

発生頻度を考慮した津波事象に関する防波堤の信頼性解析

○中央大学 学生会員 澤田 泰希
中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

現行の設計法は仕様規定型から性能照査型へと遷移しており¹⁾、これは利便性及び機能性に付随して、その経済性が構造物に要求される風潮にあることを意味している。対して近年の自然災害は、これまでの想定を超越するような規模ものが目立つようになってきており、昨年3月に発生した東日本大震災は多くの犠牲者を出した。設計における「既往最大」の原則の基準を塗り替えるような災害にどう対応していくかが、21世紀の設計の課題である。

構造物の機能保持を要求性能とし、ハードで対処する型の性能照査型設計ではその課題をカバーしきれない。Risk Crisis Managementの視点を持ち込むことが有意義である。そこでシミュレーションによって災害発生時に起こり得る様々な事象を仮定し、その発生確率を求めることで防災の質の向上、問題点の明確化を狙う必要がある。本研究にはこのような背景があり、とりわけ避難までの猶予が極端に少なく、震災において渦中の問題となった津波に着目して検討を進める。

2. 津波災害における信頼性解析

(1) 研究概要

本研究では、図-1に示すように考え得る様々な事象をフォールトツリー解析(FTA:Fault Tree Analysis)に沿って書き表し、それぞれの発生確率を求めて信頼性解析を行った。第一段階で防波堤の破壊確率を算出し、最終的に沿岸部周辺の住民の被災確率を算出することを目標として、本研究の結果が幅広く応用されることが可能になるように配慮している。

(2) 津波発生事象

式(1)より、マグニチュードの乱数モデルを示す指数乱数を作成した。

$$P_{(M)} = \frac{1}{M} e^{-\frac{1}{M}M} \quad (1)$$

その中から飯田ら²⁾により津波が発生し得るとされている6.4以上のマグニチュード乱数を抽出して、それを津波発生確率と定義した。

さらに式(2)より、津波波高モデルを示すRayleigh乱数を構築した。

$$P_{(H)} = \frac{\pi H}{2H^2} \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{H}{\bar{H}}\right)^2\right) \quad (2)$$

(2) 防波堤の越流事象及び破壊事象

本研究における防波堤は図-2に示すケーソン式、コンクリートブロック式の2タイプを採用し、その天端高は設計基準最低値の3.6mを仮定した。先の波高モデルに、水路幅が減少し津波エネルギーが収斂されることによる波高補正を付加させ、より現実的な波高モデルへと改変し、越流確率を算出した。さらにこの波高を合田式により波圧へと変換し、防波堤の破壊モード

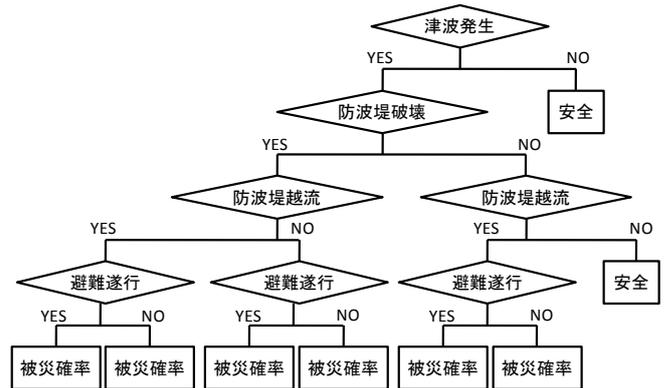


図-1 本研究におけるFTA

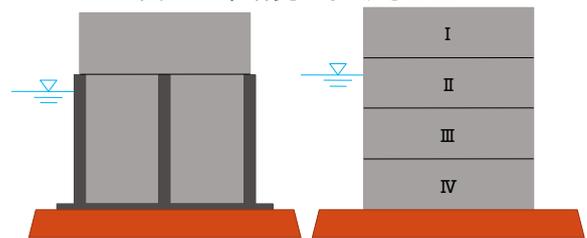


図-2 本研究で採用した各種防波堤のイメージ

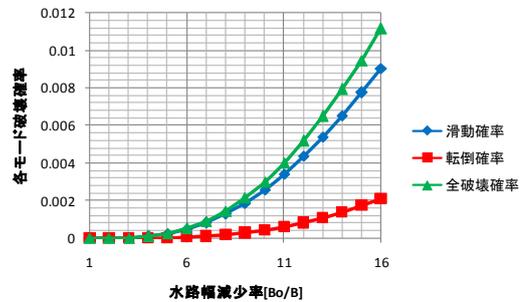


図-3 ケーソン式防波堤の信頼性解析結果

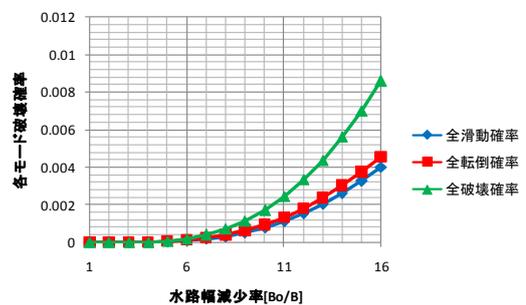


図-4 コンクリートブロック式の信頼性解析結果

は「滑動」と「転倒」を仮定して³⁾⁴⁾その信頼性解析を行った。コンクリートブロック式には、施工都合上発生するコールドジョイント部を3点仮定している。図-3、図-4はそれぞれケーソン式、コンクリートブロック式の防波堤の信頼性解析結果である。ケーソン式では滑動、コンクリートブロック式では転倒というように、各破壊モードの発生しやすさに差異があるという結果が得られた。

キーワード：防波堤、信頼性、コールドジョイント、VSL、費用便益分析

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel.03-3817-1816 fax.03-3817-1803

これは、主としてそれぞれを構成している部材の重量の違いに起因しており、重力式構造物の特徴が顕著に表れたと言える。

この結果を受けて本研究では特に転倒事象を危惧し、そのリスク軽減の為にいくつか代替設計法を提案する。

ケーソン式では上部工との境界にコールドジョイントを設け、積極的に上部工を滑動させることにより、ケーソンに載荷される高波圧モーメントを逃がして転倒に対する抵抗を向上させることを狙う。

コンクリートブロック式では鉄筋をアンカーさせることで、その安全性を改善する。アンカーをするコールドジョイント部は、その安全率に着目し最適箇所を選定する。

図-4 はケーソン式防波堤における代替設計後の各破壊モード発生確率の変化を示している。代替設計後において滑動確率が大きく上昇していることは、上部工という「重石」がとれたことで防波堤全体の重量が減少したこと起因している。逆に、上部工に載荷される波圧モーメントが滑動によりケーソンに影響を及ぼさなくなり、防波堤全体の転倒確率は1/4程度までに縮小できた。つまり、滑動量さえコントロール出来れば、コールドジョイントでより安定した防波堤を実現することは大いに可能であるということがいえる。

このように、従来、構造の信頼性、安定性の上で「宿痾」とされていたものの特徴をうまく利用することで逆に信頼性を向上させる、という考え方は、性能照査型設計ではかなり重要である。

コンクリートブロック式においては、アンカー位置、そしてその箇所数で信頼性改善度は当然変わってくる。そこで各ブロックにおける滑動および転倒に対する安全率を図-5 示す。これによれば、(I+II+III)部の安全率が最も低く、よってIII、IV部の境界をアンカー位置に決定する。次にII、III部の境界のアンカーの必要性についてだが、図-6 は防波堤が部分破壊起こした後の残されたブロックの各破壊モードの安全率である。これによれば、I部を滑動させ、津波が連続的に襲来するとすれば、(II+III+IV)部を残すことは好ましくない。よって、アンカーはIII、IV部のみに留めることが最適である。

III、IV部境界をアンカーした場合のコンクリートブロック式防波堤の信頼性変化を図-7 に示す。各破壊モードともバランス良く発生確率が軽減されていることがわかり、アンカーが効果的であることがわかる。

(3)住民の避難事象

津波が防波堤を越流又は破壊して湾内に侵入してきた場合、どれだけ被災危険度があるか、ということについて言及していく。ここでも信頼性理論におけるRSモデルによるモンテカルロシミュレーションによって評価を行うが、それぞれ、

$$R = \text{避難開始所要時間} + \text{避難場所到達時間}$$

$$S = \text{津波到達時間} + \text{最高遡上高到達所要時間}$$

と定義して議論を進めた。避難開始所要時間には、情報取得、避難準備に所要する時間も含まれる⁵⁾。避難場所到達時間にはヒトの歩行速度乱数が必要となるが、これは対数正規分布に準ずるものとして扱う⁶⁾⁷⁾。最高遡上高到達時間には、津波の最高遡上距離が必要とな

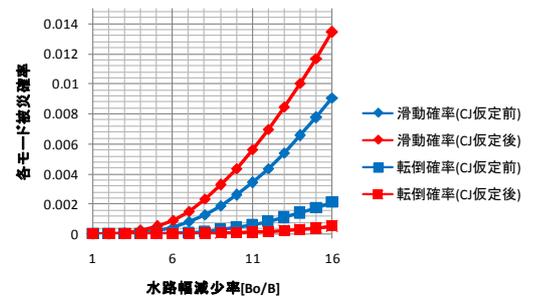


図-4 ケーソン式における代替設計後の信頼性改善

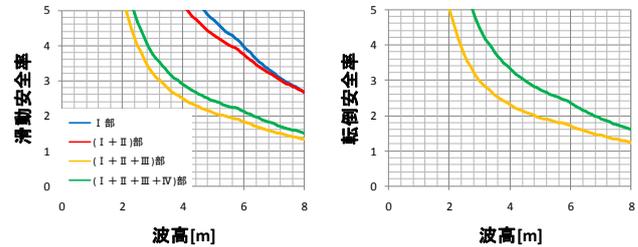


図-5 各境界より上部のブロックの各安全率

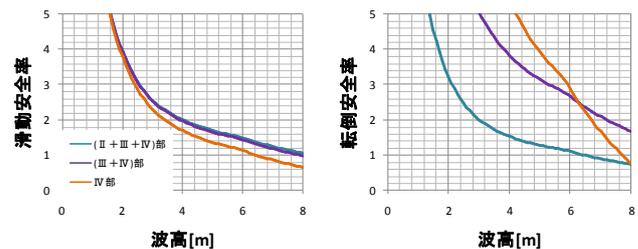


図-6 各境界より下部のブロックの各安全率

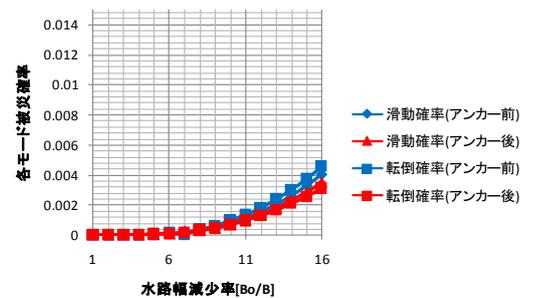


図-7 III、IV部境界アンカー後のコンクリートブロック式の信頼性変化

るが、この値の算出には、The Tsunami Risks Project(2000)⁸⁾の式(3)を採用する。

$$X_{max} = \frac{(H)^{\frac{4}{3}}k}{n^2} \quad (3)$$

この式においてkは係数で通常 0.06、nは粗度係数であり田畑で0.02程度、住宅地で0.04~0.08程度となる。地形条件を粗度係数として盛り込むことができるのがこの式の最大の特徴である。

算出した被災確率を、図-8 に示す。ここでは、水路幅減少率の代表値として、Bo/B=1, 4, 8, 12, 16の5パターンを仮定し、それぞれの場合において、避難開始所要時間を変化させてその推移をプロットした。

この結果をみると、採用した全ての水路幅減少率において、避難開始所要時間が20分を超えた場合にその被災確率が急激に上昇するということがわかる。つま

り地震発生から 20 分がデッドラインであり、それ以前に避難を開始することが望ましいが、現実に津波を伴う大地震を経験すると、自らはもちろん家族、友人の安否確認、現状把握、地震又は津波の情報収集、避難経路の模索など、多くのことに時間を消費してしまう。古きより「つなみてんでんこ」といわれることの由来はここにあると言える。高い防災意識を常に持ち合わせていることが、非常に重要であるということが、この数字から読み取れる。

図-9 は、海岸からの距離を横軸に取り、そのとき被災確率がどのように変化していくかを示したものである。初期条件として避難開始所要時間を、被災確率の上昇率が最も著しかった 23 分に仮定を置く。海岸から 50m 離れた地点では、被災確率はおよそ 1/2 程までに低減され、海岸から 200m の地点では、全ての水路幅減少率においてその被災確率はほぼ 0 に収束する。

図-10 は、防波堤天端高と被災確率の相関である。先の 2 つのパターンと比較して、その曲線は緩やかな減少を見せている。防波堤の天端高によって被災確率を 0 とする為には、最低でも 8.0m は必要であるということが言える。

以上を踏まえた上で、初期条件として防波堤が転倒破壊を起こしたと仮定したときの被災確率の推移を考察する。防波堤が滑動破壊を起こしても、それは土俵で耐える関取のように海岸構造物として波力に対する抵抗を幾分残すが、転倒破壊を起こしたときはその「防波」という機能を 100%失ってしまう。よって、ここでの計算には、防波堤がないという条件と同様の初期条件になる。

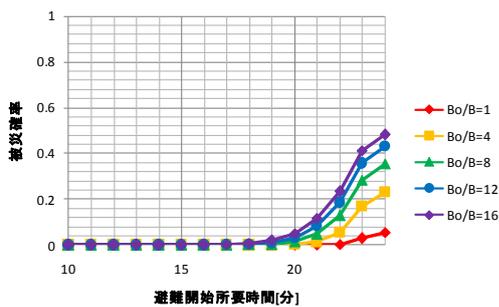


図-8 避難開始所要時間と被災確率の相関

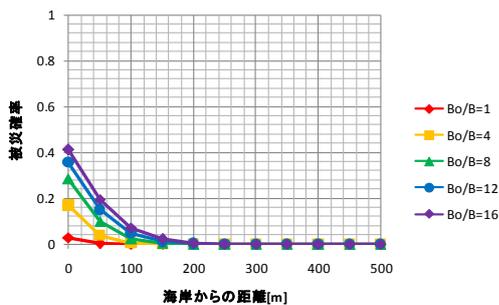


図-9 海岸からの距離と被災確率の相関

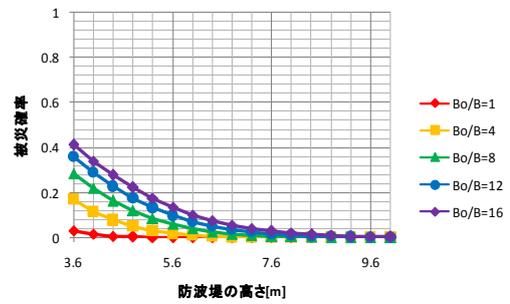


図-10 防波堤の高さと被災確率の相関

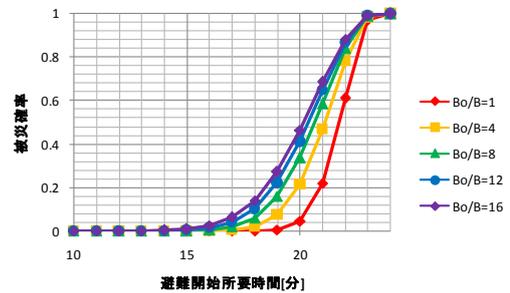


図-11 防波堤転倒破壊発生時の避難開始所要時間と被災確率の相関

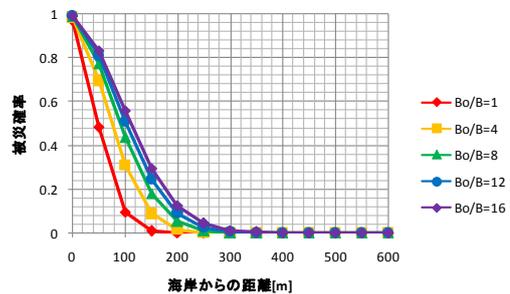


図-12 防波堤転倒破壊発生時の海岸からの距離と被災確率の相関

図-11 および図-12 は、防波堤が転倒破壊を起こしたときの、各条件下での被災確率の推移を示したものである。この計算結果によれば、避難開始所要時間に 24 分以上を要してしまうと、その被災確率は全ての水路幅減少率において 100% という値を示し、海岸から 200m の地点においてもその危険度は収束を見せていない。防波堤が機能するときと比べて、様々な場合の被災確率は、相対的に高い水準にシフトする。よって、転倒破壊事象は必ず避けなければならない破壊モードであると言える。

3. 防波堤および防潮堤の天端高拡張工事の有意性

以上の解析結果を用いて、防波堤および防潮堤の高さを変化させることの意義について言及する。東日本大震災発生以降、随所で例えば 10m の高さを持つ堤防建設の必要性が問われたが、ここではそのことについて、統計的生命価値(VSL: Value of Statistical Life)の考え方により議論を進めていく。VSL の算出にはいくつか方法があるが、ここでは支払意思額(WTP: Willingness To Pay)の概念を用いて、式(4)

$$VSL = \frac{\text{支払意思額}}{\text{リスク削減量}} \quad (4)$$

と表す VSL を採用する。一個人の収入あるいは逸失利益より、ある死亡リスクに対する主観的な価値観にこの問いを提起する目的があることがその理由である。この VSL と、その建設費を費用便益分析により比較することで、その有意性を結論づける。

表-1 は拡張する防波堤天端高別の被災低減率やその建設費などを示したものである。表中の必要最低 WTP とは、天端高拡張工事建設費と VSL が等しくなるときの WTP のことをいう。これによれば、防波堤天端高を 10m に拡張したとき、住民ひとりひとりがその工事に 130,000 円以上の価値を見出している必要があるということによる。WTP は通常、表明選考法あるいは顕示選考法で統計的に求められるものであり、この結果がひとつの判断材料になると言える。

4. 実在都市への本研究理論の当てはめ

実在する都市に本理論を当てはめ、具体的な値を算出する。ここでは、今後東海地震での甚大な被害が懸念されている神奈川県鎌倉市に焦点を当てる。図-13 は、神奈川県が作成した南関東地震における津波浸水予測図である。鎌倉市の浸水面積が比較的大きいことは明確だが、相模湾の地形による波の強め合いと、由比ヶ浜周辺には強大な堤防が存在しないことがその原因とされている。

図-14 は先と同様の被災確率の算出を、鎌倉市に適用させたときの計算結果である。近年、腰越漁港防波堤は天端高 5.8m の混成堤として整備されたが、海水浴場として名高い由比ヶ浜付近は、津波に抵抗できる目立つ堤防の整備はなされていない。そこで、防波堤がある地域と無い地域の 2 つに場合分けし、双方の違いを視覚化した。やはり防波堤がない地域での被災危険度が極めて高いという結果を得た。今後懸念される東海地震を考慮するならば、ハード面はもちろんソフト面での対策も、急務であるといえる。

5. おわりに

本研究では主に、防災分野のとりわけハード面に対して議論を展開しているが、独自の RS モデルによる被災危険度の評価などにみる計算の特徴から、ソフト面における防災の意識づけにも効果が期待でき、萌芽的研究であるといえる。また、様々な発生事象を細かく場合分けしたことから、今後の海岸工学、海岸計画における高度なリスクマネジメントを助長し得るものであると考えられる。

計算結果に、今後より精度の高い改善を加えるならば、Green の式中の、海底面における地形変化に起因する波の強め合いも考慮する必要がある。さらに、津波避難ビルの有意性などについても議論を展開すると、一般市民の意見をより多く取り入れることが可能となり、より強く求められている海岸構造物の具現、明確化、そして違った視点からの防災対策案の捻出が期待できる。

今回は、鎌倉市に焦点を当て実在都市モデルにおける防災信頼性を評価したが、今後ではより多くの都市にこの計算を適用し、被災危険度ランクの基準を設定し、それらを比較できるようになれば、本研究がもたらす社会利益はより深まるといえる。

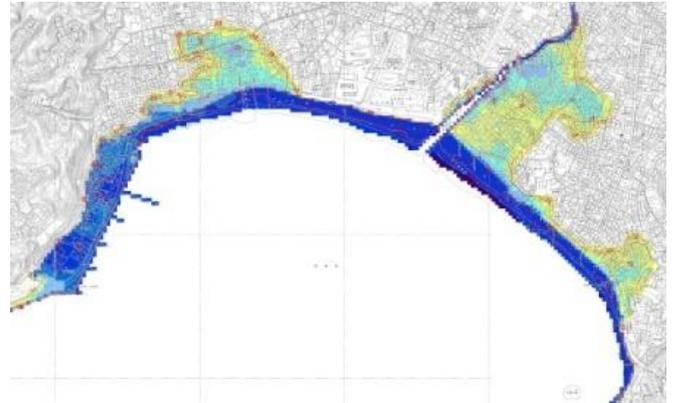


図-13 神奈川県鎌倉市の南関東地震における津波浸水予測図(神奈川県作成)

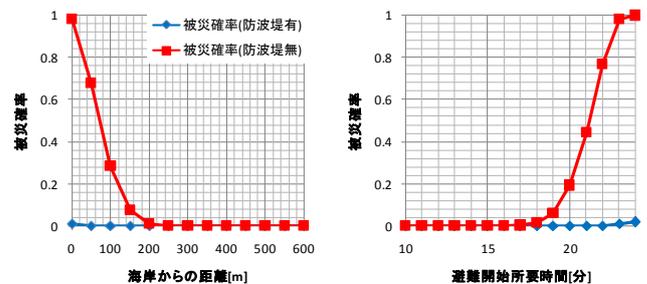


図-14 鎌倉市における各条件下での被災信頼性

表-1 防波堤天端高別の被災低減率
拡張工事建設費および必要最低 WTP

防波堤の高さ(m)	被災確率低減率	初期建設費(円)	必要最低WTP(円)
4	0.0664964	30,000	1,995
4.4	0.1215231	60,000	7,291
4.8	0.1657261	90,000	14,915
5.2	0.2001404	120,000	24,017
5.6	0.2260549	150,000	33,908
6	0.2450254	180,000	44,105
6.4	0.2585125	210,000	54,288
6.8	0.2677795	240,000	64,267
7.2	0.2739961	270,000	73,979
7.6	0.2780737	300,000	83,422
8	0.2806558	330,000	92,616
8.4	0.2822404	360,000	101,607
8.8	0.2831798	390,000	110,440
9.2	0.2837262	420,000	119,165
9.6	0.2840276	450,000	127,812
10	0.2842	480,000	136,416

参考文献

- 1) 星谷勝:構造物の信頼性設計法, 鹿島出版会, 1997
- 2) 尾崎晃 他:海岸工学, 森北出版, 1987
- 3) 鹿島建設土木設計本部:海洋・港湾構造物-新・土木設計の要点⑥, 鹿島出版会, 2003
- 4) 井上修一:リスクを含む LCC による防波堤設計の代替案比較法, 中央大学修士論文, 2004
- 5) 目黒公郎:津波災害時の避難行動シミュレーションモデルの開発, 東京大学生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター, 2004
- 6) 青木義次:避難時間と避難歩行速度の確率分布形, 日本火災学会研究発表会概要集, 頁 264-265, 2007
- 7) 高知県海洋局漁港課:漁村における津波対策基本方針, 頁 5, 2005.
- 8) The Tsunami Risks Project(2000):
<http://www.nerc-bas.ac.uk/tsunami-risks/html/Phy3ImpacI.htm>
- 9) 神奈川県庁 HP
<http://www.pref.kanagawa.jp/>