

平成21年 6月18日現在

研究種目：基盤研究(C)
 研究期間：2006-2008
 課題番号：18510167
 研究課題名(和文) 社会基盤施設被害の相関を考慮した海上物流地震防災ネットワーク戦略の評価手法構築
 研究課題名(英文) Evaluation Method of Development Strategy on Maritime Shipping Network for Earthquake Mitigation considering Correlation of Infrastructure Damage
 研究代表者
 柴崎 隆一 (SHIBASAKI RYUICHI)
 国土交通省国土技術政策総合研究所・港湾研究部・主任研究官
 研究者番号：50323514

研究成果の概要：港湾を中心とした社会基盤施設のもつネットワーク性に着目し、海上物流に関する地震被害の経済評価手法を開発するため、これまであまり考慮されることのなかった、①重力式岸壁以外の港湾施設における地震被災確率、②連続または近接する港湾施設の被災の相関、③国際海上コンテナ貨物以外の形態の貨物の経済被害、④国際輸送市場における均衡状態の変化が社会経済に与える長期的な影響の評価、について検討を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,800,000	0	1,800,000
2007年度	900,000	0	900,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	300,000	4,000,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学，交通工学・国土計画

キーワード：災害リスク評価，地震災害，港湾施設，ネットワーク，被害相関，広域被害

1. 研究開始当初の背景

近年、港湾施設の耐震設計においては、はじめに構造物の要求性能を規定し、その性能を満たす設計基準を選定するという、性能設計の考え方が導入されつつある。しかし、性能設計においては、各耐震性能における被害状況の違いを勘案した損失額と投資費用の比較考量といった、経済性に関する評価が本質的に肝要であるにもかかわらず、実務においてこのような試みは不足していると言わざるを得ない。そこで、研究代表者らは、これまでに、港湾施設の耐震設計問題を対象に、建設費用と被災時の復旧費用の期待値に加え、港湾貨物の迂回輸送等による経済損失も含めた評価の枠組みを提案し、実際に試算を

行った。

ところが、上記評価手法には、被災確率の算出・経済被害額の推定方法のいずれについても、未だ大きな問題点を抱えている。たとえば、被災確率の算出においては、

- (1) データの入手制約などの問題から、これまでに被災確率を算出した対象の施設が重力式岸壁のみであり、他の方式（栈橋式、矢板式など）の岸壁や、他の港湾施設（防波堤など）については、厳密な評価ができない。
- (2) 岸壁の被災確率算出にあたっては、入力加速度に対して被災規模別に発生確率を与えるフラジリティ・カーブに基づき、個別の岸壁ごとに算出を行っている。本来なら

ば、連続または近接する岸壁同士の被災確率の相関や、あるいは大規模な地震が発生した場合、複数の港湾が同時に被災する確率についても考慮すべきであるが、これらに関する知見の蓄積が不足しているため、現在のところは何らかの大胆な仮定を置かざるを得ない。

- また、経済被害額の推定方法についても、
- (3) 現在のところ経済被害を算出可能なのは、データの入手制約などのため、国際海上コンテナ貨物の輸送に限定されているが、その他の貨物についても考慮した評価を行う必要がある。
 - (4) 国際海上コンテナ貨物輸送における経済被害評価についても、現在は、被災した岸壁が一定期間利用できずに迂回することの費用のみが考慮されている。しかしながら、阪神・淡路大震災で神戸港が被災した際にみられたように、港湾機能（特にハブ港としての機能）が被災後一定期間他港へ移転すると、国際海上コンテナ輸送市場が被災前とは異なる状況で均衡し、完全復旧の後も貨物取扱量が完全には元に戻らず、周辺地域の経済にも影響を及ぼす、というような状況が発生する。このような点を考慮可能な評価の枠組みが必要である。

2. 研究の目的

以上のような問題意識に基づき、本研究の目的は、「港湾を中心とした社会基盤施設のもつネットワーク性に着目し、以下に掲げた項目が考慮可能な、海上物流に関する地震被害の経済評価手法の開発」とされていた。

- (1) 重力式岸壁以外の港湾施設における地震被災確率（フラジリティ・カーブ）
- (2) 連続または近接する港湾施設や道路などの関連施設、および複数港湾の同時被災確率
- (3) 国際海上コンテナ貨物以外の形態の貨物の経済被害
- (4) 国際輸送市場における均衡状態の変化が社会経済に与える長期的な影響の評価

3. 研究の方法

- (1) 重力式岸壁以外の港湾施設における地震被災確率（フラジリティ・カーブ）

矢板式岸壁を対象としたフラジリティ・カーブを作成した。具体的には、地震動と地盤物性のばらつきを考え、設計震度や液状化層厚の違いに応じて、54の検討ケースを設定し、解析法により個々のケースにおける変形量を算出し被災確率を導出することで、各ケースごとにフラジリティ・カーブを求めた。ここで、被災確率の算定においては、想定される地震動レベルと地盤物性の不確定性を反映させている。また、フラジリティ・カーブは、(1)式に示す2つのパラメータで表現でき

る簡易式にまとめる。

$$F(a) = \phi [\ln(a/c)/\zeta] \quad (1)$$

ここで、 $F(a)$ は加速度 a における被災確率であり、 ϕ は正規分布の累積分布関数である。 c および ζ は、構造物固有のパラメータである。

- (2) 連続または近接する港湾施設や道路などの関連施設、および複数港湾の同時被災確率

- ① 同一施設の構成要素に対する相関性の評価

1995年兵庫県南部地震で被災した神戸港の被災データを用いて、離れた位置に存在するケーソンの変形量の相関性を検討した。これをもとに、ケーソン間距離に応じた相関係数のモデル化を行った。

- ② 施設と断層との位置関係による相関性の評価

まず、施設 A, B が位置している $L \times L$ のエリアに対象期間内に地震が等分布の確率で発生すると仮定する。ある地点で地震が発生したときの施設 A の被災確率 $f_i(A)$ は、重力式岸壁における最大加速度に応じた被災確率を推定するフラジリティカーブより求める。ある地点を震源としたときの最大加速度は、震源からの距離に応じて(2)式より算出することとする。

$$\log_{10} A_{COR} = 0.55M - \log_{10} (R_A + 0.005 \cdot 10^{0.55M}) - 0.00122R_A + 0.502 \quad (2)$$

しかし、地震はエリア内のどこで発生するかわからないため、地震発生エリア全体に対する施設 A の被災確率 $P(A)$ を検討する必要がある。対象地域をメッシュ分割して各小エリアの重心が震源となると仮定すると、 $P(A)$ は G_i の確率で小エリア i が震源となるという条件下での A の被災確率 $G_i \times f_i(A)$ を、地震発生エリア全体で足し合わせた値となる。施設 B の被災確率 $P(B)$ も同様である。厳密には積分計算ではないが、メッシュ分割数を多くすれば積分計算に近づくと考えられる。これらを式で表すと(3)(4)式のようになる。

$$P(A) = \sum_{i=1}^{N^2} \{G_i \times f_i(A)\} \quad (3)$$

$$P(B) = \sum_{i=1}^{N^2} \{G_i \times f_i(B)\} \quad (4)$$

港湾施設の耐震性を検討するためには、施設 A と施設 B が同時に被災する確率を評価することが求められる。施設 A の被災確率と施設 B の被災確率が独立と見なせる場合の同時被災確率は(5)式のようになる。

$$P(A \cap B) = P(A)P(B) \quad (5)$$

一方、施設 A の被災確率と施設 B の被災確率に相関性がある場合の同時被災確率は(6)式のようになる。

$$P(A \cap B) = \sum_{i=1}^{N^2} \{G_i \times f_i(A)f_i(B)\} \quad (6)$$

(5)式と(6)式を比較することによって、施設と断層の位置関係による被災確率の相関性を評価する。

(3)国際海上コンテナ貨物以外の形態の貨物の経済被害

国際海上コンテナ貨物以外の形態の貨物における被災時シミュレーションの例として、東南アジア（アセアン）地域における国際陸上輸送および国際フェリー輸送への影響について検討した。具体的には、研究代表者が（被災時ではなく）通常時におけるインフラ政策評価を目的に別途構築した国際物流モデルを用いて、マラッカ海峡が航行不能となった場合やシンガポール港が被災し使用可能バースが半減した場合の、国際陸上輸送や国際フェリー輸送のパターンの変化について検討した。

なお、国際物流モデルの概要については、基盤研究(C)「アジア圏マルチモード・ネットワークのダイナミズムと国際物流予測モデル構築」（課題番号 18560526、研究代表者 渡部富博、研究期間 2006-2008）の成果報告書を参照されたい。

(4)国際輸送市場における均衡状態の変化が社会経済に与える長期的な影響の評価

神戸港を例に、(3)で述べた国際物流モデルを用いて、コンテナバースの全部または一部が、地震被災により一定期間の使用不能もしくは搬出入リードタイム増加となり、その後元の状態に復旧するという状況を想定した逐次均衡シミュレーションを行い、被災前と復旧後の輸送パターンの相違について分析した。

4. 研究成果

(1)重力式岸壁以外の港湾施設における地震被災確率（フラジリティ・カーブ）

まず、被災事例をもとにフラジリティ・カーブの検討を行った。ここでは、フラジリティ・カーブを検討するための仮想的な被災あるいは無被災の事例として、各 PSI（1,5,10,20,30,40,50,60,80,100）に対し、1000 ケース、合計で 10000 ケースが妥当であるという結果を得た。図 1 に釧路港の漁港埠頭南岸壁に対して算定したフラジリティ・カーブを示す。

次に、種々の断面に対するフラジリティ・カーブを作成し、さらにはそのフラジリティ・カーブを(1)式で示した 2 つのパラメータで表現できる簡易式にまとめた。ここでフラジリティ・カーブのバリエーションとしては、控え工形状で 2 通り、等価 N 値で 3 通り、設計震度で 3 通り、D1/H（海底面以下の液状化層厚/壁高）で 3 通りの、合計 54 ケースの断面に対して提案した。表 1 に、提案した

フラジリティ・カーブのパラメータの一部を示す。

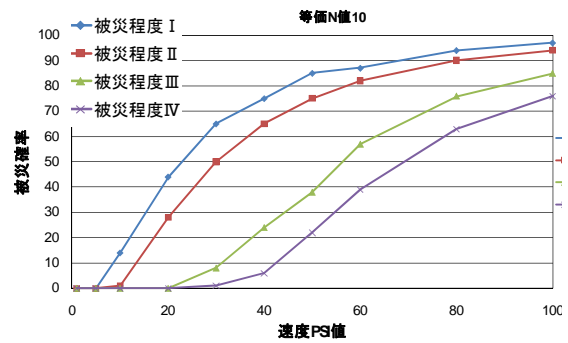


図 1 推計したフラジリティ・カーブの例

表 1 推計されたフラジリティ・カーブに関するパラメータの例

ケース番号	N値	kh	D1/H
1	10	0.1	0.5
2		0.1	1
3		0.1	1.5
4		0.2	0.5
5		0.2	1
6		0.2	1.5
7		0.25	0.5
8		0.25	1
9		0.25	1.5
10	15	0.1	0.5
11		0.1	1
12		0.1	1.5
13		0.2	0.5
14		0.2	1
15		0.2	1.5
16		0.25	0.5
17		0.25	1
18		0.25	1.5
19	20	0.1	0.5
20		0.1	1
21		0.1	1.5
22		0.2	0.5
23		0.2	1
24		0.2	1.5
25		0.25	0.5
26		0.25	1
27		0.25	1.5

(2)連続または近接する港湾施設や道路などの関連施設、および複数港湾の同時被災確率

①同一施設の構成要素に対する相関性の評価

ポートアイランド岸壁のケーソン間距離に応じた相関係数の推移を図 2 に示す。図 2 を見ると、ケーソン間の距離が非常に近い範囲においては、相関係数が大きくなっており、距離の増加に伴い減少する傾向にある。しかしながら、距離の増加に伴って単調に減少するわけではなく、ある程度の距離まで離れると、逆に増加する傾向を示す。さらに、相関係数が負の値を示す範囲も存在することがわかる。これらは、岸壁の変形は奥行き方向に均一ではなく波状に変動する性質を持っていることを示している。

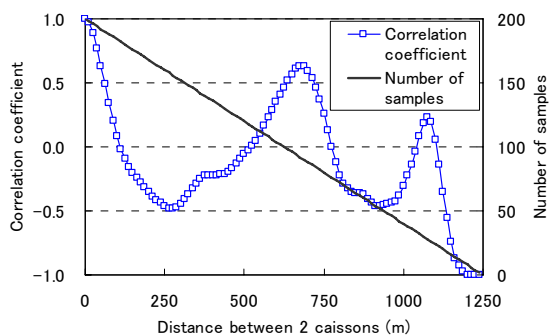


図2 ケーソン間距離に応じた相関係数 (ポートアイランド岸壁)

以上の結果を用いて、ケーソン間距離に応じた相関係数のモデル化を行う。ここで相関係数は、ケーソン間距離に応じて、正と負のピークを繰り返し減衰していくと仮定する。ここで、 i 番目のケーソンと j 番目のケーソンとの間の距離を $L(i,j)$ とし、 $L(i,j)$ に対応する相関係数 τ_{ij} を表すモデルとして、次式を仮定する。

$$\tau_{ij} = \exp\left\{-\frac{L(i,j)}{\beta}\right\} \cdot \cos\left\{\frac{2\pi L(i,j)}{\lambda}\right\} \quad (7)$$

ただし、 β はどの程度離れるまで相関性の影響があるかを示すパラメータ、 λ はケーソンの変形が波状であると仮定した場合の一波長分の距離を示すパラメータである。被災データから求めた相関係数と上式から求めた相関係数との誤差二乗和が最小となるパラメータ β と λ を推定する。相関係数を推定した結果を図2に示す。

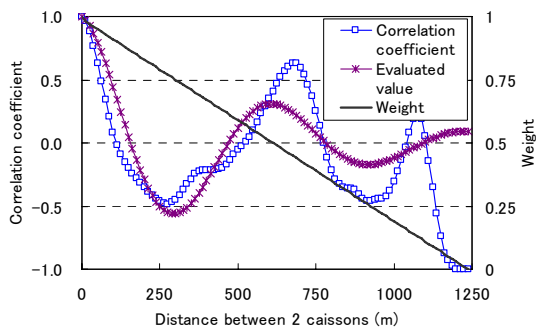


図2 距離に応じた相関係数の推定結果 (ポートアイランド岸壁)

②施設と断層との位置関係による相関性の評価

3. (2)で示したモデルを一般的形状の地震発生エリアにも適用できるよう拡張する。例えば、地震調査研究本部の長期評価によると、安芸灘～伊予灘～豊後水道のプレート内地震は図3のような四角形のエリア内において「30年以内にM6.7～7.4の地震が40%程度の確率で発生」とされている。この四角形を、図3のように小三角形にメッシュ分割し、各小三角形の重心に地震が発生すると

考える。このモデルを広島県の重要港湾施設(廿日市、五日市、宇品、呉)に適用した結果(廿日市の施設とそれ以外の施設が同時に被災する確率)を図4に示す。図を見ると、施設同士の被災確率が独立であると仮定した場合に比べて、施設同士の被災確率の相関性を考慮した場合の方が施設の同時被災確率が大きくなることがわかった。

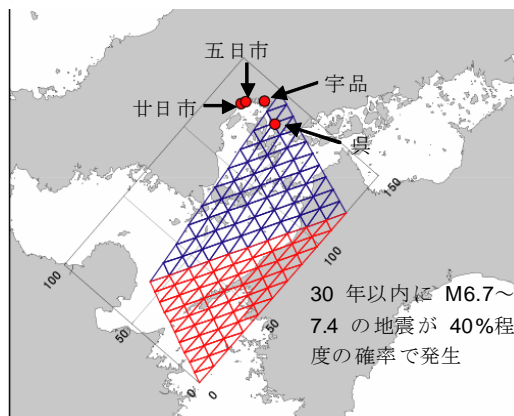


図3 地震発生エリアとメッシュ分割

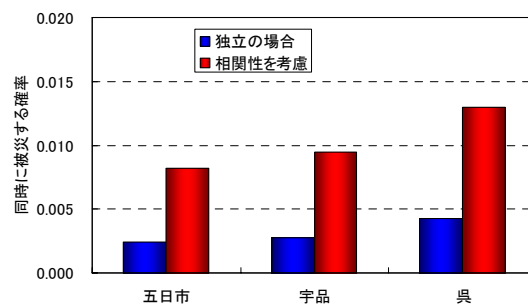


図4 廿日市の施設とその他の施設の同時被災確率

(3)国際海上コンテナ貨物以外の形態の貨物の経済被害

図5に、マラッカ海峡封鎖時における国際貨物(国際海上ユニットロード貨物および国際陸上貨物の和)の陸上輸送フローの増減を示す。マラッカ海峡(図中×印)の封鎖により、ここを通過する海上貨物は、インドネシア側の外洋を通過しロンボク海峡経由へと迂回するか、マレー半島等の陸上輸送に移転する必要がある。図より、マラッカ海峡の封鎖により、その一部がマレー半島の海峡沿いの陸上輸送へシフトしている(図中黒線)ことがわかる。また、このときのモデル化対象貨物の輸送費用(年間換算)は、世界全体で0.8%(約3.8兆円)、アセアン発着貨物全体で1.3%(約5800億円)の増加と試算された。また、東南アジア地域における国際フェリー・RORO輸送量については、年間換算で516万台から452万台へと約12%減少すると試算された。

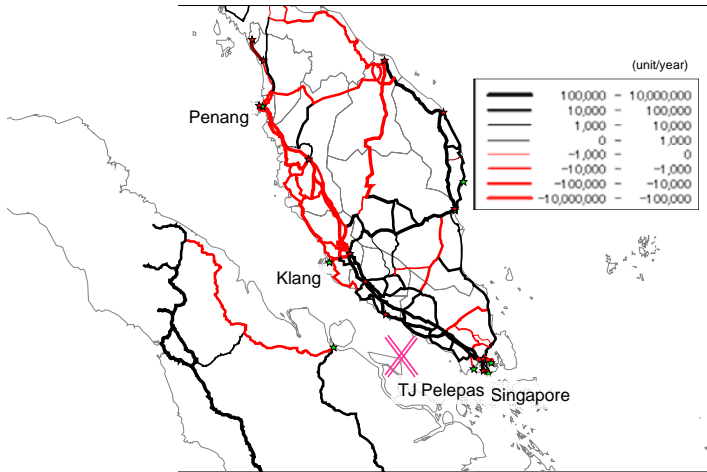


図5 マラッカ海峡封鎖時における国際貨物の陸上輸送フローの増減（封鎖後フロー－封鎖前フロー）

(4)国際輸送市場における均衡状態の変化が社会経済に与える長期的な影響の評価

①一部バース使用不能の影響

2003年時点における神戸港の全28コンテナバースのうち、使用可能なバース数（残存バース数）が、1, 2, 3, 8（全体の約30%）、14（同50%）であるときの、被災時および復旧時のコンテナ取扱量の推計結果を図6に示す。ただし、いずれの場合も、最大水深カテゴリであるカテゴリ4（4000TEU以上の船舶も接岸可能）のバースが少なくとも1つは使用可能と想定した。図より、残存バース数が1の場合は、被災時に取扱量が20%程度減少し、復旧しても被災前の水準には届かない一方、2つ以上のバースが残存している場合は、復旧後の新たな均衡解における取扱量は被災前を上回る結果となっている。

次に、被災時残存バース数が1である場合の、当該残存バースの水深の相違によるコンテナ取扱量の相違を図7に示す。ここで、カテゴリが小さくなるほど水深が浅く、入港可能な船舶サイズが小さいことを表す。図より、残存バースがカテゴリ1（1000TEU未満の船舶のみ接岸可能）であった場合、被災時の取扱量は被災前の1/4程度まで減少し、復旧後もほとんど回復しないなど、残存バースの水深により結果が大きく異なることがわかる。

また、輸送費用の変化についてみれば、たとえば最大水深カテゴリのバース1つのみが残存するケースにおいて、復旧後の日本発着貨物の輸送費用は、被災前に比べ、兵庫県発着貨物を除けば、平均して2.7%減少する結果となった。すなわち、被災によるバース利用の制限というショックにより、輸送システム全体としてはより総費用の安い均衡解へと移行する可能性が示された。同様に、最も水深の浅いバース1つのみが残存するケースにおいても、日本全体でみれば輸送費用が

1.7%減少するものの、大阪府や兵庫県を中心とした関西地域では、最大2%程度輸送費用が増加すると推計され、被災地域のダメージをより増幅させるという傾向が示された。

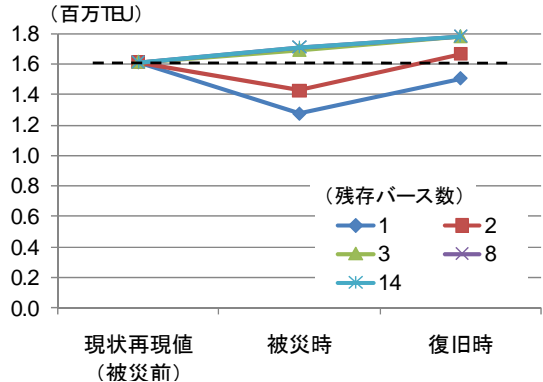


図6 神戸港被災・復旧シミュレーションの結果(1)：残存バース数による取扱量の相違

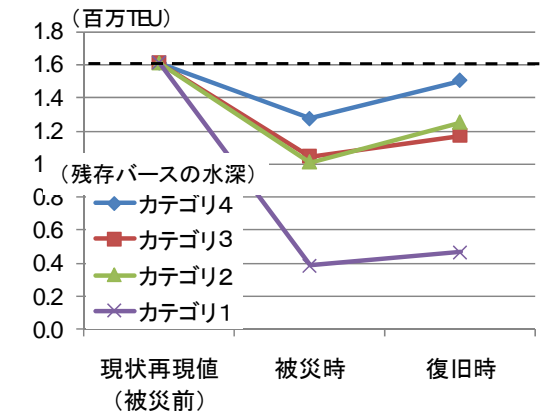


図7 神戸港被災・復旧シミュレーションの結果(2)：残存バースの水深による取扱量の相違（残存バースが1つの場合、カテゴリ1：1000TEU以下船舶のみ入港可能、同2：2500TEU以下、同3：4000TEU以下、同4：全船舶入港可能）

②リードタイム増加の影響

①の分析では、港湾搬出入時のリードタイムは、被災時でも変化しない（搬出・搬入ともに48時間と想定）と仮定したが、港湾の被災時には、背後の道路等も大きく被災し、他港に比べ搬出入や背後輸送時間においても大きく不利となるものと考えられる。そこで、被災時のリードタイムが被災前の2倍、4倍になったと仮定した場合（復旧後はリードタイムも元の水準に戻ると仮定）のコンテナ取扱量の変化を図8（被災時残存バース数が1の場合）と図9（全バースが被災時も使用可能な場合）に示す。これらの図より、

- ・本推計における港湾取扱量への影響は、リードタイム増加の方が、多くのバースが使用不能となるよりもはるかに大きいこと
- ・復旧後にリードタイムが被災前の水準に戻ったとしても、取扱量は被災前の水準に戻らないこと

・以上の変化は、残存バース数にはほとんど影響を受けず、図9に示されるように、たとえ全バースが使用可能であっても同様の傾向となること
がわかる。

また、輸送費用についてみれば、被災時には特に関西地方発着貨物の費用が最大4~5%程度増加すると試算されたが、復旧時には被災前より費用が減少する傾向となった。

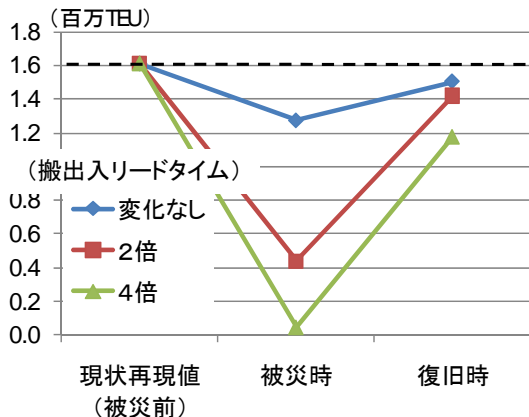


図8 神戸港被災・復旧シミュレーションの結果(3): 搬出入リードタイムの増加による取扱量の相違 (残存バース数1, ただし最大水深カテゴリの場合)

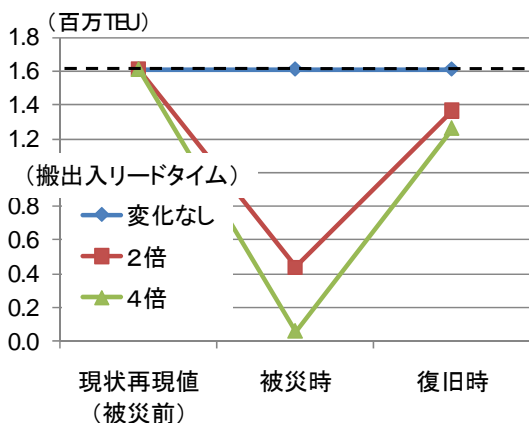


図9 神戸港被災・復旧シミュレーションの結果(4): 搬出入リードタイムの増加による取扱量の相違 (被災時も全バースが使用可能とした場合)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計7件)

①Shibasaki, R., Watanabe, T., and Kadono, T.: Development of an Economic Evaluation Method for Seismic Design of Port Facilities Considering Freight Transportation Cost, 31st International Navigation Congress, PIANC, Estoril, Portugal, 2006

- ②Yamamoto, Y. and Ichii, K.: Evaluation of seismic induced relative displacement for container cranes on caisson walls, 2nd International conference on Geotechnical Engineering for disaster mitigation and rehabilitation (GEDMAR08), 2008. 5. 30-6. 2, 中国南京市
- ③Ichii, K., Yamamoto, Y. and Shibasaki, R.: Evaluation of simultaneous failure probability for two quay walls in different sites considering the distance, 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008. 10. 12-17, 中国北京市
- ④吉川裕子, 一井康二: 矢板式岸壁の地震時被災確率評価式の提案, 第61回土木学会中国支部研究発表会, 2009. 5. 30, 広島市
- ⑤Shibasaki, R.: Risk Scenario Analysis in Southeast Asia: An Application of Model for International Cargo Simulation, International Workshop on Risk Governance of Maritime Global Critical Infrastructures: Straits of Malacca and Singapore Exposed to Extreme Hazards, 2009. 6. 5, Uji, Japan
- ⑥Shibasaki, R.: Modeling International Freight Flow in Eastern Asia and Application to Blockade of Malacca Strait, Research Seminar on Global Critical Infrastructure Systems: Towards Disaster Risk Governance, 2009. 6. 6, Kyoto, Japan
- ⑦Ichii, K., Yamamoto, Y., Hata, Y. and Shibasaki, R.: The simultaneous failure probability of quay walls at multiple sites, International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (IS-Tokyo' 09), 2009. 6. 17, Tsukuba, Japan.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

柴崎 隆一 (SHIBASAKI RYUICHI)

国土交通省国土技術政策総合研究所・港湾研究部・主任研究官

(2) 研究分担者

一井 康二 (ICHII KOJI)

広島大学大学院・工学研究科・准教授
研究者番号: 70371771

(3) 連携研究者

家田 仁 (IEDA HITOSHI)

東京大学大学院・工学系研究科・教授
研究者番号: 90168089

渡部 富博 (WATANABE TOMIHIRO)

国土交通省国土技術政策総合研究所・港湾研究部・港湾システム研究室長

研究者番号: 10356040