

高潮防災へのリスクマネジメント手法の適用

松田 真盛*・河田 恵昭**・永田 茂***

本研究の目的は、高潮防災にリスクマネジメント手法を適用することである。まず地震ハザード解析の手法を用いて、高潮の発生確率を明らかにする。次に高潮から地域を守る護岸・防潮堤の破壊確率を信頼性解析の理論を用いて導き出す。最終的に高潮に伴う地域の経済的被害を定量的に明らかにし、その発生確率とを総合した高潮リスクカーブの構築を行う。本研究での高潮リスク評価を大阪を事例的に取りあげ行う。この高潮リスクカーブの形状を定量的に評価し、数ケースの高潮防災投資を想定し、その事業の年間投資便益を定量的に示した。

1. 緒 言

本研究の目的は、高潮防災にリスクマネジメントの考え方を適用することである。まず高潮の発生確率を明らかにし、それに伴う被害を定量的に明らかにする。それらを総合した高潮リスクを求め、リスク低減策に関していくつかの考察を行う。地震防災の分野では阪神・淡路大震災以降、全国で被害想定が進んでおり、その地域が潜在的に持っている地震による危険度が定量的に明らかになってきている。そのリスク情報をもとに個人および行政の防災対策の意思決定を、定量的な評価の上に進めることができる。

本研究の流れを図-1に示す。まず高潮の確率的特性の把握を行う。次に高潮による堤内地への氾濫水量を求

める。高潮時、堤内地への海水の流入を防いでいるのは護岸・防潮堤である。この護岸・防潮堤の破壊が堤内地への流入量に大きな影響を与えるため、護岸・防潮堤の破壊確率も加味し流入量の評価を行う。次にこの期待流入量をもとに、地盤情報、国勢調査・事業所統計を用いて地域の被害額を算出する。最終的なアウトプットは、被害額とその発生確率を図示した高潮リスクカーブである。このリスクカーブの防災対策による変化を定量的に評価する。

2. 高潮ハザードの評価

高潮の発生頻度がポアソン分布と考え、高潮ハザードカーブの構築を行った。ハザードカーブは地震の危険度評価でよく使用される外力とその発生頻度の関係を示したものである。既往の文献(土木学会編(1989), 星谷(2001))による地震ハザードカーブの算出法に従い今回の高潮ハザードカーブを導く。

ある潮位偏差 η 以上の高潮の年平均発生回数を $\nu(\eta)$ とすると、ある潮位偏差 η 以上の高潮年超過発生確率 $P(\eta)$ は次式のようになる。

$$P(\eta)=1-\exp[-\nu(\eta)] \cdots \cdots (1)$$

$$\nu(\eta)=\frac{n_{\eta}}{T} \cdots \cdots (2)$$

ここに、 n_{η} : T 年間における潮位偏差が η 以上の高潮の発生回数(回)、 T : 観測年数(年)である。

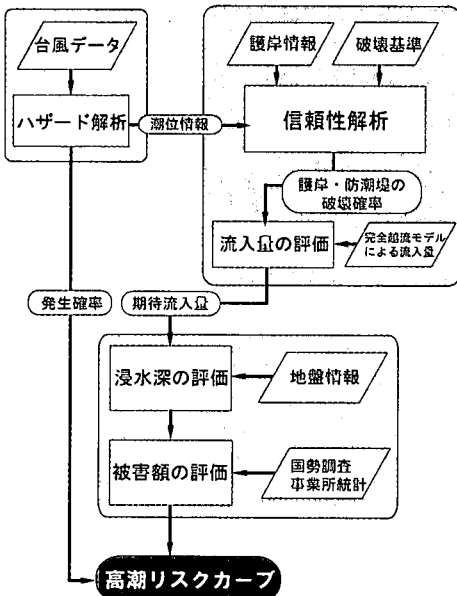


図-1 本研究の流れ

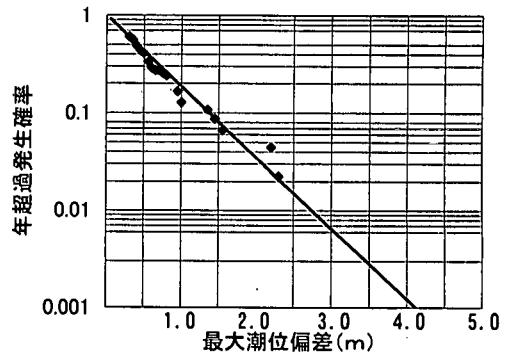


図-2 大阪の高潮ハザードカーブ

* 工修 (株)電通 (元京都大学大学院)
** フェロー 工博 京都大学防災研究所 教授 巨大災害研究センター長
*** 正会員 工博 (株)イー・アール・エス リスクマネジメント部部长

3. 護岸・防潮堤のフラジリティと越流量の評価

高潮時、堤内地への海水の流入を防いでいるのは護岸あるいは防潮堤である。しかし、潮位が大きくなれば、この護岸・防潮堤が被害を受けることも少なくない。護岸・防潮堤の破壊は後背地への流入量の増大を招き、結果的に高潮による被害増大へとつながる。本章では護岸・防潮堤の破壊の有無が後背地への被害に大きく影響するものと考え、護岸・防潮堤の破壊確率、それによる流入量の影響のモデル化を行う。まず護岸・防潮堤が被害を受ける確率（フラジリティカーブ）を導き出す。次に護岸・防潮堤に被害が無い場合の堤内地への流入量、被害が発生した時の流入量を各々モデル化し求める。最終的にイベント発生確率とその時の流入量を掛け合わせ、期待流入量を評価する。

(1) 信頼性解析による護岸・防潮堤のフラジリティの評価

a) 護岸・防潮堤の破壊基準

合田 (1975) によれば、護岸・堤防の破壊の可能性は護岸を超える越波流量と関係がある。表-1 は合田がまとめた限界流量の表である。この限界流量を超える流量が発生すると、護岸・堤防は破壊に至る可能性がある。

表-1 被災限界の越波量

種別	被覆工	限界流量 ($\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$)
堤防	天端・裏法面とも被覆なし	0.005 以下
	天端被覆工あり、裏法面被覆工なし	0.02
	三面巻き構造	0.05
護岸	天端被覆工なし	0.05
	天端被覆工あり	0.2

表-1 の破壊基準は越波流量により判定される基準である。本研究では越波流量での評価は行わず、次式で示される完全越流量の値 Q_0 をこの基準に用いることとする。この流入が完全越流であるとする、単位護岸・防潮堤長当たり・単位時間当たりの堤内地への流入量は以下の式で表すことができる。

$$Q_0 = Ch_1 \sqrt{2gh_1} \cdot B$$

$$C = 0.36 \quad (3)$$

ここに Q_0 : 本間の公式による横越流流量、 B : 越流水面幅、 h_1 : 越流水深である。

表-1 より、護岸・堤防とも天端の被覆工の有無によって限界流量に大きな差がでてくる。本研究での対象地域の大阪においては、護岸・防潮堤の天端はほとんどが被

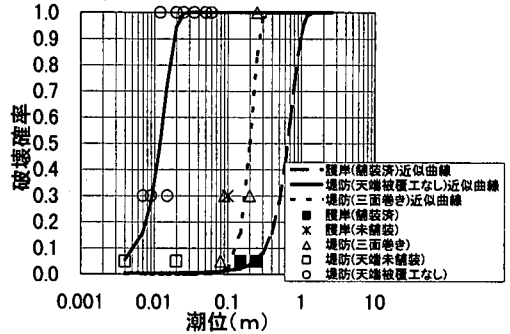


図-3 限界流量のばらつきの推定

覆されており、破壊基準としては $0.2 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$ を用いるのが妥当であると考えられる。

図-3 にこの限界流量のもととなった破壊した護岸サンプルを示す。観測された破壊の程度は分類は大破・中破・小破の3分類であり、それぞれの破壊確率を $0.80 \cdot 0.30 \cdot 0.05$ と仮定した。この $0.2 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$ の基準の元となった護岸の被害サンプルは2つしかなく、この両者とも護岸自体の被害は小破の分類であった。この護岸が破壊した時の推定越波流量は、 $0.166 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$ 、 $0.248 \text{ m}^3/\text{m}\cdot\text{s}$ である。破壊基準が正規分布のばらつきを持った基準であると仮定し、この2つのサンプルにフィッティングするように限界流量 $C(\mu, \sigma^2)$ を $C(0.65, 0.0625)$ とした。

台風9918号による護岸の被害をまとめた高橋ら (2000) によれば、護岸被害のほとんどはパラベットの倒壊である。ここでは高潮による護岸・防潮堤のパラベットのフラジリティを信頼性解析の理論を用いて算出する。

b) 信頼性解析によるフラジリティの評価

ここに、越流水深 h_1 は、高潮による潮位を T とすると、

$$h_1 = T - H \quad (4)$$

となる。

ここで、護岸・防潮堤のパラベットの破壊条件は、完全越流による越流量が破壊基準を超える時であるから、

$$C(\mu_c, \sigma_c^2) - Q_0 \leq 0 \quad (5)$$

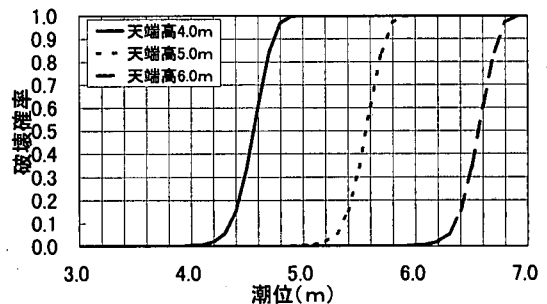


図-4 護岸のフラジリティカーブ

と表すことができる。

結局、護岸・防潮堤のパラペットの破壊確率 P_f は

$$P_f = P[\alpha(\mu_a, \sigma) - Q_k \leq 0] \dots\dots\dots (6)$$

となる。

この P_f を天端高ごとにモンテカルロシミュレーションにより求めたのが図-4である。

c) 流入量のモデル化

高潮による潮位が護岸・防潮堤の天端高を越えると、堤内地へと海水の流入が始まる。

式(3)に図-6のような潮位の時系列を与え、堤内地への流入量の算定を行う。この潮位の時系列は1999年に不知火において発生した高潮災害時の推定潮位の時系列(図-5)を参考にしモデル化したものである。ここに $\eta_{\max}$ は高潮による最大潮位偏差である。また評価対象地域の大阪湾の平均朔望満潮位 H.W.L. を T.P.=1.0m とする。

図-6(左)は護岸・防潮堤の破壊を考慮しない場合のケースであり、また図-6(右)は護岸・防潮堤の破壊を考慮するケースである。この時、護岸・防潮堤のパラペ

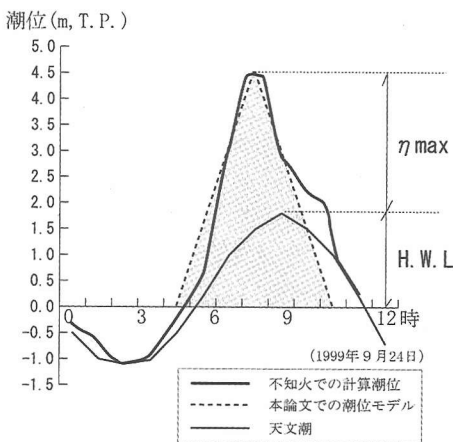


図-5 不知火での高潮潮位の時系列

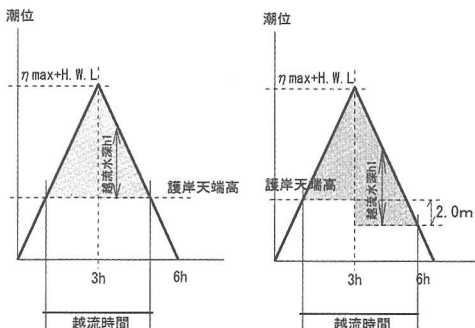


図-6 潮位の時間モデルと越流時間(左:護岸・防潮堤が破壊しないとき、右:破壊するとき)

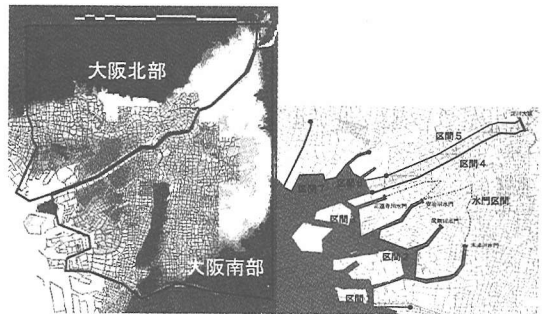


図-7 高潮リスク評価対象地域(左)と護岸の区分(右)

ト倒壊は最大潮位が出現した時点で発生するものと仮定し、護岸・防潮堤の破壊後は天端高がパラペットの高さ分減少するものとしてモデル化している。大阪市港湾局(平2年)の資料を参考に、本研究では倒壊するパラペットの高さを一律2.0mとして計算する。

(2) 大阪の護岸・防潮堤の脆弱性

本研究の高潮リスク評価対象地域である大阪を対象に脆弱性の算出を試みる。対象地域は図-7(左)に示すように淀川と武庫川で区切られる大阪北部と、淀川と大和川で区切られる大阪南部に分けて評価する。また対象護岸・防潮堤は、背後地の地盤高と防潮水門の位置を考慮し、図-7(右)の様なエリア分けを行い、そのエリアごとに脆弱性の評価を行う。

この各区間の護岸・防潮堤の天端高の計測データをまとめると、各区間の天端高は一律ではなく、高さのばらつきが認められた。以下の表-2に各区間の天端高の平均値および、ばらつきの尺度である標準偏差を示す。

表-2 対象護岸・防潮堤の諸元 (T.P.)

	区間1	区間2	区間3	区間4	区間5	区間6	区間7	水門区間
平均(m)	4.80	5.40	5.50	7.48	7.47	6.49	5.88	3.74
標準偏差(m)	0.69	0.33	0.24	1.16	1.15	0.89	0.81	0.10
最小(m)	2.60	4.59	3.90	6.39	6.38	2.56	2.70	3.20
最大(m)	6.54	6.45	6.13	10.84	10.05	6.82	7.20	4.60
延長(m)	9500	13000	11000	9300	8200	6500	9500	12000
背後地盤高(m)	3.00	1.00	2.00	0.00	0.00	2.00	3.00	1.00

大阪湾を取り囲む護岸・防潮堤は区間によって平均値が違っており、また同一区間内でもばらつきがある。表-2より、淀川の河川堤防である区間4・区間5は天端高が他の区間よりかなり高くばらつきも大きい。護岸・防潮堤のエリア分けを行うと、各区間の天端高は区間ごとに一律ではなく、ばらつきを持つことになる。信頼性解析の手法を護岸・防潮堤の破壊確率算出に用いるにあたり、この護岸・防潮堤天端高のばらつきを考慮するため、ここでは護岸・防潮堤の天端高を不確定要素として

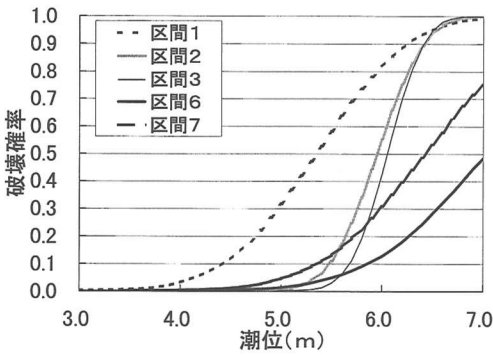


図-8 大阪護岸・防潮堤防の脆弱性

扱うこととする。今回は護岸・防潮堤天端高と延長のばらつきが正規分布であると仮定して、護岸・防潮堤の破壊確率の算出を行う。大阪の護岸に対して算出した結果が図-8である。

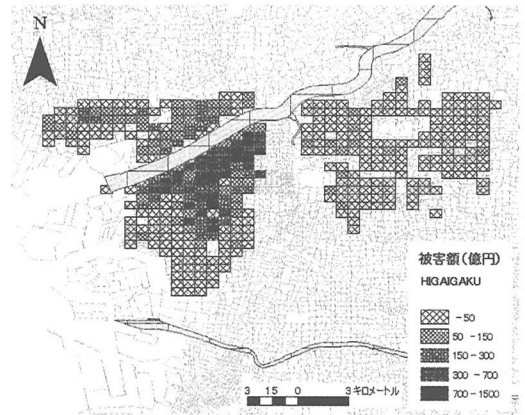


図-11 1000年確率高潮時の被害額

4. 被害額の評価

(1) 浸水深の推定

水害による被害は浸水深と大きな関係がある。評価対象地域である大阪において、ある大きさの高潮が発生したときの各地点の浸水深の推定手法には、外力規模ごとの堤内地への期待流入量を対象地域の低地より溜めていき、その時の各地点の浸水深を被害額算出のための浸水深とするレベル湛水法を用いる。

(2) 被害額の評価

水害による被害額は直接被害額と間接被害額に大別される。治水経済調査マニュアル(案)を参考に、本研究では以下に示す直接被害と間接被害を対象に被害額の算出を行う。直接被害の対象は家屋、家庭用品、事業所償却・在庫資産、農漁家償却・在庫資産、農作物、公共土木施設等の被害であり、間接被害の対象は営業停止損失、家庭における応急対策費用、事業所における応急対策費用である。今回被害額算出に使用したデータは、国勢調査(H8)、事業所メッシュ統計(H7)、であり、地盤の標高には国土空間基盤情報の50mメッシュ標高データを用いた。図-9, 10, 11には、それぞれ100年, 500年, 1000年確率の高潮に対する被害額の分布図を示した。

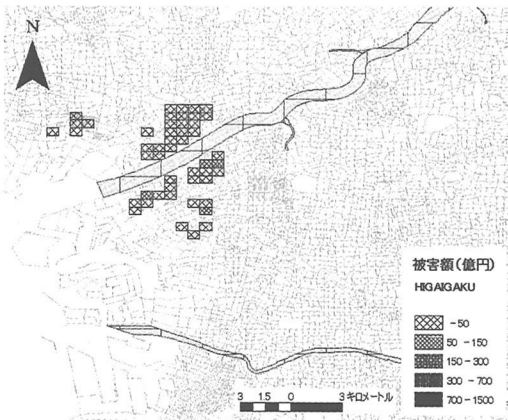


図-9 100年確率高潮時の被害額

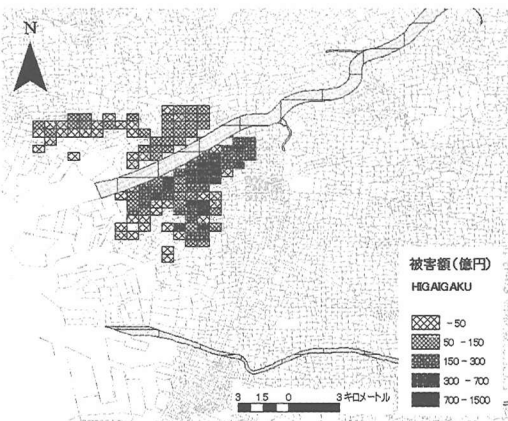


図-10 500年確率高潮時の被害額

5. 高潮リスクカーブと防災投資効果の考察

(1) 大阪の高潮リスク評価

図-12に大阪南部と大阪北部の高潮リスクカーブを示す。大阪南部のリスクカーブが大阪北部より右上に位置している。大阪南部が大阪北部に比べて高潮リスクが高いことが明らかになった。

(2) 大阪南部における防災投資効果に関する考察

今回想定した大阪南部の防災対策を以下の表-3に示し、各対策のリスクカーブを図-13に示した。なお対策

表-3 想定した防災対策

防災対策	天端高	強度	水門
対策①	現況	補強	有(現状)
対策②	1.0 m 嵩上げ	現況	有(現状)
対策③	1.0 m 嵩上げ	補強	有(現状)
対策④	現況	現況	無(仮定)

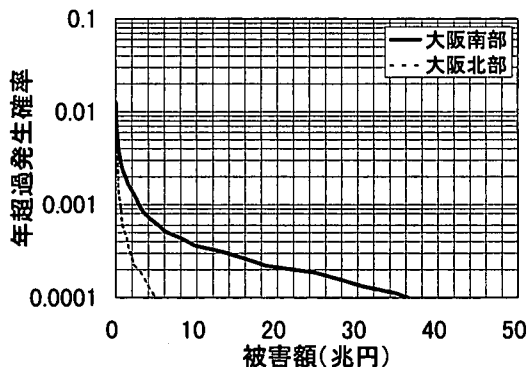


図-12 大阪北部と大阪南部の高潮リスクカーブ

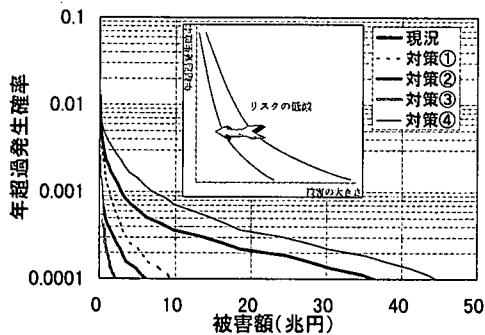


図-13 防災対策による大阪南部のリスクカーブの変化

の補強とは護岸の破壊確率を0にすることとした。

この各々のリスクカーブの積分値の差が各対策の年間便益となる。この対策ごとの年間便益を図-14に示した。この年間便益は何年確率の外力を対象とするかにより大きく値が左右する。

6. 結 語

本研究で得られた成果は以下の通りである。

- (1) 大阪を事例的に取り上げ、リスクマネジメント手法の高潮防災への適用手順を示した。
- (2) 高潮の規模ごとに大阪地域の被害を求め、その被害

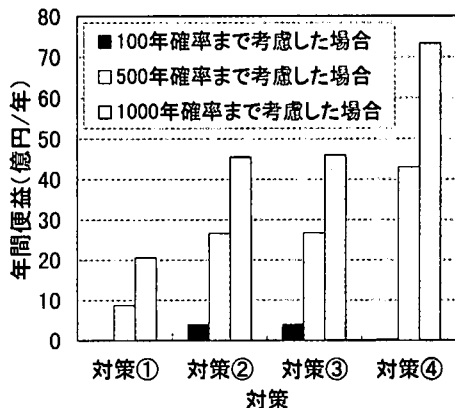


図-14 各対策の年間便益

の発生確率を高潮リスクカーブの形で明らかにした。大阪南部は大阪北部に比べて高潮のリスクがかなり高いことが分かった。

- (3) 高潮リスクカーブの形状を定量的に評価し、数ケースの高潮防災投資の年間投資便益を定量的に示した。
- (4) 年間投資便益は、評価する再現期間の長さにより大きく左右されることが分かった。

参 考 文 献

- 合田良実, 岸良安治, 神山 豊 (1975): 不規則波による防波堤岸の越波流量に関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号。
- 大阪市港湾局 (1990): 大阪港構造物図集。
- 国土交通省河川局 (2000): 治水経済調査マニュアル(案), 平成12年。
- 高橋重雄・大木泰憲・下迫健一郎・諫山貞雄・石貫国朗 (2000): 台風9918号による護岸の被災とその対策に関する水理模型実験, 港湾技術資料, No. 973。
- 土木学会 (1985): 水理公式集, p. 287。
- 土木学会編 (1989): 動的解析と耐震設計 地震動・動的特性, 第1巻, 技報堂出版, p. 42。
- 土木学会海岸工学委員会 (2000): 海岸施設設計便覧, p. 71。
- 鳥居謙一, 加藤史朗: 高潮災害に関する研究, 土木研究所資料, 3803号, p. 21。
- 星谷勝 (2001): 構造物の地震リスクマネジメント, 土木施工, 42巻, 7号, pp. 97-101。
- 光田 寧・藤井 健 (1997): 台風による風災害の予測, 日本風工学会誌, Vol. 72, pp. 73-83。
- 光田寧・藤井健 (1999): 日本本土に上陸した顕著台風の気圧場客観解析の結果について, 実時間的な台風風災害予測法の研究, pp. 64-65。
- Schloemer, R. W. (1954): Analysis and synthesis of hurricane wind patterns over Lake Okeechobee, Florida. Hydrometeorological Report, USWB, No. 31, p. 49。