

津波・浸水予測に係わる不確実性要素についての考察

諸星一信* ・難波喬司** ・磯部雅彦***
大下英治****・杉浦幸彦*****・木俣順*****

津波浸水ハザードマップの作成に際して設定される諸条件には不確実なものも多く、これらの考慮なしには有効性の高いハザードマップとはなり得ない。本研究では、津波浸水区域を予測する際の不確実性要素が津波浸水区域の予測に及ぼす影響度について検討した。その結果、モデル地区では、地震断層モデル、地盤変位、計算格子間隔、地盤高および潮位の条件設定が浸水予測結果に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。また、人命被害の最小化に資する津波ハザードマップ作成を念頭に置き、不確実性要素の合理的な取扱い方法についても考察した。

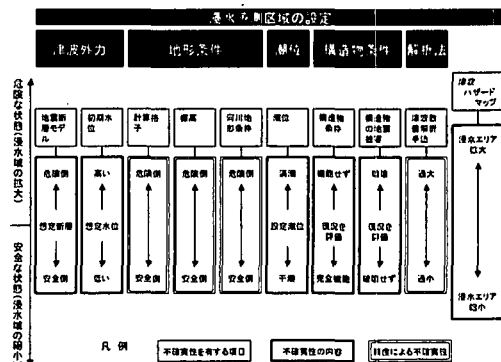
1. はじめに

切迫する海洋型地震に対して、近年、津波に起因する浸水予測区域を示したハザードマップが作成・公表されつつある。しかし、浸水ハザードマップの作成に際して設定される諸条件には不確実なものが数多く、これらの影響に対する配慮なしには有効性の高いハザードマップとはなり得ない。本研究では、津波浸水区域を予測する際の不確実性要素を系統的に抽出・整理するとともに、各々の不確実性要素が津波浸水区域の予測に及ぼす影響度について検討する。また、人命被害の最小化に資する津波ハザードマップ作成を念頭に置き、不確実性要素の合理的な取扱い方法について考察する。

なお、本稿に示す津波・浸水予測結果は、不確実性要素の考察のために、各種パラメータを変化させて予測したものであり、実際の防災対策のために浸水予測したものではない。

2. 研究の内容

最も確からしい諸条件の設定により作成されたハザードマップが、適切な住民の避難を促し、被害を最小化することに有効であるわけではない。津波浸水区域の予測に必要となる諸条件（津波外力、地形条件、潮位、構造物条件、解析法等）は、図-1に示す通り、いくつかの不確実性を有している。実現象において、諸条件の各々がハザードマップ作成のための想定値（設定値）より危険側に顕在化すると、住民の想定していた浸水域より実際の浸水域が拡大することとなり、住民が適切な避難を行えない可能性がある。反対に諸条件を危険側に設定すれば、実際の浸水域は予測値を超えないが、この場合、過大な浸水域の予測になり、ハザードマップへの住民の信頼性を失わせ、適切な避難が行われない可能性もある。



図一1 津波・浸水予測に係わる不確実性要素

本研究では、モデル地区において、不確実性に関するシナリオ設定を種々に変えた津波・浸水シミュレーションを実施し、シミュレーション結果の比較検討・分析などにより、各々の不確実性要素が津波浸水区域の予測に及ぼす影響度について考察した。また、ハザードマップ作成における諸条件の最適な設定方法について考察した。

3. 不確実性要素が浸水域の予測に及ぼす影響度

表-1 に示す津波浸水区域の予測に影響を及ぼすと考
えられる各条件を検討の対象とした。

以下、モデル地区（静岡県清水地区）におけるシミュレーション結果の比較検討・分析に基づき、各不確実性要素が浸水域の予測に及ぼす影響度について考察する。

(1) 地震断層モデル

地震断層モデル(断層の位置・深さ・長さ・幅・すべり量・走向角・傾斜角等)は、津波計算における初期条件(初期水位)と地盤変位(隆起・沈降)を決定する。これらは津波の大きさと浸水状況に直接影響する。

地震の発生による地盤変位を考慮すると、最大津波高を生じる地震と最大浸水深を生じる地震とは異なる可能性や、地震被害と浸水被害に正の相関がない可能性がある。よって、最大規模の浸水被害を想定する際の地震断

* 正 会 員	修(工)	国土交通省国土技術政策総合研究所
** 正 会 員	工 修	国土交通省港湾局海岸・防災課
*** フェロー	工 博	東京大学教授 大学院新領域創成科学研究科 環境学専攻 (財)沿岸開発技術研究センター

*****	工 修	国土環境(株)
***** 正 会 員	工(工)	中央復建コンサルタンツ(株)

表-1 津波・浸水予測に係わる不確実性要素

項目	不確実性要素(ハザードマップ作成時の諸条件)
津波外力	1. 地震断層モデル
	2. 地震断層モデルで表現される初期水位
地形条件	3. 格子間隔
	4. 標高
	5. 河川地形条件
潮位	6. 潮位
構造物条件	7. 構造物条件
	8. 構造物の地震被害
解析法	9. 津波数値解析手法

層モデルは、地盤高の変位を考慮した津波高から決定するべきと考えられる。

想定東海地震によってモデル地区では1.6～1.9mの隆起が生じる。この隆起を考慮すると津波による浸水はほとんど生じない(図-2(a)参照)。一方、同じ地震断層モデルで地盤の隆起がなかったと仮定した場合(初期水位のみ地震断層モデルに対応したものを条件として与えた場合)、かなりの浸水が予測される(図-2(b)参照)。

地盤変位は1m以上に及ぶことがあるが、その分布には不確実性が高く、予測される隆起が実際には起こらない可能性も十分あることから、浸水に関して危険側の判断を行うため、地盤の沈降のみ考慮することが適当であると考えられる。

(2) 地震断層モデルで表現される初期水位

津波の数値計算は初期条件として海面の変位分布(＝初期水位)を与え、運動方程式と連続式を時間経過に伴い数値的に解くものである。このため、アウトプットとして得られる津波の水位は、この初期水位の条件に大きく左右される。

(3) 格子間隔

津波計算では一般に矩形格子で地形を表現しており、

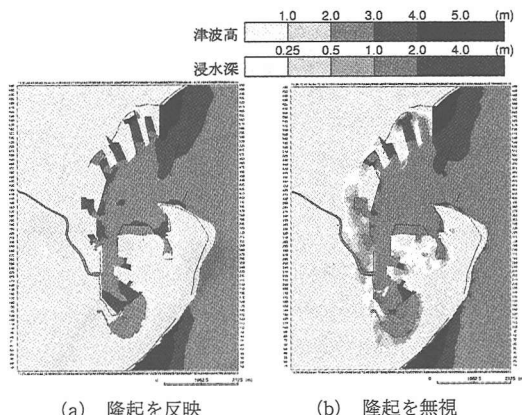


図-2 地盤高への地盤隆起の反映による浸水予測結果の違い

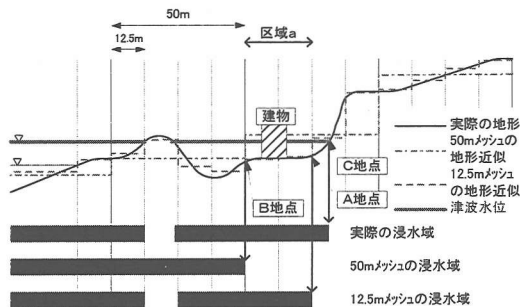


図-3 格子間隔が浸水予測結果に与える影響

標高は格子内の平均的な地盤高で表現している。地盤高の変化が大きい場所では、計算格子間隔を狭くすることによって地形近似が高まり、構造物や微地形の影響をより正確に反映できるため、計算精度は向上すると考えられる。図-3に格子間隔が浸水シミュレーションに与える影響についてのモデル図を示す。

50 m メッシュで予測した場合、一点鎖線で地形近似を行っているため、B地点で浸水しなくなる。一方実際のは、C地点まで浸水することとなり、50 m メッシュの地形近似においては浸水域を過小評価していることとなる。12.5 m メッシュの地形近似を行うことにより、C地点により近い浸水域を予測することができる。区域aの建物は、50 m メッシュでは浸水しないと判定されるが、12.5 m メッシュでは浸水すると判定されることとなる。このように地盤高の変化が大きい場所では、格子間隔が浸水範囲に影響を与える可能性が高い。

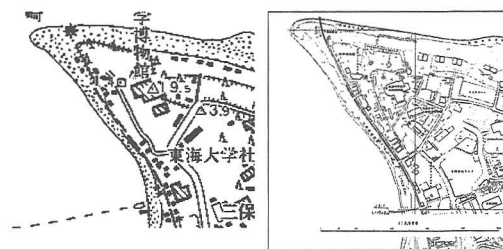
(4) 標高

標高データは津波計算の計算条件として用いられるとともに、浸水状況の推定に使用される。津波計算では各格子点の標高をもとにその伝播過程を計算し、これによって各格子点の水位の時刻歴が得られる。浸水状況は計算結果としての津波水位と地盤高との差で表される。

標高データとしては下記を利用することが多い。

- ・国土地理院発行の縮尺1:50,000地形図または1:25,000地形図の等高線
- ・国土地理院発行の数値地図(50 m 格子標高値)
- ・自治体が整備している1:2,500地形図(国土基本図)の等高線や個々の標高値

1:25,000地形図では10 m 間隔の等高線で標高が表現されている。このため、浸水被害が発生しやすい水際線付近の低平地の標高を忠実に再現することは困難な場合が多い。また、数値地図の50 m 格子標高値も1:25,000の等高線から作成されたものであるため、同程度の精度である。これに対し、1:2,500地形図では等高線間隔が1 m で表現されているため、より精度の高い標高データを作成することが可能である。



(a) 縮尺 1 : 25,000

(b) 縮尺 1 : 2,500

図-4 地形図の縮尺の差による標高データの違い

図-4(a) は 1 : 25,000, 図-4(b) は 1 : 2,500 縮尺で作成されたモデル地区 (一部) の地形図である。両者は、比較のために同縮尺で表示している。

両者に記載されている標高情報を比較すると、1 : 25,000 の地形図には標高が 10 m を越える地盤がないため、等高線が記載されておらず、三角点等の標高が 3 地点分記載されているのみである。一方、1 : 2,500 地形図の方には 1 m 毎の等高線が記載されており、かつ標高値の記載密度が高い。低平地での標高情報は、簡略化してある 1 : 25,000 の地形図では読み取ることが難しく、1 : 2,500 の地形図で把握する必要性が高いと考えられる。

(5) 河川地形条件

震源から沿岸に達した津波の一部は、河口から遡上した後、河川から溢れて浸水を引き起こす可能性がある。従って、浸水シミュレーションにおいては、河川の地形条件 (河川形状・河床高) や堤防の天端高等を考慮しなければ、河川から生じる浸水を適切に評価することができない。

津波計算にあたっては河川の地形条件を計算メッシュと標高データで表現するとともに、河川堤防の天端高等の構造物条件を設定しておく必要があると考えられる。

(6) 潮 位

津波は通常、潮位が高いほど陸域を遡上しやすく、浸水被害も増大する。

モデル地区におけるシミュレーションでは、潮位は清水港の H.W.L. (朔望平均満潮位) を採用した。清水港における L.W.L. (朔望平均干潮位) は $CDL + 0.04$ m, H.W.L. (朔望平均満潮位) は $CDL + 1.64$ m であり、その差は 1.6 m である。従って、津波発生タイミングによっては、浸水深にも 1.6 m 程度の差が生じる可能性がある。津波がどの潮位で発生するかは予測できないため、危険側の状況を想定して、H.W.L. (朔望平均満潮位) の潮位を設定することが妥当であると考えられる。

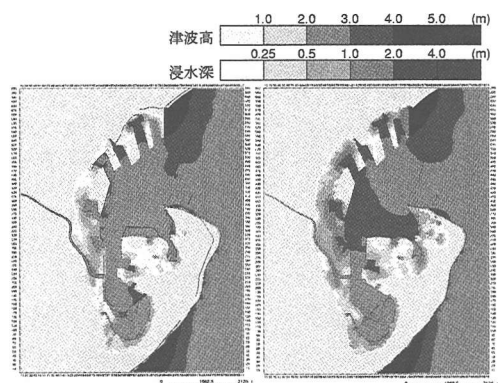
(7) 構造物条件

津波の伝播過程にあつて地盤より高い構造物 (例えば防波堤、防潮堤、胸壁、道路の盛土等) は、津波の遡上

を阻止する効果が期待できる。ただし、水門や陸閘等の操作を必要とする構造物は、津波来襲までの余裕時間が短いものと考えられるため、閉鎖することができず、この部分から浸水被害が拡大する可能性を有している。

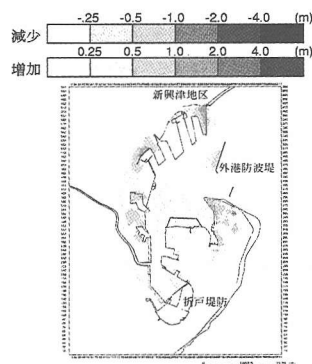
一般的に、水位は構造物の沖側で高まり、陸側では低くなる。これは施設ありと施設なしの計算結果を比較することで推定できる。モデル地区における想定東海地震を対象とした津波最大水位と浸水深の計算結果を図-5に示す。図-5(a), (b), (c) はそれぞれ、構造物を考慮したもの、構造物なしとしたもの、両者の差である。これによると、構造物の有無による水位・浸水深に関して、新興津地区周辺で有意な差が認められる。また、外港防波堤が存在することによって、締め切り効果により最大水位が 1 m ~ 2 m 以上低下している。

構造物を計算条件として適切に取り扱うことでシミュレーションの精度は向上すると考えられる。また、水門・陸閘等の防護施設については、津波到達時間が短いため閉鎖が困難であったり、地震動による変形等により十分に閉鎖できないことが想定されるため、開放状態として取り扱うことが考えられる。ただし、①耐震性を有し



(a) 構造物あり

(b) 構造物なし



(c) 構造物有無の差

図-5 構造物の有無による浸水予測結果の違い

自動化された施設や②常時閉鎖の施設及び③耐震性有し津波到達時間より早く閉鎖できると考えられる施設については、水門等を閉鎖状態として取り扱うことが考えられる。

(8) 構造物の地震被害

前節で示したように施設（例えば防波堤、防潮堤、胸壁等）は、その機能が保たれていれば背後地の浸水被害を軽減する効果があることがシミュレーション上で確認できる。万一、これらの施設が地震による被害で、その機能を発揮できない場合は、浸水被害が拡大すると考えられる。

過去の港湾施設の地震被害事例によれば、津波の遡上阻止効果が大きく損なわれるような機能的破壊に至ったケースは多くはない。しかしながら、安全側を考慮し、対象として選定された地震断層モデルにより地震動を与え、構造物被害を算定の後、その被害状況を考慮した浸水予測を実施するべきと考えられる。

(9) 津波数値解析手法

津波のような波長の長い波の運動は、通常、非線形長波の理論式（浅水理論式）によって表され、津波波源から陸上遡上に至る津波伝搬の基本的な様子を再現する。

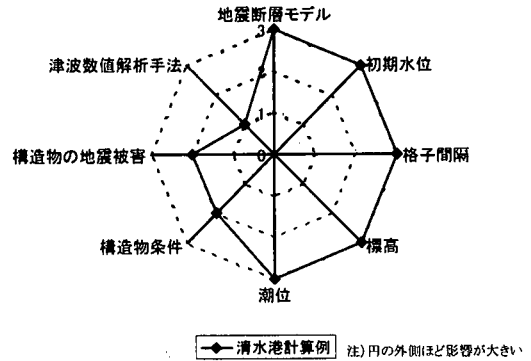
ただし、遠浅海岸に到達した津波は分散効果によってソリトン分裂する場合があり、この場合には分裂する前の津波頂部の高さに比べ分裂後の波の頂部の方が高くなる。

日本海中部地震で観測されたソリトン分裂や波状段波は波数分散効果を考慮したブーシネスク式等でないと再現することが困難である。ソリトン分裂を起こした津波は、波形曲率効果により波高が増幅し、増幅した波高はいつかは砕波するので、砕波モデルを考慮する必要がある。

4. 津波ハザードマップにおける不確実性要素の影響程度の考察

被害を最小化することを目的とした津波ハザードマップを全国的に普及させるためには、ハザードマップ作成時の諸条件となる各々の不確実性要素の影響度合いを把握し、その知見を全国の地域を対象に活用できるよう汎用化あるいは類型化する必要があると考えられる。具体的には、ハザードマップ作成に当たって諸条件を各地域でどのように設定すべきかをとりまとめることである。また、住民配布用や行政用等のマップ活用目的の違いにより、これら諸条件の設定値が異なる可能性を有していることにも留意が必要と考えられる。

図一六はモデル地区におけるシミュレーション結果に基づいた、ハザードマップに係わる各不確実性要素の影響度合いを模式図として示したものである。この例では、



図一六 不確実性要素の影響度合い
(静岡県清水地区の事例の場合)

比較的広域（数 km の範囲）の浸水範囲・浸水深に大きく影響を及ぼした不確実性の要素は、地震断層モデルの選定・地盤変位、格子間隔、標高・潮位であった。

前述の通り、津波ハザードマップの作成技術の確立には、ハザードマップに係わる不確実性要素の影響程度の把握が不可欠である。従って、今後さらなる数値シミュレーション等を実施し、各モデル地区においてこのような模式図を作成し、汎用的な不確実性要素の影響程度パターンを明確化することが重要であると考えられる。

5. ハザードマップにおける不確実性要素の考え方

(1) 不確実性要素の整理・類型化

津波ハザードマップに係わる不確実性要素の浸水予測区域への影響度は、数多くのケーススタディ結果に基づき、汎用化あるいは類型化を目指す必要がある。しかし、全国にはさまざまな地形に加えて、海象気象、既設の防護状況、人口・産業集積等、様々な条件を有する海岸保全施設及びその背後地域が存在しており、ハザードマップに係わる不確実性要素すなわちマップ作成条件の設定方法も全国一律で論ずることは困難であるものと予想される。従って、マップ作成条件の設定方法を汎用化あるいは類型化するためには、表一2に示すような視点で整理する必要があると考えられる。

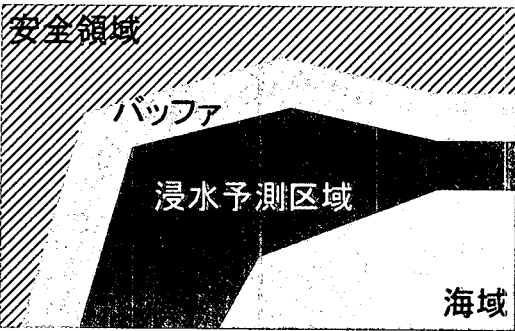
(2) 不確実性を踏まえたハザードマップの表現

予測された浸水域は不確実性を有するものであり、想定外の外力に対する留意などを明記するとともに、確実な避難のためにはハザード情報（浸水危険度）の表現方法に何らかの工夫が必要である。

例えば、計算条件を上回る外力による浸水予測を合わせて示すなど、複数外力による表示も考えられる。予測の負荷等を考え、1つの浸水予測から比較的簡便に危険領域を設定する方法として、図一7に示すような浸水予

表－2 類型化の視点

類型化の視点	内容
地形	・海岸の位置・海岸の形状・湾の有無・形状
人口・産業集積	・大都市・中都市・小都市 ・観光地
津波危険度	・地震対策推進地域・津波危険地域 ・太平洋側・日本海側



図－7 バッファの概念図

表－3 バッファの設定方法例

区分	設定方法
予想浸水区域からの幅による設定	予想浸水区域から幅〇m以内の領域を準危険領域（バッファ）として設定
標高による設定	標高〇m以下の領域を準危険領域（バッファ）として設定
幹線道路等による設定	予想浸水区域の外側に位置する幹線道路等で囲まれた領域を避難領域（バッファ）として設定
町丁目界による設定	予想浸水区域に近接する町丁目領域を避難領域（バッファ）として設定
他の外力による設定	予想浸水区域の予測に用いた外力を上回る外力を用いた予測による浸水域を避難領域（バッファ）として設定

測区域の外側に緩衝領域（バッファ）を表示することが考えられる。なお、ほとんどの場合、着色域の境界に明確な危険度の差はないため、誤解を生じないようにグラデーション表示などの工夫が必要である。

バッファの設定方法としては表－3のような方法が考えられる。また、検討余力がある場合やバッファによって危険領域を設定するとあまりにも過大評価になり現実性がない場合等ある程度の精度が必要な場合は、複数外

力による浸水予測により、幅のある浸水予測を行うことも考えられる。

また、将来より精度の高い手法で予測を見直せるよう予測実施年月日、予測手法を明記しておくべきである。

6. 結 論

本研究の結論は、以下の通りである。

- ① モデル地区のシミュレーション結果においては、浸水範囲および浸水深に大きく影響を及ぼした不確実性要素（設定条件）は、地震断層モデル、地盤変位、計算格子間隔、地盤高および潮位であった。また、これらの結果は、今後、他のいくつかのモデル地区において、不確実性要素の影響程度パターンを考察することの重要性を示唆するものである。
- ② 人命被害を最小化する目的のもと、信頼性を有する津波ハザードマップを全国的に普及させるために、浸水予測時における諸条件の設定方法を示した。
- ③ 不確実性を踏まえたハザード情報の表示方法として、バッファによる危険領域の表示、予測実施年月日等の付記を提案した。

7. あとがき

本研究は、内閣府と海岸省庁（国土交通省河川局及び港湾局、農林水産省、水産庁）共同で実施している「高潮・津波ハザードマップ研究会」（座長：河田恵昭 京都大学防災研究所 巨大災害研究センター長）における検討成果の一部を活用し、とりまとめたものである。

参 考 文 献

佐藤良輔 (1989): 日本の地震断層パラメータ・ハンドブック、鹿島出版会、120 p.
太平洋沿岸部地震津波防災計画手法調査委員会 (1997): 地域防災計画における津波対策強化の手引き、99 p.
中央防災会議事務局 (2001): 東海地震に関する専門調査会（第11回）関連資料、17 p.
中央防災会議事務局 (2001): 東海地震に関する専門調査会（第11回）とりまとめ資料（図表編）、23 p.
津波対策推進マニュアル検討委員会 (2002): 津波対策推進マニュアル検討報告書、162 p.
津波被害予測マニュアルに関する調査委員会 (1997): 津波被害予測マニュアル、96 p.
農林水産省構造改善局・農林水産省水産庁・運輸省港湾局・建設省河川局 (1997): 太平洋沿岸部地震津波防災計画手法調査報告書、308 p.