

震災における港湾の復旧過程の簡易評価モデルに関する検討

A Study on Simple Estimation Model of Recovery Process of Port Facilities Damaged by Earthquake

○鳥澤 一晃¹, 佐土原 聰²
Kazuaki TORISAWA and Satoru SADOHARA²

¹鹿島技術研究所

Kajima Technical Research Institute

²横浜国立大学大学院

Graduate School, Yokohama National University

In the Great East Japan Earthquake, the business activity was very influenced by disruption of supply chain. In this paper, the methods of the recovery process estimation of the port facilities damaged by earthquake were studied to contribute to the development of BCP for the companies that compose supply chain. The example analysis which simulated the recovery process was conducted for the port facilities actually damaged in the Great East Japan Earthquake. The result showed that the methods were reasonable to develop BCP of supply chain.

Keywords : Business Continuity Plan, Supply Chain, The Great East Japan Earthquake, Seismic Risk Analysis

1. はじめに

東日本大震災ではサプライチェーンの寸断により企業の事業活動が大きな影響を受けた。地震後に東北地域の企業を対象に行なわれたアンケート調査¹⁾では、震災による事業中断被害の要因として、物流インフラの復旧の遅れを回答した割合が最も高く、次いで原材料の供給の途絶の回答割合が高かった。震災の教訓としてサプライチェーンでのBCPの重要性が再認識された²⁾が、適切なBCPを策定するには自社施設のみでなく、取引先、物流インフラ、ライフラインについても被害を予測し、現状で可能な復旧期間を推定する必要がある³⁾。

そこで、本研究ではサプライチェーンを構成する企業の事業継続に影響を与える物流インフラの一つである、港湾の復旧期間を簡便に評価する手法を検討する。

関連する既往研究としては、湯沢・須田⁴⁾や柴崎ら⁵⁾が地震による港湾被害に伴う経済的影響を算出するため、バースの被害程度と復旧期間を評価している。ただし、いずれの研究も、港湾施設管理者を実施主体として想定したものであるため、バースの被害予測には対象施設の構造形式や地盤情報を用いる方法となっている。また、地震動による被害のみが対象であり、津波による被害については考慮されていない。

本研究では、一般企業が港湾施設利用者として、震災時の港湾の利用可否を概略評価することを目的に、外力のみをパラメータに港湾の復旧過程を予測するモデルを検討する。また、東日本大震災において主に津波による被害が顕著であった港湾に着目して、分析を行なう。

2. 検討に用いたデータ

本研究では、東日本大震災で被災した国土交通省東北地方整備局の重要な港湾における復旧バース数の推移⁶⁾のデータを用いて、震災時の港湾の復旧過程に関して分析を行なう。港湾の被災状況として、相馬港以北では津波による防波堤などの被害が顕著であったが、相馬港以南では地震動による岸壁などの被害が顕著であったことが

指摘されている⁶⁾。そこで、本研究では、東北地方整備局の重要な港湾のうち、津波を主因として被害を受けた表1の7港湾を対象に分析を行なうこととした。対象港湾における震度および津波高を表1に示す。対象港湾では比較的大きな津波高が観測されている。また、対象港湾におけるバース復旧率(全バース数に対する復旧バース数の比率)の推移を図1に示す。八戸港では4ヶ月弱で約9割が復旧し、宮古港・大船渡港・石巻港・仙台塩釜港・釜石港も半年程度で7~8割が復旧している。

表1 対象港湾における震度および津波高⁶⁾

No	港湾名	全バース数	震度	津波高
1	八戸港	44	震度5強	6.2m
2	久慈港	24	震度5弱	8.6m
3	宮古港	26	震度5強	7.3m
4	釜石港	7	震度6弱	8.1m
5	大船渡港	10	震度6弱	9.5m
6	石巻港	31	震度6弱	7.7m
7	仙台塩釜港	42	震度6強	7.2m

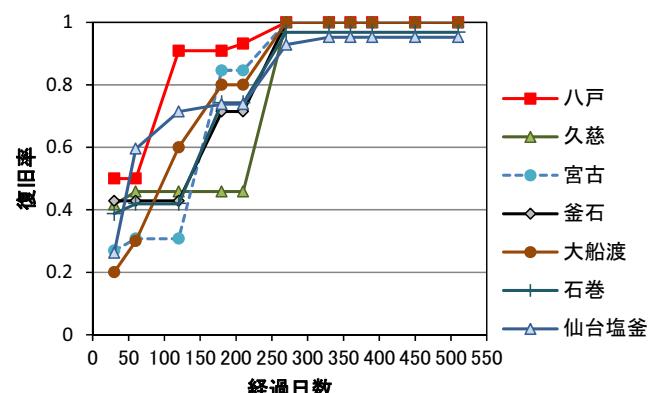


図1 対象港湾におけるバース復旧率の推移⁶⁾

3. 港湾の復旧過程の簡易評価モデル

(1) 復旧過程の評価モデルの考え方

本研究では、バース使用不能の状態を「バースの被害」と定義する。また、次に記す仮定を置く。

- ① バースの耐震性能・対津波性能はすべて同じ
- ② バースの被害は互いに独立に発生
- ③ バースの復旧はすべて同時に開始

図 1 に示したバース復旧率は「地震後 t 日以内に復旧するバースの比率」であるから、上記の仮定の下では「地震後 t 日以内にバースが復旧する確率」と同義である。また、それは(1)式により求めることができ、図 2 のように描ける。

$$F(t|x) = H(t|x) \cdot G(x) + (1 - G(x)) \quad (1)$$

ここで、 $G(x)$ は外力 x が発生したときにバースが被害を受ける確率、 $H(t|x)$ は外力 x により被害を受けたバースが t 日以内に復旧する確率である。

そこで、図 1 に示したバース復旧率に基づき、バースの被害確率 $G(x)$ およびバースの復旧期間の確率分布 $H(t|x)$ のモデル化を行なう。

なお、上記の仮定のうち、①については現実には耐震バースや一般バースが混在しているが、本研究の趣旨により国土交通省の重要な港湾が満たす平均的な性能として一律に考えることにした。②については同一港湾に複数のバースがある場合、各バースの被害には多少の相関があると思われるが、柴崎ら⁵⁾も指摘しているようにその具体的な設定は今後の課題と言える。③については現実には復旧順序も問題になると思われるが、既往研究^{4), 5)}では同時開始を仮定しているケースも多い。

(2) バースの被害確率のモデル

本研究では、津波高を外力として、被害率との関係を分析した。なお、文献 6 では地震直後から 30 日までのバース復旧率は不明であったため、ここでは 30 日時点の復旧率を用いて、それを 1 から引いた値をバース被害率 G_i とした (i は港湾を示す。 $i = 1, \dots, 7$)。

$$G_i = 1 - P_{i0} \quad (2)$$

ここで、 P_{i0} は港湾 i の 30 日時点のバース復旧率である。

津波高に対する対象港湾のバース被害率のプロットを図 3 に示す。別途、津波高の自然対数と被害率の関係は確率紙上ではほぼ直線状になると確認されたため、津波高 x が発生したときのバース被害率を標準正規分布の累積分布関数 Φ を用いて、(3)式のようにモデル化することにした。

$$G(x) = \Phi((\ln x - \lambda_x)/\zeta_x) \quad (3)$$

ここで、 λ_x および ζ_x はバースに被害が発生する津波高 $\ln x$ の平均値および標準偏差である。

λ_x および ζ_x は(4)式に示す ε を目的関数とした最小二乗法によって求めた。

$$\varepsilon = \sum_i (G_i - G(x))^2 \quad (4)$$

得られた回帰曲線を図 3 に合わせて示した。本研究で用いたデータは限られているため、今後データを追加し、データがない範囲の評価結果の精度向上が必要である。

(3) バースの復旧期間の確率分布のモデル

図 1 のバース復旧率から、復旧期間の確率分布 $H(t|x)$ に相当するものを分離するため、(5)式により 30 日時点での復旧率が 0 となるように基準化した(図 4)。

$$\tilde{P}_{ij} = (P_{ij} - P_{i0}) / (1 - P_{i0}) \quad (5)$$

ここで、 P_{ij} は港湾 i の時点 j の復旧率 ($j = 0$ は 30 日時点で、 $j = 0, \dots, 10$)、 \tilde{P}_{ij} は基準化した復旧率である。

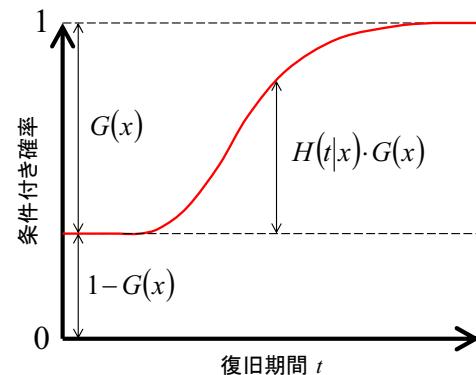


図 2 外力 x が発生したときのバースの復旧期間が t 日以内となる確率

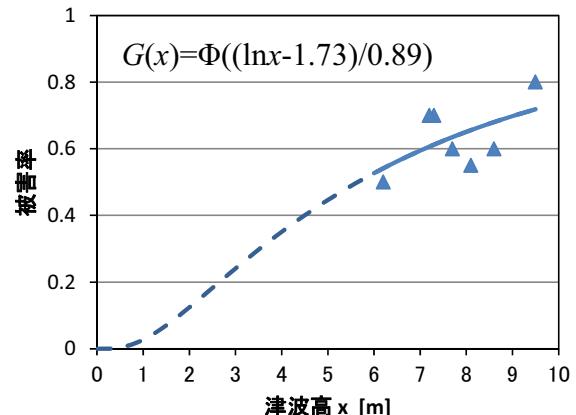


図 3 津波高によるバースの被害率関数

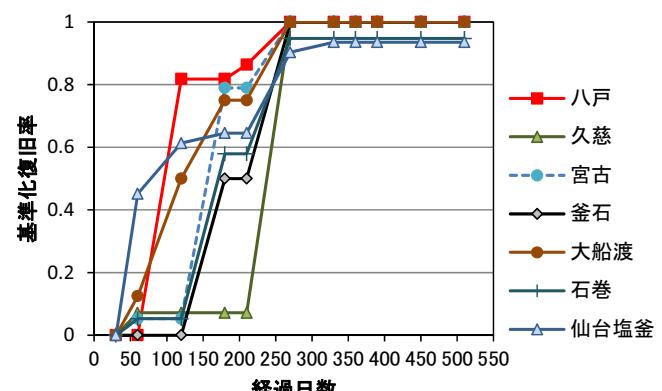


図 4 30 日時点の値で基準化したバース復旧率

図 4 に示したグラフは単純な分布形状ではないが、本研究では簡単のため、復旧期間は対数正規分布に従うと仮定して、(6)式のようにモデル化することにした。

$$H(t|x) = \Phi((\ln t - \lambda_t(x))/\zeta_t(x)) \quad (6)$$

ここで、 $\lambda_t(x)$ および $\zeta_t(x)$ はそれぞれベースの復旧期間 $\ln t$ の平均値および標準偏差であり、それらは外力 x の関数として検討することにした。

本研究では、外力として津波高を対象に復旧期間との関係を分析した。

まず、津波高に対する対象港湾の復旧期間の対数平均のプロットを図 5 に示す。津波高が高くなれば復旧期間も長くなる傾向にあることが読み取れるが、大船渡港と仙台塩釜港はそれ以外の港湾の分布からやや外れていることが分かる。図 4 のグラフの分布形状から、大船渡港や仙台塩釜港について対数正規分布を仮定するのは難があると思われる。大船渡港と仙台塩釜港を除くとデータは少なくなるが、津波高と復旧期間の対数平均の間には明瞭な比例関係が見られることから、本研究では両港を除いて、(7)式によりモデル化することにした。線形回帰で得られた回帰直線を図 5 に合わせて示す。

$$\lambda_t(x) = ax + b \quad (7)$$

次に、津波高に対する対象港湾の復旧期間の対数標準偏差のプロットを図 6 に示す。前述と同様の理由で、仮に大船渡港と仙台塩釜港を除いて考えると、復旧期間の対数標準偏差は津波高に依らず概ね一定の関係にあると思われる。そこで、本研究では $\zeta_t = 0.3$ と設定することにした。

4. 構築したモデルによる復旧過程の予測結果

3 章の検討で得られた、津波高を外力のパラメータとする港湾の復旧過程の簡易評価モデルによる予測結果を、実際の復旧率の推移と比較した。各港湾のベース復旧率の推移（データ）と予測した復旧過程（モデル）を重ね書きして図 7 に示す。これより、八戸港や石巻港は全体的によく整合しているが、釜石港では全体的にやや過小評価の傾向で、宮古港では約 100 日以前でやや過大評価である。久慈港ではデータとモデルとの乖離が大きいが、これは実際のベースの復旧の進め方等に起因するものと思われる。また、大船渡港については、津波高（9.5m）で予測される平均的な復旧過程よりも、大幅に早く復旧が進んでいた可能性がある。仙台塩釜港については約 200 日以後は比較的整合している。

なお、各港湾における被害状況や復旧過程については、今後文献調査等で詳細を確認していきたい。

5. まとめ

本研究では、サプライチェーンを構成する企業の BCP 策定のために、外力に係るパラメータのみで簡易に港湾の復旧過程を予測可能なモデルを検討した。

また、東日本大震災で被災した国土交通省の重要港湾の復旧データから津波高に基づく評価モデルを導出した。数例の試算をしたところ概ね妥当な結果が得られたが、引き続き適用性の検討等を進める必要がある。

なお、今回分析に用いたデータは非常に限られており、

また、津波以外に地震動や液状化による影響も含まれている。今後はデータの追加等も進めながら、モデル化の再検討も行ないたい。

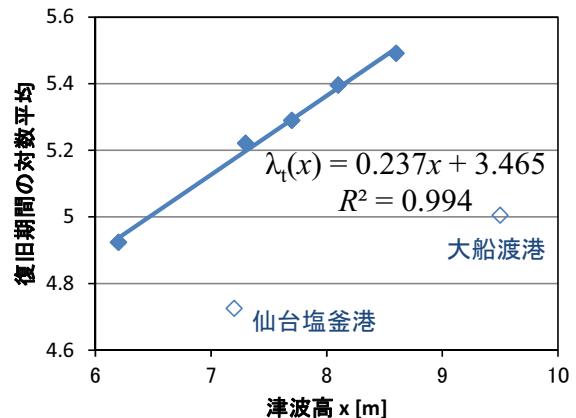


図 5 津波高と復旧期間の対数平均の関係

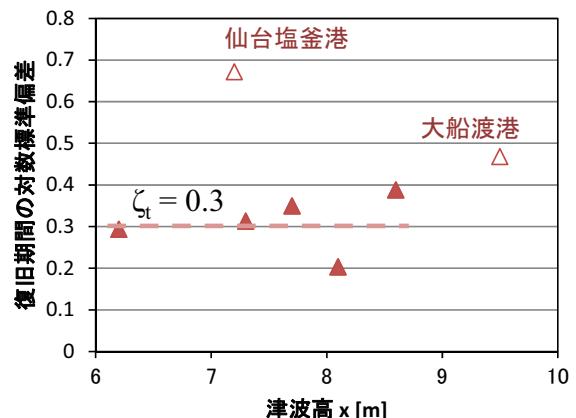


図 6 津波高と復旧期間の対数標準偏差の関係

参考文献

- 1) 社団法人東北経済連合会：東日本大震災の影響に関するアンケート調査結果、2011年9月
- 2) 内閣府（防災担当）：東日本大震災を踏まえた企業の事業継続への取組みに関する提言～企業の事業継続計画策定・運用、事業継続ガイドラインの改定に向けて～、2012年3月
- 3) 内閣府（防災担当）：事業継続ガイドライン－あらゆる危機的事象を乗り越えるための戦略と対応－、2013年8月改定
- 4) 湯沢昭、須田熙：地震による港湾機能の経済被害予測、土木学会論文集、第401号、IV-10、pp.79-88、1989.
- 5) 柴崎隆一、森屋陽一、渡部富博、安間清：貨物輸送費用も考慮した港湾施設の耐震設計における経済評価手法の構築、国土技術政策総合研究所資料、第125号、2003年12月
- 6) 小野憲司、赤倉康寛：東日本大震災における港湾物流へのインパクトと海運・港湾部門のレジリエンス機能、京都大学防災研究所年報、第56号B、pp.23-36、2013年6月

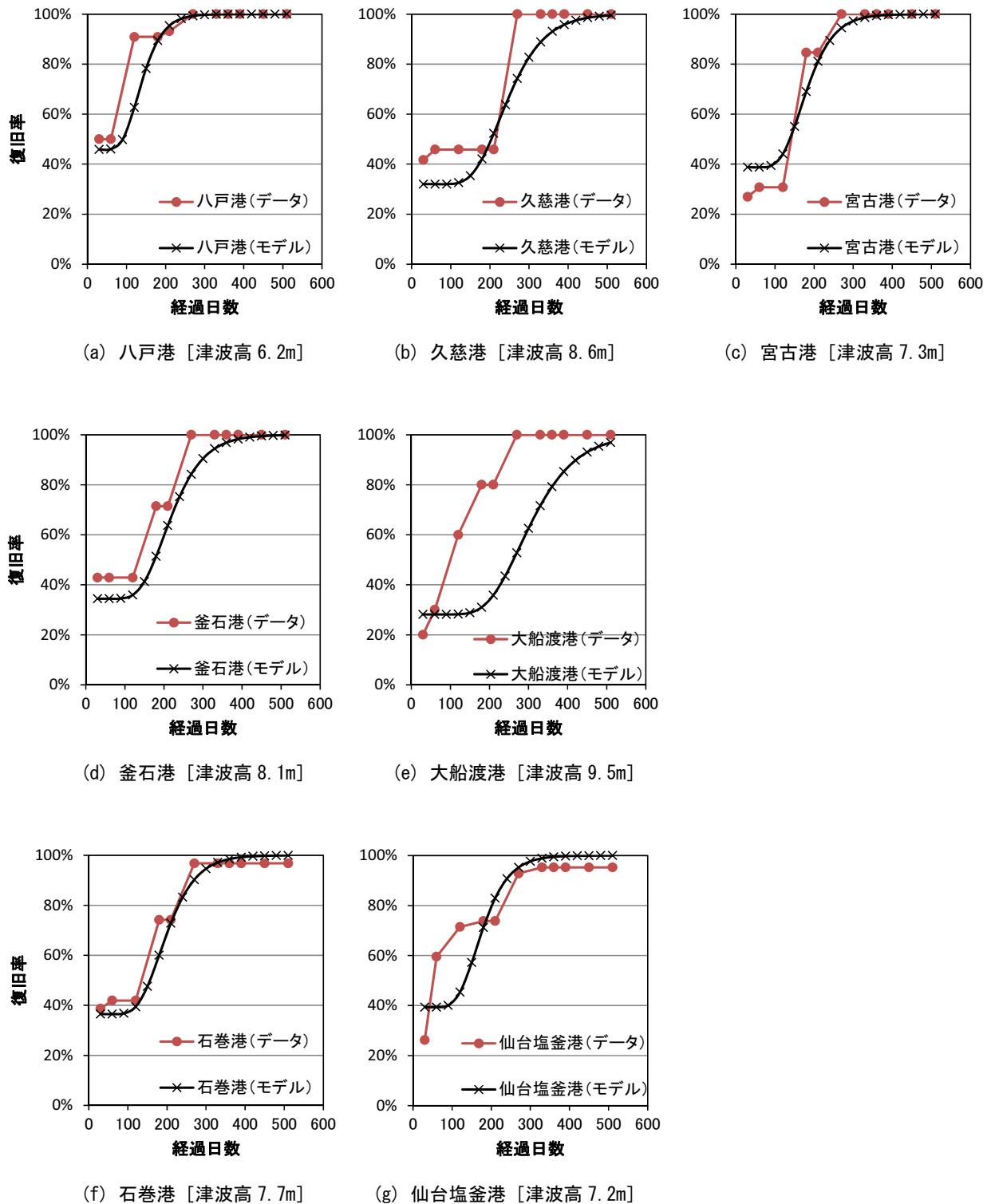


図7 東日本大震災で被災した港湾での復旧率の推移（データ）と予測した復旧過程（モデル）の比較