応答曲面を用いた数値解析援用 確率論的津波ハザード評価

小谷 拓磨¹・高瀬 慎介²・森口 周二³・寺田 賢二郎⁴・
福谷 陽⁵・大竹 雄⁶・野島 和也⁷・桜庭 雅明⁸

¹学生員 東北大学大学院 工学研究科 (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)
E-mail: kotani99@dc.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学助教 工学部 (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)
E-mail: takase@irides.tohoku.ac.jp

³正会員 東北大学准教授 災害科学国際研究所 (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)
E-mail: s_mori@irides.tohoku.ac.jp

⁴正会員 東北大学教授 災害科学国際研究所 (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)
E-mail: tei@irides.tohoku.ac.jp

⁵正会員 東京海上日動リスクコンサルティング株式会社 企業財産本部 (〒 100-0005 東京都千代田区丸の内 1-2-1)
E-mail: you.fukutani@tokiorisk.co.jp

⁶正会員 新潟大学准教授 工学部 (〒 950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050)
E-mail: y_ohtake@eng.niigata-u.ac.jp

⁷正会員 日本工営株式会社 中央研究所 (〒 300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2034)
E-mail: a7385@n-koei.co.jp

⁸正会員 日本工営株式会社 中央研究所 (〒 300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2034)
E-mail: sakuraba-ms@n-koei.jp

本研究では、津波解析から得られる情報を効率的に利用して確率論的津波ハザード評価を達成する手法を提案する。この手法は、津波解析の結果に基づき評価する対象事象の応答曲面を作成する特徴を有する。また、津波解析に関する不確実性を定量化する。これにより、高度な津波解析の結果に基づくモンテカルロシミュレーションの実施を可能としている。適用例では、一部の断層パラメータおよび津波解析手法のモデル化誤差の不確実性を定量化し、東北地方太平洋沖地震時の仙台・石巻・釜石における最大津波高さの確率密度分布を評価した。その結果、提案する手法が確率論的津波ハザード評価に対して有効であることを確認した。

Key Words: probabilistic tsunami hazard analysis, response surface, Monte Carlo method, uncertainty analysis

1. はじめに

兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震の地震動による被害、および近年多発する集中豪雨による洪水や土砂災害の被害は、我が国の防災技術・枠組みに多くの課題を突き付けている。その中でも工学的に特に重要な課題として、極めて大きな外力の評価が挙げられる。この問題に対応する手段の1つとして、確率論に基づくハザードやリスク評価に関する手法や枠組みが、精力的に議論されている。確率論的ハザード評価については、地震の分野において古くから研究が行われており、Cornell¹⁾の研究などがその先駆けとして知られている。また、我が国においては、原子力発電所を評価対象とした亀田²⁾の研究などが先駆的である。さらに、近年では、地震動だけでなく、地震に伴って発生する津波についても確率論的に評価しようとする研究が進んでいる。東北地方太平洋沖地震以降にこの動きが加速したが、研究自体はそれよりも前から行われている。土木学会原子力土木委員会津波評価部会は、確定論的評価³⁾の枠組みを拡張し、2007年に確率論に基づく津

波水位の評価方法⁴⁾を示している。また、同委員会は、東北地方太平洋沖地震による被害により津波の確率論的評価の社会的要請が強くなったことを受け、「確率論的津波ハザード解析の方法」⁵⁾を公開している。この中では、考えるべき不確実性について、実現象が持つ不確実性である偶然的ばらつきと、知識やデータの不足およびモデル化の精度に起因する認識論的不確実性の2種類に分け、後者の評価にはロジックツリー手法を用いている。この資料の中には、東北地方太平洋沖地震の知見は含まれていないが、その後に原子力安全基盤機構がまとめた手引き⁶⁾では、東北地方太平洋沖地震の知見を含めた評価手法が提案され、実際のサイトへの適用を通じて具体的な技術事項が例示されている。

先述のように、津波を対象とした確率論的評価については、具体的な枠組みが構築され、適用事例までが示されている。しかしながら、現状の確率論的評価の枠組みの中では、「予測」の役割を担う数値解析が効果的に用いられているとは言い難い。例えば、「確率論的津波ハザード解析の方法」⁵⁾の中では、ある特定の地震

に対する特定地点の最大津波高さの確率密度関数を求めることが必要となるが、最大津波高さの確率密度分布を表現する分布関数は対数正規分布として予め設定されており、数値解析結果は分布関数の中央値を評価する目的のために用いられる。また、そのばらつき（標準偏差）は相田⁷⁾が提案した津波痕跡高と計算値の空間的適合度を表す指標によって表現される。従って、数値解析結果から直接的に確率密度分布が得られるわけではない。数値解析の役割は、最大津波高さの確率密度分布の一部の特性を決めるために限定して用いられるため、その構造はシンプルで扱いやすいものであるが、数値解析の結果は部分的にしか使われていない。一方で、近年の津波数値解析は、計算機能力や並列計算技術の急速な発展に伴い、目覚ましい速度で高速化が達成されており、リアルタイムの津波数値解析に関する報告⁸⁾もある。そのため、現象の確率密度分布そのものを数値解析によって表現できる可能性がある。このような観点から、本研究では、津波ハザードの確率論的評価の中で、現代の高度化した数値解析を有効に活用するための手法を提案する。

数値解析と確率論の融合については、特に有限要素法（FEM: Finite Element Method）をベースとした研究成果が既に報告されている。例えば、一次近似二次モーメント（FOSM: First-Order Second-Moment Method）法の考え方を有限要素法に展開可能であることを示したCornell⁹⁾やCambou¹⁰⁾の研究があり、我が国では中桐ら¹¹⁾、桜井・土居¹²⁾、鈴木・石井¹³⁾の研究が先駆的なものとして挙げられる。これらの研究成果は、学術的に貴重な研究成果である一方で、数値解析と確率理論が直接的に関係づけられ、実務利用レベルでは計算コストが大きな問題となる。そこで、本研究では、Zhangら¹⁴⁾や本城ら¹⁵⁾、Honjo¹⁶⁾の研究に見られる応答曲面を用いる枠組みを基礎として、数値解析を効率的に用いた津波の確率論的評価手法を提案するものとする。特に、本城らが提案する枠組みは、液状化地盤上の水路のハザード評価¹⁷⁾や落石の危険度評価¹⁸⁾など、実問題に適用した事例の中でその有用性が確認されていることから、本研究でもその枠組みを基礎とする。東北地方太平洋沖地震の津波を対象として評価の具体的な手順を示し、数値解析を有効に活用した確率論的評価の優位性や課題について整理する。

2. 信頼性設計の枠組み

(1) 基本となる信頼性解析のスキーム

本城らは、地盤構造物の実務的なレベルⅢの信頼性設計のスキームとして、図-1に示す枠組みを提案している¹⁶⁾。この枠組みは、高度な現代の解析技術や設計ツールに基づいた信頼性解析の達成を可能とするもの

図-1 数値解析を用いた地盤構造物の信頼性設計の枠組み¹⁶⁾

である。通常、高度な数値解析や設計ツールを用いて対象事象の評価を行う場合、その計算コストの制約により、実務レベルでは十分な試行回数の確保が難しく、十分な精度での信頼性解析を実施することが難しい。本城らの提案する枠組みでは、この問題を解決するために、高度な数値解析や設計ツールの結果を応答曲面と呼ばれる数式に集約する。以下では、この枠組みの具体的な手順について説明する。まず、評価の対象となる対象事象 Y を決定する。また、対象事象 Y に対して支配的と考えられる基本変数 X をリストアップする。その後の作業は、(i) 数値解析（図-1では地盤解析と表現）、(ii) 不確実性解析、(iii) 信頼性解析の3種類のプロセスに分けられる。まず、数値解析（数値解析や設計ツールによるパラメトリックスタディ）により、基本変数 X と対象事象 Y の関係を調べる。具体的には、いくつかの基本変数の組み合わせに対して対象事象の応答を確認する。この結果は、後述する応答曲面を構築するための材料として用いられる。この工程の中では、解析者が計算結果を通じて、各基本変数が対象事象に与える影響を確認することになるが、解析者の工学的知見や経験に基づいて結果を分析することで、対象事象 Y に関する物理やメカニズムに関する感覚を養うことができる。次に、不確実性解析のプロセスに移る。この工程では、基本変数 X のばらつきを定量化する。例えば、基本変数が量的変数である場合には、その平均値、分布関数、標準偏差などの情報を整備すればよい。また、質的変数である場合にはその出現確率などを整備すればよい。この工程では、基本変数 X に対する経験的な知見や蓄積されているデータベースの情報、および対象とする現場の状況などから、基本変数のばらつきを定量化する。十分にデータが揃っている場合にはそのデータに基づき定量化すればよいが、現実には完全に十分なデータが整備されていることは少なく、工学的な判断に頼らざるを得ない場合が多い。

最後の信頼性解析では、まず、(i) の数値解析で得られた結果を用いて、基本変数 X に対する対象事象 Y の応答曲面を仮定する。具体的には、対象事象 Y の量や確率

などを出力する数学的な関数（応答曲面）を構築する。この関数は、基本変数 X が含まれ、(i) の数値解析の結果と整合するように係数等が決定される。さらに、ここで得られた応答曲面と、(ii) の不確実性解析で定量化された基本変数のばらつきの情報に基づいて、モンテカルロシミュレーション（MCS: Monte Carlo Simulation）を実施する。すなわち基本変数のばらつきを考慮して数多くの基本変数の組み合わせを用意し、それを応答曲面の関数に代入して対象事象 Y の値を計算する。これによって、対象事象の確率密度分布を得ることができる。応答曲面は、(i) の数値解析の結果に基づいて得られたものであるため、それを通じて対象事象の確率密度分布を得るということは、間接的に高度な数値解析や設計ツールに基づいて対象事象の確率密度分布を得ていることになる。

(2) 津波解析による危険度評価への適用

上述の信頼性設計のスキームでは、地盤解析のプロセスとその他のプロセスが独立しているため、解くべき問題に対して解析ツールを変更することが可能である。本研究の内容では、津波解析が地盤解析の部分に該当する。ここでは、スキームを本研究に適用した場合の具体的な流れについて説明する。図-2 に示すように、まず信頼性解析を行う対象事象を決定する。対象事象は、例えば、最大津波高さなどの物理的な量が考えられる。また、ある地点領域に浸水が到達するか否かという選択的なものであってもよい。定量的か選択的かという違いは、応答曲面を構成する数式の種類の違いとなって現れる。

次に、基本変数について検討する。実質的には、この検討は後に続く津波解析の条件設定と強く関係する。なぜなら、津波解析における解析条件や解析パラメータの多くは、解析結果に大きな影響を与えるものであり、これらが応答曲面の基本変数となる可能性が高いためである。そのため、解析を実施する段階で、基本変数の検討を並行して実施するイメージである。ただし、この段階では、基本変数を必ずしも絞り込む必要はない。シミュレーション実施者の工学的判断に基づいて、現象に対して支配的と考えられる解析条件や解析パラメータを変化させて複数ケースのシミュレーションを実施すればよい。シミュレーションは対象事象を観察するための数値解析として位置づけられ、実施者はその数値解析を通して各基本変数が対象事象に与える影響を学習することになる。従って、シミュレーションを実施する前に変化させる解析条件や解析パラメータの種類とその範囲を確定的に設定するよりも、シミュレーションを実施していく中で、出力される結果を観察しながらそれらを決定していく方が効果的かつ現実

図-2 提案する確率論的津波ハザード評価手法

的である。また、このシミュレーションのプロセスにおいては、膨大な量の解析ケースを実施する必要はなく、各基本変数が対象事象に与える傾向を確認することができる程度の解析結果を揃えればよい。なお、このシミュレーションのプロセスでは、調査結果などから解析パラメータなどを推定する際の「変換誤差」が含まれ、加えて、津波解析モデルの「モデル化誤差」も不確実性として存在するが、これらの不確実性については、その定量化のためには別途十分な検証データが必要となる。また、津波解析と並行して、不確実性解析を実施する。これは後述する MCS の入力パラメータを作成するための基礎データとなる基本変数の分布情報（平均値、分散、分布形状）を決定するプロセスである。

最後に、津波解析と不確実性解析の結果に基づいて信頼性解析を実施する。まず、津波解析の結果に基づいて応答曲面を構築する。これは、基本変数を含む対象事象の数学的関数の構築を意味する。津波解析の結果はこの関数式に集約される。津波解析では海底地形や遡上地形の形状を直接的に表現するため、これらの効果も応答曲面には含まれており、同じ対象事象でも解析対象地域によって応答曲面は異なるものとなる。応答曲面を構築した後は、その応答曲面と不確実性解析の中で定量化した基本変数の情報を用いて MCS を実施する。応答曲面を用いることで、膨大な計算ケースの実施が可能となり、断層モデルを逐一変化させて津波解析から対象事象の確率密度分布を得るよりも密な結果を低計算コストで得ることが出来る。また、得られた確率密度分布から対象事象に関する危険度を確率論的に論じることが可能となる。

3. 津波解析

(1) 対象事象と基本変数の検討

本研究では、津波解析における海岸近傍の「最大津波高さ」を対象事象 Y としてハザード評価を実施する。これは、これまでの我が国の経験と知見・様々な研究

から最大津波高さが海岸構造物への被害に密接に関係していると推定されるためである。

次に基本変数を検討する。まずは関与するパラメータを列挙する。津波発生から遡上までの現象の支配因子は様々であり、またそれらは複合的な作用をもたらして津波の規模を変化させる。例えば津波解析における支配因子として、地震発生の過程では地震活動の位置やマグニチュードの大きさなどが挙げられ、津波伝播の過程では津波の初期波形を支配する断層モデルや海底地形データ、潮位、浅水長波式に代表される伝播の支配方程式などが挙げられ、津波遡上の過程では、陸上地形データ、建物や防潮堤・防潮林などを表す遡上抵抗モデル（粗度データや越流モデル）、および遡上時の波の支配方程式などが挙げられる。津波のハザード評価を行う際、これらすべての要因が不確実性を持つことになる。最終的にはすべての不確実性を基本変数 X として与えることが最も望ましいことであるが、信頼性解析を実務で扱う場合には、ある程度その現象を支配しているパラメータにあたりをつけると効率が良い。今村・首藤¹⁹⁾は、津波解析においては主として断層パラメータが最大津波高さや波の指向性に大きく関係していることを明らかにしている。また、原子力土木委員会津波評価部会³⁾は、津波解析に用いる断層モデルの各パラメータを合理的範囲で変化させてパラメトリックスタディを行うことで、各パラメータが最大津波高さに及ぼす影響の程度をまとめている。本研究ではこれに基づき、図-3に示す Satake ら²⁰⁾による東北地方太平洋沖地震の断層面上の時空間的なすべり分布を推定した、55の小断層で構成される断層モデル（Fujii-Satake モデル Ver.8.0）を用い、基本変数 X として、図-4に示す小断層における各断層パラメータの中でも断層の食い違い量の特性に関係が深いと考えられる「すべり量 (Slip)」及び「すべり角 (Rake)」を設定した。なお、図-3における白星は震源、菱形は GPS 波浪計、四角は海底圧力計である。

(2) 解析条件

本解析の中で考えるすべり量とすべり角のばらつきは、表-1に示す各小断層ごとに割り振られた断層パラメータを基準に決定する。表-1では簡単のために、本来断層運動開始から 30 秒間隔毎に計 5 分間の経時変化を与えている各パラメータの総計値を示しており、本解析もその効果を考慮している。時刻歴変化を考慮した詳細なパラメータに関しては、Satake ら²⁰⁾を参照されたい。本研究で行う解析ケースとそのケース名は表-2に示すとおりであり、各小断層のすべり量に対して 0.7, 0.85, 1.0, 1.2, 1.4 を乗じた 5 パターン、及びすべり角に対して -10 度, -5 度, ± 0 度, 5 度, 10 度を加減

図-3 55 個の小断層からなる Fujii-Satake ver.8.0 モデル²⁰⁾

図-4 小断層におけるパラメータの概要

させた 5 パターンを考慮した、計 25 ケースを解析する。このパラメータ幅は、後述するモンテカルロシミュレーションにおいてパラメータが変動する幅を概ねカバーするように設定している。すなわちケース「A3B3」におけるすべり量とすべり角のばらつきは零である。その他の解析条件を表-3に示す。津波の初期波形については、Fujii-Satake モデル Ver.8.0 に対して、Okada の方法²¹⁾を用いて断層モデルから海底地殻変動量の鉛直成分を計算し、初期水位変動量として与える方法を用いている。また、津波伝播の数値計算においては、式 (1) に示す連続の式と、式 (2) および式 (3) に示す非線形長波方程式を用いている。

表-1 Fujii-Satake モデル Ver.8.0 の各小断層のパラメータ

L [m]	W [m]	D [km]	θ [°]	δ [°]	λ [°]	U [m]	Lat. [decimal system]	Lon.
50	25	0	193	8	81	10.699	40.198	144.350
50	25	0	193	8	81	20.492	39.738	144.331
50	25	0	193	8	81	36.079	39.300	144.200
50	25	0	193	8	81	30.647	38.862	144.069
50	25	0	193	8	81	51.893	38.424	143.939
50	25	0	193	8	81	69.141	37.986	143.810
50	25	0	193	8	81	31.715	37.547	143.682
50	25	0	193	8	81	22.450	37.135	143.400
50	25	0	193	8	81	0.759	36.730	143.070
50	25	0	193	8	81	4.333	36.325	142.740
50	25	0	193	8	81	5.905	35.905	142.504
50	25	3.5	193	8	81	0.840	40.248	144.066
50	25	3.5	193	8	81	2.982	39.788	144.049
50	25	3.5	193	8	81	13.705	39.350	143.920
50	25	3.5	193	8	81	22.425	38.912	143.790
50	25	3.5	193	8	81	37.381	38.474	143.662
50	25	3.5	193	8	81	14.932	38.036	143.535
50	25	3.5	193	8	81	19.127	37.597	143.408
50	25	3.5	193	8	81	10.108	37.185	143.128
50	25	3.5	193	8	81	0.000	36.780	142.799
50	25	3.5	193	8	81	1.827	36.375	142.471
50	25	3.5	193	8	81	2.531	35.955	142.236
50	50	7	193	10	81	1.342	40.298	143.782
50	50	7	193	10	81	0.225	39.838	143.767
50	50	7	193	10	81	6.653	39.400	143.639
50	50	7	193	10	81	16.896	38.962	143.512
50	50	7	193	10	81	26.552	38.524	143.385
50	50	7	193	10	81	24.674	38.086	143.260
50	50	7	193	10	81	18.059	37.647	143.135
50	50	7	193	10	81	4.829	37.235	142.856
50	50	7	193	10	81	0.000	36.830	142.529
50	50	7	193	10	81	0.606	36.425	142.201
50	50	7	193	10	81	2.349	36.005	141.968
50	50	15.6	193	12	81	0.652	40.398	143.216
50	50	15.6	193	12	81	1.059	39.938	143.205
50	50	15.6	193	12	81	0.000	39.500	143.081
50	50	15.6	193	12	81	13.144	39.062	142.957
50	50	15.6	193	12	81	15.548	38.624	142.834
50	50	15.6	193	12	81	21.579	38.186	142.711
50	50	15.6	193	12	81	10.872	37.747	142.590
50	50	15.6	193	12	81	10.525	37.335	142.314
50	50	15.6	193	12	81	2.122	36.930	141.990
50	50	15.6	193	12	81	0.080	36.525	141.665
50	50	15.6	193	12	81	1.966	36.105	141.435
50	50	26	193	16	81	0.816	40.497	142.654
50	50	26	193	16	81	0.000	40.037	142.646
50	50	26	193	16	81	0.000	39.599	142.526
50	50	26	193	16	81	2.813	39.161	142.405
50	50	26	193	16	81	2.412	38.723	142.285
50	50	26	193	16	81	14.263	38.285	142.166
50	50	26	193	16	81	2.674	37.846	142.048
50	50	26	193	16	81	4.475	37.434	141.775
50	50	26	193	16	81	0.000	37.029	141.453
50	50	26	193	16	81	2.751	36.624	141.132
50	50	26	193	16	81	2.553	36.204	140.905

表-2 解析ケース

		断層すべり角 (Rake) の増分				
		-10度	-5度	0度	5度	10度
断層すべり量 (Slip)	70%	A1B1	A1B2	A1B3	A1B4	A1B5
	85%	A2B1	A2B2	A2B3	A2B4	A2B5
	100%	A3B1	A3B2	A3B3	A3B4	A3B5
	120%	A4B1	A4B2	A4B3	A4B4	A4B5
	140%	A5B1	A5B2	A5B3	A5B4	A5B5

表-3 解析条件の一覧

項目	内容
計算格子間隔 ※中央防災会議 2013 の設定に 準ずる	領域 1 : 2430[m] 領域 2 : 810[m] 領域 3 : 270[m] 領域 4 : 90[m]
境界条件	沖側境界 : 透過境界 陸側境界 : 完全反射境界
計算潮位	地震発生時の潮位 (T.P. -0.57[m])
基礎方程式	非線形長波方程式
計算手法	Leap-Frog 法及び Staggered 格子
対象地震津波	東北地方太平洋沖地震
断層モデル	Fujii-Satake モデル Ver8.0
津波初期波源	Okada(1992) の方法により 断層モデルから地殻変動量 及び水位変動量を計算
計算再現時間	地震発生から 3 時間

ここに、 η は水位、 D は全水深、 g は重力加速度、 n は Manning の粗度係数、 M と N は x 方向および y 方向の流量フラックスである。また、計算スキームには Leap-Frog 法及び Staggered 格子に基づく平面 2 次元浅水流モデル²²⁾を採用した。本解析 25 ケースでは、図-5, 6 に示す宮城県の仙台・石巻と岩手県の釜石の計 3 点を観測点として設けた。これに応じて計算格子は、図-7, 8 に示すような、2013 年中央防災会議の報告書²³⁾に準じた 2430[m], 810[m], 270[m], 90[m] 間隔のメッシュを作成し、津波波源から対象に向かって細分化するようにネスティングした。陸域・海域の標高をメッシュに補間する際には、2430[m], 810[m], 270[m] メッシュには陸・海底地形をデータセットとして含む ETOPO1²⁴⁾を補間した。また、90[m] メッシュには、詳細な陸域データとして国土地理院が提供する 10 mDEM データ²⁵⁾、及び詳細な近海の海底地形データとして M7000 シリーズの等水深線データ²⁶⁾を補間し、これらで対応できない範囲は ETOPO1 で補間した。なお、陸海境界は、海域での実現象の再現性が比較的に透過境界よりも高い完全反射境界としている。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M^2}{D} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{MN}{D} \right] \\ + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{MN}{D} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{N^2}{D} \right] \\ + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

図-5 仙台・石巻における最大津波高さの観測点

図-7 宮城県沖のメッシュ領域

図-6 釜石における最大津波高さの観測点

図-8 岩手県沖のメッシュ領域

(3) 解析結果

a) 津波解析モデルの妥当性の検証

本研究に用いる津波解析モデルの妥当性を確認するため、東北地方太平洋沖地震時の津波の実測値と Fujii-Satake モデルの断層パラメータの基準値を用いた津波解析の計算値における水位変動量の時刻歴を比較した。実測値としては、国土交通省港湾局の提供する NOW-PHAS (Nationwide Ocean Wave information network for Ports and HARbourS) の GPS 波浪計観測データ²⁷⁾を用いた。観測位置は、図-9 に示す岩手県北部沖 (No.1)、岩手県中部沖 (No.2)、岩手県南部沖 (No.3)、宮城県北部沖 (No.4)、宮城県中部沖 (No.5) の5点とした。検証結果を図-10 に示す。いずれの観測点においても解析結果が実測値を概ね再現出来ており、本稿に用いた津波解析ツールの妥当性を確認できた。なお、ここでの更なる誤差抑制は数値解析技術の課題となるが、本研究の手法では後にモデル化誤差としてこれを定量化している。その詳細については後述するものとする。

b) 各解析ケースの結果

本解析 25 ケースにおける、津波発生から3時間までの間での各地域の最大津波高さの分布図を図-11, 12 に、3 地点の最大津波高さをまとめたものを表-4 に示す。こ

図-9 水位変動量の観測点 No.1～No.5 (Google Earth に加筆)

れらの結果は、どの地点でも概ねすべり量が支配的であることを示している。

4. 不確実性解析 (基本変数のばらつきの定量化)

ここでは、不確実性解析について説明する。先述の用に、不確実性解析では、基本変数のばらつきを定量化する作業であり、この定量化された情報は、その後

図-10 各観測点における水位変動量の時刻歴

表-4 各解析ケースの計算結果

Case	すべり量 (Slip) [×100(%)]	すべり角 (Rake) [×100(%)]	最大津波高さ		
			仙台 [m]	石巻 [m]	釜石 [m]
A1B1	0.700	0.877	7.911	4.626	9.845
A1B2	0.700	0.938	7.808	4.780	9.693
A1B3	0.700	1.000	7.759	4.897	9.484
A1B4	0.700	1.062	7.590	4.982	9.210
A1B5	0.700	1.123	7.496	5.033	8.951
A2B1	0.850	0.877	9.255	5.516	11.571
A2B2	0.850	0.938	9.273	5.694	11.345
A2B3	0.850	1.000	9.272	5.834	11.077
A2B4	0.850	1.062	8.986	5.927	10.757
A2B5	0.850	1.123	8.702	5.982	10.369
A3B1	1.000	0.877	10.658	6.384	13.210
A3B2	1.000	0.938	10.612	6.598	12.956
A3B3	1.000	1.000	10.654	6.762	12.681
A3B4	1.000	1.062	10.281	6.878	12.308
A3B5	1.000	1.123	10.205	6.943	11.828
A4B1	1.200	0.877	12.732	7.487	15.468
A4B2	1.200	0.938	12.662	7.744	15.161
A4B3	1.200	1.000	12.603	7.942	14.836
A4B4	1.200	1.062	12.331	8.085	14.396
A4B5	1.200	1.123	11.926	8.171	13.826
A5B1	1.400	0.877	14.581	8.552	17.827
A5B2	1.400	0.938	14.582	8.823	17.516
A5B3	1.400	1.000	14.434	9.057	17.109
A5B4	1.400	1.062	14.287	9.226	16.520
A5B5	1.400	1.123	13.875	9.338	15.906

に続くモンテカルロシミュレーションによる信頼性評価の入力情報となる。本研究では、すべり角とすべり量の2つの物理量を基本変数として設定しているため、これらのばらつきを定量化する。具体的には、すべり角とすべり量の確率密度関数を推定する作業であり、平均値、標準偏差、分布関数の情報を整理することになる。この情報整備には、実測データに基づく推定と工学的知見や経験に基づく推定の2種類のアプローチが

図-11 宮城県沖における最大津波高さの分布

図-12 岩手県沖における最大津波高さの分布

存在する。実測データが十分にデータベース化されている場合は、その情報から推定すればよいが、十分な情報が揃っていない場合は、経験的な知見や工学的判断に頼ることになる。本研究では、断層パラメータであるすべり量とすべり角について、その平均値、標準偏差、分布関数を設定する必要がある。

まず、ばらつきの与え方と平均値について説明する。津波解析の解析条件の部分で示したとおり、本研究で用いた断層モデルの Fujii-Satake モデル Ver.8.0 は、55の小断層を含んでおり、各小断層はすべり角とすべり量の値を持つ。すべり角は全ての小断層に対して共通となっているが、すべり量は異なる値を持っている。そこで、シミュレーションの際にパラメータを変動させた考え方と同様に、Fujii-Satake モデルのパラメータ値を平均値として、その周辺にばらつきが存在すると思われる。そのため、基本変数であるすべり角とすべり量の平均値は Fujii-Satake モデルのパラメータ値そのものとなり、先述の応答曲面の説明の中で示したとおり、基本変数を Fujii-Satake モデルのパラメータ値で正規化し

た値を用いるため、平均値は 1.0 となる。また、ばらつきは平均値に対する割合として表現される。つまり、すべり角とすべり量に関して、55 の小断層の中で一律に変化すると仮定している。また、これら 2 つの基本変数の分布関数の形状については、実現象において特別考慮しなければならないばらつきの偏りは無いと仮定して、正規分布で評価することとした。

最後に標準偏差の設定根拠について説明する。すべり量の標準偏差は、平均値に対して 10% の標準偏差を意味する 0.1 とした。正規分布で考えた場合、分布は標準偏差の 3 倍程度の広がりを持つため平均値に対して 30% 程度のばらつきを考えていることになる。この設定根拠は、Kanamori²⁸⁾ のモーメントマグニチュード M_w に対してばらつきを与えたことに基づいている。 M_w は、断層パラメータの諸量の関数として定義される地震モーメント M_0 と以下の式で関係付けられる。

$$\log M_0 = 1.5M_w + 9.1 \quad (4)$$

ここで、

$$M_0 = \mu DS \quad (5)$$

であり、 D は断層のすべり量、 S は断層面積、 μ は震源断層付近の媒質の剛性率である。モーメントマグニチュードのばらつきについては、断層面積の同じ既往地震を考慮すると ± 0.1 程度であることが、原子力土木委員会津波評価部会によって示唆されている⁵⁾。式 (4) と式 (5) において、 μ と S は決定されているとして、 M_w が 0.1 増加したとすると D が $10^{0.15} = 1.41$ 倍となることから、すべり量の変動幅は 70~140% 程度となることがわかる。従ってこの変動幅を表現するために、すべり量の標準偏差を 0.1 とした。すべり角についても、同委員会が、断層の走向を ± 10 度変化させた確率論的評価の試算を行っており、結果的にすべり角が ± 10 度程度変化しているため、本研究でもこの程度のばらつきを考慮する。標準偏差の 3 倍程度の広がりを持つと考え、すべり角の標準偏差を 0.04 に設定した。この場合、すべり角の変動量は 90~110% 程度 (± 10 度程度) となる。以上で説明した内容を整理したものが表-5 である。

表-5 入力パラメータの分布情報

不確実パラメータ	平均	標準偏差	分布形状
すべり量	1.0	0.1	正規分布
すべり角	1.0	0.04	正規分布

5. 信頼性解析

(1) 応答関数の構築

これまでに、仙台・石巻・釜石の 3 地点に関する津波解析の結果を示した。以降では、これらの結果に基づいて、最大津波高さの応答曲面を構築する。本研究では、断層のすべり量とすべり角の 2 種類の基本変数を設定しているため、これらを含む応答曲面を考える。なお、地形などの影響によって、各地点ですべり量とすべり角が最大津波高さに与える影響の度合いは異なると考えられる。そのため、各地点にそれぞれ応答曲面を構築するものとした。先述のように、表-4 は、津波解析で得られた各地点のすべり量、すべり角、最大津波高さの関係の一覧を示したものである。このデータに基づいて各地点の応答曲面を構築する。まず、応答曲面の基本形として、下記のものを採用した。

$$H_{\max} = aU + b\lambda + cU\lambda + d \quad (6)$$

ここで、 $H_{\max}$ は最大津波高さ、 U はすべり量、 λ はすべり角であり、 a 、 b 、 c 、 d は未定係数である。未定係数は、表-4 の結果に整合するように決定される。応答曲面の基本形については、基本変数のべき乗項などの存在も考えられる。しかしながら、そのような非線形性の強い項を含む応答曲面の場合、非物理的な挙動を示す可能性が高くなる。特に、津波解析で確認した基本変数の範囲外の領域で予想外の挙動を示す危険性がある。もちろん、物理的に非線形項を考慮すべき理由があれば基本形に含めるべきではあるが、表-4 の結果を見る限り、応答値（最大津波高さ）は基本変数の変化に対して概ね線形的であることから、上式の形式で十分と考えた。また、すべり量とすべり角の積 $U\lambda$ の項（以降、クロス項と呼ぶ）を、念のため基本形に含めた。

ここからは、本研究の中で得られた実際の応答曲面を示しながら説明を進める。先述の応答曲面の基本形には、すべり量の項、すべり角の項、クロス項、切片の 4 つの項が存在する。このうち切片を除いた 3 つの項の組み合わせにより、6 種類の応答関数が考えられる。通常、多数の変数が存在する条件で最適な応答曲面を求めるためには、変数増加法、変数減少法、ステップワイズ法などの手法を用いて、効率的に最適解を求めるが、本研究では、変数が少ないため、6 種類すべてについて重回帰分析を行った。表-6~8 は、各地点（仙台、石巻、釜石）の計算結果から得られた応答曲面の係数と t 値、および各応答曲面の AIC (Akaike's Information Criterion)²⁹⁾ の値を示しており、AIC が最小値をとる応答曲面を最適なものとして選択した。その結果、全ての地点で同じ関数形（表中の AIC の値にアンダーラ

表-6 重回帰分析より得られた応答曲面（仙台）

関数形	係数(上段は係数, 下段は t 値)				R^2	r.s.e. [m]	AIC
	A	b	c	d			
$H_{\max} = aU + b\lambda + cU\lambda + d$	11.238 11.014	-0.596 -0.554	-1.726 -1.698	1.618 1.497	0.998	0.110	-33.7
$H_{\max} = aU + b\lambda + d$	9.512 102.877	-2.374 -9.032		3.396 12.108	0.998	0.115	-32.5
$H_{\max} = aU + d$	9.516 48.476			1.022 4.917	0.990	0.244	4.2
$H_{\max} = b\lambda + d$		-2.374 -0.421		13.193 2.329	-0.036	2.464	119.9
$H_{\max} = aU + cU\lambda + d$	11.785 47.126		-2.273 -9.701	1.022 11.048	0.998	0.108	-35.5
$H_{\max} = b\lambda + cU\lambda + d$		-12.084 -17.71	9.427 41.93	13.193 20.48	0.987	0.280	121.9

表-7 重回帰分析より得られた応答曲面（石巻）

関数形	係数(上段は係数, 下段は t 値)				R^2	r.s.e. [m]	AIC
	a	b	c	d			
$H_{\max} = aU + b\lambda + cU\lambda + d$	3.630 6.918	0.0005 0.000	2.285 4.371	0.759 1.365	0.999	0.057	-67.0
$H_{\max} = aU + b\lambda + d$	5.914 96.000	2.353 14.440		-1.595 -8.530	0.998	0.076	-52.8
$H_{\max} = aU + d$	5.914 32.354			0.759 3.917	0.978	0.227	0.7
$H_{\max} = b\lambda + d$		2.353 0.670		4.497 1.276	-0.023	1.532	96.2
$H_{\max} = aU + cU\lambda + d$	3.630 28.430		2.285 19.100	0.759 16.060	0.999	0.055	-69.0
$H_{\max} = b\lambda + cU\lambda + d$		-3.710 -15.210	5.887 73.200	4.497 19.520	0.996	0.100	-39.2

表-8 重回帰分析より得られた応答曲面（釜石）

関数形	係数(上段は係数, 下段は t 値)				R^2	r.s.e. [m]	AIC
	a	b	c	d			
$H_{\max} = aU + b\lambda + cU\lambda + d$	16.470 21.195	0.204 0.249	-5.723 -7.393	1.680 2.041	0.999	0.084	-47.0
$H_{\max} = aU + b\lambda + d$	10.747 85.760	-5.690 -15.970		7.575 19.920	0.997	0.156	-17.3
$H_{\max} = aU + d$	10.747 24.710			1.885 4.090	0.962	0.540	44.0
$H_{\max} = b\lambda + d$		-5.690 -0.892		18.640 2.911	-0.009	2.785	126.1
$H_{\max} = aU + cU\lambda + d$	16.282 85.990		-5.535 -31.200	1.885 26.900	0.999	0.082	-49.3
$H_{\max} = b\lambda + cU\lambda + d$		-16.631 -17.610	10.622 34.130	18.644 20.910	0.981	0.388	-28.4

インがついているもの) が最適な応答曲面として選択された。各地点でそれぞれ別々の関数形が選択される場合、基本変数の選択に問題がある可能性があるため、応答曲面が物理的意味を持つかどうかを考える上では、この結果は良好であると考えられる。なお、表中に示す通り、選択された応答曲面における各解析ケースの計算値と応答曲面との残差標準偏差 (r.s.e.) が最大津波高さに対して数 % 程度であり、回帰式のあてはまりの良さを表す自由度調整済み決定係数 R^2 も高いことから、津波解析結果から応答曲面を構築する際の誤差は考慮しないものとした。図-13~15 は、各地点の最適な応答曲面を、すべり量、すべり角、最大津波高さの 3 軸空間で表現したものである。青い面が構築した応答曲面を表し、赤い点は解析 25 ケースの津波解析による計算値を表す。なお、すべり量とすべり角の軸範囲には、表-5 における分布に対応していることを明確にするた

図-13 構築した仙台の応答曲面

図-14 構築した石巻の応答曲面

図-15 構築した釜石の応答曲面

めに、Fujii-Satake モデルの基準値で正規化した値を用いている。表-6~8 および図-13~15 を見ると、3 点全てにおいて、すべり量が増大するに従い最大津波高さが増大する傾向がある。すべり量が海底地殻の鉛直変位に大きく関係する量であるため自明な結果を確認できたといえる。一方で、すべり角に関しては石巻の応

図-16 モデル化誤差のヒストグラムとその正規分布

表-9 基準とした津波痕の観測データ

	津波痕の座標位置		津波痕 の高さ [m]
	緯度 [decimal system]	経度 [decimal system]	
仙台	140.986	38.2183	12.129
	140.986	38.2187	11.203
	140.985	38.2184	9.317
石巻	141.287	38.4139	6.902
釜石	141.892	39.2650	11.4262

答曲面は、仙台と釜石に比べて特異な性質を持つことがわかる。すべり角が増大すると最大津波高さが減少する仙台と釜石に対して、石巻では最大津波高さが増加している。この違いは、応答曲面の中では、クロス項の係数の符号の違いとして現れる。この理由について考えると、最大津波高さの取得地点が地震波源から遠く、陸に近い点であるため、断層のすべり量やすべり角の変化だけが、石巻の最大津波高さに影響しているわけではないといったことが考えられる。従って、海底地形の変化による波の浅水変形、反射や屈折、さらには断層モデルと石巻との位置関係が半島を挟む地形となっているために起こる回折など、非線形効果の影響が応答曲面に含まれていることが考えられる。このような地形特性を傾向として得られることは、津波ハザード評価の議論を進めていく上で貴重な情報となる。

(2) モデル化誤差の表現

本研究では、実現象に対する数値解析の誤差を定量化し、その影響を応答曲面に含めて表現することで、数値解析手法のモデル化誤差についても考慮するものとした。すなわち、応答曲面を次のように再定義する。

$$H_{\max} = aU + b\lambda + cU\lambda + d + M_{\text{err}} \quad (7)$$

ここに、

$$M_{\text{err}} = H_{\text{obs}} - H_{\text{sim}} \quad (8)$$

図-17 仙台的確率密度分布と超過確率

図-18 石巻の確率密度分布と超過確率

図-19 釜石の確率密度分布と超過確率

である。ここで、 M_{err} はモデル化誤差である。また右辺は、図-10に示す水位変動量の各時刻における実測値と計算値の差を表す。本研究では、ある程度妥当性が検討できている点での誤差をモデル化誤差として定量化するため、観測5地点全ての M_{err} を合わせて考慮した分布を算出した。本来であれば、モデル化誤差を各地点の最大津波高さをを用いた正規化によって無次元化し、任意の評価地点に適用することが望ましい。しかしながら、本研究では、用いる観測地点が5地点のみであるため、モデル化誤差の分布の評価が難しい。そこで、本研究では、上述のように図-10の時系列データ

全体の実測値と解析値の平均的な差をモデル化誤差として評価した。本研究におけるモデル化誤差の扱いについては、不完全なものであることを前提として、全く考慮しないよりは良いという判断により用いている。図-16が得られた分布であり、モデル化誤差は正規分布で表現できると考えられ、この場合の平均値は0.49[m]、標準偏差は0.76[m]となった。なお、図-16には、得られた平均値と標準偏差で表現した正規分布を重ねて示している。

(3) モンテカルロシミュレーション

ここまでで説明した応答曲面と定量化した基本変数のばらつきの情報を用いて、モンテカルロシミュレーションを行う。具体的には、定量化したすべり角とすべり量のばらつきの情報に基づいて乱数を発生させ、そこから任意の基本変数の組み合わせ生成し、それを応答曲面の関数に代入することで、最大津波高さを計算する作業を繰り返す。これにより、最大津波高さの確率密度分布が得られる。本研究では、試行回数を1万回として確率密度分布を求めた。

(4) 超過確率の算出

前節で確率密度分布に対して、基準値となる最大津波高さを設定することで、その基準値に対する超過確率が算出できる。本研究では算出した超過確率の妥当性を概ね検討し得るものとして、東北地方太平洋沖地震の津波の痕跡高を基準値とし、超過確率を算出した。基準値には、表-9に示す東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループが提供する現地踏査による津波の痕跡高の観測値³⁰⁾を用いた。なお仙台については隣接する痕跡高のデータにばらつきがあったため、3地点の平均値10.883[m]を採用した。超過確率を算出した結果を図-17~19に示す。結果として、仙台及び石巻においてはその中央値が概ね津波痕の観測値と一致し、仙台的超過確率が54.6%、石巻の超過確率が60.6%となった。今回の断層モデルは東北地方太平洋沖地震時のものを想定しているため、超過確率としては概ね妥当な結果であると考えられる。一方、釜石に関しては超過確率が89.8%となり、想定する最大津波高さが実際のものよりも大きいものとなった。この理由として、解析条件に陸側境界に完全反射境界を用いたため、入り組んだ湾形状の釜石では湾内で波が増幅し、実際のものよりも過大に評価されたためと考えられる。

6. おわりに

本研究では、昨今要求される大きな津波外力の適切な評価を達成するため、現象の確率場を数値解析の情

報から定量的に表現できる枠組みの構築を目的とした。そこで、地盤工学分野で確立されている信頼性解析の枠組みを基礎として、津波ハザード評価に対して数値解析の情報を直接的に関係付けるアプローチを試みた。その結果、得られた成果を以下にまとめる。

- 近年の高度な数値解析技術によって得られる詳細な工学的情報を確率場に対してより密に与え、かつそれを低計算コストで達成するための評価手法を提案した。
- 提案する枠組みに基づいて実際に津波ハザード評価を行った結果、構築した応答曲面に地形の影響が考慮された。従って不確実性と地域特性との関係性が得られ、本枠組みを通して数値解析結果を津波ハザード評価に適用することで、詳細かつ議論する上で貴重な工学的情報を提供することを確認した。

本研究では、不確実性として、現象を強く支配するすべり量とすべり角に着目して検証を行ったが、本来は定量化できる全ての不確実性を考慮するのが望ましい。この枠組みは、そのような考慮すべき膨大な不確実性を、多変量解析により効率的に検討できるのも利点となる。また、提案する枠組みの実施例を通して、解析条件や解析パラメータを定量的に評価しながら津波解析を重ねることで、実施者自身が体系的に工学的知識や判断力を養うことができる点も特徴である。

今後、より多くの不確実性を考慮して信頼的な検証を重ねると共に、実務利用を想定した結果の取り扱い方法を詳細に検討していくことが課題となる。

参考文献

- 1) Cornell, C. A.: Engineering seismic risk analysis, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968.
- 2) 亀田弘行:地震動の設定と発生確率, 特集—原子力発電所の地震時危険度の確率論的評価, 日本原子力学会誌, Vol.28, No.1, pp.6-11, 1986.
- 3) 原子力土木委員会津波評価部会: 原子力発電所の津波評価技術, 土木学会, 2002. (<http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/5>, 2015年10月5日アクセス)
- 4) 原子力土木委員会津波評価部会: 津波評価手法の高精度化研究, 土木学会論文集 B, Vol.63, No.2, pp.168-177, 2007.
- 5) 原子力土木委員会津波評価部会: 確率論的津波ハザード解析の方法, 土木学会, 2011. (<http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/node/39>, 2015年10月5日アクセス)
- 6) 原子力安全基盤機構: 確率論的手法に基づく基準津波策定手引き, *JNES-RE-Report-Series*, 2013-2041, 2014.
- 7) 相田勇: 三陸沖の古い津波のシミュレーション, 東京大学地震研究彙報, Vol.52, pp.71-101, 1977.
- 8) 越村俊一, 香月恒介, 茂渡悠介: GPU コンピューティングによる津波解析の高速化とリアルタイム浸水予測, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.191-195, 2010.

- 9) Cornell, C. A.: First-order uncertainty analysis of soil deformation and stability, *Proc. 1st Int. Conf., Application of Statistic and Probability in Soil and Structural Engineering, Hong Kong*, pp.130-143, 1971.
- 10) Cambou, B.: Application of first-order uncertainty analysis in the finite element method in linear elasticity, *Proc. 3rd ICASP, Aachen*, pp.67-87, 1975.
- 11) 中桐滋, 久田俊明, 糸谷康宏: 確率有限要素法による形状に不確かさを有する構造の解析, *日本機械学会論文集 (A編)*, Vol.48, No.427, pp.339-348, 1982.
- 12) 桜井春輔, 土居康成: 有限要素法による斜面の信頼性解析, *土木学会論文集*, No.330, pp.87-97, 1983.
- 13) 鈴木誠, 石井清: 確率有限要素法による斜面安定解析, *土木学会論文集*, No.364/III-4, pp.199-208, 1985.
- 14) Zhang, J., Zhang, L. M. and Tang, W. H.: Kriging numerical models for geotechnical reliability analysis, *Soils and Foundations*, Vol.51, No.6, pp.1169-1177, 2011.
- 15) 本城勇介, 大竹雄, 原隆史: ETC10 例題のレベル III 信頼性設計, *JCOSSAR 2011 論文集*, pp.615-622, 2011.
- 16) Honjo, Y.: Challenges in geotechnical reliability based design, *Proceedings of 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk*, pp.11-27, 2011.
- 17) 大竹雄, 本城勇介: 応答曲面を用いた実用的な地盤構造物の信頼性設計法: 液状化地盤上水路の耐震設計への適用, *土木学会論文集 C (地圏工学)*, Vol.68, No.1, pp.68-83, 2012.
- 18) 森口周二, 大竹雄, 高瀬慎介, 寺田賢二郎, 小坂祐司, 堀内克, 沢田和秀, 八嶋厚: 個別要素法による落石の確率論的危険度評価, *地盤工学ジャーナル*, Vol.10, No.4, 2015.
- 19) 今村文彦, 首藤伸夫: 津波高さに及ぼす断層パラメータ推定誤差の影響, *海岸工学論文集*, Vol.36, pp.178-182, 1989.
- 20) Satake, K., Fujii, Y., Harada, T. and Namegawa, Y.: Time and space distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.103, No.2B, pp.1473-1492, 2013.
- 21) Okada, Y.: Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.82, No.2, pp.1018-1040, 1992.
- 22) 後藤智明, 小川由信: Leap-Frog 法を用いた津波の数値計算法, *東北大学工学部土木工学科*, pp.52, 1982.
- 23) 内閣府: 南海トラフの巨大地震モデル検討会 (第二次報告), 津波断層モデル編 - 津波断層モデルと津波高・浸水域等について -, 2012. (<http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/model/>, 2015 年 10 月 5 日アクセス)
- 24) Amante, C. and Eakins, B. W.: ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis, *NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24*, National Geophysical Data Center, NOAA, 2009. doi:10.7289/V5C8276M [August 1, 2014].
- 25) 国土地理院: 基盤地図情報ダウンロードサービス, <http://www.gsi.go.jp/kiban/>
- 26) 日本水路協会: 海図ネットショップ, <http://www.jha.or.jp/shop/>
- 27) 国土交通省港湾局 HP: 全国港湾海洋波浪情報網 (ナウファス), <http://www.mlit.go.jp/kowan/nowphas/>
- 28) Kanamori, H.: The energy release in great earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, Vol.82, No.20, 1977.
- 29) Akaike, H.: Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, *Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory*, Petrov, B. N. and Caski, F. (eds.), Akademiai Kiado, Budapest, pp.267-281, 1973.
- 30) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake Tsunami Information, <http://www.coastal.jp/tjt/index.php>

(2015. 12. 8 受付)

NUMERICAL-ANALYSIS-AIDED PROBABILISTIC TSUNAMI HAZARD EVALUATION USING RESPONSE SURFACE

Takuma KOTANI, Shinsuke TAKASE, Shuji MORIGUCHI, Kenjiro TERADA,
Yo FUKUTANI, Yu OTAKE, Kazuya NOJIMA and Masaaki SAKURABA

This study presents a new framework of the probabilistic tsunami hazard evaluation which enables us to use numerical simulation effectively. The basic idea of the framework had been proposed for the reliability analysis of geostructures, and the key issue of the framework is use of the response surface which obtained from the results of numerical simulations. In this study, the response surface of the tsunami height is obtained from the results of the tsunami simulation. In addition, uncertainties related to tsunami simulations are quantified. By using the framework, we can create an environment in which the Monte Carlo Simulation can be performed based on highly-developed numerical simulations. The proposed framework is finally applied to the probabilistic evaluation of the tsunami that was induced by the great east Japan earthquake. The probability density distributions of tsunami height at Sendai, Ishinomaki, and Kamaishi were evaluated with consideration of uncertainties of some fault parameters and a modeling error of the numerical simulation. The obtained results indicate that the framework is effective for the probabilistic tsunami hazard evaluation.