

貨物輸送の損失を考慮した港湾施設における設計震度選択問題の取り扱いと リスク評価特性の計測

Seismic Design for Port Facilities considering Economic Loss in Freight Transportation and The Risk Evaluation Characteristics

柴崎隆一*

By SHIBASAKI Ryuichi*

1. はじめに

地震・洪水・斜面災害・交通事故など各種の災害・事故リスクは、生起頻度や災害1件あたりの被害額が様々であり、防災・事故防止施設の整備水準を決定するにあたり、投資による便益をどのように評価するかについて多くの議論が存在する。最も一般的な評価指標として、投資前後の期待被害額の差で表される期待被害軽減額があるが、特に、相当な不確実性を伴う稀少頻度リスクや、カタストロフィックな被害をもたらすリスクにおいては、期待被害軽減額による投資評価は不適切であるという指摘も多い¹⁾。このような特徴を持つ災害・事故リスクを評価する手法については、理論レベルでは問題点の整理がそれなりに進みつつあるものの²⁾、実際に投資を行う組織においては、明示的に考慮する必要性が認識されはじめた段階にある³⁾⁴⁾。しかし、これまで現実に行われてきた数多くの防災投資においては、明示的であるかどうかはともかく、何らかの形でこのような災害・事故リスクの特徴を考慮しつつ整備水準が決定されてきたものとも考えられる。

このような立場から、筆者らはこれまでに、洪水リスクに対する計画安全度や鉄道の斜面災害リスクに対する運転中止雨量の決定問題を対象に、各防災施設の整備水準実績から、各リスクの被害額や生起頻度がどのように評価されてきたかについて計測を行ってきた⁵⁾⁶⁾。本稿では、同様の方法によって、港湾施設の耐震設計における設計震度選択問題を対象に、その実績から、港湾施設の地震被災リスクにおける、被害額や生起頻度に関する評価特性を計測することとする。

2. リスク評価特性を考慮した防災施設整備水準決定問題⁵⁾⁶⁾

(1) 期待被害軽減額による防災投資評価

防災投資等の防災・減災施策の経済評価指標として最も一般的に用いられるのは、期待被害軽減額である。あるひとつの災害・事故リスクにおいて、災害（または事故、以下略）の状態 s ごとに、防災施設整備水準が z のときの災害の年間生起頻度を $\pi(z, s)$ 、被害額を $D(z, s)$ とする。このとき、投資前の防災施設整備水準を $z = z_0$ 、投資後の水準を $z = z$ とすれば、この投資による期待被害軽減額 $\Delta E[D(z)]$ は(1)式のように表される。

$$\Delta E[D(z)] = \int \pi(z, s) \cdot D(z, s) ds - \int \pi(z_0, s) \cdot D(z_0, s) ds \quad (1)$$

この期待被害軽減額は、機械的に計算される被害額と生起頻度の積で表される期待値の、防災施策実施前後の単純な差をとっており、災害リスクに対する家計やインフラ管理者の評価特性がまったく考慮されていない。しかし、以下に示すように、家計等が主観的に評価する災害リスクの生起頻度や被害額は、機械的に求められる実際のそれらとは異なると考えられる。

(2) リスク評価特性を考慮した防災施設整備水準決定問題の取り扱い

(a) 被害額に関するリスク評価特性

最も簡単な家計のリスク評価特性の考慮法としては、家計の限界効用が逓減するという、リスク回避的な性質⁷⁾がある。この場合、施策を行うことによる社会的効果の評価値（便益）は、オプション価格とよばれ、期待被害軽減額との差で定義されるオプション価値は、必ず正となる⁸⁾。また、小林・横松⁹⁾は、家計が危険回避的なリスク効用関数を持つことを前提に、災害リスクの集合性に着目し、災害証券を含め完全な災害保険市場が成立する場合、期待被害額に災害保険のマークアップ率を乗じる

キーワード: 防災計画, 物資流動, 港湾計画, リスク評価

*正会員, 博(工), 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

(〒239-0826 神奈川県横浜須賀市長瀬3-1-1,

tel/fax :046-844-5028, shibasaki.r92y2@ysk.nilim.go.jp)

ことで防災投資の便益が得られることを示した。逆に、現状の日本のように完全保険市場が存在せず、またその他の政策等によっても家計の被害が完全に補填されない場合には、当該インフラの管理組織によって比較的短時間に被害の回復が可能な公共土木施設等の被害にくらべ、一般の家計が負担しその回復に比較的長期間を要する被害は、被害額が同一であっても効用の低下量の社会的総和は大きいことが指摘されている²⁾。

(b) 生起頻度に関するリスク評価特性

松原¹⁰⁾によれば、特に発生頻度が稀少である災害ほど、①発生頻度に関する情報の不足・偏りのために、得られる情報から意思決定者が主観的に判断する確率と、客観的に正しいと考えられる確率にずれが生じたり（ベイズ論的主観確率の考え方）、②そもそも稀少確率現象に対する判断や意思決定が通常と異なったりする（究極の場合は、被害の大きさのみに注目し生起確率の大小を全く無視したり、逆に生起確率をゼロとみなしたりする）ために、意思決定者が主観的、または潜在意識下において評価する生起確率と、客観的データから機械的に求められる生起確率の乖離が大きくなる。

(c) リスク評価特性を考慮した防災施設整備水準決定問題の定式化

上記の議論を踏まえ、意思決定者のリスク評価特性を介した期待被害軽減額 $\Delta E[L(z)]$ を(2)式のように表す。意思決定者が主観的に評価する生起頻度 $f(\pi)$ と実際の生起頻度 π が異なることを表すため、生起頻度に関する評価関数 $f(\cdot)$ を導入した。また、公共土木施設の被害などインフラ管理者にとっての「直接的な」被害額 Dd と、家計が負担する被害、すなわち、インフラ管理者からみた「間接的な」被害額 Dh では、額が同一であっても社会的総効用の低下量が異なることを表すため、インフラ管理者にとって間接的な被害額への重み付けとなる評価関数 $g(Dh)$ を導入した。ここで本研究では、インフラ管理組織の規模は十分大きく、インフラ管理組織自身の損失についてはリスク中立を仮定している。

$$\Delta E[L(z)] = \int f(\pi(z_0, s)) \cdot \{Dd(z_0, s) + g(Dh(z_0, s))\} ds \quad (2)$$

$$- \int f(\pi(z, s)) \cdot \{Dd(z, s) + g(Dh(z, s))\} ds$$

このとき、このインフラ管理組織にとって最適な防災施設整備水準 z^* は(3)式で表される。

$$z^* = \arg \max_z \left\{ \sum_{t=0}^{T-1} \frac{\Delta E[L(z)]}{(1+i_t)^t} - C(z) \right\} \quad (3)$$

ここで、 T は供用期間(年)、 i_t は割引率、 $C(z)$ は防災施設整備水準を z_0 から z に引き上げるに要する費用である。

3. 貨物輸送の損失を考慮した港湾施設における設計震度選択問題の取り扱い

(1) 現行の基準における設計震度の取扱いと既往の研究

わが国の岸壁や防波堤等の港湾施設における耐震設計基準は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹¹⁾ (以下「技術基準」とよぶ)に記載されている。ここでは、耐震性能が、耐震強化施設（特に重要な施設でその耐震性能を強化する施設）とその他の施設に対して一意に定められている。すなわち、地震被災リスクに対し、港湾施設の耐震設計を行う際には、レベル1地震動に対しては、すべての施設において「施設の健全な機能が損なわない」とされており、また、レベル2地震動に対しては、耐震強化施設については機能が保持されることとされている。一方で、港湾施設の設計震度を定める際には、レベル1地震動・レベル2地震動いずれも、当該施設の立地する地域別の震度に、当該施設の重要度と、地盤種別ごとに定められた係数を乗じて算出することとされている。ここで、設計震度の想定の際に、地域特性や地盤特性だけでなく、当該施設の重要度についても考慮されているという事実は、各港湾施設の被災による社会経済的な影響まで暗に考慮している結果と考えられるものの、その基準は明確でないのが現状である。そこで Nagao, et al.¹²⁾, Ichii¹³⁾らは、港湾施設の耐震設計基準策定に示唆を与えることを目的として、重力式岸壁を対象に、建設費用と被災時の復旧費用の期待値の総和を設計震度別に算出し、総コストが最小となる設計震度を選択する、という枠組みを提案している。しかしながら、これらの研究において考慮されている被災時の損失は復旧費用のみであり、港湾貨物の迂回輸送等による損失などの、いわゆる波及的な被害は含まれていない。

一方、上記のような物流被害まで考慮した、港湾施設の地震被災時における経済損失の算出を行ったものとしては、「港湾投資の評価に関するガイドライン」¹⁴⁾ (以下「ガイドライン」)に算出方法が記述されているのを除けば、湯沢・須田¹⁵⁾などごく僅かしか存在しない。湯沢・須田¹⁵⁾においては、想定地震が固定されており、またガイドラインに示される、耐震強化施設整備プロジェクトについての費用対効果分析手法においても、地震動に対して被災状態が確定的に与えられるとの仮定に基づき計算を行うこととされており、実際に出現する被災状態は確率的に変動することが考慮されていない。

そこで本稿では、上記文献を参考に、以下に示すように、貨物輸送における経済損失も考慮した港湾施設の設計震度選択の枠組を独自に構築した上で、リスク評価特性計測を行うこととする。

(2) 貨物輸送における経済損失も考慮した重力式岸壁の設計震度選択問題の定式化

(a) 設計震度選択問題の定式化

本問題は、被災時の復旧費用と貨物の迂回輸送による損失額の期待値と、建設費用の総和を設計震度別に求め、これが最小となる設計震度を、個別の港湾施設ごとに選択するものである。

計算の具体的な手順を、図-1 に示す。図に示すように、はじめに、評価の対象とする港湾施設について、港湾ごとに定義される加速度別の地震発生確率と、想定される断面（施設水深と施設幅の比や地盤改良の有無など）を設計震度ごとに用意する。次に、想定された断面ごとに与えられる、加速度別・被災状態別の発生確率を与える関数（フレンジュー・カーブ）に基づき、モンテカルロ

シミュレーションによって各加速度における被災の出現状態をシミュレートする（ここで個々の被災の状態を確率計算によるのではなくモンテカルロシミュレーションにより与えるのは、出現する被災のパターンが異なると、計算される経済的被害が大きく異なるためである）。さらに、得られた個々の被災状態について、周辺港湾の被災状況も考慮しつつ、その復旧費用や貨物輸送における経済損失を求める。最後に、得られた被害額に最初に求めた加速度別の地震発生確率を乗じて積分することにより地震被災による被害額の期待値が設計震度ごとに得られ、設計震度ごとの投資費用と足しあわせることにより、総コストが最小となる設計震度を選択することができる。なお、本研究において対象とする港湾施設は、後述の被災確率式が重力式岸壁を対象としたものしか公表されていないため、重力式岸壁のみとする。

本問題を数式で表現すれば、次式のように表される。

$$\min_{k_b} TC(k_b) \tag{4}$$

$$TC(k_b) = \sum_{i=1}^T \frac{\int_0^{\infty} \phi'(x) \{R(x, k_b) + L(x, k_b)\} dx}{(1+i)^{-1}} + qd_b \cdot C(k_b)$$

ここで、 k_b : パース b における設計震度（以下では必要のない限り k と省略する）、 TC : 総コスト（千円）、 T : 供用期間（年）、 i : 年割引率、 x : 最大 SMAC 地震加速度（Gal）、 ϕ : 最大地震加速度の超過確率、 R : 復旧費用（千円）、 L : 迂回輸送による損失（千円）、 qd_b : パース b の岸壁延長（m）、 C : 単位岸壁長あたり建設費用（千円/m）、である。設計震度 k は、Ichii¹³⁾ に従い、図-2 に示すように 0.00 から 0.25 までの 6 段階とし、設計震度別の単位岸壁長あたり建設費用 C （千円/m）も Ichii¹³⁾ に従うこととした（図-2 参照）。供用期間 T と年割引率 i は、それぞれ 50 年と 4% とした。

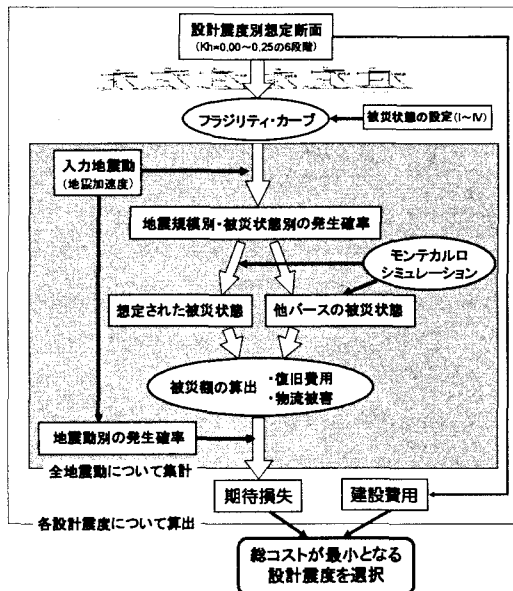


図-1 本研究における設計震度選択のフローチャート

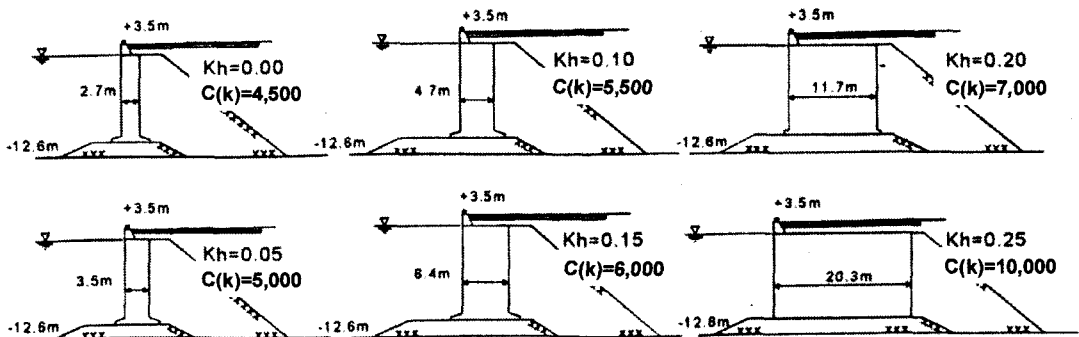


図-2 設計震度別の標準的な重力式岸壁の断面と岸壁 1m あたりの建設費用（千円）

(b) 地震発生確率

最大地震加速度の超過確率 ϕ は、以下に示す野津ら¹⁶⁾による式を用いた。

$$\phi(x) = \frac{N}{K} \cdot \exp \left[- \left(\frac{x - B}{A} \right)^h \right] \quad (5)$$

ここで、 K : データ観察年数、 N : サンプル数、 A, B, h : 各港湾ごとに決まるパラメータである。野津ら¹⁶⁾は、全国の主な港湾について、 $K=110$ (年)、 $N=20$ (個) のときのパラメータ A, B, h を推定している。各地域の地震発生確率については、活断層やプレート境界など、想定される地震発生源別に各地域の予想震度等を求めていく方法のほうがより本質的とも考えられるが、この野津らの式は、全国の主な港湾について、最大加速度の発生確率を簡便に推定できるという利点があり、今回はこれを採用した。

(c) モンテカルロシミュレーションによる期待被害額の算出

(4)式第1項に含まれる、復旧費用と貨物の迂回輸送による損失額は、同一港湾内におけるバースの被災パターンによって大きく異なるものと考えられることから、モンテカルロシミュレーションを行うことによって求めることとする。すなわち、(4)式第1項の分子は、次式のように書き直せる。

$$\int \phi'(x) \{R(x, k) + L(x, k)\} dx \quad (6)$$

$$\approx \sum_{y=\min(x)/a}^{\max(x)/a} \{\phi(ay) - \phi(a(y+1))\} \{R(ay, k) + L(ay, k)\}$$

ただし、

$$R(x, k) = qd_b \cdot \frac{1}{TN} \cdot \sum_{s_0=0}^4 \left[\left\{ \sum_s n_{s_0, s}(F, x, k) \right\} \cdot R_s \right]$$

$$L(x, k) = \frac{1}{TN} \cdot \sum_{s_0=0}^4 \sum_s \left[\left\{ \sum_{r=0}^3 \{ (RD_{r+1} - RD_r) \cdot L_{s_0, s, r} \} \right\} \right] \quad (7)$$

ここで、 a : シミュレーションにおいて発生させる地震加速度の間隔 (Gal)、 $\min(x)$ 、 $\max(x)$: シミュレーションにおいて発生させる地震加速度の最小値と最大値、 s_0 : 分析対象バースの被災状態、 $s = \{s_1, s_2, \dots, s_b\}$: 分析対象バース以外のバースの被災状態を表すベクトル ($\sum_s = \sum_{s_1} \sum_{s_2} \dots \sum_{s_b}$)、 b : 当該港湾におけるバース数、

$n_{s_0, s}$: モンテカルロシミュレーションの結果得られた被災パターン $\{s_0, s\}$ の発現回数、 TN : 最大加速度 x と設計震度 k が与えられたときのモンテカルロシミュレーションの

回数 (すなわち、 $TN = \sum_{s_0=0}^4 \sum_s n_{s_0, s}$)、 $F(s, x, k)$: 最大加

速度 x 、設計震度 k のときに被災状態が s 以上となる確率を表す関数 (フラジリティカーブ)、 R_s : 被災状態別の単位岸壁長あたり復旧費用 (千円/m)、 RD_s : 被災状態別の復旧期間 (日)、 $L_{s_0, s, r}$: 各バースの被災パターンごとに異なる、復旧段階 r 別の一日あたり迂回による輸送損失 (千円/日)、である。なお、復旧費用 R については、分析対象バース以外のバースにおいては設計震度を現状に固定し、(6)式に示すように、分析対象バースのみを対象に算定することとする。各岸壁の被災状態については、Ichii¹⁵⁾に従い、表-1に示すように、 $s=0$ (被災なし) から4までの5段階設定した。また、復旧工事の実績や試算結果¹²⁾を参考に設定した、被災状態別の単位岸壁長あたり復旧費用 R_s と復旧期間 RD_s についても表-1に示す。復旧期間がこのように定義されるとき、復旧段階 r と使用可能なバースの関係は、表-2に示すとおりとなる。

また、モンテカルロシミュレーションによる被災パターン $\{s_0, s\}$ の発現回数 $n_{s_0, s}$ は、次式のように表現できる。

$$n_{s_0, s}(F, x, k) = n \left[\bigcap_{t=0}^b \{F(s_t + 1, x, k_t) < \lambda_t \leq F(s_t, x, k_t)\} \right] \quad (8)$$

ここで、 $n[\cdot]$: TN 回の乱数発生のうち $[\cdot]$ 内の式を満たす回数、 λ_t : 各バースごとに発生させた乱数 (ただし $0 \leq \lambda_t \leq 1$)、 k_t : 各バースの設計震度、である。各バースの設計震度 k_t に関しては、分析対象バース以外のバースにおいては、現状の設計震度 k_t^* に固定する。最大加速度、

表-1 本研究で設定した被災状態別の復旧費用と期間 (ただし表中の x は岸壁水深 (m) の絶対値)

被災状態 s	復旧費用 R_s (1,000円/m)	復旧期間 RD_s (日)
0 (無被害)	0	0
1	290	180
2	166.28x - 112.07	360
3	193.54x + 28.614	540
4	10,000	720

表-2 復旧段階と使用可能なバースの関係

復旧段階 r	被災後の日数	使用可能なバース
0	被災当日～被災後180日目	被災状態0(無被害)のバースのみ
1	被災後181日目～360日目	上記+被災状態1のバース
2	被災後361日目～540日目	上記+被災状態2のバース
3	被災後541日目～720日目	上記+被災状態3のバース
4	被災後720日目以降	全バース使用可能 (経済損失はゼロとなる)

表-3 フラジリティカーブのパラメータ (Ichii¹²⁾に基づき作成)

地盤改良なしの場合

設計震度	c				ζ			
	被災状態1	被災状態2	被災状態3	被災状態4	被災状態1	被災状態2	被災状態3	被災状態4
0.00	187.9	353.2	502.2	626.3	0.65	0.45	0.40	0.33
0.05	225.3	391.2	528.7	626.1	0.60	0.40	0.34	0.27
0.10	262.7	429.2	555.1	625.8	0.55	0.35	0.28	0.21
0.15	300.1	467.2	581.6	625.6	0.50	0.30	0.22	0.15
0.20	337.5	505.2	608.0	625.3	0.45	0.25	0.16	0.09
0.25	375.4	547.2	629.6	713.9	0.38	0.22	0.14	0.12

地盤改良ありの場合

設計震度	c				ζ			
	被災状態1	被災状態2	被災状態3	被災状態4	被災状態1	被災状態2	被災状態3	被災状態4
0.00	206.6	365.1	457.8	547.7	0.73	0.40	0.33	0.30
0.05	207.4	372.0	471.1	558.3	0.74	0.41	0.32	0.28
0.10	208.1	378.8	484.4	568.8	0.74	0.41	0.31	0.26
0.15	208.9	385.7	497.7	579.4	0.75	0.42	0.30	0.24
0.20	209.6	392.5	511.0	589.9	0.75	0.42	0.29	0.22
0.25	215.5	400.0	512.5	587.5	0.73	0.41	0.29	0.20

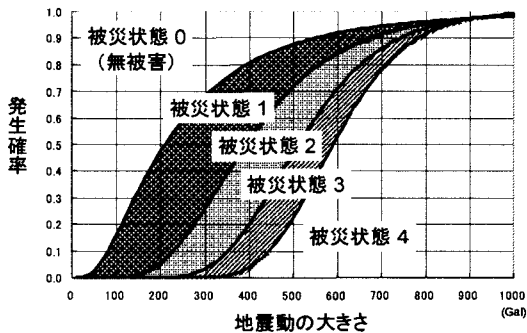


図-3 フラジリティカーブの例 (設計震度 0.20, 地盤改良あり)

設計震度別のフラジリティカーブについては、Ichii¹³⁾の推定結果を用いる。すなわち、求める被災確率が、地震加速度を変数とした対数正規分布の累積密度分布に従うと仮定し、兵庫県南部地震の被災実績をもとに有限要素解析を用いて推定された結果に基づき作成されたもので、次式で表される。

$$F(s, x, k) = \varphi \left[\frac{\ln(x/c_{s,k})}{\zeta_{s,k}} \right] \quad (9)$$

ここで、 φ は正規分布の累積密度関数、 c, ζ は構造物に固有のパラメータで、表-3に示すように、地盤改良の有無別に定められている。図-3に、推定されたフラジリティカーブの例を示す。

(d) コンテナ貨物を対象とした被災時の迂回輸送に伴う損失額の算出方法

被災状態別の一日あたり迂回による輸送損失 L_i は、周囲のパスの被災状態に依存する。基本的には、ガイドラインに記載されている方法に準じて算出することとする。ここでは、コンテナ貨物を対象とした、平成10年の

外貿コンテナ貨物流動調査¹⁷⁾データに基づく迂回輸送に伴う損失額の算出方法の概要について述べる。一日当たり輸送コストの増加量 $L_{0,ls,r}$ は、次式のように表される。

$$L_{s_0,ls,r} = \sum_{i=1} \left\{ \begin{aligned} & (Ocap_{i-1,r,20} - Ocap_{i,r,20}) \cdot \\ & (CL_{i,20} + CM_i + Tv_{20} \cdot (TL_{i,20} + TM_{i,20})) + \\ & (Ocap_{i-1,r,40} - Ocap_{i,r,40}) \cdot \\ & (CL_{i,40} + CM_i + Tv_{40} \cdot (TL_{i,40} + TM_{i,40})) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

ここで、 i : 当該港湾被災時の i 番目の代替港 ($i=0$ のときは分析対象港湾をさす)、 $Ocap_{i,r}$: 復旧段階 r における i 港でオーバーキャパシティとなる貨物量 (TEU/日)、 CL : 陸上輸送費用 (千円/TEU)、 CM : 海上輸送費用 (千円/TEU)、 TL : 陸上輸送時間 (h)、 TM : 海上輸送時間 (h)、 Tv : コンテナ貨物の時間価値 (千円/h/TEU)、である。また、添字の 20,40 はそれぞれ 20ft コンテナ、40ft コンテナにおける数量を表す。

i) 被災時のオーバーキャパシティの考え方

被災時に分析対象港湾 ($i=0$) で取り扱うことができず、オーバーキャパシティとなる貨物量 $Ocap_{0,r}$ (TEU/日) は、次式で表される。

$$Ocap_{0,r} = \sum_j Q_{0,j} - Bcap_{0,r} \quad (11)$$

ここで、 $Q_{0,j}$: 分析対象港湾を積出港 (または積卸港、以下同様) とし、 j を生産地 (または消費地、以下同様) とするコンテナ貨物量 (TEU/日)、 $Bcap_{0,r}$: 復旧段階 r における分析対象港湾の取扱可能貨物量 (TEU/日)、である。生産地別・積出港別のコンテナ貨物量は、外貿コンテナ貨物流動調査データ (1ヶ月値、フレートトンベース) より日 TEU ベースに換算することで得た。換算係数は、ガイドラインに従い、20ft、40ft コンテナ 1 個当たりそれぞれ 18.7、28.1 フレートトンとした。また、20ft コンテナと 40ft コンテナの構成比も、ガイドラインに従い、中核・中核国際港湾においては個数ベースで 1:1、その他の港湾においては 5:2 とした。この比率は、各代替港におけるオーバーキャパシティ貨物の内訳にも適用する。すなわち、 $Ocap_{i,r}$ が TEU ベースで定義されていることを考慮すれば、中核・中核国際港湾においては $Ocap_{i,r,20} = 1/3 Ocap_{i,r}$ 、 $Ocap_{i,r,40} = 2/3 Ocap_{i,r}$ 、その他の港湾においては $Ocap_{i,r,20} = 5/9 Ocap_{i,r}$ 、 $Ocap_{i,r,40} = 4/9 Ocap_{i,r}$ となる。また、復旧段階 r における分析対象港湾の取扱可能貨物量 $Bcap_{0,r}$ (TEU/日) は、次式で表される。

$$Bcap_{0,r} = Bcap_{0,r-1} + \sum_{i=0}^b \{ \alpha \cdot cap_{0,i} \cdot U(s_i, r) \} \quad (12)$$

$$\left(\text{ただし、} Bcap_{0,0} = \sum_{i=0}^b \{ \alpha \cdot cap_{0,i} \cdot U(s_i, r) \} \right)$$

ここで、 cap_{0i} : 分析対象港湾における各バースの通常時のキャパシティ (TEU/日)、 α : 被災時のキャパシティ増加率、 $U(s_i, r): s_i=r$ のとき 1、それ以外るとき 0 となる関数、である。被災時のキャパシティ増加率 α については、ガイドラインに従い、1.4 と仮定した。

代替港 ($i > 1$) においては当該地震動による被災は発生しないと仮定すれば、各代替港でオーバーキャパシティとなる貨物量 $Ocap_{i,r}$ は次式で表される。

$$Ocap_{i,r} = \left(\sum_j Q_{i,j} + Ocap_{i-1,r} \right) - \alpha \cdot \sum_i cap_{i,j} \quad (13)$$

なお、代替港は、アジア域内航路貨物については、コンテナを取り扱う港湾のうち、分析対象港湾から陸上輸送経路で最短となる港湾から順に設定する。また、基幹航路貨物については、中核・中核港湾のうち分析対象港湾から陸上輸送経路の短い港湾から順に設定した。ここで、各港湾間の陸上輸送経路については、道路情報便覧¹⁸⁾に収録されている、全高速道路・全国道・主要地方道を含む全国 46,798 交差点、76,555 リンクからなるネットワーク上で最短経路探索を行うことにより得た。

ii) 各輸送費用の算出方法

陸上輸送費用 CL に関しては、ガイドラインに記載されている表 (表 2-2-13) より、20ft コンテナ、40ft コンテナの別に、輸送距離と費用の関係式を次式のように推定した。

$$\begin{aligned} CL_{i,20} &= -0.153 \cdot ld_{ij}^2 + 380 \cdot ld_{ij} + 26700 \\ CL_{i,40} &= -0.120 \cdot ld_{ij}^2 + 279 \cdot ld_{ij} + 21800 \end{aligned} \quad (14)$$

ここで、 ld_{ij} : 積出港 i と生産地 j の陸上輸送往復距離 (km) で、前出の道路情報便覧ネットワーク上の最短経路探索から得る。なお、生産地は各市町村役場の所在地で代替し、積出港については、各港湾で最も代表的なコンテナ埠頭とした。

海上輸送費用 CM については、ガイドラインに記載されている表 (表 2-2-15) には、船型別の輸送費用算定式が記載されているが、本試算で用いるコンテナ流動調査データにおいては、利用するコンテナ船の船型が不明なため、基幹航路 (4,000TEU 船を仮定する) とアジア域内航路 (500TEU 船を仮定する) に分けて、あてはめることとする。すなわち、

$$\begin{aligned} CM_{m,i} &= 1885 \cdot md_{ih} \cdot 24 / v_{mi} + 1740 \quad (\text{基幹航路}) \\ &= 4385 \cdot md_{ih} \cdot 24 / v_{mi} + 3385 \quad (\text{アジア域内航路}) \end{aligned} \quad (15)$$

ここで、 md_{ij} : 日本の積出港 (または積卸港) i と海外の仕向港 (または仕出港) h の海上輸送距離 (NM)、 v_{mi} : 基幹航路における船速 (knot)、 v_{mi} : アジア域内航路にお

ける船速 (knot)、である。また、1TEU あたりの海上輸送コストである CM は、20ft コンテナ、40ft コンテナいずれにおいても同じ値を仮定している (すなわち、40ft コンテナ 1 個の海上輸送費用は、20ft コンテナ 1 個の費用のちょうど 2 倍である)。海上輸送距離 md については、海上保安庁による距離表¹⁹⁾などから得た。基幹航路とアジア域内航路における船速 v_{mi} 、 v_{mi} については、ガイドラインに準じ、それぞれ 22.7、16.2 (knot) とした。また、本試算においては、各コンテナ貨物の仕向 (仕出) 港、最終仕向 (仕出) 国にはともに被災前後で変化はないものと仮定したため、アジア諸港におけるトランシップ費用などに変化は生じない。

陸上輸送時間 TL については、次式で表される。

$$TL_{i,j} = ld_{ij} / v_i \quad (16)$$

ここで、 v_i : 陸上輸送速度 (km/h) である。ガイドラインにおいては一般道路と高速道路の別に平均的な走行速度が記載されているが、ここでは高速道路の利用の有無は不明なため、全て一般道路を利用していると仮定し、 $v_i = 34.5$ (km/h) とした。

海上輸送時間 TM については、(15)式と同様にして次式の通り得られる。

$$\begin{aligned} TM_{i,j} &= md_{ih} / v_{mi} \quad (\text{基幹航路}) \\ &= md_{ih} / v_{mi} \quad (\text{アジア域内航路}) \end{aligned} \quad (17)$$

さらに、(10)式中のコンテナ貨物の時間価値 Tv (千円/h/TEU) についても、ガイドラインに従い、それぞれ輸出入別に、 $Tv_{20} = 2.7, 1.4$ 、 $Tv_{40} = 2.05, 1.05$ とした。

4. 全国の重力式岸壁のコンテナバースにおける設計震度選択問題を対象としたリスク評価特性の計測

(1) リスク評価関数の推定方法

復旧費用 R がインフラ管理者の直接的な被害、迂回輸送による損失 L が荷主等の負担する被害であることを考慮し、2章で導入したリスク評価関数を用いて(4)式を書き直す。

$$\hat{k}_b = \arg \min_{k_b} \left[\sum_{y=\min(x)/a}^{\max(x)/a} \left\{ f(\phi(ay) - \phi(a(y+1))) \right\} \left\{ R(ay, k_b) + g(L(ay, k_b)) \right\} \right] \quad (18)$$

$$\left[\sum_{i=1}^T \frac{1}{(1+i_r)^{-1}} + qd_b \cdot C(k_b) \right]$$

(14)式より得られる設計震度の推定値 \hat{k}_b と実測値 k_b^* を比較し、計算対象となる全バースにおける両者の重み付き誤差二乗和が最小となるようリスク評価関数を推定した。すなわち、

$$\min_{f,g} \sum_b \left\{ \frac{TC(\hat{k}_b+1)+TC(\hat{k}_b-1)}{2 \cdot TC(\hat{k}_b+1)} - 1 \right\} \cdot (k_b^* - \hat{k}_b)^2 \quad (19)$$

ここで生起確率評価関数 f 、被害額評価関数 g は、これまでの筆者らによる他の災害リスクを対象とした同様の推定結果を踏まえ、少ないパラメータでできるだけ多くの状況を表すことを念頭に、以下に示すべき乗型関数を仮定した。

$$f(\phi(x) - \phi(x+a)) = \beta_1 \cdot \{\phi(x) - \phi(x+a)\}^{\beta_2} + \beta_3$$

$$g(L) = \lambda_1 \cdot L^{\lambda_2} \quad (20)$$

ここで、 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \lambda_1, \lambda_2$ は未知パラメータ ($\beta_1 > 0, \beta_3 \geq 0, \lambda_1 > 0$) であり、 $\beta_1 = \beta_2 = 1$ かつ $\beta_3 = 0$ のとき生起確率評価関数を考慮しないことと等しく、 $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$ のとき被害額評価関数を考慮しないことと等しくなる。

(2) 入力データの準備

本研究は、1998年時点でコンテナ取扱実績のあるわが国の港湾のうち、重力式岸壁のコンテナバースがあり、かつ貨物輸送に関する経済損失が計算可能な、16港計26バースを計算対象とした。これらのバースにおける設計震度と地域別震度についての集計結果を表4に示す。重力式岸壁が比較的的地方(特に西日本)の港湾に多く分布することから、全国の平均的な分布よりも設計震度等の比較的小さいバースが多い。また、(9)式に示されるフラジリティカーブのパラメータを決める際に必要な地盤改良の有無については、各バースの標準断面図によって判定した。モンテカルロシミュレーションに関するパラメータについては、 $a = 20$ (Gal), $\min(x) = 20$ (Gal), $\max(x) = 1000$ (Gal), $TN = 10$ (回)とした。

(3) リスク評価関数の推定結果

異なる未知パラメータの組み合わせごとに逐次探索法によりパラメータを推定した結果とAICを表5に示す。

表4 本研究の分析対象バースの設計震度と地域別震度(地域別震度は現基準によるもので、設計時点とは異なる場合がある)

	地域別震度					計
	A地域 (0.15)	B地域 (0.13)	C地域 (0.12)	D地域 (0.11)	E地域 (0.08)	
設計震度	0.05			1	6	7
	0.10		2	3	1	7
	0.15		2	3		5
	0.20	6				6
	0.25			1		1
計	6	4	7	2	7	26

(表中の数字はバース数を表す)

もっともAICのよいモデルは4つのパラメータを含むモデル8であり、評価関数を何も考慮しなかった場合(モデル0)よりも有意に説明力が高い結果となった。このとき推定された生起確率と被害額の評価関数を、図4に示す。年生起確率については、実際の確率がどんなに小さくても1/100弱程度はあるものと評価される結果となり、稀少確率災害でも供用期間中に一度は発生するものと捉えられることが多いという、筆者らの従来の結果⁹⁾と概ね一致する。しかしながら、被害額については、額の小さい領域では最大10倍程度大きく評価されるものの、額の大きい領域では実際の被害額より評価値が小さくなる結果となった。これは、今回算出した経済被害額は、採用した物流被害の算出方法の性格上、港湾の規模(背後圏の大きさ)によって大きく異なるのに対し、実際に採用される設計震度においては、表4からも推察されるように、地域的な特性については比較的良好に反映されているものの、港湾やその背後圏の規模の違いに対してはあまり大きな差異が見られない、という実態に起因するものと考えられる。物流被害の算出方法について更なる検討が必要であることはいうまでもないが、このような結果から、経済性の観点からいえば、設計震度を選択する際には、港湾の規模(すなわち、重要度)に応じてもっとメリハリの利いた判断を行うことの妥当性も示唆される。

表5 各モデルごとに推定されたパラメータとAIC

モデル	パラメータ推定値					目的関数値 (誤差二乗和)	サンプル数	パラメータ数	AIC
	生起頻度			被害額					
	β_1	β_2	$\log(\beta_3)$	λ_1	λ_2				
0	1	1	0	1	1	0.09883	26	0	6.80
1	1	0.95	0	1	1	0.06100	26	1	2.53
2	0.006	0.060	0	1	1	0.00862	26	2	-20.92
3	1	1.12	-2.6	1	1	0.00715	26	2	-23.35
4	1	1.06	-2.6	0.3	1	0.00605	26	3	-23.51
5	1	1.06	-2.6	1	0.49	0.00421	26	3	-28.24
6	1	1.06	-2.6	0.9	0.47	0.00412	26	4	-26.51
7	0.04	0.48	-2.7	1	1	0.00437	26	3	-27.76
8	0.06	0.55	-2.7	1	0.68	0.00233	26	4	-33.94
9	0.03	0.43	-2.7	0.43	1	0.00382	26	4	-27.49

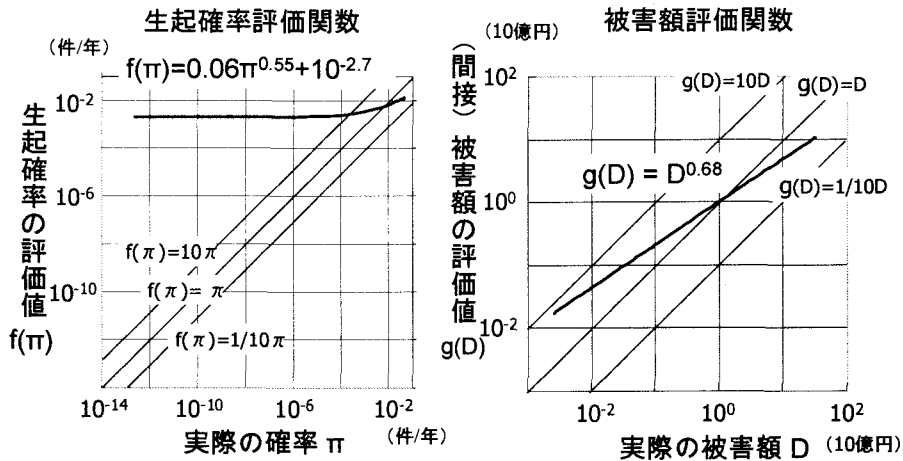


図-4 推定されたリスク評価関数

5. まとめ

本研究は、筆者らがこれまでに行ってきたものと同様の方法によって、港湾施設の耐震設計における設計震度選択問題を対象に、その実績から、港湾施設の地震被災リスクにおける、被害額や発生頻度に関する評価特性を計測することを目的として、はじめに、貨物輸送における経済損失も考慮した港湾施設の設計震度選択の枠組を独自に構築し、全国の重力式岸壁のコンテナバースにおける設計震度選択問題を対象としてリスク評価特性を計測した。その結果、年発生確率については、どんなに小さい確率でも 1/100 弱程度はあるものと評価される結果となり、稀少確率災害でも供用期間中に一度は発生するものと捉えられることが多いという、筆者らの従来の結果とも概ね一致した。いっぽう、被害額については、額の小さい領域では最大 10 倍程度大きく評価されるものの、額の大きい領域では実際の被害額より評価値が小さくなる結果となった。今回の結果は、フラジリティカーブや貨物流動データの入手制約から、重力式岸壁をもつコンテナターミナル（または多目的国際ターミナルにおけるコンテナ貨物だけの物流被害）を対象を限定したため、栈橋式岸壁が多くを占める 3 大湾のコンテナターミナルなどは除外されている。また、複数港湾の同時被災等についても考慮しておらず、港湾のもつネットワーク性や相互補完性についても考慮する必要がある。今後は、本研究で提案した設計震度選択問題の枠組を、これらの要素も含めて拡張したうえで、リスク評価特性計測の精度向上を図りたいと考えている。また、筆者らの従来計測結果とあわせ、リスク評価特性についてのより一般的かつ総合的な考察についても行っていきたいと考えている。

参考文献

- 1) たとえば、小林潔司・横松宗太：治水経済評価のフロンティア：期待被害額パラダイムを越えて、河川技術に関する論文集，Vol.6，pp.237-242，2000 など。
- 2) たとえば、小林潔司・横松宗太：災害リスクマネジメントと経済評価，土木計画学研究・論文集，Vol.24，1，2002。
- 3) 建設省河川局：治水経済調査マニュアル（案），2000。
- 4) 島村誠：運用・維持管理段階でのリスクマネージメント（鉄道斜面防災を例として），土木学会誌 2000 年 7 月号 特集 リスクマネージメント入門，pp.34-37。
- 5) 柴崎隆一・家田仁：計画治水安全度の決定における洪水リスク評価特性の計測，河川技術論文集，Vol.9，pp.305-310，2003。
- 6) 柴崎隆一・大川剛思・家田仁：斜面对策投資における鉄道事業者のリスク評価特性の計測，土木計画学研究・講演集，26，215，2002。
- 7) Gollier, C: The Economics of Risk and Time, MIT Press, 2001.
- 8) Johansson, P.-O: The Economic Theory and Measurement of Environmental Benefits, Cambridge University Press, 1987.
- 9) 小林潔司・横松宗太：カストロフ・リスクと防災投資の経済評価，土木学会論文集，IV-46，pp.39-52，2000。
- 10) 松原望：意思決定の基礎 第2章，朝倉書店，2001。
- 11) 運輸省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，1999。
- 12) Nagao, T., Moriya, Y., and Washio, T.: Optimization of the Target Failure Probabilities for Port Structures, International Conference on

- Applications of Statistics and Probability (ICASP), vol.9, 2003.
- 13) Ichii, K.: Optimization of Design Seismic Coefficient Based on Total Expected Cost for Gravity Type Quay Walls, Structural Eng./Earthquake Eng., JSCE, 20(1), 13-23, 2003.
- 14) 港湾投資の社会経済効果に関する調査委員会編：港湾投資の評価に関するガイドライン 1999.
- 15) 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, No.401/IV-10, pp.79-88, 1989.
- 16) 野津厚・上部達生・佐藤幸博・篠澤巧：距離減衰式から推定した地盤加速度と設計震度の関係, 港湾技研資料, No.893, 1997.
- 17) 運輸省港湾局：平成 10 年度 全国輸出入コンテナ貨物流動調査.
- 18) (財)日本道路交通情報センター：道路情報便覧 2002 年 CD-ROM 版.

貨物輸送の損失を考慮した港湾施設における設計震度選択問題の取り扱いとリスク評価特性の計測

柴崎隆一

本研究は、港湾施設の耐震設計における設計震度選択問題を対象に、その実績から、港湾施設の地震被災リスクにおける、被害額や生起頻度に関する評価特性を計測することを目的に、はじめに、貨物輸送における経済損失も考慮した港湾施設の設計震度選択の枠組を独自に構築し、全国の重力式岸壁のコンテナバースにおける設計震度選択問題を対象としてリスク評価特性を計測した。その結果、年生起確率については、筆者らの従来の結果とも概ね一致するいっぽう、被害額については、額の小さい領域では最大 10 倍程度大きく評価されるものの、額の大きい領域では実際の被害額より評価値が小さくなる結果となった。

Seismic Design for Port Facilities considering Economic Loss in Freight Transportation and The Risk Evaluation Characteristics

SHIBASAKI Ryuichi

The objective of this paper is to measure risk evaluation characteristics on the amount of loss and occurrence frequency, for seismic design of port facilities against earthquake risk. First, economic evaluation method on seismic design for port facilities considering freight transportation cost is developed. Then, risk evaluation characteristics are measured, for seismic design of container berth with gravity type quay-walls in Japan, resulted that evaluation characteristics on occurrence frequency is similar to the results in our past studies against other disaster risk, but that evaluation characteristics on amount of loss is different especially when large amount of loss happen.
