

# 津波防災施設の最適規模と 残余リスクを明示する手法の提案

藤間 功司<sup>1</sup>・嶋原 康子<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)  
E-mail:fujima@nda.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 (元) 応用地質株式会社

減災を進めるためには、津波防災施設の規模に関して速やかに地元自治体と合意できるスキームを整えておくべきである。ここでは、地震の発生頻度を考慮した上で複数の大きさの地震の発生可能性を考え、それぞれに対して津波被害想定を行うことにより、ある規模 $H$ の津波防災施設を建設したときの期待被害軽減額 $B(H)$ 、期待被害額 $D(H)$ を算出する。これに費用 $C(H)$ も考慮して、社会の負担を小さくする方向で合意を促進するスキームを提案する。本手法を用いると残余リスクを明らかにでき、具体的な減災目標を設定することが可能である。

**Key Words :** tsunami, coastal dike, hazard mitigation, residual risk, benefit, cost, damage

## 1. はじめに

2011年の東北地方太平洋沖地震の後、土木学会<sup>1)</sup>や中央防災会議<sup>2)</sup>は、比較的発生頻度が高い津波に対しては堤防などで防御し、それを超える最大クラスの津波に対しては避難やまちづくりによる減災で対応するよう提案した。頻度が高い津波とは具体的に「数十年から百数十年に一度の津波」とされ、国交省<sup>3)</sup>によりその算定方法も示されている。実際、岩手県・宮城県・福島県ではその手法により設計津波の高さが提案され、地元自治体との協議のもとに最終決定されつつある。今後、東南海地震や南海地震の被害が想定される地域においても同様の手続きが行われるだろう。

しかし、被災前の地域で堤防の高さを変更することには困難が伴うと予想される。実際、これまでも堤防のかさ上げや水門の建設などをめぐり地域の合意が得られないことがあった。その構造物によって対象津波による被害が低減されることが示されても、次の津波の大きさが分からないため、その構造物で十分なのか、過剰投資にならないか判断できず、結局個人的な心情で判断してしまうことがひとつの理由だろう。

小林・秀島<sup>4)</sup>は、防災投資に際し、まずリスクの公平化を優先させナショナルミニマムの一定の安全率を保証し、その上でカタストロフ回避のための追加投資を費用便益分析により検討することを提唱している。中央防災

会議などが提案し国交省が方法を示した設計津波の考え方はこの方法に沿ったものであり、ナショナルミニマムとして数十年から百数十年に一度の津波に対する安全性を保証し、さらにそれ以上の津波に対しては減災により対応しようというものだと考えられる。しかし、設計津波の高さに関して地元自治体と合意できず膠着状態に陥ってしまった場合、減災に向けての動きも止まってしまう危険性があるため、合意を促進させるスキームを整えておくことが望ましい。

本研究では、津波防災施設によって軽減されるリスクと残余するリスクを示し、建設費用なども含めて、社会の負担が小さくなる方向で決着させるスキームを提案する。本提案スキームでは残余リスクを明示できるので、減災の具体的な目標を示すことが可能である。

また、本提案スキームを使うことなく合意に至った場合でも、本手法により残余リスクを示し、定期的にモニターすれば減災の進み具合がチェックでき、減災活動の動機付けになると考えられる。なお、本手法では超過外力を考慮することになるため、いわゆる‘粘り強い’構造物の効果を数値で評価するツールとしても使用できる可能性がある。

## 2. 手法の説明

## (1) 地震の発生頻度

次に起こる地震は分からないが、地震調査研究推進本部地震調査委員会<sup>5)</sup>が長期予測を公表しており、ある領域で想定される地震マグニチュードとその発生確率を知ることができる。また、経験的に、マグニチュードが1増えると地震の頻度は1/10程度になるといわれている。これらの情報から、津波防災施設の供用期間中におけるマグニチュードMの地震の発生頻度に関する密度関数p(M)を仮定する。Mを中心とした区間dMの地震の発生回数はp(M)dMである。

津波被害はマグニチュードだけでなく、位置や震源の深さ、傾斜角、津波防災施設の被災の有無など様々な要因で変化する。M以外の要因をe<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>などとし、結合密度関数p(M, e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>, …, e<sub>n</sub>)が定義できれば、地震の発生回数はp(M, e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>, …, e<sub>n</sub>)dMde<sub>1</sub>de<sub>2</sub>…de<sub>n</sub>となる。しかしここまで議論するのは困難なので、M以外の要因を考慮する場合でも、数通りの評価を行い平均あるいは重み付き平均を取るのが現実的だろう。このような平均操作を[ ]で表す。

## (2) 被害と海岸保全施設の便益

地震のモデルが決まれば、津波数値計算を実施し、被害推定の手法により津波被害を算定できる。ここでは以下の被害を考える。

- 人的被害による直接的な損失
- 物的被害による直接的な損失
- 被災による間接的な損害

3番目の項目の間接被害には、被災による逸失利益が入る。また、考えている地域に代替の利かない施設・機能などがある場合には、それが失われることによる損害を考慮する必要がある。例えば、大規模な製油所が被災すれば影響は全国に及ぶ可能性があり、特定の先端技術を持った病院が被災すれば医療機会を逸することになりかねない。このような損害を可能な限り評価する。

以上の損害を国交省<sup>6)</sup>の手法などで金額で評価したものをD<sub>S</sub>と書くことにする。ただしD<sub>S</sub>は地震マグニチュードMなど前節で示した要因の他、津波防災施設の規模H(例えば堤防の高さ)によっても変化する。供用期間中における地震の発生頻度の密度関数はp(M)だから、被害想定を不確定性を考慮して複数行って積分すれば、規模Hの津波防災施設を建設した場合の供用期間中の被害の期待値を次式で表すことができる。

$$D(H) = \int [D_S(M, H) p(M)] dM \quad (1)$$

ただし[ ]は平均操作で、例えば同じMに対して2種類の断層モデルを考え、それぞれの頻度をp<sup>1</sup>, p<sup>2</sup>とし(p<sup>1</sup>(M)+p<sup>2</sup>(M)=p(M))、それぞれの断層モデルに基づく被害額をD<sub>S</sub><sup>1</sup>, D<sub>S</sub><sup>2</sup>と書くと、[D<sub>S</sub> p]=D<sub>S</sub><sup>1</sup>p<sup>1</sup>+D<sub>S</sub><sup>2</sup>p<sup>2</sup>を意味する。また、津波防災施設を建設しなかった場合の被害額を

算定し、D<sub>N</sub>とおくと、(D<sub>N</sub>-D<sub>S</sub>)が津波防災施設による被害軽減額である。供用期間中に期待できる被害軽減額を便益と考えると、津波防災施設の便益は次式で表される。

$$B(H) = \int [(D_N(M) - D_S(M, H)) p(M)] dM \quad (2)$$

D(H)は規模Hの津波防災施設を建設した後の残余リスク、B(H)は規模Hの施設を建設することにより軽減されるリスクと捉えることができる。

図-1の左側の図は、Hを固定しMを変化させたときのD<sub>N</sub>, D<sub>S</sub>の変化を予想し模式的に示したものである。地震が非常に小さければ津波防災施設がなくても津波による被害はゼロであり、被害が発生する限界のMが存在する。津波防災施設があると、この限界値が大きくなる。ただし地震を極端に大きくすると津波防災施設の効果は限定的になり、D<sub>N</sub>-D<sub>S</sub>は小さくなると予想される。

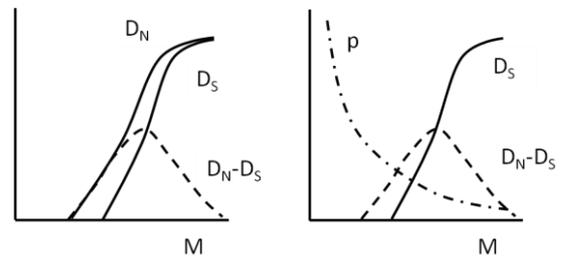


図-1 D<sub>N</sub>とD<sub>S</sub>の模式図

図-1の右側に、pの変化も併せて示した。この図から、Bの積分の収束性に問題はないと思われる。また考えている地域全体が浸水してしまえばD<sub>S</sub>はそれ以上大きくならず、飽和すると考えられるので、Dの積分も収束する。ただし、平野部で海岸線から離れたところに市街地があると、Mをかなり大きくしないと収束しない可能性があるため注意が必要である。

地域によっては、異なるプレート境界からの津波が来襲する。この場合、両者を考えなければならないが、頻度や津波の大きさ、来襲方向がまったく異なるから、別々に評価して足し合わせる。すなわち、次式で被害と便益を評価する。

$$D(H) = \sum_i \int [D_{S,i}(M, H) p_i(M)] dM \quad (3)$$

$$B(H) = \sum_i \int [(D_{N,i}(M) - D_{S,i}(M, H)) p_i(M)] dM \quad (4)$$

なお、津波の場合はひとつの地域でも高さが違うから式(1)-(4)の積分変数を地震マグニチュードにしているが、一事業所を対象にして、事業所内で水位が一定と見なせるなら、式中のMを津波の最高水位と読み替えた方が被害推定が考えやすい。また、ここでは津波だけを考えているが、高潮も考慮に入れて式(3)(4)を適用することもできる。その場合はMを高潮による最高水位、または台

風の規模と考えれば良いだろう。

### (3) 費用

津波防災施設にかかる費用として、以下のものが考えられる。

- 建設費
- 維持費
- 失われるものがある場合にはその補償

3番目の項目には、例えば希少動物の産卵場がなくなることにより生態系回復事業が必要になる、といった場合を想定している。それ以外にも、堤防などの場合には生活が不便になるとか景観が悪くなるといった指摘がされることがある。これを金額に置き換えるのは難しいと思うが、もし評価可能ならここに入れてよいだろう。

供用期間中に発生するこれらの総額を費用 $C(H)$ とする。ただし、現実には高さ $H$ が大きくなると堤防の形式を変えざるを得なくなるといった事態が生じ、 $C(H)$ は不連続になる可能性もある。

### (4) 分析

地震の規模と津波防災施設の規模を変化させて被害推定を行えば、 $D(H)$ 、 $B(H)$ を求めることができる。また過去の実績などから $C(H)$ を評価することもできる。ここでは $B$ 、 $C$ 、 $D$ が求められたとして、それをどのように使うか考察する。

構造物を建設する以上、それなりの費用対効果が求められる。しかし、例えばソフト対策が進み、死亡率を常にゼロにできるようになれば社会にとって望ましいが、その仮定の下では $D_N$ と $D_S$ がともに小さくなるため、 $(D_N - D_S)$ が小さくなり、結果として $B$ が小さくなる。ソフト対策をまったく行わない脆弱な地域を構造物だけで防御している方が、 $B/C$ が高くなる。すなわち、社会にとって望ましいことと $B/C$ が高いことは必ずしも一致しない。

住民にとっては、 $D$ が最小であることが望ましいだろう。 $D$ は住民にとっての負担であると同時に社会全体の負担でもあるから、 $D$ が小さいことは社会全体にとっても望ましい。しかし、 $C$ もまた社会全体の負担であり、 $D$ を小さくするために大き過ぎる津波防災施設を建設すると、社会全体として大きな負担を負うことになりかねない。そこで、

$B/C \geq 1$ の範囲内で $D+C$ を最小にする

ことを目標にすることを提案する。 $D+C$ は、社会全体の負担のうち、この津波防災施設に関係するものを抽出したものである。

図-2に、 $B$ と $C$ 、 $C$ と $D$ の変化を模式的に示した。 $C$ は $H$ とともに増大するが、 $H$ を小さくしても工事の管理費がかかるため、 $H$ が小さくてもゼロにはならないと思われる。 $D$ は $H$ が大きくなると減少し、 $B$ は $H$ が大きくなると

増大すると考えられるが、津波の高さよりはるかに高い構造物を作っても便益は向上しないから、 $B$ は頭打ちになるだろう。したがって、図のように $B/C$ は最大値、 $D+C$ は最小値をもつと考えられる。

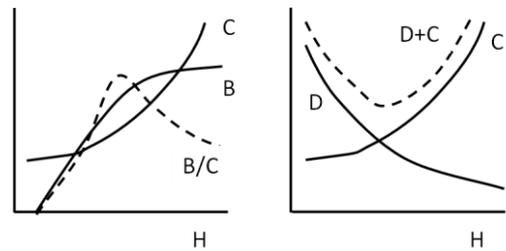


図-2 B, C, Dの模式図

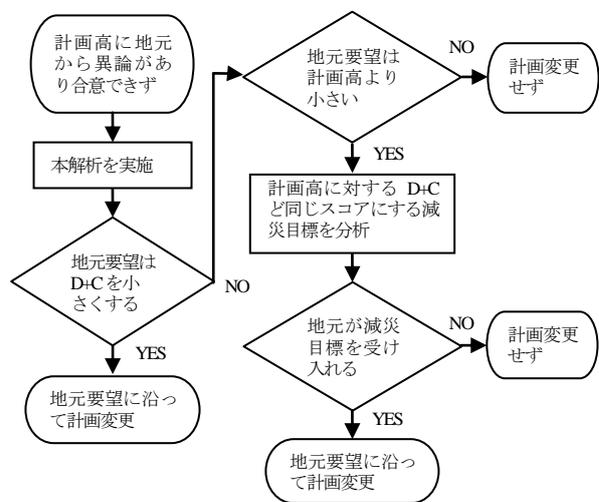


図-3 提案スキーム

## 3. 本手法の適用方法

### (1) 合意を促進する

津波防災施設の規模をめぐる合意が困難な状態に陥ったときに本手法を適用する手法は前章で述べた通りである。 $B(H)$ 、 $C(H)$ 、 $D(H)$ の分布を求め、分析の結果、地元の要望が $B/C \geq 1$ を満たし計画高（統一手法で求めた設計津波の高さ）に比べ $D+C$ を小さくするなら、要望を受け入れて計画を変更すればよい。逆に地元の要望が $D+C$ を大きくするなら、社会全体の負担を増大させないため、基本的に計画を変更すべきではない。

ただし、この手法の利点のひとつは、死亡率などのパラメーターを変更したときの結果をすぐに算定できることである。被害率をどの程度低下させれば計画高に対する $D+C$ と同じスコアが得られるか分析できる。もし地元が計画高より大きな規模の施設を要望しているなら、このとき地元要望は $D+C$ の極値より右側にあり、計画高より小さな $D$ が予測されているはずである。したがって、

ソフト対策によりさらに被害を小さくするのは難しく、技術開発によりCが下げられない限り受け入れる余地はないと思われる。しかし、地元の要望が計画高より小さいときには、地元要望が極値より左側にあり、大きなDが予測されているはずから、ソフト対策によって大きくDを下げられる可能性がある。この場合、地元は大きな津波防災施設で失われてしまうものに価値を感じており、それはナショナルミニマムの安全性を犠牲にしてもよいと考えるだけの貴重なもののはずである。そこで、地元が計画高に対するD+Cと同程度のスコアにするための減災目標を達成すると‘公約’するなら要望を受け入れてよいのではないだろうか。ただし、実際にはソフト対策にも費用がかかるので、同程度ではなく同程度以下を条件にすべきかもしれない。以上の提案をフローチャートにして図-3に示す。

## (2) 残余リスクを明示する

津波防災施設を建設した後でも、残余リスクが存在する。減災を進めるためには、残余リスクを明示することが重要だろう。地元自治体との合意に本提案スキームが不要だった場合でも、本手法により、建設した規模Hに対して $D_3$ を評価して式(1)に従ってDを評価すれば残余リスクを評価できる。前節の利用に比べれば計算量はかなり少なく済む。

減災活動は継続することが重要である。したがって、この分析を定期的に、例えば5年ごとに行うことにして、残余リスクの診断を義務付ける制度を作ったらよい。前回診断後に地震に関して新たな知見が得られたり、地形データが更新された場合には津波計算からやり直す必要があるが、それがない場合は新しい人口統計などから被害評価だけ実施すればよく、診断費用はそれほどかからないはずである。ただし、避難訓練の結果を被害率に反映させるなど、ソフト対策の効果を取り入れる方法を開発する必要がある。

## (3) 粘り強い津波防災施設の効果を示す

本手法は超過外力に対する被害推定も行うため、破壊に至る時間が長い粘り強い構造物の効果を表現することができる。もちろん、破壊過程の予測が非常に難しいため、精度の高い数値を出すのは難しい。

しかし、もっとも問題になるのは、粘り強い構造にしたことによる費用Cの上昇分だけ被害Dの低下が期待できるかどうかだろう。Dを算出する積分の中で超過外力分の寄与がもともと大きくないなら、いくら粘り強い構

造にして超過外力に対する被害額を減らしても意味はないだろう。反対に、超過外力分の寄与が大きければ、粘り強い構造にする効果が期待でき、破壊に至る時間を延ばした数値計算をもとに被害推定を行い、Dの低下を算出できる。Dの低下分だけCを上積みしてよいはずだから、「破壊に至る時間を〇分延ばせるなら、建設費を〇円増やしてよい」といった定量的な議論が可能になるはずである。

## 4. おわりに

本報告では、津波防災施設施設の規模をめぐる合意を促進し、残余リスクを明示する手法を提案した。

本提案を実際に適用するには、地元自治体の正確な情報を反映し、地震発生頻度や断層モデルの選定は的確で公平である必要がある。したがって、地震発生頻度や断層モデルの設定方法、被害想定的手法、被害を金額に換算する際の基準値などに関しては国がルールを決め、県が統一的に実施するのが良いだろう。

今後、実際に本手法を適用してみて、その効果の検討を行う予定である。

## 参考文献

- 1) 土木学会：津波特定テーマ委員会 第1回報告会 (2011/5/10) 資料、  
<http://committees.jsce.or.jp/2011quake/node/79>
- 2) 中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」：今後の津波防災対策の基本的考え方について（中間とりまとめ）（平成23年6月26日公表）、  
<http://www.bousai.go.jp/jishin/chubou/higashinohon/tyuukan.pdf>
- 3) 国土交通省：「設計津波の水位の設定方法等」について、  
[http://www.mlit.go.jp/report/press/river03\\_hh\\_000361.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/river03_hh_000361.html)
- 4) 小林潔司・秀島栄三：防災施設の社会的規範、防災の経済分析、pp334-342、勁草書房、2005。
- 5) 地震調査研究推進本部：長期評価結果一覧、  
[http://www.jishin.go.jp/main/p\\_hyoka02\\_chouki.htm](http://www.jishin.go.jp/main/p_hyoka02_chouki.htm)
- 6) 国土交通省：治水経済調査マニュアル（案）、  
[http://www.mlit.go.jp/river/basic\\_info/seisaku\\_hyouka/gaiyou/hyouka/h1704/chisui.pdf](http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/seisaku_hyouka/gaiyou/hyouka/h1704/chisui.pdf)

(2012.9.21 受付)

# NEW APPROACH TO SPECIFY THE ADEQUATE SCALE OF FACILITY AGAINST TSUNAMI AND THE RESIDUAL RISK

Koji FUJIMA and Yasuko SHIGIHARA

For tsunami damage reduction, it is necessary to develop a scheme to obtain a rapid agreement with local government on scale of facility against tsunami. Considering generation frequency of earthquake, several tsunami-damage estimations are conducted for several earthquakes and several scales,  $H$ , of facility against tsunami. These analyses evaluate an expected value of account of damage reduction,  $B(H)$ , by construction of facility of scale  $H$  and an expected value of account of damage,  $D(H)$ , under existence of facility of scale  $H$ . Cost,  $C(H)$ , is also considered, and a scheme is proposed to minimize total social burden. This method specifies the residual risk, which indicates an adequate target for damage reduction.