

地震/津波/洪水による災害リスクの統合評価と GIS-VR によるリスクの可視化

東京都市大学 工学部 都市工学科 吉川弘道

概要：

地震発生に伴う、震動被害、津波被害、液状化被害は、その発生特性と被害形態がきわめて異なる災害であるが、一旦発災すれば、地震規模と防災力に応じた被災規模を呈する。これらの自然災害は、別個に算定/議論されてきたが、ある特定の土木施設に着目した場合、全てを勘案する必要がある。

本報では、マルチイベントモデルによる地震ハザードを設定し、津波/液状化/震動被害の異なる災害リスクの評価手法および統合化についての試案を呈示するものである。また、国内の3つの港湾（コンテナ埠頭）を解析対象として災害リスク評価を実施し、イベントリスク曲線およびPML（再現期間475年）を算出し、定量的なリスク評価を行った。

さらに、災害リスクを3次元バーチャルリアリティにより可視化し、6K デジタルサイネージを含め3つの画面にて、リスク認知効果の評価実験も実施した。

キーワード：災害リスク、イベントリスク曲線、リスクの統合評価、リスクの可視化

1. まえがき

地震災害、津波災害、液状化、火災（以下‘災害リスクと呼ぶ）は、その発生特性と被害形態がきわめて異なる災害であるが、一旦発災すれば、地震規模と防災力に応じた被災規模を呈する（当初の計画では、洪水リスクを含めることを考えていたが、洪水リスクはその他の災害リスクと無関係に発生する（相関特性を持たない）ので、本報では除外し、新たに液状化を加えるものとした）。

災害リスクを統合的に評価することは喫緊の課題であり、土木施設の被災予測/減災対策/予算措置に有用な指針を与えることが急務である。

さらに、災害リスクを3D-VRにて可視化し、10名の被験者によるリスク認知効果の評価実験を実施した。ここでは、6K デジタルサイネージなど3つの画面を用いた。

2. 統合リスクの評価手法

（1）評価手法の概要

評価手法のフロー図を図1に示す。同図に示すように、まず、マルチイベントモデルによる地震ハザード評価を行う。この際、地震ハザード評価で抽出されたシナリオ地震の中から、大津波を引き起こす可能性のあるシナリオ地震を抽出しておく。次にイベントツリーを用いて、

対象施設の被害をモデル化する。統合リスクの評価のポイントは、①津波による被害、②地盤の液状化による被害、③震動による被害を考慮することである。

そして、これら①～③をイベントツリーでモデル化し、それぞれの被害の発生確率を評価する。イベントツリーと被害の発生確率が評価できれば、各被害が生じた場合の物的損失率及び復旧期間を与えることで地震リスクが算出される。

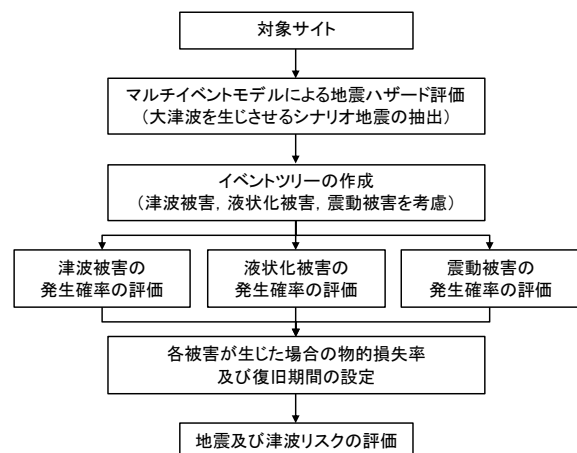


図1 評価手法のフロー図

(2) 評価手法における要素技術

1) マルチイベントモデルによる地震ハザード評価

本研究ではマルチイベントモデルによるイベントハザード曲線を採用する。Cornell 流の地震ハザード曲線¹⁾は各イベントでマグニチュード、震源(震央)距離及び地震動のばらつきを考慮して積分した地震動の超過確率関数に相当するが、イベントハザード曲線は各諸値のばらつきは考慮せず、シナリオ地震の発生確率を累積して求めた超過確率関数であり、その形状はステップ状となる。そして各ステップが各シナリオ地震に対応する。なお、地震動指標は工学的基盤における最大加速度(PBA: Peak engineering Bedrock Acceleration)とする。

2) イベントツリーの作成

対象施設のイベントツリーは、津波による被害、地盤の液状化による被害及び震動による被害を考慮することがポイントとなる。また、被害のシーケンスを考慮しつつ、相関の高い要因(津波被害や液状化被害)を上位に位置づけることが望ましい。一方、各損傷モードの物的損失率の設定では、被害要因の組み合わせであるイベントツリーの帰結や被害の従属関係などを勘案し、重複がないように配慮する必要がある。イベントツリーにより、各分岐に各損傷モードの発生確率、物的損失率及び復旧日数を与えることで、任意の地震動強さを条件とした物的損失率や復旧日数の期待値がリスクとして算出される。

3) 津波被害の発生確率の評価

津波被害の発生確率は、阿部が提案する津波高さの推定式(津波距離減衰式)²⁾を用いて算定する。津波被害の発生確率の評価では、まず地震ハザード評価で抽出したシナリオ地震の中から、津波被害を生じさせる地震を選別する。次にサイトから震源までの津波伝搬距離を計算し、津波距離減衰式を用いて対象サイトにおける津波高さ及びその確率分布を評価する。そして、評価対象サイト周辺の防潮堤や護岸などの高さなどの防御物の高さを調査し、これと津波高さの確率分布を比較することで、津波被害の発生確率(津波が防御物を越える確率)が算出できることになる。

4) 液状化被害の発生確率の評価

本研究では、道路橋示方書・同解説(V 耐震設計編)³⁾に記載されているPL値と地盤の残留水平変位の関係に基づき、残留水平変位が1.0mになる場合(PL=25となる場合)に液状化による被害が発生するものとする。したがって、対象サイトの地盤情報からPL=25となる地表面最大加速度(PGA: Peak Ground Acceleration)を中央値とした確率分布を求め、これと対象サイトで想定されるPGAを比較することで、液状化被害の発生確率が算出されることになる。

5) 震動被害の発生確率の評価

震動被害の発生確率は、損傷確率の連続関数(fragility Curve)を評価して算出する。フ

ラジリティカーブは、地震動強さ(最大速度、最大加速度など)に応じて算出した損傷確率を、地震動強さを横軸に示した一価関数である。このとき損傷確率は、構造信頼性理論に基づき、対象構造物の応答が耐力を越える確率として算出される。

3. 評価事例

(1) 対象施設及び対象サイト

対象施設はコンテナ埠頭とし、対象サイトは図2(a)~(c)に示す東京港、鹿島港及び仙台港の3サイトとする。



(a) 東京港



(b) 鹿島港



(c) 仙台港

図2 対象サイトの位置図⁴⁾

(2) 評価のための条件設定

1) 護岸高さ

護岸高さは標高値を用いることとした。標高値は国土地理院の5mメッシュ標高⁴⁾を参照し、東京港でT.P.+3.1m、鹿島港でT.P.+2.7m、仙台港でT.P.+2.8mとした。

2) 地盤情報及び地盤増幅率

地盤情報については、国土地盤情報サイト KuniJiban⁵⁾より、対象サイト近傍のボーリング柱状図を採用することとした。また、PBAに対するPGAの地盤増幅率は1.2倍を仮定することとした。

3) イベントツリー

イベントツリーは対象サイトに関わらず同じになるも

のと仮定して図3を設定した。

4) フラジリティ情報

フラジリティ情報は表1を設定した。なお、津波被害

確率を相対的に比較すると、地震ハザードは東京港、鹿島港、仙台港の順に高いことがわかる。

(2) 津波被害の発生確率

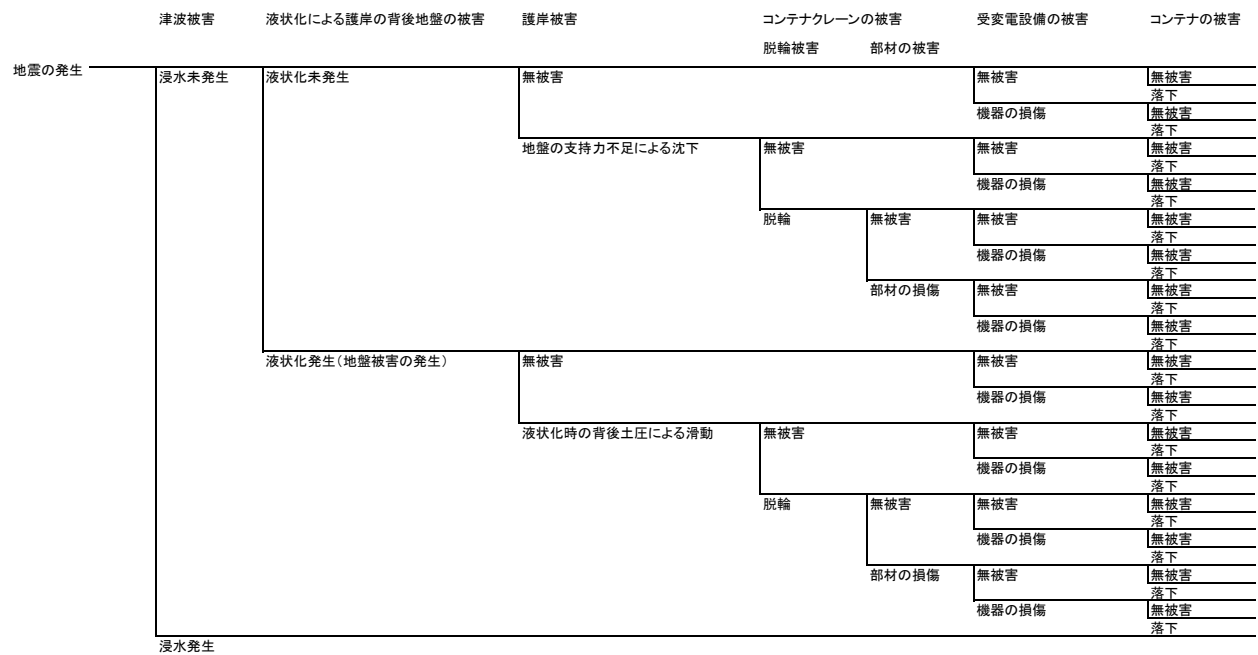


図3 イベントツリー

及び液状化被害以外の耐力中央値は仮定した値である。

表1 フラジリティ情報

被害要因	損傷モード	耐力中央値 (cm/s2) (地面最大加速度換算)			複合 偏差	損失率	復旧期間 (日)
		東京港	鹿島港	仙台港			
津波被害	津波未発生	抽出したシナリオ地震毎に発生確率を算出			—	0.00	0
	津波発生				—	1.00	180
液状化被害	液状化未発生	—	—	—	—	0.00	0
	液状化発生	200	320	360	0.54	0.30	60
護岸被害	無被害	—	—	—	—	0.00	0
	沈下	500	500	500	0.54	0.20	90
	滑動	600	600	600	0.54	0.40	180
コンテナクレーンの被害	無被害	—	—	—	—	0.00	0
	脱輪	400	400	400	0.54	0.05	60
	部材の損傷	700	700	700	0.54	0.15	120
受変電設備の被害	無被害	—	—	—	—	0.00	0
	損傷	600	600	600	0.54	0.05	10
コンテナの被害	無被害	—	—	—	—	0.00	0
	落下	400	400	400	0.54	0.01	5

津波被害を発生させる可能性がある地震として、東京港で7シナリオ、鹿島港で3シナリオ、仙台港で1シナリオが抽出された。抽出された震源名、津波高さ、護岸高さ及び津波被害の発生確率を表 2(a)～(c)に示す。同表より各港ともに、東北地方太平洋沖地震による被害の発生確率が最も高くなることがわかる。

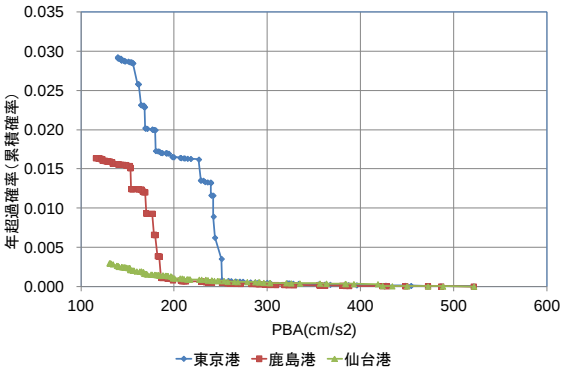


図4 イベントハザード曲線

4. 評価結果

(1) 地震ハザード

マルチイベントモデルによる地震ハザード評価の結果として、地震動の大きい上位 100 地震を抽出した。抽出結果としてイベントハザード曲線を図4に示す。

図4より、一部の地震動強さの範囲で仙台港の年超過確率が他の港より高くなる傾向がみてとれるが、年超過

表2 津波被害の発生確率

(a)東京港

No.	震源名	津波高さ (m)	護岸高さ (m)	津波被害の 発生確率
1	関東12(M7.1)	0.4	3.1	0.000
2	関東10(M7.1)	0.4	3.1	0.000
3	関東11(M7.1)	0.4	3.1	0.000
4	1703,1923関東	1.6	3.1	0.066
5	東北地方太平洋沖02(M8.7)	1.9	3.1	0.128
6	関東02(M7.1)	0.2	3.1	0.000
7	関東09(M7.1)	0.2	3.1	0.000

(b)鹿島港

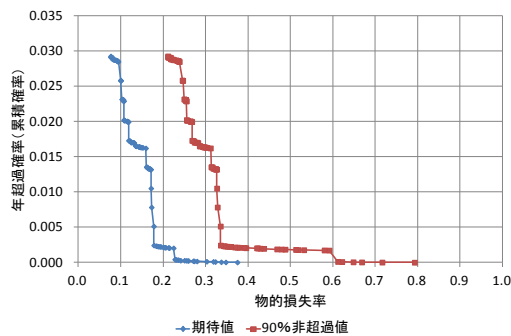
No.	震源名	津波高さ (m)	護岸高さ (m)	津波被害の 発生確率
1	東北地方太平洋沖02(M8.7)	5.7	2.7	0.955
2	関東17(M7.1)	0.4	2.7	0.000
3	関東15(M7.1)	0.6	2.7	0.000

(c)仙台港

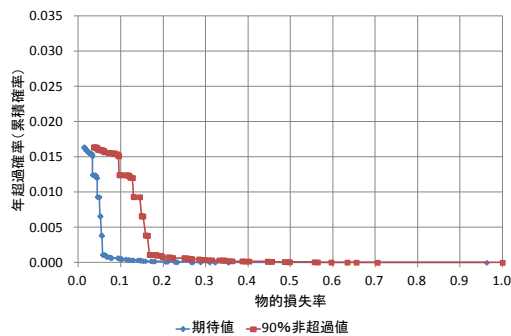
No.	震源名	津波高さ (m)	護岸高さ (m)	津波被害の 発生確率
1	東北地方太平洋沖02(M8.7)	7.2	2.8	0.984

(3) イベントリスクカーブ

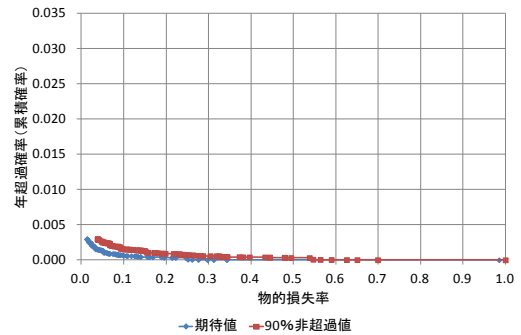
統合リスク評価の結果として、物的損失率及び復旧期間に関するイベントリスクカーブを算出した。算出した結果を図5、図6に示す。各図より、イベントリスクカーブは、物的損失率に関しても、また復旧期間に関しても、東京港、鹿島港、仙台港の順にグラフの右上に位置する。これは、地震ハザードが東京港、鹿島港、仙台港の順に大きいこと、また、液状化被害に関する耐力中央値が、東京港、鹿島港、仙台港の順に低いことに起因している（注：液状化の発生以外の被害モードの耐力中央値は港に関係なく同じ値を設定している）。しかしながら、各イベントリスクカーブにおいて、物的損失率や復旧日数が最大となるプロットを比較してみると、東京港に比べて、鹿島港や仙台港の方が大きな値となっている。この理由は、東北地方太平洋沖地震の津波リスクの影響である。つまり、同地震が発生すると、鹿島港と仙台港では、東京港よりも津波高さの高い津波が発生し、かつ鹿島港と仙台港の護岸高さは東京港に比べて低い値を設定していることから、東北地方太平洋沖地震により高い確率で浸水被害が生じる。この結果、このシナリオ地震による物的損失率と復旧期間は、東京港に比べて大きなものとなる。



(a)東京港

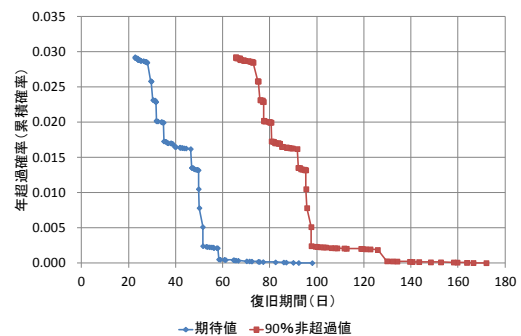


(b)鹿島港

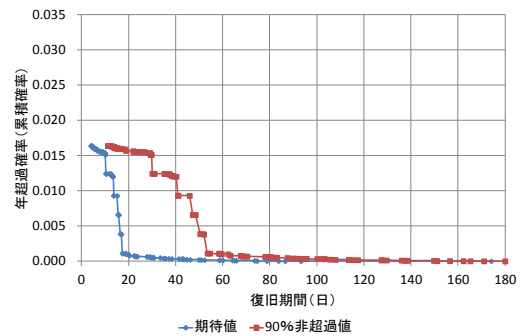


(c)仙台港

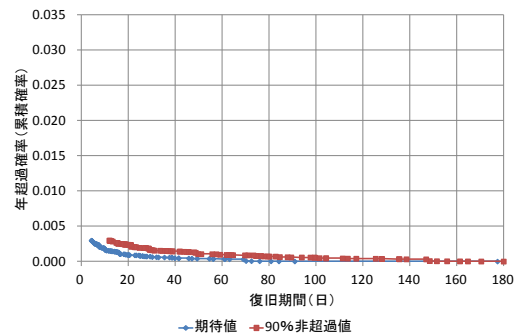
図5 物的損失率に関するイベントリスクカーブ



(a)東京港



(b)鹿島港



(c)仙台港

図6 復旧期間に関するイベントリスクカーブ

(4) 再現期間475年に対応するリスク

図5、図6に示した各イベントリスクカーブより、再現期間475年（年超過確率=1/475）に対応するリスク、いわゆるPML（Probable Maximum Loss：予想最大損失）を求めて表3に示した。

表 3 より、再現期間 475 年に対応する PML 値で災害リスクの大きさを判断すると、3 つの港の中で東京港が最もリスクが大きく、仙台港のリスクが最も小さいことがわかる。

表 3 各港の PML

	物的損失率に関するPML		復旧期間(日)に関するPML	
	期待値	90%非超過値	期待値	90%非超過値
東京港	0.21	0.38	58	110
鹿島港	0.06	0.17	17	53
仙台港	0.02	0.07	7	22

参考文献

- 1) Cornell, C. Allin: Engineering seismic risk analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968.
- 2) 阿部勝征: 地震と津波マグニチュードに基づく津波高さの予測, 地震研究所彙報, 第64冊第1号, pp.51-69, 1989.
- 3) 社団法人日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, P.406, 2002.
- 4) 国土地理院: 地理院地図(電子国土 Web), <http://portal.cyberjapan.jp/site/mapuse4/index.html>
- 5) 国土交通省: 国土地盤情報検索サイト「KuniJiban」, <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/index.html>

付録 3D-VR による災害リスク認知効果評価実験

1. 調査の目的

災害リスクを 3 次元バーチャルリアリティ (3D-VR) で可視化し、被験者(学生と社会人 10 名)に画面サイズの異なる 3 種類の視聴環境で体験させ、リスク認知効果の評価実験を実施した。

2. 評価実験の実施概要

- ・実施日: 2015 年 1 月 27 日(火)
- ・被験者: 10 名(学生 3 名+社会人 7 名): 学生(災害リスクを専攻しているが、VR に関する知識は浅い)、社会人(IT 企業に勤務しているが、VR の技術知識は浅い)
- ・3D-VR コンテンツの作成: 2 種類の災害(地震動および津波)に対し、様々な状況下での 3D-VR コンテンツ。
- 1. 全体的な俯瞰映像、2. 安全な場所での被災、3. 被災を回避可能な場所(避難すれば助かる場所)、4. 助からない場所
- ・3D-VR の視聴: 被験者に、画面サイズの異なる大・中・小 3 種類のモニタ画面で、2 つの災害タイプの視聴
- ・すべての視聴体験後、アンケート票に記入。すべての作業終了後に、視聴体験の意見交換

3. 調査結果(アンケート集計結果)

- ・すべての項目で、大画面による評価値が最も高く、大画面の有効性があらためて確認された。ただし、ばらつきの多い項目もあった。

- ・災害リスクの認知効果については、地震、津波ともに大画面の評価が最も高く、特に津波の威力については、ばらつきも少なく高い評価結果となった。一方、リアル感が乏しい、画面の同期ずれなどの指摘があった。
- ・臨場感については、自分の位置の理解が十分できないという意見もあり、表現方法にさらに工夫が必要である。
- ・防災教育への可能性については、多くの人が活用できると考えている。

4. 今後の課題

- ・大画面のアスペクト比が他の 16:9 と異なり、24:9 となっているため、単に大きさだけの比較でなく、アスペクト比を合わせて実験したい。
- ・被験者全員の視聴条件(順序など)を厳密に揃えられていないので、統一できるようにしたい。
- ・クラスタ表示による同期ずれの問題の解決が必要。
- ・今回実施したアニメーションによる視聴体験は一方の体験であるため、3D-VR ならではのインタラクティブな体験による効果を検証したい。



写真-1 大画面(6K デジタルサイネージ)による
災害リスクの 3D-VR 視聴評価実験