

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

柴崎隆一*

By SHIBASAKI Ryuichi*

1. はじめに

地震・洪水など各種の災害リスクに対して防災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は多くの議論が存在する。最も一般的な評価指標としては、被害額と生起頻度の単純な積で表される期待被害額があげられるが、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、このような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、洪水リスクに対する計画安全度や鉄道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対する、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の取扱

(1) 期待被害額による防災投資評価

防災施設整備水準が z のときの被災状態 s の発現する年間生起頻度を $\pi(z,s)$ 、そのときの被害額を $D(z,s)$ とすると、期待被害額 $E[D(z)]$ は(1)式のように表される。

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

(1)式においては、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。しかしながら、下記に示すように、家計等が主観的に評価する生起頻度や被害額は、上式に示される π, D とは異なる可能性がある。

(2) リスク評価特性を考慮した防災整備水準決定問題の定式化

(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。小林・横松⁸⁾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比べ、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⁹⁾によれば、特に発生頻度が稀少である災害ほど、発生頻度に関する情報の不足・偏りのため、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)、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額 $E[L]$ 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確率 $f(\pi)$ と実際の生起確率 π が異なることを表すため、生起確率に関する評価関数 $f(\cdot)$ 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。

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

このとき、 T : 供用期間(年)、 i_r : 割引率、 $C(z)$: 整備水準 z である防災施設の整備費用とすれば、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。

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 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1, tel/fax: 046-844-5028, shibasaki-r92y2@ysk.nilim.go.jp)

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

3. 輸送損失を考慮した港湾施設の設計震度選択問題

(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、「港湾施設の技術上の基準・同解説」¹⁰⁾(以下「技術基準」)に記載されている。ここでは、港湾施設の設計震度を定める際に、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とされている。この際、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.¹¹⁾, Ichii¹²⁾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最適とする枠組を提案している。しかし、ここで考慮され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」¹³⁾(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・須田ら¹⁴⁾などごく僅かしか存在しない。湯沢・須田ら¹⁴⁾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) 輸送損失も考慮した重力式岸壁の設計震度選択問題

(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選択するものである。すなわち、

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

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

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)、 x : SMAC 最大地震加速度(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 : 岸壁延長(m)、 C :

単位岸壁長あたり建設費用(千円/m)。設計震度 k と設計震度別建設費用 C は Ichii¹²⁾に従い図1に示す6段階に設定した。供用期間 T と年割引率 i_r は、それぞれ50年と4%とした。また、最大地震加速度の超過確率は、以下に示す野津ら¹⁵⁾の式を用いた。

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

ここで、 K : データ観察年数(110年とする)、 N : サンプル数(20とする)、 A, B, h : 各港湾ごとに推定されたパラメータ。なお、想定される地震発生源別に各地域の地震発生確率を求める方法も考えられるが、全国の主な港湾について簡便に推定できるという利点から、今回は上式を採用した。

(b) 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パースの被災パターンによって大きく異なる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。

$$\int_0^{\infty} \phi'(x) \{R(x, k) + L(x, k)\} dx \approx \sum_{y=\min(x)/a}^{\max(x)/a} \{ \phi(ay) - \phi(a(y+1)) \} \{R(ay, k) + L(ay, k)\} \quad (6)$$

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

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

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 : 分析対象パースの被災状態、 $s = \{s_1, s_2, \dots, s_{n_b}\}$: 分析対象パース以外のパースの被災状態を表すベクトル($\sum = \sum \sum \dots \sum$)、 n_b : 当該港湾におけるパース数、 $n_{s_0, s}$: 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)、 $L_{s_0, s, r}$: 各パースの被災パターンごとに異なる、復旧段階 r における一日あたり迂回輸送による損失(千円/日)。なお、復旧費用 R については、(7)式に示すように分析対象パースのみを対象に算定する。パースの被災状態について

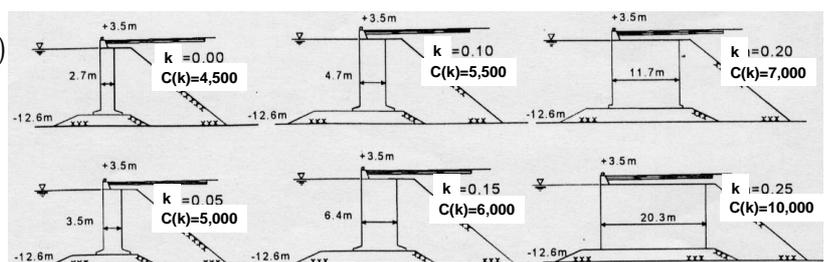


図1 設計震度別の重力式岸壁の標準断面と1mあたり建設費用(千円)

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

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

表2 復旧段階と使用可能なパースの関係

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

は, Ichii¹²⁾に従い, 表1に示すように, $s=0$ (被災なし) から4までの5段階に設定した. また, 復旧工事の実績や試算結果¹¹⁾を参考に設定した, 被災状態別の復旧費用 R_s と復旧期間 RD_s についても表1に示す. またこのとき, 復旧段階 r ごとの使用可能なパースは表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.

$$n_{s_0, s}(F, x, k) = n \left[\prod_{b \in i} \{F(s_i + 1, x, k_b) < \lambda_b \leq F(s_b, x, k_b)\} \right] \quad (8)$$

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, $\{\cdot\}$: $\{\cdot\}$ 内に含まれるすべての式を満たす積集合, b : 各パースごとに発生させた乱数 (ただし $0 < b < 1$). 分析対象パース以外については, 設計震度は現状値 k_b^* に固定する. 最大加速度, 設計震度別のフラジリティカーブについては, 兵庫県南部地震の被災実績をもとに Ichii¹²⁾によって作成された次式を用いる.

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

ここで, φ : 正規分布の累積密度関数, c, ζ : 設計震度・地盤改良の有無・被災状態別に定められたパラメータ(表3).

(c) コンテナ貨物を対象とした迂回輸送に伴う損失額の算出

ここでは, コンテナ貨物を対象とした迂回輸送に伴う損失額の算出方法について示す. 迂回輸送による一日あたりの損失 $L_{s_0, s, r}$ は, 周囲のパースの被災状態に依存し, 次式のように表される.

$$L_{s_0, s, r} = \sum_i \sum_l \left\{ \left(Ocap_{i-1, r, l} - Ocap_{i, r, l} \right) \cdot \left(CL_{i, l} + CM_{i, l} + Tv_l \cdot (TL_{i, l} + TM_{i, l}) \right) \right\} \quad (10)$$

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). また, 添字の $l=20$ or 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. 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

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

パシティとなる貨物量 $Ocap_{0, r}$ は, 次式で表される.

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

ここで, $Q_{0, j}$: 当該港湾を積出港 (または積卸港) とし, j を生産地 (または消費地) とするコンテナ貨物量(TEU/日)であり, 全国輸出入コンテナ貨物流動調査データ¹⁶⁾を日TEUベースに換算することで得た. このときの換算係数や20ft/40ft コンテナの構成比は, ガイドラインの記述に従った. また, $Bcap_{0, r}$: 復旧段階 r における当該港湾の取扱可能貨物量(TEU/日)であり, 次式で表される.

$$Bcap_{0, r} = Bcap_{0, r-1} + \sum_b \left\{ \delta_{s_b, r} \cdot \alpha \cdot cap_{0, b} \right\} \quad (12)$$

ここで, $cap_{0, b}$: 当該港湾における各パースの通常時の容量(TEU/日), δ : 被災時の容量増加率で, ガイドラインに従い1.4とした. また, $s_b, r: s_b = r$ のとき1, それ以外のとき0となるパラメータである.

代替港 ($i > 1$) においては当該地震によって被害が発生しないとすると, 各港において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.

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

なお, 代替港は, アジア域内航路貨物については, 当該港湾から陸上輸送経路で最短となるコンテナ貨物取扱港湾から, また, 基幹航路貨物については, 中枢・中核港湾のうち当該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¹⁷⁾に収録された全国道路ネットワーク上で最短経路探索を行うことにより得た. また, 陸上・海上の輸送・輸送時間費用 CL, CM, TL, TM や, コンテナ貨物の時間価値 Tv については, ガイドラインに従い, 20ft/40ft コンテナ別や基幹航路/アジア域内航路の別にそれぞれ算出する.

4. 全国の重力式岸壁のコンテナパ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。

$$\hat{k}_b = \arg \min_{k_b} \left[\sum_{y=\min(x)/a}^{\max(x)/a} [f(\phi(ay) - \phi(a(y+1)))\{R(ay, k_b) + g(L(ay, k_b))\}] \right] \cdot \left[\sum_{r=1}^T \frac{1}{(1+i_r)^{r-1}} + qd_b \cdot C(k_b) \right] \quad (14)$$

(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、全38パ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、

$$\min_{f,g} \sum_b \left\{ \frac{TC(\hat{k}_b+1) + TC(\hat{k}_b-1)}{2 \cdot TC(\hat{k}_b+1)} - 1 \right\} \cdot (k_b^* - \hat{k}_b)^2 \quad (15)$$

ここで生起確率評価関数 f 、被害額評価関数 g は、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。

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

$$g(L) = \lambda_1 \cdot L^{\lambda_2} \quad (16)$$

ここで $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \lambda_1, \lambda_2$ は未知パラメータ ($\beta_1 > 0, \beta_3 = 0, \lambda_1 > 0$)。

(2) 入力データの準備

本研究の分析対象とした、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パスがあり、かつ貨物輸送に関する経済損失が計算可能な16港計26パスにおける、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パスが多い。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、各パ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、 $a = 20(\text{gal})$, $\min(x) = 20(\text{gal})$, $\max(x) = 1000(\text{gal})$, $TN = 10(\text{回})$ 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。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2に示す。年生起確率については、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、筆者らの従来(結果^{5),6})とも概ね一致する。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。この結果は、予想される経済被害は港湾の規模によって大きく異なるが、実際の設計震度にはあまり大きな差異がないという実態に起因するものと考えられる。

表4 本研究の分析対象パ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 (0.15)	B (0.13)	C (0.12)	D (0.11)	E (0.08)	
設計震度	0.05			1	6	7
	0.10		2	3	1	8
	0.15		2	3		5
	0.20	6				6
	0.25			1		1
計	6	4	7	2	7	26

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	$\text{Log}(\beta_3)$	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	

参考文献

- 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。
- 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。
- 建設省河川局：治水経済調査マニュアル(案), 2000。
- 島村誠：運用・維持管理段階でのリスクマネジメント(鉄道斜面防災を例として)、土木学会誌 2000年7月号 特集 リスクマネジメント入門, pp.34-37。
- 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。
- 柴崎隆一・大川剛思・家田仁：斜面対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。
- Gollier, C.: The Economics of Risk and Time, MIT Press, 2001。
- 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。
- 松原望：意思決定の基礎 第2章, 朝倉書店, 2001。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 湯沢昭・須田照：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。
- 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。
- 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。
- (財)日本道路交通情報センター：道路情報便覧 2002年 CD-ROM版。

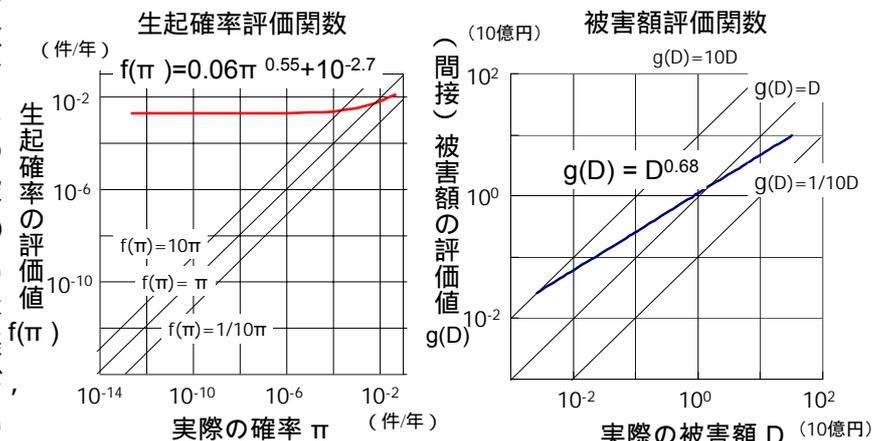


図2 推定されたリスク評価関数