

地震による港湾機能の経済被害予測

ESTIMATING EARTHQUAKE DAMAGE COSTS OF PORT FUNCTIONS

湯沢 昭*・須田 熙**

By Akira YUZAWA and Hiroshi SUDA

In case that port facilities are damaged by earthquake, their functional disorder have a bigger influence on various economic activities than roads because the former have higher and longer restoration cost and period than the latter.

Since very few previous studies had paid attention to those impacts, however, this paper proposes a method to estimate the earthquake damage costs of port facilities by defining them as the total amount of restoration costs of the damaged port facilities and the additional physical distribution costs due to the disorder of port facilities, for which the estimation techniques can be summarized as follows :

1) In order to estimate restoration cost and period of a berth, this paper applies a regression analysis on the past experiences of various ports in Japan.

2) For estimating the damage cost in terms of physical distribution function of the port facilities, this paper builds a model of operations research type for the ships and cargos in the port.

3) By applying those models to a port, this paper checks the applicability of our model, and proposes a feasibility study technique of the anti-earthquake berth.

Keywords : port facilities, earthquake, anti-earthquake berth

1. はじめに

地震により都市の物流機能や生産機能は一時的には停止するが、物流機能の回復とともに産業活動は急激に回復する。しかし、物流機能が破壊的な損害を受けた場合は、産業活動の回復に大きな影響を与えることが予想される。物流機能の中でも道路等の施設は比較的短期間に復旧させることが可能であるが、港湾はその復旧に長期間を要する。事実、昭和58年5月25日に発生した日本海中部地震による物流機能の被害のうち、道路の仮復旧は数日で完了したが、港湾施設の復旧には2年程度の期間を要したことが報告されている^{1),2)}。特にわが国の地震の発生源の大部分は、日本海溝付近の深海部であるため、物流機能の中でも港湾施設が地理的に最も近い位置にあり、地震の規模によっては壊滅的な被害を受けることも予測される。このような物流機能の被害は、単に物理的被害だけでなく、各種の経済被害を発生させる。たとえば港湾のふ頭が被災し、利用可能ふ頭が減少するこ

とにより生じる滞船現象の増大や、代替港利用による陸上輸送費の増加等が予想され、これらによる被害額は時として物理的被害額以上の損失を生じることがある。

このような地震による物流機能の低下によって生じる経済被害に関する研究は現在までにほとんどなく、日本海中部地震に伴う米澤の報告³⁾がある程度である。それによると経済被害とは、従来より港湾を利用して生産活動を行っている産業およびその産業に関連する産業で、地震による港湾の物流機能の低下を原因として発生した、または失われた財貨の大きさとする。具体的には輸送方法の変更に伴って支払いを余儀なくされた追加費用、船舶の港湾利用の減少により失われた収入およびこれらに関連して発生する損失額であるとしている。この場合、船舶の港湾利用減少による港湾関連産業の収入減を掲げているが、国民経済的にみた場合は、代替港湾の利用が増加するため総貨物量が変化しなければ全体的にはその収入は変化しないものと考えられる(当然、財貨の帰属先は異なる)。したがって、地震による経済被害額としては、被災施設の復旧費用と物流機能低下により生じる追加費用である。

本研究は物流機能の中でも産業活動に大きな影響を与

* 正会員 工博 東北大学助手 工学部土木工学科
(〒980 仙台市荒巻字青葉)

** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科 (同上)

えている港湾を取り上げ、地震により生じる港湾施設の物理的被害額と利用可能バースの減少による間接被害額の推定を行い、併せて耐震化バースの評価を行うものである。この場合、一般にバースを耐震化構造にするかどうかの判断は、地震により想定される被害額をどのように見積るかによる。つまり地震の発生確率を考慮した被害額をもとに議論されるものであるが、本論文ではあくまでも検討期間内に1回の地震が発生するとした場合を想定している。また港湾施設としては、船舶の荷役に直接影響するバースのみを考え、以下の項目に関し検討を行う。

- ① バースの被災程度の予測
- ② バースの復旧費用および復旧期間の推定
- ③ バースの復旧順位の決定と間接被害額の推定
- ④ 耐震化バースの評価

2. 経済被害額の推定方法

図一は、地震によるバースの被害程度の予測から耐震化バースの評価までの全体フローを表わしており、おのおの以下のような考え方に沿って研究を進める。

(1) 地震規模の推定

地震の規模(マグニチュード)と震源域が決まると、地盤応答解析により検討地点の地表加速度が算出され、構造物に働く作用震度が決定されることになる。また各構造物は滑動や転倒に対する限界震度が決まっているため、作用震度と限界震度より耐震性の評価が可能となる。このように地震の規模、震源域、作用震度、および限界震度の算出が地震による構造物の被災予測⁴⁾には必要となるが、本論文ではその理論的内容に関してはいっさい議論せず、それらは所与のものとして取り扱う。

(2) バースの被災変形量の予測

バースの被災変形量の予測に関しては、本研究の目的が経済被害額の評価であるため、本論文では従来より提案されている予測手法をそのまま適用する。それは地盤が液状化しない場合とする場合とに分け、各バースの最大はらみ出し量と天端沈下量を過去の被災例をもとに予測するものである。表一は、運輸省港湾技術研究所と

同じく第二港湾建設局が提案しているモデル式であり、バースの構造別(重力式、矢板式)別にそれらの値を求めるものである。

表一の中で限界震度(K_c)とは、構造物の安定計算(滑動、転倒、基礎地盤の支持力についての安定)においてその安全率が1を切る震度をいう。また液状化指標値(P)は、地盤の応答解析より得られる地盤中に生じる最大せん断応力比と地質(N 値、粒度等)条件より計算される動的せん断強度比より計算される⁵⁾⁻⁷⁾。

表一より求められた最大はらみ出し量と天端沈下量だけで被災バースの評価を行うには無理がある。その他の指標としてエプロンの沈下量や矢板の傾斜等があり、これらを総合化して被災状況を評価する必要がある。バースの被災状況の総合評価としては、昭和40年3月に報告された新潟地震港湾被害報告書第2部⁸⁾に「被害後の断面が原形に比較してどのくらい変位・変形してい

表一 バースの被災変形量予測式

I) 液状化しない場合(港研式)

構造	回帰式	相関係数
重力式	$Dx = -113.8 + 124.4 Fc$	0.559
	$Sp = -50.9 + 57.1 Fc$	0.667
矢板式	$Dx = -1.6 + 34.9 Fc$	0.679
	$Sp = 5.3 + 14.7 Fc$	0.398

Dx : 最大はらみ出し量(cm)
 Sp : 天端沈下量(cm)
 $Fc = Ke / Kc$
 Ke : 作用震度
 Kc : 限界震度

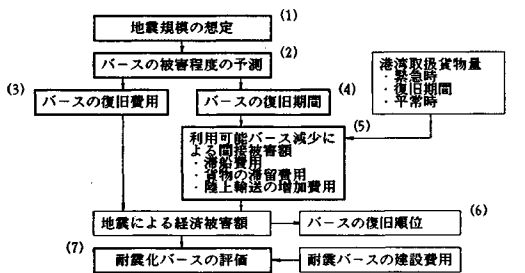
II) 液状化する場合(二建式)

構造	回帰式	相関係数
重力式	$Yx = -0.812 + 3.90 Fc + 0.453 P$	0.652
	$Yp = -1.21 + 2.82 Fc + 0.963 P$	0.664
矢板式	$Yx = 1.41 + 3.39 Fc + 0.0929 P$	0.702
	$Yp = 0.149 + 1.90 Fc + 0.169 P$	0.826

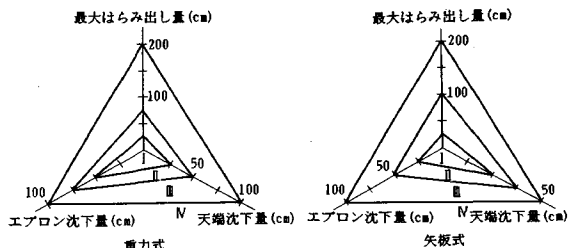
$Yx = Dx / H$ $Yp = Sp / H$ $Fc = Ke / Kc$
 $Ke = 1/3(a/g)^{1/3}$ $a \leq 200 \text{ gal}$
 $Ke = a / g$ $a < 200 \text{ gal}$
 H : 構造物の高さ(m) a : 最大地表加速度(gal)
 g : 重力加速度(980 gal) P : 液状化指標値

表二 被災ランク

ランク	被災の状況
0	無被災
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、構造物自体に破壊が起こったものと認められるもの
IV	全壊して形をとどめていないもの



注) ()の数字は第2章の節の番号を示す
 図一 研究の全体フロー



図二 バースの諸変形量と被災ランク

るか」という観点に基づき無被災から全壊までの5段階に分類しているものがある。本論文でもこの基準を採用し、この被害の状況を示す数字を被災ランクとよぶことにする(表-2)。また図-2は、バースの諸変形量と被災ランクとの関係を表わしている⁵⁾。

(3) バースの復旧費用

地震による被災バースの復旧費用は、表-1で求められたバースの変形量によって大きく変化し、当然、その変形量が多いほど費用は増大する。復旧費用は過去の被災バースの復旧金額と被災延長より単位被災延長当たりの被災額を算出する。方法としては、過去の地震による被災事例に基づきバースの構造別(重力式、矢板式)に変形量と被災額との関係に回帰分析を適用し、予測式を作成している。本論文では、参考文献5)の結果を使用する(表-3)。

(4) バースの復旧期間

地震によるバースの被災程度は、表-1に示したように地震による地盤加速度と土質条件により決定されるため、必ずしもバース単位で被災するわけではない。つまり、図-3に示すようにある岸壁内に複数のバースが配置されており、同じ岸壁のバースは水深や土質条件は同一である場合が多いため、地震による被害も岸壁内では連続して生じることになる。また、復旧にあたってはバース単位で復旧するのではなく、作業の連続性や効率上岸壁単位で実施される。したがって、バースの復旧順位をバース単位で考えることは実際的でないため、本論文では岸壁単位での復旧期間を算定する。

岸壁の復旧期間は、その被災程度と規模(水深、延長)により大きく異なるものと考えられる。復旧期間の算出方法としてはその被災程度により撤去工事、基礎工事等

表-3 バース変形量と被災額

構造	回帰式	相関係数
重力式	$C = 2.0 + 4.38 Dx$	0.706
	$C = 141.7 + 2.41 Sp$	0.530
矢板式	$C = -128.4 + 6.97 Dx$	0.823
	$C = -14.4 + 4.43 Sp$	0.629

C: 被災額(千円/m) Dx: 最大はらみ出し量(cm)
Sp: 天端沈下量(cm)

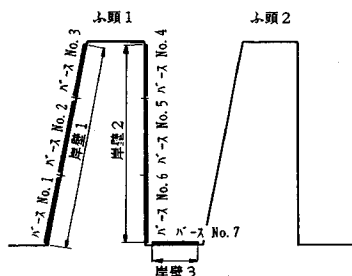


図-3 バースと岸壁との関係

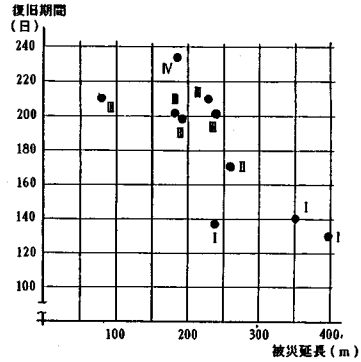


図-4 バースの復旧期間と被災延長

と全体の工程計画より期間を算出することは可能であるが、本論文ではその概略値を求めることが目的であるため、過去の事例より簡略的に算出す

表-4 被災ランク別復旧期間

ランク	復旧期間
I	140日
II	170日
III、IV	210日

る。図-4は、昭和58年に発生した日本海中部地震による秋田港の主な岸壁別の復旧期間と被災延長の関係を表わしており、併せて図中には、表-2に示した被災ランクを記入してある。それによると、被災岸壁の復旧期間は被災延長とは相関がなく、その被災ランクによりほぼ一定となることがわかる。また被災ランクが小さいほど、その延長が長い傾向にある。このことは必ずしもすべての港湾に当てはまるものではないが、このような事例が少ないため本論文では、被災ランク別に復旧期間は一定とする(表-4)。

(5) 利用可能バース減少による間接被害額の評価⁹⁾

図-5は、地震前後における港湾取扱貨物量の時間的变化量とその内容を表わしている。地震直後においては、使用可能なバースより緊急時における生活必需品が搬入され、併せて住宅や道路復旧のための資材の搬入やがれき等の搬出が行われる。これらの期間は地震発生後数日から数か月程度であり、その後背後地の経済活動の再開

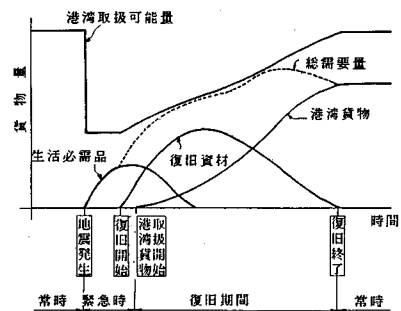


図-5 地震前後の港湾取扱貨物量の変化

とともに原材料や製品の物流需要が発生する。しかし完全に港湾機能が回復するには、被災の程度にもよるが1~2年の期間を要する。その期間内においては必要とされる資材の搬出入の確保や背後地の経済被害を最少とするような被災パースの復旧を決定しなければならない。

利用可能パース減少による間接被害としては、大きく2つに分けることができる。1つは、港湾部での船舶の荷役待ちにより生じる費用であり、もう1つは代替港利用による需要地までの陸上輸送費用の増加である。図-6は港湾における船舶の入港から出港までの一般的行動と貨物の流動状況を表わしている¹⁰⁾。被災後における船舶の行動の大きな変化は、荷役可能なパースの減少によるパース待ち時間の増大と、大型船舶着岸不能による船舶の小型化や、夜間荷役・休日荷役による荷役可能時間の延長が考えられる。また貨物に着目した場合は、船舶と同様に港湾における滞留時間の増加と代替港湾利用による陸上輸送距離の変化である。したがって、本論文では、その影響が特に大きいと予想される船舶のパース待ちと貨物の滞留時間の増加、および陸上輸送距離の変化に着目し、それらによって生じる費用ができるだけ少なくなるように被災パースの復旧順位を決定し、地震による間接被害額の予測を行う。しかし、入港船舶の船型、貨物の種類によりその被害額は大きく異なるため、船型、貨物の種類別に費用に換算する必要がある。本論文では以下に示す費用を考慮する。

- ① 船舶側：船型別の滞船費用と船員費用
- ② 貨物側：品目別の滞留費用と陸上輸送費用

以上の事項を評価するためのシステムとしては、次の要件を満足することが必要とされる。

- ① 船舶ごとの入港から出港まで(図-6)の行動が把握できること。
 - ② 船舶の小型化や夜間荷役や休日荷役による荷役可能時間の延長が評価できること。
 - ③ 代替港からの陸上輸送が評価できること。
- また実際の港湾計画に適用するためには
- ④ パースの被災ランクが評価できること。
 - ⑤ 船種による荷役形態(ポンプ荷役やクレーン荷役等)が評価できること。
 - ⑥ パース別の取扱可能品目および着岸可能船型が評価できること。

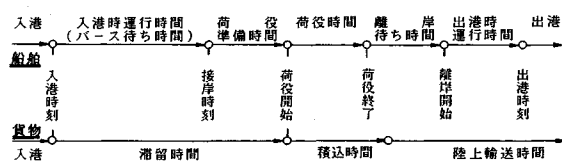


図-6 港湾における船舶と貨物の流動状況

⑦ 港湾統計から容易に各種のパラメーターが算出できること。

⑧ 入港船舶数(10 000隻/年程度)、パース数(100程度)の処理ができること。

以上の要件を勘案し、本研究では待ち行列型のシミュレーションモデルを作成し、利用可能パース減少による間接被害額の評価を行う(モデルの詳細な説明は3.で述べる)。

(6) パースの復旧順位

前述したように利用可能パースの減少による間接被害額は、待ち行列型のシミュレーションモデルにより算出するが、この場合、それらの費用をできるだけ少なくするようにパースの復旧順位を決定する必要がある。パースの破損状況としては表-2に示したように無被災(0)から全壊(IV)までの5段階に分類したが、ここではさらにその被災ランクにより、着岸可能船型を表-5のように設定した。

表-5は、その被災ランクにより着岸可能船型の制約を意味しており、ランクⅢ、Ⅳは全く使用不可能であり、Ⅰ、Ⅱは船型を減少させることにより使用を可能としている。

次にパースの復旧順位の考え方であるが、(4)のパースの復旧期間のところでも述べたように、パース単位の復旧順位ではなく、岸壁単位でその順位を決定する。この場合、大きく2つの方法が考えられる。1つは、図-7の(a)に示すように被災パースの復旧開始を同時に行う場合であり、この場合は全体の復旧期間は最少となるが、被災パースのすべてが一時使用不可能となるためそのときの取扱可能貨物量が最少となる。もう1つの考え方は、被災ランクⅠ、Ⅱのパースの復旧開始を適当に遅らせることで、取扱可能貨物量の最少値をできるだけ上げ、貨物需要に対応させるものである。当然、全体の復旧期間は延長されることになる。こ

表-5 被災ランク別の着岸可能船型

ランク	船型Ⅰ	船型Ⅱ
0	1/1	1/1
Ⅰ	1/2	1/2
Ⅱ	1/3	1/2
Ⅲ、Ⅳ	使用不可	使用不可

注) 1/2とは、常時の着岸可能最大船舶の半分までの船舶が着岸可能船型(は)エプロンに載荷して荷役を行う(船舶)船型Ⅱとは、エプロンに載荷せず荷役が可能な船舶(液体等)

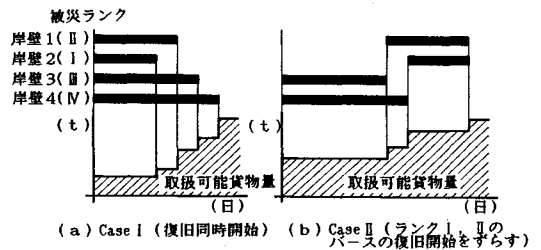


図-7 被災パースの復旧順位と港湾取扱可能貨物量

のどちらの方法を採用するかは、(5)で求められた間接被害額を最少とすように決定する。

(7) 耐震化バースの評価

耐震化を検討するバースは、(2)でバースが被災を受けると予測されたものに対して行い、その決定は以下の手順で実施する。

- ① 被災バースの1つを被災なしとした場合の間接被害額の減少分とそのバースの復旧費用の合計を耐震化による便益額とする。
- ② すべての被災バースの便益額を計算し、便益額の最も大きいバースを耐震化の第1候補とする。
- ③ 第1候補のバースの耐震化費用がその便益額より小さい場合は耐震化を実施する。
- ④ ③で決定されたバースは、被災を受けなかったものとして、システムに組み込み、①へ戻る。それ以外の場合は耐震化の検討を終了する。

3. 利用可能バース減少による間接被害額評価システム

システムは大きく2つのサブシステムから構成されている。1つは船舶の入港から出港までの行動を評価するものであり、もう1つは港湾から消費地への貨物の搬入(またはその逆もある)を決定する部分である。地震前においては図-8に示すようにA港に搬入された貨物は、背後地の消費地Dへ陸上輸送される。それが地震によりA港の使用可能なバースが減少することにより、A港で全く荷役不可能な品目と荷役可能ではあるがA港でバース空きを待つ費用(滞船費用、貨物の滞留費用)とA港より消費地Dまでの輸送費用の合計よりB港で荷役を行い、消費地Dまで陸上輸送した方が総費用が少ない場合は船舶はB港を選択するものとする。ただし、船舶がA港またはB港に到着するまでの費用とB港での船舶のバース待ち費用は考慮しない。

ここでB港でのバース待ち費用を考慮しないのは、B港の地震による被害が著しく少なく、またバースに十分な余裕があるものとの前提にたっている。ただし、B港も地震による被害を受けたり、またバースに余裕がな

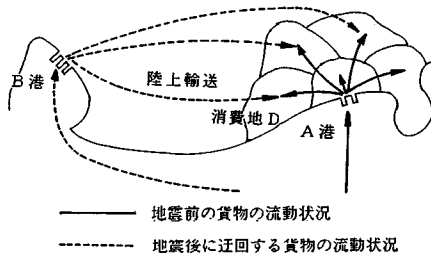


図-8 地震前後の貨物流動

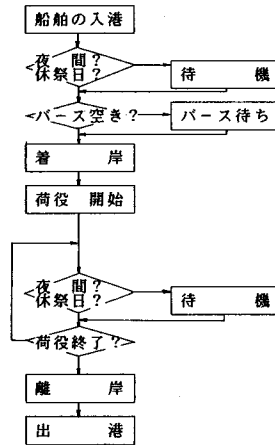


図-9 船舶の入出港

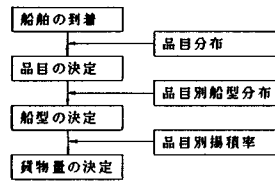


図-10 品目別貨物量推定

く、A港よりの船舶によりB港での待ちが増大する場合は、A港、B港を同時に評価することにより本システムはそのまま適用可能である。

(1) 船舶の行動システム

図-9は、船舶の入港から出港までのフローを示しており、以下のような仮定に基づいている。

- ① 船舶は、1隻、1品目である。
- ② 入港時刻が夜間(17:00~8:00)のときは翌朝まで、休祭日の場合は平日になるまで待機する。
- ③ 各バースは取扱可能品目と着岸可能な船型の上限・下限が設定されている。

④ 入港船舶は、③の条件の中で最も早く荷役が開始できるバースを選択し、着岸する。入港から着岸までに必要な最少時間は、6000GT以上が2時間、1000GTから6000GTまでが1時間、1000GT未満が0時間とする。

⑤ 着岸したら一定の荷役準備時間(荷役準備時間+荷役後始末時間:1000GT以上が2時間、1000GT未満が1時間)の後、荷役を開始する。

⑥ 荷役中に夜間または休祭日になった場合は、②と同様に待機する。ただし、品目が液体の場合は連続荷役とする。

⑦ 荷役終了後、ただちに離岸・出港する。

以上の船舶の行動で問題となるのが、船舶別の品目別貨物量と荷役時間の算出である。品目別貨物量を決定するうえで利用可能な資料としては港湾統計がある。本研究ではこの港湾統計のデータを使用し、以下の手順で入港船舶の品目別の貨物量を推定する(図-10参照)。

① 年間取扱貨物量の品目別比率を求める。

$$f_i = F_i / \sum_i F_i \dots \dots \dots (1)$$

f_i : 品目 i の比率

F_i : 品目 i の年間取扱貨物量 (t)

② 式(1)で求めた比率になるよう乱数を発生さ

せ、入港船舶の品目を決定する。

③ 品目別船型比率を求める。

$$f_{ik} = \frac{F_{ij}}{\sum_j F_{ij}} \cdot R_{jk} \dots\dots\dots (2)$$

f_{ik} ：品目 i ，船型階級 k の比率
 F_{ij} ：品目 i ，バース j の年間取扱貨物量 (t)
 R_{jk} ：バース j ，船型階級 k の年間入港隻数 (隻)

④ 式 (2) で求めた比率になるよう乱数を発生させ、船型階級を決定する。

⑤ 品目別揚積率を計算する。

$$r_i = F_i / Q_i \dots\dots\dots (3)$$

$Q_i = \sum_k [f_{ik} \cdot W_k / R_k]$
 r_i ：品目 i の揚積率
 F_i ：品目 i の年間取扱貨物量 (t)
 Q_i ：品目 i の船舶の年間入港総トン数
 W_k ：船型階級 k の年間入港総トン数
 R_k ：船型階級 k の年間入港隻数 (隻)

⑥ 最後に揚積率を船型に乗じることにより、貨物量を計算する。

品目別の荷役時間は、式 (4) より計算する。

$$t_i = \frac{E_i}{U_i \cdot H_{ik}} \cdot \eta \dots\dots\dots (4)$$

t_i ：品目 i の荷役時間 (h)
 E_i ：の貨物量 (t)
 U_i ：の荷役能力 (t/h)
 H_{ik} ：品目 i 船型階級 k の投入ギャング数
 η ：荷役効率

荷役能力 U_i は、専用荷役機械を使用する場合はその能力を、また一般のクレーン荷役等の場合は荷役業者にヒアリング調査を実施し、その値を求める。また投入ギャング数は同じく現地調査の結果、表一六に示す値を使用した。

(2) 陸上輸送システム

港湾で荷役された貨物は、背後地へ輸送されることになる。輸送機関としては自動車と貨車輸送があるが、実際はその大部分が自動車輸送であるため、本論文では自動車輸送のみを考える。

いま、表一七に示すように消費地別に年間品目別需要量が与えられているものとすれば (陸上出入貨物調査¹¹⁾

表一七 品目別需要量

消費地 j \ 品目 i	1	2	3	...	合計
1					
2		D _{ij}			
3					

より算出する)，入港した船舶の貨物 (品目 i) の消費地 (j) を決定する基準としては、式 (5) の供給率の最も小さい消費地を選択し、輸送するものとする。

$$\alpha_{ij} = S_{ij} / D_{ij} \dots\dots\dots (5)$$

α_{ij} ：品目 i ，消費地 j への供給率
 S_{ij} ：の累積供給量 (t)
 D_{ij} ：の年間需要量 (t)

当然、初期においてはすべての消費地とも $\alpha_{ij} = 0$ であるため、その場合は D_{ij} の大きい順にその消費地を決定する。

(3) 費用の算定

船舶の滞船費用、貨物の滞留費用および陸上輸送費用は以下のように算出する。

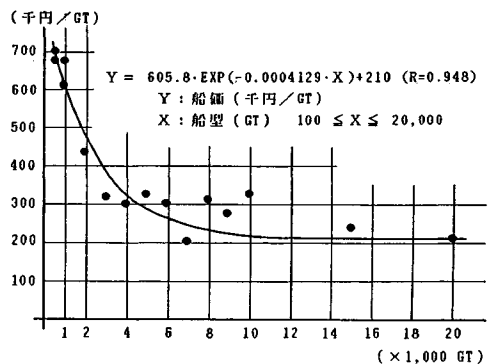
a) 船舶の滞船費用

バース待ちによる滞船費用 (c_1) は、船舶とその船員費用の和とし、船舶の費用はその原価償却費として式 (6) より計算する。

$$c_1 = \frac{\text{船価} \times 0.9}{\text{償却年数} \times \text{年間運転時間}} \dots\dots\dots (6)$$

式 (6) の船価は、船種・船型により異なるがここではその建造費を採用¹²⁾し、式 (7) より算出した (図一11 参照)。

$$\begin{aligned} Y &= 180 \text{ 千円/GT} & X > 20,000 \text{ GT} \\ Y &= 605.8 \text{ EXP}(-0.0004129 X) + 210 & 100 \leq X \leq 20,000 \end{aligned} \dots\dots (7)$$



図一11 船型と建造単価

表一八 船員の人件費 (c_2)

船型 (GT)	乗員数	人件費 (円/h)
10,000以上	20人	33,500
1,000-9,999	10人	17,250
1,000未満	5人	9,125

表一六 品目別投入ギャング数

品目 (荷役)	10,000以上	6,000以上	3,000以上	1,000以上	100以上
液体 (粉体)	2	2	2	1	1
原木 (海面)	2	2	2	1	1
自動車 (自走)	1	1	1	1	1
コンテナ	1	1	1	1	1
その他一般雑貨	5	4	3	2	1

$$400 \text{ GT} \leq X \leq 20\,000 \text{ GT} \quad (r=0.948)$$

$$Y=750 \text{ 千円/GT} \quad X < 400 \text{ GT}$$

Y: 単価 (千円/GT), X: 船型 (GT)

滞船に伴う船員の人件費 (c₂) は表—8のとおりとする。したがって、滞船に伴う船舶側の費用 (C₁) は式 (8) のようになる。

$$C_1 = (c_1 + c_2) \cdot t_w \dots\dots\dots (8)$$

t_w: パース待ち時間 (h)

b) 貨物の費用

貨物の費用は、滞船に伴う滞留費用 (C₂) と陸上輸送費用の変化分 (C₃) であり、おのおの式 (9), 式 (10) のように計算される。

$$C_2 = \frac{\text{貨物量} \times \text{単価} \times \text{金利}}{365 \times 24} \times t_w \dots\dots\dots (9)$$

$$C_3 = \text{貨物量} \times \text{陸上輸送単価} \dots\dots\dots (10)$$

貨物の品目別単価は、「外国貿易概況」¹³⁾の貨物量とその金額より算出し、陸上輸送単価¹⁴⁾は式 (11) より算出する (すべての品目とも同じとする)。

陸上輸送単価 (円/10t)

$$= 213.2 X + 25\,880 \dots\dots\dots (11)$$

X: 輸送距離 (km) (r=0.9973)

以上、式 (8), 式 (9), および式 (10) より利用可能パース減少による間接被害額 C は式 (12) のようになる。

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \dots\dots\dots (12)$$

4. 適用事例

地震による港湾施設の経済被害額の推定と耐震化パースの評価に関する適用事例としては、実際の港湾への適用を行う。対象港湾は、近年東海沖地震が想定されている東海地方のA港を取り上げ、地震後の代替港湾としてはB港を想定する。計算に際しての前提条件は以下のとおりである。

① パースは公共パースのみとし、その数は66とする。

② 各パースは、荷役可能品目と着岸可能船型が設定されている (表—9)。ただし表—9の中でパース No. 64, 65, 66 は泊地による荷役を表わしている。

③ 品目は港湾統計の54品目分類を使用する。

④ 品目別荷役能力、揚積率および単価の一部を表—10に示す。

⑤ 地震前の入港船舶数は、同港の港湾統計より6313隻/年とし、年間取扱貨物量は約850万トンである (公共パース)。

⑥ 荷役時間は8時間とし、また式 (4) の荷役効率 η は0.75とする。

⑦ 式 (6) の償却年数は15年、年間運転時間は300日、式 (9) の金利は5%とする。

⑧ 地震の規模はマグニチュード8であり、それによる各岸壁での地表加速度、限界震度、作用震度、および液化化指標値は、表—11のように与えられ、また岸壁の構造様式で栈橋式のものは被災を受けないものとする。

⑨ 地震後の取扱貨物量は、図—5に示したように時間とともに変化するが、緊急時は短期間であるとして復旧期間以降に対しての検討を行う。またこの場合の港湾貨物の総需要量は、地震前と同じとする。

⑩ A港から背後地への貨物の輸送は、A港の直背後地とB港とは反対側の地域へその大部分が輸送されるため、代替港利用による陸上輸送距離の増加は、A港とB港間の道路距離にほぼ等しくなる。したがって、輸送距離はその増加分として200kmとする。

表—9 各パース別の諸データ

パースNo	水深 (m)	延長 (m)	取扱可能品目 (番号は港湾統計参照)	岸壁No
1	10.0	185	3, 4, 5, 8, 9, 10, 15, 16, 22, 23, 24, 26, 30, 31, 36, 37	1
2	10.0	185	38, 39, 42, 44, 48, 50, 53	2
3	10.0	185		3
4	5.0	90	8, 23, 24, 26, 38, 42, 53	4
5	5.0	91		5
6	10.0	185	3, 4, 5, 8, 9, 10, 15, 16, 22, 23, 24, 26, 30, 31, 36, 37	6
7	10.0	185	38, 39, 42, 44, 48, 50, 53	7
8	10.0	185		8
9	10.0	185		9
10	12.0	190	54	10
11	12.0	220		11
12	10.0	185	25, 31	12
13	10.0	185		13
14	4.5	60	16, 20, 22, 48	14
15	4.5	60		15
16	4.5	60		16
17	4.5	60		17
18	7.5	135	8, 9, 38, 42, 48, 50, 53	18
19	12.0	240	54	19
20	12.0	240	25, 54	20
21	12.0	240		21
22	12.0	240		22
23	7.5	130	2, 5, 8, 9, 19, 21, 22, 24, 25, 26, 30, 31, 36, 37, 41, 42	23
24	7.5	130	8, 9, 19, 21, 22, 24, 26, 31, 41, 42, 52	24
25	7.5	130		25
26	7.5	130		26
27	12.0	330	11	27
28	9.0	165	32, 35	28
29	7.5	72		29
30	7.5	440	32	30
31	6.5	95	8, 42, 53	31
32	6.5	95		32
33	6.5	96		33
34	6.5	90		34
35	6.5	95		35
36	4.5	74	8, 42, 53	36
37	4.5	75		37
38	4.5	68	8, 31, 53	38
39	4.5	68		39
40	4.5	68		40
41	4.5	68		41
42	4.5	68		42
43	4.5	68		43
44	4.5	90	51	44
45	6.5	95	8, 31, 53	45
46	4.0	125	32	46
47	4.5	64	2, 15, 20, 22, 24, 26, 30, 31, 37, 42, 50	47
48	4.5	64		48
49	4.5	64		49
50	4.5	65		50
51	4.5	65		51
52	7.5	113	2, 9, 10, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 30, 36, 37, 38	52
53	7.5	113	41, 42, 50, 53	53
54	10.0	198	2, 5, 9, 10, 20, 22, 23, 24, 26, 30, 36, 37, 38, 41, 42, 50	54
55	10.0	198	2, 5, 9, 10, 20, 22, 23, 24, 26, 30, 31, 36, 37, 38, 39, 42	55
56	10.0	198	44, 48, 50, 53	56
57	9.0	165	1, 11, 28, 31	57
58	9.0	165		58
59	11.0	185	1, 28	59
60	9.0	173	2, 4, 5, 9, 10, 15, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 30, 31, 36, 37	60
61	9.0	156	38, 39, 41, 42, 44, 50	61
62	7.5	100	29, 37, 48	62
63	7.5	88	29, 48	63
64	11.0	-	55	64
65	11.0	-		65
66	12.0	-	32	66

⑩ パース復旧は、岸壁単位で実施し、その復旧過程は図一7に示したように2つの場合を考える。1つは、被災岸壁のすべてを同時に復旧開始する場合であり、もう1つは被災ランクⅢ、Ⅳの岸壁の復旧が終了してからランクⅠ、Ⅱの岸壁の復旧を開始する。

⑪ 耐震化パースの評価方法としては、⑩で求められた間接被害額の小さい方の復旧過程を採用し、被災パースの1つを被災なしとした場合の間接被害額の減少分とそのパースの復旧費用の合計を耐震化による便益額とする。

⑫ パースの耐震化費用は、表一12に示す一般的なパース建設単価(原単位)の5割増しとする。

⑬ パースの復旧費用は、岸壁別の単位長当たりの被

災額をパース長に乗じることにより算出する。

⑭ すべての費用は、昭和57年度を基準としてデフレータを用い、価格調整を行う。

⑮ 検討期間は、復旧期間を含めて2年間とし、おのおののケースについて10回のシミュレーションを行い、その平均を取る。

表一11は、岸壁別の被災状況を表わしており、この中で岸壁No.1, No.5はすでに耐震化構造となっているので地震による被災はないものとする。表より岸壁の全被害額は、約28億円と推定される。

図一12は、被災岸壁の復旧過程とその場合の取扱貨物量の月別変化量とパース減少による間接被害額を表わしたものである。その結果、被災岸壁を同時に復旧開始した場合の復旧期間は210日であり、そのときの間接被害額は約84.6億円となる。被災ランクⅠ、Ⅱの岸壁の復旧開始をランクⅢ、Ⅳの復旧後とすることにより、その被害額は約32.7億円と大幅に減少させることが可能である。しかし、すべての被災岸壁の復旧期間は380日と延長されることになる。このことより、地震後においては被災程度の軽い岸壁を暫定的に使用しながら使用不能な岸壁を復旧し、それらが復旧した後に、被災程度の軽い岸壁を復旧開始することが経済被害額の減少に大きく寄与することが明らかである。また図一12より、取扱貨物量の減少および間接被害額のいずれも復旧開始後約7か月の間にその大部分が集中している。これは被災ランクⅢ、Ⅳの岸壁の使用不能が大きく影響している。

図一13は、パースを耐震化構造にすることにより生じる経済被害額(パースの復旧費用+間接被害額)の変化を表わしている。図より、パースの復旧費用は、パースの耐震化によってもその変化はあまりみられないが、間接被害額は急激に減少する。また間接被害額の内訳を

表一10 品目別荷役能力・揚積率・単価

品目	荷役能力 (t/h)	揚積率	単価 (万円/トン)
1 麦	250	0.5610	4.000
2 米/雑穀/豆	30	0.5794	3.208
3 野菜/果物	50	0.5140	13.359
4 棉花	80	0.4690	34.320
5 その他農産品	50	0.4450	39.909
6 羊毛			
7 その他畜産品			
8 水産品	30	0.5820	78.826
9 原木	100	1.1180	2.608
10 樹脂類	32	0.2840	20.916
11 その他木材	350	0.7370	2.366
12 薪炭			
13 石炭			
14 鉄鉱石			
15 その他金属鉱	50	1.7230	3.647
16 砂利/石材等	50	1.4630	1.422
.	.	.	.
.	.	.	.

・荷役能力は、荷役機械の能力とヒアリング調査による
 ・揚積率は、式(3)より計算
 ・単価は、「外国貿易概況」、日本関税協会、1985-12より作成

表一11 岸壁別の被災額

岸壁No	延長 (m)	構造様式	前面高 (m)	地震加速度 a(cal)	限界震度 Kc	作用震度 Ke	液状化指標	回帰式	はらみ出し量 Dx(cm)	沈下量 Sp(cm)	被災ランク	被災額 千円/延	全被災額 千円
1	370	矢板式	13.6	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0
2	185	拱	—	—	—	—	—	—	—	—	—	197	35,700
3	181	ケーソン	8.5	570	0.27	0.28	無	潜崩式	44.5	21.8	Ⅱ	251	215,500
4	240	〃	15.5	466	0.18	0.26	〃	〃	65.9	31.6	〃	0	0
5	440	〃	15.5	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0
6	370	拱	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
7	240	矢板式	7.5	463	0.19	0.26	18.027	潜崩式	57.9	43.5	Ⅲ	275	66,000
8	135	ケーソン	11.0	538	0.21	0.27	無	潜崩式	46.1	26.2	Ⅱ	184	2,500
9	480	〃	15.5	228	0.21	0.27	〃	〃	34.3	19.1	Ⅱ	152	84,500
10	240	〃	15.5	428	0.21	0.25	〃	〃	34.3	19.1	Ⅱ	152	36,500
11	240	〃	14.5	456	0.21	0.21	〃	〃	10.6	6.2	Ⅱ	48	11,500
12	570	〃	14.7	379	0.21	0.23	5.595	潜崩式	76.1	92.3	Ⅲ	364	189,500
13	335	〃	17.5	216	0.22	0.28	〃	〃	10.6	43.2	Ⅳ	48	15,800
14	192	〃	11.0	311	0.20	0.23	34.099	潜崩式	222.3	432.3	Ⅳ	1,198	197,700
15	440	〃	—	—	—	—	13.655	〃	108.3	166.9	Ⅳ	544	39,200
16	287	矢板式	9.2	708	0.20	0.30	59.051	潜崩式	297.1	550.7	Ⅳ	2,425	696,000
17	334	〃	9.2	708	0.20	0.30	59.051	〃	297.1	550.7	Ⅳ	2,425	810,000
18	320	ケーソン	9.5	708	0.20	0.28	22.863	〃	133.2	188.1	Ⅳ	2,395	947,500
19	97	〃	9.5	280	0.21	0.22	13.656	〃	89.9	141.5	Ⅳ	482	46,800
20	310	拱	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
21	373	ブロック	7.2	511	0.21	0.27	12.967	潜崩式	72.6	107.3	Ⅲ	400	129,200
22	639	拱	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
23	330	〃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
24	185	〃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25	173	〃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
26	158	〃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
27	188	〃	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
合計													2,807,100

注) 岸壁No.1, No.5は、耐震化されている場合の岸壁の被災変形量予測式を表わしており、
 ①潜崩式は、液状化しない場合の予測式である(表一1参照)、
 ②潜崩式は、液状化する場合の予測式である(表一1参照)。

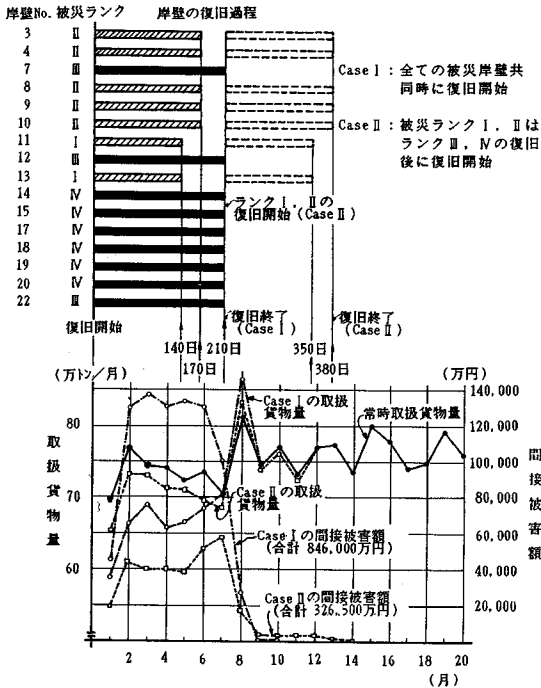


図-12 岸壁の復旧過程と取扱可能貨物量・間接被害額

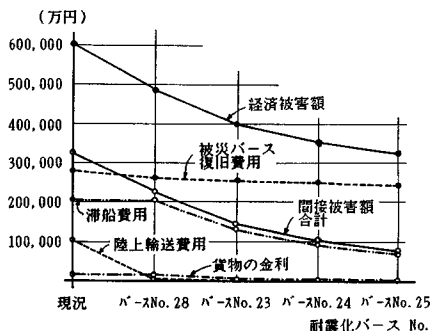


図-13 経済被害額と耐震化バースとの関係

みるとその大部分が滞船費用によるものであり、貨物の金利の影響はあまり大きくないことがわかる。同様に図-13より現状においては地震による経済被害額として、バースの復旧費用が約28億700万円、間接被害額として約32億6500万円、合計60億7200万円と予測される。これに対し、バースNo.28(岸壁No.14)を耐震化することにより、経済被害額の合計は約48億7100万円となり、その減少分は約12億100万円となる。同様にバースNo.23も併せて耐震化することにより、さらに8億8800万円の経済被害額の減少が見込まれる。

表-13は、以上の結果を整理したものであり、バースを耐震化した場合の便益額と耐震化費用を表わしている。それによるとバースNo.28, No.23の便益額がそ

表-12 バースの建設単価

水深(m)	重力式(千円/m)	矢形式(千円/m)
7.5	2,400	2,150
9.0	3,040	2,890
10.0	3,460	3,380

仙台湾、八戸港のバース建設費用より作成

表-13 耐震化による便益と費用

(金額:千円)

No.	バースNo.	復旧費用	間接被害の減少額	耐震化による総便益額	耐震化費用	耐震化の検討
1	28	197,670	1,003,240	1,200,910	752,400	○
2	23	47,320	840,540	887,860	468,000	○
3	24	47,320	419,010	466,340	468,000	×
4	25	47,320	229,400	276,720	468,000	×

の費用より上回っており、耐震化の可能性を示している。本研究で対象としたA港は、表-11にも示したようにすでに2つの岸壁(No.1, No.5)が耐震化構造となっているため、計算結果では2つのバースの耐震化までが経済的にみて有利という結果になった。

5. まとめ

本研究は、地震により生じる港湾施設の復旧費用と利用可能バースの減少による間接被害額の推定を行い、併せて耐震化バースの評価を行ったものである。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 地震による港湾施設の被害予測から、それにより生じる経済的影響までの全体のシステムを作成することができた。
- (2) 被災程度の軽い岸壁(ランクI, II)を暫定的に使用しながら使用不能な岸壁を復旧し、その後に被災程度の軽い岸壁を復旧することにより間接被害額を減少させることが可能となる。
- (3) 経済被害評価システムとして、待ち行列型のシミュレーションモデルを作成することにより、船型の変化、荷役時間の変化、代替バース、代替港湾等の評価が容易に行え、実際の港湾計画に十分適用可能であることを示した。
- (4) またシミュレーションモデル作成に必要なデータも若干の現地調査に加え、既存の港湾統計で十分である。
- (5) 利用可能バース減少による間接被害額のうち、その大部分は滞船費用と代替港からの陸上輸送費の増加分であり、貨物の滞留による金利は他の費用に比較して小さいものとなった。しかし、その内容は対象とする港湾により大きく異なる。たとえば現在の港湾施設の利用が限界に近いような港湾が被災を受けた場合は、代替港からの輸送費用の増加が大部分を占めることも予想される。

(6) あらかじめバースを耐震化構造にしておくことにより、全体の経済被害額を減少させることが可能である。その場合、どのバースを耐震化対象とするかの決定に対し、本システムが非常に有効であることが明らかとなった。

(7) 本論文では、地震により被害を受ける港湾を1港として取り扱ったが、同時に複数の港湾を対象にすることも可能である。

謝 辞：最後に本研究を実施するにあたり、資料の収集にご協力いただいた運輸省第五港湾建設局、同じく第一港湾建設局、秋田県土木部港湾課、(株)日建設計に対し深甚な謝意を表わす。

参 考 文 献

- 1) 秋田県土木部港湾課：1983年日本海中部地震・港湾施設の被害と復旧，1984.9.
 - 2) 第一港湾建設局秋田港工事々務所：秋田港災害復旧工事報告，1986.3.
 - 3) 米澤：日本海中部地震による秋田港の貨物流動の変化と経済被害(その2)，港湾技研資料，No.530，1985.9.
 - 4) 土田・稲富：港湾・海岸施設耐震性調査手法について，港湾技研資料，No.336，1980.6.
 - 5) 上部：地震被災事例に基づく重力式および矢板式係船岸の被災変形量と被災額の推定，港湾技研資料，No.473，1983.12.
 - 6) 運輸省港湾局：東海地域震災後対策計画調査報告書，1986.3.
 - 7) 運輸省港湾局：東海地域震災後対策計画調査報告書，1987.3.
 - 8) 運輸省港湾局：新潟地震港湾被害報告第2部，1965.3.
 - 9) 湯沢・徳永・稲村・須田：地震による港湾被災ふ頭の復旧順位の決定，土木計画学研究・講演集，No.10，1987.11.
 - 10) 吉川：地域計画の手順と手法，森北出版.
 - 11) 住田・米澤：陸上出入貨物調査に基づく港湾貨物の一次流動図集(第9報)，港湾技研資料，No.513，1985.3.
 - 12) 運輸省：造船機統計月報，1982.
 - 13) 日本関税協会：外国貿易概況，1985.12.
 - 14) 交通日本社：貨物運賃と各種料金表，1986.
(1988.4.21・受付)
-