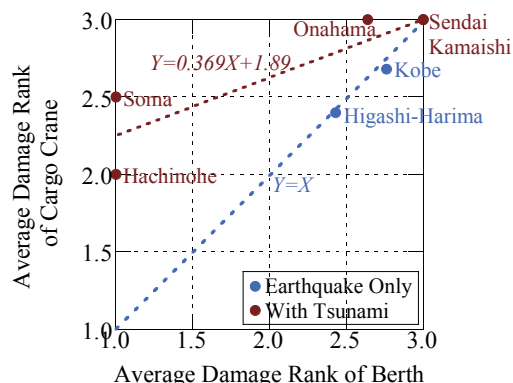


Fig. 15 Relation of damage rank of berth and cargo crane

この関係性を用いて、震度及び津波浸水深に対する荷役施設の大まかな被災確率を推計した結果が、Table 6である。係留施設の推計結果であるTable 4をベースとし、津波浸水がある場合には、被災ランクをFig. 12の関係性によって、引き上げた。その際、東日本大震災の被災5港湾においては、荷役施設に被災ランク1が存在しなかったため、本稿の推計においても被災ランク1は一律0%とし、その上で、被災ランク2と3の割合を、引き上げられた平均被災ランクに合うように算定した。被災ランク1が存在しなかったのは、脚下部や受変電設備の浸水により、水洗いやオーバーホール、電気機器等の交換、検査が必要となるためである。特に、電気機器やケーブル類は、新品交換の場合調達だけで3~6ヶ月を要し、被災港湾が多い場合、生産工場に限られるため納期が長期

化する。換言すれば、対応策として、代替部品を備えておくことで、復旧に要する期間を短縮することが可能である。東日本大震災では、他港発注分の走行給電ケーブルを被災港湾に融通することにより速やかな仮復旧に繋がった例があり、(一社)港湾荷役機械システム協会では、荷役機械の予備品リスト情報の共有化を進めている(港湾荷役機械システム協会, 2012a, 2012b)。

ここで、阪神・淡路大震災以降、レベル2地震動に対する修復性を備えた免震クレーンが導入されてきている。これは、耐震強化岸壁の要求性能が、レベル2地震動に対して、軽微な修復により荷役施設の機能が回復できるレベルの損傷にとどめることとなっていることに対応している(宮田ら, 2008)。東日本大震災においては、関東地方の港湾(震度5弱~5強)では、通常のコンテナクレーンの中には構造の一部が損傷して荷役停止を伴う補修が必要となったものがあつたが、耐震性が強化された免震クレーンでは、荷役停止を伴う補修を必要とするものはなかった(日本クレーン協会, 2012)。基本的には、耐震強化岸壁と免震クレーンはセットであるべきと考えられるため、Table 6では、そのような記載をしている。しかし、免震クレーンの被災事例は、収集できた範囲の中では、仙台塩釜港高砂コンテナターミナルのガントリークレーン2基だけであつた。これらのガントリークレーンは、地震時には免震装置が作動して構造被害はなかったものの、津波漂流物による脚部損傷や浸水による電気機器へのダメージがあり、復旧には最短で約半年が必要となった(日本クレーン協会, 2012)。結果として、高砂コンテナターミナルでは、免震クレーンと通常のクレーンとで、

Table 6 Estimated probability of each damage rank of cargo crane by earthquake and tsunami

JMA Seismic Intensity		5 Upper	6 Lower	6 Upper	7	
Normal Crane (Normal Berth)	Earthquake Only	Rank 1	95~47%	47~5%	5~0%	0%
		Rank 2	5~39%	39~25%	25~2%	2~0%
		Rank 3	0~14%	14~70%	70~98%	98~100%
	Tsunami Inundation 4 (m)	Rank 1	0%	0%	0%	0%
		Rank 2	55~27%	27~7%	7~1%	1~0%
		Rank 3	45~73%	73~93%	93~99%	99~100%
	Tsunami Inundation 8 (m)	Rank 1	0%	0%	0%	0%
		Rank 2	41~9%	9~3%	3~0%	0%
		Rank 3	59~91%	91~97%	97~100%	100%
Seismic Isolation Cargo Crane (Quakeproof Berth)	Earthquake Only	Rank 1	100~96%	96~457%	57~10%	10~0%
		Rank 2	0~4%	4~32%	32~31%	31~0%
		Rank 3	0%	0~11%	11~59%	59~100%
	Tsunami Inundation 4 (m)	Rank 1	0%	0%	0%	0%
		Rank 2	71~55%	55~30%	30~11%	11~0%
		Rank 3	29~45%	45~70%	70~89%	89~100%
	Tsunami Inundation 8 (m)	Rank 1	0%	0%	0%	0%
		Rank 2	69~41%	41~10%	10~4%	4~0%
		Rank 3	31~59%	59~90%	90~96%	96~100%

本稿で設定した被災ランクでは差がなかった。他に、免震クレーンの被災事例がないため、現時点では、その耐震性能の通常のクレーンからの向上度合を評価できておらず、そのため、Table 5における免震クレーン(耐震強化岸壁)の地震のみの場合の数値は、耐震強化岸壁の数値(Table 4)と同じとしている。実際には、免震クレーンは、特にレベル2地震動より小さい地震動に対して、通常のクレーンより耐震性が高く、被災を抑えることができる設計となっている。そのため、特に、震度5強～震度6弱の被災ランクは、免震クレーンについては、安全側の評価となっており、留意が必要である。

また、荷さばき施設のうち、上屋については、Honda and Tomita (2014) が、津波に対する被災の有無を推計するフラジリティ・カーブを、(10)式及びFig. 16のように提案している。ここで、 $P_f$  : 被災割合、 $H_T$  : 津波浸水深 (m) である。

$$P_f = \Phi \left[ \frac{\ln \{ \ln(H_T) - 0.430 \}}{0.642} \right] \quad (10)$$

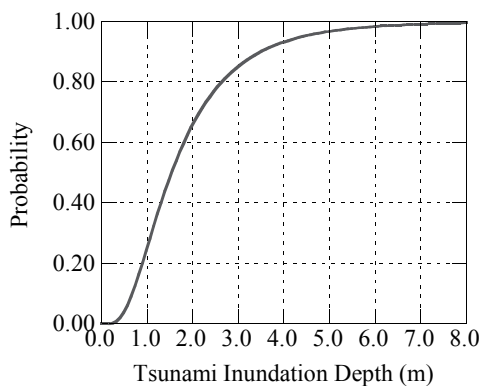


Fig. 16 Fragility curve for warehouse

## 6. おわりに

本稿は、現時点において、港湾BCPの脆弱性評価に使用可能な簡易な耐震・耐津波被災確率の評価式を作成し、また、既存式の整理を行ったものである。本稿の内容が、各港湾における港湾BCPに活用されれば幸いである。

## 謝 辞

本研究の実施に当たり、国土交通省東北地方整備局港湾空港部及び中部地方整備局名古屋港湾空港整備事務所、国土技術政策総合研究所の宮田正史港湾施設研究室長及び熊谷兼太郎沿岸海洋・防災研究部主任研究官(当時、現防災研准教授)、(独)港湾空港技術研究所アジア・太平洋防災研究センターの富田孝史副センター長及び本多和彦主任研究官、広

島大学の一井康二准教授にご助力いただきました。また、(公社)日本港湾協会、(一財)沿岸技術研究センター、(一財)港湾空港総合技術センター及び防災研究所社会防災研究部門の多々納裕一防災社会システム研究分野教授には、産官学共同研究部門の共同研究先として、研究環境を整えていただきました。ここに記し、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 井合進・菅野高弘・山崎浩之・長尾毅・野津厚・一井康二・森川嘉之・小濱英司・西森男雄・佐藤陽子・田中剛・海老原健介・大村武史・大槇正紀(2001) : 平成12年(2000年)鳥取県西部地震による港湾施設等の被害報告, 港湾空港技術研究所資料, No.1015.
- 稲富隆昌・上部達生・井合進・田中祐人・山崎浩之・宮井真一郎・野津厚・宮田正史・藤本義則(1997) : 1994年北海道東方沖地震による港湾施設被害報告, 港湾技研資料, No.856.
- 上田茂・稲富隆昌・上部達生・井合進・風間基樹・松永康男・藤本健幸・菊池喜昭・宮井真一郎・関口信一郎・藤本義則(1993) : 1993年釧路沖地震港湾施設被害報告, 港湾技研資料, No.766.
- 上部達生・高野剛光・松永康男(1995) : 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察(その3)神戸港のケーソン式大型岸壁の被災分析, 港湾技研資料, No.813.
- 河田恵昭・小鯛航太・鈴木進吾(2007) : 東南海・南海地震発生時の港湾機能を活用した緊急輸送戦略, 海岸工学論文集, Vol.54, pp.1326-1330.
- 気象庁(2011) : 平成23年3月地震・火山月報(防災編)。
- 神戸港埠頭公社(1998) : 阪神大震災復旧工事誌—1995年兵庫県南部地震—公社埠頭復旧の記録.
- 港湾事業評価手法に関する研究委員会(2011) : 港湾投資の評価に関する解説書2011.
- 港湾荷役機械システム協会事務局(2012) : 東日本大震災における港湾荷役機械関連の被災状況調査報告の概要, 港湾荷役, Vol.57, No.5, pp.530-536.
- 港湾荷役機械システム協会事務局(2012) : 3.11大震災による荷役機械関係の被害とその補修について, 港湾荷役, Vol.57, No.6, pp.622-627.
- 国土交通省(2008) : チャート式耐震診断システムの概要, [www.mlit.go.jp/common/000052151.pdf](http://www.mlit.go.jp/common/000052151.pdf), 2014年12月15日アクセス.
- 国土交通省(2012) : 津波に対する港湾の安全性評価, 交通政策審議会港湾分科会第4回防災部会, 資料3-1.
- 後藤智明(1983) : 津波による木材の流出に関する

- 計算, 第30回海岸工学講演会論文集, pp.594-597.
- 下迫健一郎 (2013) : 東北地方太平洋沖地震津波による防波堤の被災, ながれ, Vol.31, pp.27-31.
- 新日本製鐵株式会社 (2011) : 再生に向けて始動! 釜石製鐵所, NIPPON STEEL MONTHLY, Vol.212, pp.3-11.
- 須賀堯三・利根川利水研究会編 (1995) 利根川の洪水 語り継ぐ流域の歴史, 山海堂.
- 菅野高弘・野末康博・田中智宏・野津厚・小濱英司・ハザリカ・ヘマンタ・元野一生 (2007) : 2005年福岡県西方沖の地震による港湾施設被害報告, 港湾空港技術研究所資料, No.1165.
- 菅野高弘 (2012) : マグニチュード9 地震と津波の複合被害の特徴と今後へ向けて, 第9回国際沿岸防災ワークショップ講演概要集.
- 竹信正寛・宮田正史・曾根照人・野津厚・渡部富博・栞原直範・佐藤裕司 (2014) : 大規模地震時における港湾全体としての被害程度の推定手法の提案, 第14回日本地震工学シンポジウム講演論文集, CD-ROM.
- 丹治雄一・加藤広之・中村隆・藤間功司 (2012) : 津波による車両・船舶の漂流実験, 日本沿岸域学会研究討論会講演概要集, Vol.25 (CD-ROM).
- 團村肇・宮田正史・野津厚・岩井厚・浅井茂樹 (2013) : 液状化を考慮した岸壁残留変形量の簡易評価法の高度化, 国土技術政策総合研究所資料, No.743.
- 中央防災会議 (2013) 南海トラフ巨大地震の被害想定について (第二次報告) .
- 外山進一・松永康男 (1995) : 兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察 (その2) 被災状況-岸壁, 防波堤, 海岸保全施設-, 港湾技研資料, No.813.
- 永野修美・今村文彦・首藤伸夫 (1989) : 数値計算による沿岸域でのチリ津波の再現性, 海岸工学論文集, Vol.36, pp.183-187.
- 日本クレーン協会 (2012) : 東日本大震災におけるクレーン等の被災状況及び対応, クレーン, Vol.80, No.8, pp.6-32.
- 日本港湾協会 (2007) : 港湾の施設に技術上の基準・同解説.
- 東日本大震災合同調査報告書編集委員会 (2014) : 東日本大震災合同調査報告 機械編.
- 野津厚・井合進 (2001) : 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.
- 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会 (1998) : 阪神・淡路大震災調査報告 機械編.
- 宮田正史・竹信正寛・菅野高弘・長尾毅・小濱英司・渡部昌治 (2008) : 耐震強化施設としてのコンテナクレーンの耐震性能照査方法に関する研究 (その1), 国土技術政策総合研究所資料, No.455.
- 吉川祐子・一井康二 (2009) : 矢板式岸壁の地震時被災確率評価式の提案, 第44回地盤工学研究発表会, pp.1371-1372.
- Akakura, Y., Ono K. and Ichii, K. (2014): Earthquake and tsunami damage estimation for port-BCP, Geotechnics for Catastrophic Flooding Events, Proceedings of 4th GEDMAR, pp.233-238.
- Honda, K. and Tomita, T. (2014): Damage to Port Facilities by the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami, Proceedings of the 24th International Ocean and Polar Engineering Conference, pp.30-37.
- Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T. (1990): Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the port and harbour research Institute, Japan, Vol.29, No.4, pp.27-56.
- Ichii, K. (2002): A Seismic Risk Assessment Procedure for Gravity Type Quay Walls, Structural Engineering / Earthquake Engineering, JSCE, Vol.19, No.2, pp.131-140.
- Karim, k. and Yamazaki, F. (2002): Correlation of JMA instrumental seismic intensity with strong motion parameters, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.31, pp.1191-1212.
- Kumagai, K. (2013): Tsunami-induced Debris of Freight Containers due to the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, JSCE Disaster Fact Sheet, FS2013-T-0003, pp.1-25.

(論文受理日: 2015年5月20日)