

防災対策の不確定性を考慮した津波減災効果の評価手法

河田 恵昭*・鈴木 進吾**・越村 俊一***

近年南海トラフの巨大地震津波の発生が懸念されており、津波防災対策の強化が始められている。しかしながら、地震・津波被害の複合性や個々の対策効果の因果関係が複雑であるため、対策を講じることによる地域全体の減災効果を総合的かつ定量的に評価できる手法がない。本研究では、確率論を応用してこれらの不確定要因を評価し、地域の津波に対する脆弱性を評価する方法を提案した。またこの確率を政策変数として取り扱い、防災対策を行った場合の減災効果を評価する手法を検討した。この手法を大阪市の水門・陸間の閉鎖に関する問題に適用した結果、手法の有効性を確認することができた。

1. 序 論

2004 年 3 月、中央防災会議 (2004) は東南海・南海地震防災対策推進基本計画を策定し、防災対策の基本的方針、地方公共団体や事業者が防災対策を講ずべき区域、その防災対策の基本となる事項について定めた。これにより、今後、東南海・南海地震防災対策計画を作成して津波に関する防災対策を講ずべき区域においては、ソフト対策とハード対策を組み合わせ、地域に応じた津波防災対策が強化される。1997 年に関係 7 省庁 (1997) により提案された津波防災対策指針によると、津波対策計画の策定過程においては、(1) 計画津波高の評価、(2) 防災施設整備やまちづくりによる被害抑止効果、(3) 防災体制の強化による被害軽減効果、を総合的に考慮して地域に応じた対策を講じる必要がある。現在、(1) についてはこれまでの研究成果に基づき行われているが、(2) および (3) に関しては、地震・津波災害の複合性や、各対策の複雑な因果関係などにより、被害推定結果の不確定性が大きく、対策の効果を総合的に評価できる手法がない。このため、地域の社会的・経済的条件を考慮した総合的かつ定量的な意思決定がなされていない。

本研究では、被害想定時に設定する条件に存在する不確定性を確率事象としてとらえ、それを被害発生過程のシミュレーションあるいは被害発生率関数に取り入れることで、地域の津波災害に対する脆弱性を確率分布で評価する手法を提案する。また、その確率の一部を政策変数として扱い、防災対策によって変化させることによって、津波対策強化による減災効果を評価するモデルを開発する。具体的には、ハード対策である防災施設とソフト対策である防災体制の不確定性を確率事象としてとらえ、水門・陸間の閉鎖シミュレーションによって対象地域の津波災害に対する脆弱性と減災効果の評価を行う。

2. 防災対策の不確定性

津波災害は、先行して発生した被害が引き金となって他の被害が拡大することが考えられる。例を挙げると、地震被害により防潮施設に被害が発生しバリアとしての機能が損失する、あるいは、津波により漁船や船舶等に被害が発生しコントロールを失った船が防潮施設に衝突し破壊する等である。このような被害同士の複雑な関係は、対策の対象とする被害の大きさに影響するため、各種被害を独立に評価しては、総合的な被害想定およびそれに基づく防災対策の決定ができない。

また、ある単一の被害項目に関しても不確定性が存在する。被害予測が過去のデータに基づく経験的被害率関数を用いて行われる場合、条件細分化の度合いによる精度とデータの充実度合いによる精度の両立は難しく、それぞれの精度に起因する不確定性を有する。さらに、被害が発生する社会の変化、被災過程における事象に含まれる本質的なランダム性、素因となる要素に存在する多様性等のため、推定値には幅が生じる。

特に臨海都市部における地震・津波災害は、複雑化した社会構造により被害と外力の間の因果関係がますます不明確になり、また発生頻度が少ない巨大災害では、同一条件で多数のデータを得ることによる不確定性の排除は期待できない。このような場合、ゆらぎがある部分に確率論を応用することで不確定性を考慮することが有効であり、ライフラインの信頼性解析やリアルタイム地震防災等の分野で利用されている (例えば能島, 1997)。

本研究でも、確率論を用いてこのような不確定性を表現し、津波に対する地域の脆弱性を確率分布の形で得る方法を構築し、不確定性の影響、防災対策の意思決定支援に利用する方法を考察する。

3. 水門・陸間の閉鎖シミュレーション

津波の陸上浸水による人的被害、家屋被害を始めとした人々の生活圏内に発生する被害を抑止・軽減する対策として、護岸・胸壁および水門・陸間などの付帯施設からなる防災施設が整備される。1960 年チリ津波以降の我

* フェロー 工 博 京都大学教授 防災研究所
** 学生会員 修(工) 京都大学大学院情報学研究所社会情報学専攻
*** 正 会 員 博(工) 人と防災未来センター 専任研究員

が国の津波防災対策は、防災施設の整備により進捗してきた(首藤, 1999)。これらの防災施設による抑止限界をひとたび越えると被害は急激に増大する。従って、まずこれらの津波防災施設による被害抑止が実効的に機能するかを検証することが重要である。

我が国の津波防災施設のうち、護岸や胸壁は耐震設計されており、超過外力や船舶等の衝突が発生しない限り機能すると考えられる。一方、水門や陸閘等の門扉は施設の開口部にあたるので、緊急時に津波の侵入を防止するためには、来襲までの時間内に閉鎖しなければならない。そのためには、門扉も耐震性を有し、地震後であっても、操作の自動化・遠隔化や人手による閉鎖作業により、確実に閉鎖される必要がある。この閉鎖活動の実行可能性が生活圏における被害を左右する大きな不確定性を持つ。門扉による津波防御系の概念図を図-1に示す。図のように津波侵入経路は、水門による経路の分岐、陸閘からの堤内地への浸水からなり、多数のパターンが考えられる。門扉による津波防御はこれらの水門、門扉を利用して津波侵入経路を遮断することになる。

(1) 門扉の閉鎖に関わる要素

地域に存在する全ての門扉の中から、常時閉鎖されている門扉、利用時以外は閉鎖されている門扉、常時開放されているが大河川の水門等安全上津波来襲時も開放しておくものといった不確定性が小さい門扉を除去し、初動対応において閉鎖が計画される門扉を対象門扉とする。

門扉の閉鎖に関わる要素を表-1に示す。門扉の閉鎖失敗に関わる要素は大別して、次の2種類に分けられる。(1) 地震による揺れや液状化に伴う地盤変動など、門扉に構造的な障害を発生させる要素、(2) 地震による門扉の閉鎖に必要な要員確保の失敗や水防活動の実行性の不足など、閉鎖が不可能となる事態を発生させる要素である。(1) はハード対策によって変化する要素、(2) はソフト対策によって変化する要素である。

各門扉が閉まらないという機能損失事象 E が発生するのは、この分類におけるハード面での閉鎖不可能またはソフト面での閉鎖不可能が発生する場合である。従って、両者が独立であるように設定すると、対象門扉 $a_i(i=1, 2, \dots)$ に対し、事象 E の生起する確率 $Pa_i(E)$ は次式で表される。

$$\begin{aligned} Pa_i(E) &= Pa_i(Eh \cup Es) \\ &= Pa_i(Eh)Pa_i(Es) + Pa_i(\overline{Eh})Pa_i(Es) \\ &\quad + Pa_i(Eh)Pa_i(\overline{Es}) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに、 Eh : 地震動や地盤液状化により門扉のハードに生じる障害により閉鎖不可能となる事象、 Es : 地震による参集不可能などソフトに生じる障害により閉鎖不可能となる事象である。オーバーバーはそれぞれの排反事象

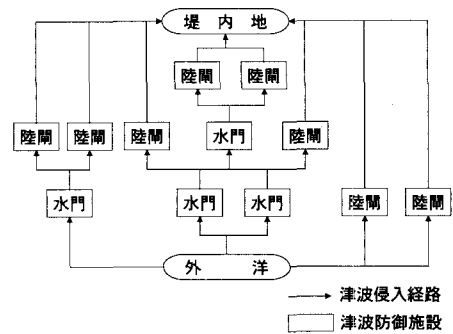


図-1 門扉による津波防御系の概念図

表-1 門扉の閉鎖失敗に係る要素

	項目	要素
ハード面	液状化による 不同沈下	液状化対策
		門扉幅
		地盤条件
		地振動強度
ソフト面	地振動による 構造物の損傷	設計荷重
		建設年代
	閉鎖体制	人員数
		閉鎖時間
	参集・避難経路の地震被害	
	フェイルセーフとなる代替対策	
	監視体制	

を表す。式(1)を用いることによりハードとソフトを連携させた評価が可能となる。

(2) ハード対策の不確定性評価

$Pa_i(Eh)$ は地震動が作用することによる門扉のレール部や扉体などの構造に発生する閉鎖障害、または液状化が発生し不同沈下が生じることによる閉鎖障害等、施設の津波防御機能が損失する確率で、施設の耐震化や液状化対策などのハード対策に関連づけて評価できる。原則として、施設は地震力を考慮して設計されるが、阪神・淡路大震災では液状化による被害が報告されており、液状化による機能損失が対策の主な不確定性と考えられる。

地震による地盤液状化に関する研究は多数行われているが、市町村レベルでの液状化確率に関する研究は見当たらない。液状化判定は地震力(地表最大加速度、地表最大速度)、地下構造、液状化履歴、シミュレーションなどにより行われ、これらをもとにした確率評価が望ましいが、本研究では、簡易的に評価できるようにするため、翠川・松岡(1995)が提案した国土数値情報による微地形分類と地表最大速度振幅を用いた液状化危険度評価を

用いた。翠川らは、微地形分類と液状化が発生した最大速度振幅の関係をみだし、過去の液状化記録から、微地形分類ごとに液状化を発生せしめる最大速度振幅を求めた。これによると最大速度振幅は、埋立地などで15 cm/s、三角州、後背湿地などで25 cm/sといった値となり、想定地震による最大速度振幅がこの値の1.25倍以上となる地域を液状化危険度大、1倍以上1.25倍未満で危険度中、0.75倍以上1倍未満で危険度小としている。本研究では、 $Pa_i(Eh)$ を危険度大の地域で0.75、中の地域で0.5、小の地域で0.25、これ以外で0とした。

(3) ソフト対策の不確定性評価

$Pa_i(Es)$ は門扉の閉鎖体制の実行性不足による閉鎖不可能確率で、現況の門扉閉鎖体制や水防訓練等の分析を通じて計算することでソフト対策と関連づけて評価できる。また、政策決定時には政策目標として設定する。

門扉閉鎖のための水防要員の参集は、構造的な機能損失の有無にかかわらず行われると仮定すると、前節で述べた事象とは独立となる。

(4) 津波伝播シミュレーション

津波伝播シミュレーションにおいては、門扉閉鎖シミュレーションに用いるため、各門扉位置のグリッドにおける水位変動を、その地域における津波の到達時刻付近から一定の時間間隔ごとに記録しておく。また、水門の開閉によって水門の外側の水位が大幅に変化する場合は、水門の開閉ごとに津波伝播シミュレーションを繰り返す必要があるが、小河川の水門等あまり開閉が他の門扉での水位変動に影響を及ぼさない場合は解放状態で計算し、小河川にある陸側位置での水位変動を記録しておく。

記録された水位変動情報と、陸側の数居高、開口幅を用いて、陸側ごとに解放時の津波流入量を計算する。本研究では津波流入が完全越流であるとして、単位門扉・単位時間あたりの地域への流入量を以下の式で計算し、津波伝播シミュレーションの再現終了時刻まで積算する。

$$\left. \begin{aligned} Q &= Ch\sqrt{2gh} \cdot B \\ C &= 0.36 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここに Q : 本間の公式による横越流流量, B : 開口幅, h : 越流水深である。

(5) 対象門扉の絞り込み

初動時に閉鎖が計画されている門扉から、開閉シミュレーションに用いる門扉を絞り込む。これまで対象としてきた初動時に閉鎖が計画されている門扉の中から、前節で計算された流入量が0である門扉を除去する。すなわち、津波伝播シミュレーションの条件下においては、開放されていても数居高が高く津波の流入がおこらない門扉、最小格子で表現できない内陸側の水路・河川など

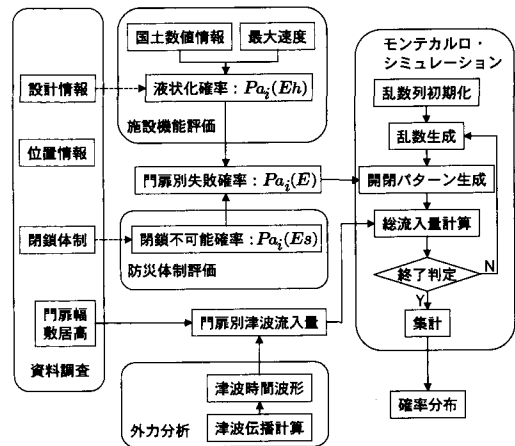


図-2 本手法の流れ

に面する門扉は除去される。これにより、考慮しなければならない門扉の数を減らすことができる。

(6) 門扉の開閉シミュレーション

我が国の津波防災対策の骨子の一つは防災施設による被害抑止である。すなわち、門扉の閉鎖により堤内地への津波流入をどの程度阻止できるかが地域の津波防災力を計るための一つの指標となる。本研究ではその指標として地域への津波流入量の総計を用いる。津波総流入量がある一定範囲に入る確率は、そのような総計となる開閉パターンを全て列挙し、各開閉パターンが生じる確率の和をとることで得られる。門扉数を n とすると、門扉の全開閉パターンは 2^n 通りとなり、対象門扉数が少ない場合は、列挙法により計算可能であるが、門扉数が多い場合には、列挙法による計算は現実的ではなく、コンピュータによるシミュレーションを用いることになる。

本研究では門扉数が多い場合を念頭にシミュレーションによる計算を行った。本手法のフローチャートを図-2に示す。(2)節および(3)節で評価された確率 $Pa_i(Eh)$ および $Pa_i(Es)$ を式(1)に代入して門扉ごとの閉鎖失敗確率 $Pa_i(E)$ を算出する。また、(4)節の方法で門扉ごとの解放時の流入量を算出しておく。

次にモンテカルロシミュレーションを行う。全門扉を開放した状態から、コンピュータにより発生させた一様乱数を用いて、各門扉を確率 $1 - Pa_i(E)$ で閉鎖することにより1開閉パターンを疑似的に生成させる。生成された門扉の開閉パターンに従って地域への総流入量を求める。この実験を多数回繰り返すことによって、総流入量は各門扉の閉鎖失敗確率を反映したばらつきを持った値となる。多数回の実験によって得られた総流入量から、適当な流入量幅を定義して頻度分布をとり、それを実験回数で除することにより確率分布を求める。また、この確率分布は流入量幅毎の発生確率であり、それをさらに

流入量幅で除することにより確率密度分布が得られる。

4. 本評価手法の適用例

前章で提案した評価手法を大阪市に適用し、本手法の有効性を検証する。大阪市を選んだ理由は次の通りである。(1) 多数の門扉が存在する。(2) 既往の高潮対策により沿岸全域にわたって防潮施設が整備されている。(3) 現状の想定では、門扉を完全に閉鎖すれば堤内地への津波氾濫を完全に阻止できることが分かっており、目標設定が明確である。(4) 津波被害想定において、全ての門扉が閉鎖できない状態を仮定するのは現実的でない。(5) 南海地震により発生した津波が到達するまでには約2時間の時間的余裕があり、門扉の閉鎖による被害抑止効果が期待できる。(6) 背後に大都市が控えており、ひとたび堤内地に浸水すると甚大な被害が発生する。

大阪市において、門扉の閉鎖操作による浸水被害の不確定性を考慮した被害評価を行った。

(1) 門扉に関する調査

解析を実施するに当たり以下の資料を収集した。

- ・大阪市地域防災計画(2002)、大阪市内の門扉の位置情報、敷居高、幅

(2) シミュレーションの諸条件

地震による施設構造物に閉鎖障害が発生する確率は以下のように設定した。まず、南海地震の震源域内に地震マグニチュード8.4の震源を設定し、司・翠川(1999)の最短距離式による基準地盤最大速度に表層地盤による速度の増幅率を乗じて地表最大速度を求め、大阪市域の震度分布を求める。この過程は地震被害想定支援ツール(国土庁, 1999)で実行可能である。中央防災会議(2003)によると、大阪市域の震度は震度5強ないし6弱である。そこで、震源の位置を調整し、大阪市域が震度6弱になるケース、震度5強になるケースを設定した。

防災体制などソフト面での閉鎖障害が発生する確率は、本研究ではこの値の変化による結果の変化を考察するため、0.1と0.5の2ケース設定する。

津波伝播計算は大領域に中央防災会議の地形データおよび最小領域に大都市大震災軽減化特別プロジェクトにより作成された地形データを用い、表-2に示す条件で行った。初期条件となる地盤変動量は表-3に示す2モデルを設定した。大阪市に襲来する津波の高さはModel-1の方が大きくなる。大阪への南海地震による津波の到達は地震発生から約2時間程度であるので、津波伝播計算の実行中に1時間後から6時間後までの10秒毎の海面上昇量を出し、内挿によって各門扉の位置において解像度5秒の時間波形を作成した。また、地震による大阪市港湾域の地盤変動量はModel-1で20~30 cm、Model-2で10~20 cmであるので、各門扉の敷居高はこ

表-2 津波シミュレーションの諸条件

支配方程式	非線形長波理論式			
差分スキーム	スタaggerド・リーブフロッグ法			
範囲	外洋	紀伊水道	大阪湾	
空間格子間隔	1350 m	450 m	150 m	50 m
時間間隔	0.5 秒			
再現時間	6 時間			
沖側境界条件	透過	水位・流量接続		
汀線境界条件	完全反射			
潮位条件	朔望平均満潮位			

表-3 津波シミュレーションの地盤変動モデル

	地盤変動モデル
Model-1	想定南海地震(大阪市防災会議, 2002)
Model-2	東海・東南海・南海地震(中央防災会議)

表-4 モンテカルロシミュレーションの計算ケース

	津波	大阪市における地盤動強度	門扉の閉鎖体制による閉鎖不可能確率
Case A	Model-1	震度6弱	0.1
Case B			0.5
Case C		震度5強	0.1
Case D			0.5
Case E	Model-2	震度6弱	0.1
Case F			0.5
Case G		震度5強	0.1
Case H			0.5

の値を考慮して一律20 cm沈下させたものを用いた。前章(5)節により門扉の絞り込みを行った結果、閉めなければならない水門は無く、従って陸開数は一定となった。

これらを組み合わせたモンテカルロシミュレーションの実行条件を表-4に示す。門扉の開閉パターンに基づいて計算された流入量は、区間幅100 m³の頻度分布に集計した。シミュレーションの結果は、疑似乱数の周期内において、実験回数が増えるに従って、滑らかな分布に収束していくことを確認した。

(3) シミュレーションの実行結果

シミュレーションにより、地域に流入する津波の総流入量に関する確率密度分布が得られた。代表的な計算ケースでの津波総流入量の確率密度分布を図-3に示す。津波総流入量の増減により、堤内地への浸水量が決まるので、防潮施設を乗り越えてくる津波に対する地域の脆弱性として理解できる。図は左端が全ての門扉が閉じられた時、右端が全ての門扉が閉鎖できなかったときの津波総流入量になるように表示した。この図から、門

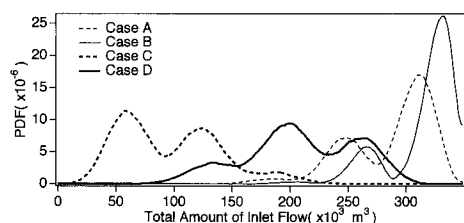


図-3 地域への津波総流入量に関する確率密度分布

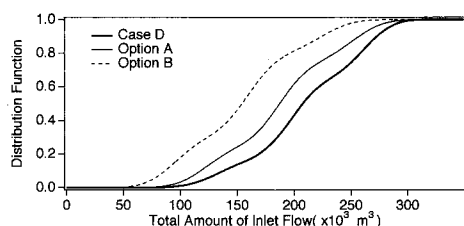


図-4 防災対策の実施による減災効果の評価結果

扉の開閉確率、すなわち、防災対策の不確定性を考慮すると、想定結果は幅を持ったものとなる。全開または全閉を想定した場合の防災計画は、場合によっては、現実的でないものとなることがわかる。この図から超過確率を計算すると、門扉の閉鎖体制の強化により、震度5強の場合に $150 \times 10^9 \text{ m}^3$ 以上の津波の流入が発生する確率を86%、震度6弱の場合に $250 \times 10^9 \text{ m}^3$ 以上の津波の流入が発生する確率を18%軽減できることが分かった。

この確率密度分布から非超過確率を表す分布関数が求まる。津波流入量に応じて被害額が単調増加となるように地域をゾーニングすれば、ゾーン内の許容被害額を設定することで、許容流入量を設定することができる。ゾーン内で本研究の手法を用いて分布関数を求めておけば、許容流入量の非超過確率を求めることができる。従って、いくつかの政策が考えられる場合、それぞれの政策に応じて門扉の閉鎖確率を決定し、本シミュレーションの実施により分布関数を取得し、許容流入量における非超過確率を比較することによって減災効果の評価できる。図-4には例として、大阪市の現状の門扉閉鎖体制による閉鎖不可能確率 $Pa_i(Es)$ を0.5と仮定して試算した場合の分布関数 (Case D) を、市内の流入量が多い10基の門扉に耐震補強を施した場合 (門扉の $Pa_i(Eh)$ を0に設定) の分布関数 (Option A)、閉鎖体制を改善することにより $Pa_i(Es)$ を0.3にできたと仮定して試算した場合の分布関数 (Option B) と比較したものを示した。

5. 結 論

本研究により得られた結論は以下の通りである。

(1) 地震時の防潮施設の機能維持と水防体制の不確定

性を考慮して、地域の津波災害への脆弱性と減災効果の評価を行う手法を開発した。

(2) 現況施設と、門扉の閉鎖体制に基づく脆弱性と減災効果の評価を行った。震度特性に基づく施設機能損失確率と門扉の閉鎖不可能確率を変化させた場合の背後地への津波流入量の確率密度分布を求めることができた。

(3) 本手法により、地域に許容できる津波の総流入量に対して、防潮施設整備と門扉の閉鎖体制強化双方の対策の効果を評価できる。

ただし、ここで考慮した閉鎖不可能確率等の政策変数は、かならずしも現状を正確に反映しているわけではない。本研究で提案した手法を防災実務に展開するためには、防潮施設の管理主体、地震動、地盤、構造物等の対策に携わる専門家が協議しながら政策変数を決定しなければならない。本手法は津波総流入量のみではなく、浸水深や被害の予測にも応用可能であると考えられ、地域の特性にあった情報を使用することによる政策目標の設定、およびそれを反映した政策変数の設定が今後の課題である。

謝辞：本研究で使用した水門・陸閘に関する資料は大阪市港湾局より提供を受けた。ここに記して謝意を表す。なお、本研究は文部科学省の大都市大震災軽減化特別プロジェクト (代表：河田恵昭) の一環として行われたものである。

参 考 文 献

- 大阪市防災会議 (2002): 大阪市地域防災計画 (資料編), 461 p.
- 国土庁 (1999): 地震被害想定支援ツール.
- 国土庁・農水省構造改善局・農林省水産庁・運輸省・気象庁・建設省・消防庁 (1997): 地域防災計画における津波対策強化の手引き, 99 p.
- 司 宏俊・翠川三郎 (1999): 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文報告集, 第523号, pp. 63-70.
- 首藤伸夫 (1999): 津波による海岸堤防・護岸の防災-昭和8年三陸大津波から昭和35年チリ津波まで, 津波工学研究報告第16号, pp. 1-37.
- 中央防災会議 (2003): 「東南海、南海地震等に関する専門調査会」東南海、南海地震の被害想定について, 第14回, 資料2, 45 p.
- 中央防災会議 (2004): 東南海・南海地震防災対策推進基本計画, 87 p.
- 土木学会 (1995): 水理公式集, p. 287.
- 土木学会海岸工学委員会 (2000): 海岸施設設計便覧, 582 p.
- 能島暢呂 (1997): ネットワーク信頼性解析に基づく道路網の地震防災戦略について, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 1293-1296.
- 翠川三郎・松岡昌志 (1995): 国土数値情報を利用した地震ハザードの総合的評価, 物理探査, 第48巻, 第6号, pp. 519-529.