

臨海都市域に來襲する津波の統合シミュレーション開発

今村文彦*・藤原 誠**・進藤一弥**・市村 強***

本研究は、地震発生から臨海都市部を襲う津波に対して、被害を推定できる統合型シミュレーションの開発を目指したものである。レーザ・プロファイラーを利用して現在入手可能な最小分解の陸上地形データを作成し、地震動、津波の浸水、人間行動をシミュレーションできるモデルを開発した。このモデルは、複合利用された臨海都市域である仙台港周辺に適用し、対象領域の陸上構造物の地盤からの高さの頻度分布解析からメッシュサイズの違いによる浸水範囲の違いを説明できることが分かった。また、避難開始時間を変化させたシミュレーションを実施し、僅か 6 分の違いが避難率がゼロから 100%まで変化する事が示された。

1. はじめに

チリ津波以降の防災対策の整備と高度成長により、日本の沿岸地帯の状況は急速に変貌した。過去の津波時には存在しなかった様々な施設が沿岸に建設され、沿岸での里浜作りやレジャーなどの利用も高まっている。これまでの防災対策は過去の事例に基づいてなされてきたため、津波の洗礼を受けていない地域や施設については、事例経験ではなく想像力に従って対策を講じなければならない。特に、懸念されているのが、臨海工業地帯での新しい被災パターンであり、大規模集客施設、多様な沿岸利用者、大量な可燃物、大型船舶、高密度な交通網さらには、複雑な地下空間などの被害が重要であると考えられているが、これらを十分に取り入れた解析手法はまだ提案されていない。

そこで、本研究は、GIS データを用いた小谷ら(1998)の手法を大きく改良し、現在入手可能な地形データを利用して、複雑な臨海都市港湾における津波浸水計算を実施する。対象箇所に対して、どのように評価体制のデザインをし、データや解析手法を融合させていくかが重要であると考えられる。ここでは港湾周辺部において、避難行動シミュレーションおよび地震動シミュレーションを融合させ、臨海部での津波災害の統合型モデルの構築を目指す。

2. 過去の沿岸域での被害と将来の被害予測

(1) 近年の我が国での津波被害

チリ津波来襲以降、近年の我が国の津波災害を考えた場合、3つの大きな事例がある。1983 年日本海中部地震津波、1993 年北海道南西沖地震津波、2003 年十勝沖地震津波である。それぞれ発生規模・時間帯・被害形態などが違うが、いままでの津波対策の基本を修正せざるを得ない教訓が残された。まずは、人的被害に関しては、そ

の地域に住んでいる住民以外に、沿岸利用者、工事従事者など多彩な人々が海岸におり被災し、また今後その可能性が高いことが挙げられる。また、家屋・構造物被害においては、津波からの直接被害の他に、浮遊物(船舶、木材、ブロック)による被害拡大、大規模な火災の発生(青苗地区での大規模火災:189 棟焼失, 5.1 ha)が指摘されている(今村・高橋, 2004)。

(2) 将来での被害予測

高度に利用されている臨海都市域・港湾工業地帯では、(1)の事例にあるように、新しいタイプの被害形態が発生しており、様々な利用形態がある都市域については、想像もつかない高い災害ポテンシャルが内在し顕在化している(中央防災会議, 2003)。この状況を少しでも明確化させるために、本研究では、表-1 に示すように地域特性を把握するいくつかの項目を整理した。これらは地域を選定した際に、チェックすべき事項(定量的な評価も必要である)である。なお、表-1 には、被害想定のためのシナリオの事例も示している。

表-1 臨海都市域での被害シナリオ作成のための項目

		確認項目
土地利用形態	陸上	住宅、工場・倉庫、インフラ、道路、大規模集客施設、コンテナ、車両、地下空間、防災施設の機能性、避難施設、貯木場
	海域	小型・大型船舶、木材(貯木場)、水産関係(養殖)
構成員	常時	住民、従業員
	非常時	沿岸利用者(つり客、サーファー)、訪問者
災害のシナリオ例		・陸上・沿岸域での人的被害 ・家屋・構造物の被害、船舶・養殖への被害 ・2 次被害(火災発生、漂流物の流出)の発生 ・交通・通信網の停止

3. 津波被害の統合型シミュレーション

(1) 全体のコンセプト

現在入手可能な陸上地形データ(レーザ・プロファイ

* 正会員 工 博 東北大学教授 大学院工学研究科附属災害制御研究センター

** 学生会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻

*** 正会員 博(工) 東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻

ラー)を元に、津波の遡上計算を実施し、この結果を避難行動シミュレーションの入力データとして与えて、人的被害推定手法を開発する。従来は、津波計算にはメッシュ・データ(越村ら, 2003)、避難シミュレーションにはノード・リンクデータ(今村ら, 2001; 島田ら, 1999; 越村ら, 2003)を用いて、結果の交換は空間的な補間で行ってきたが、ここでは、メッシュデータに完全に一致させ、流れや浸水高さの情報を詳細に与えることとする。

(2) 対象

対象領域は、高い発生確率で発生が懸念されている宮城県沖地震津波の影響を受ける仙台港および周辺である(図-1, 写真-1)。この地域では表-1 中の下線を引いた項目が該当する。夢メッセという大規模集客施設、中央公園などがあり、多くの利用者が集まる。レーザ・プロファイラー(図-2 参照)により 2 m 格子間隔の地盤高さ情報を作成する。ここでは、2 次元データ曲率から人工構造物と自然地形を分離し、シミュレーションの入力データとして用いる。ここで想定・対象とされる地震は、宮城県沖地震や昭和三陸地震になる。

(3) 地震動の解析

得られた 2 m 格子間隔の高さデータから 3 次元 CAD データを生成し、これを用いて数値シミュレーションモデルを作成する。より高精度かつ高分解能な解析のため



図-1 対象領域

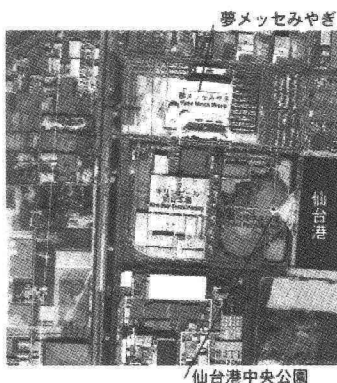


写真-1 夢メッセ周辺の航空写真

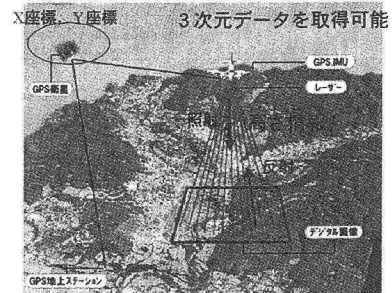


図-2 レーザ・プロファイラによる地上標高データの計測
(<http://www.ramse3d.com/index1.html> より)

には、各対象構造物毎に適した数値シミュレーション手法を選択する必要があるが、今回は、1) レーザ・プロファイラにより得られたデータを用いてシミュレーションモデルを作成し解析を行うという一連の流れを構築することを目的としていること、2) 地盤情報・各種構造物の詳細なデータが準備段階であることなどから、すべての構造物に対して線形弾性体による動的解析を適用した。対象領域全域の 3 次元 CAD データを用いて有限要素法による数値解析モデル(Ichimura ら, 2004; Yang ら, 2002)を作成し、一括してすべての構造物の動的解析を行った。地盤は均質とし、建物の物性には同種の構造から推定される適切な値を各々適用した。入力地震動として海洋型の地震動を模した中心周波数 1 秒の Richer Wavelet 波(単位地震動)を工学的基盤より一様な平面波として入力した。

(4) 津波の高精度津波遡上計算

津波遡上計算には、マニング等価粗度係数モデルを用いずに、地形モデル(油屋・今村, 2002)を採用した。出来るだけ、複雑な土地利用を考慮するためである。推定された結果を用いて、どのようなタイプの災害が発生するかシナリオ解析を実施する。今回の対象地域の建物のスケールは 20-400 m であり、2 m 格子間隔で十分高い浸水精度が得られる(油屋・今村, 2002)。

(5) 津波避難行動シミュレーション

本モデルでは、経路選択モデルを特に工夫する。そのため、各メッシュデータ上に全避難者に共通する要因、個別の要因、災害要因などを総合的に取り入れたポテンシャルモデルを作成した。ポテンシャルの概念は、目黒・原田(1997)により提案されており、ここでは機能の整理と内容の拡張を図り、市街地で顕著な構造物である壁やフェンスの効果も取り入れている。図-3 に全体のフローを示し、避難者情報データを作成しシミュレーションの初期値として与え、所要の経過時間まで解析を実施した。初期値には、当初の避難場所も与えられており、外生的な判断も取り入れられるように改善されている。

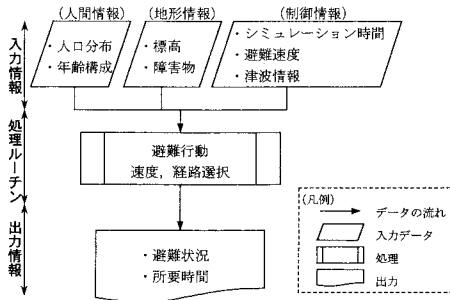


図-3 津波避難行動シミュレーションの流れ

歩行速度は、今村ら（2001）に従い、年齢と避難者密度により変化させる。

津波に関してメッシュモデルを利用した避難シミュレーションの研究例はある（消防科学総合センター、1984）が、経路選択、遡上計算の精度、データの分解能（50 m メッシュ間隔でありにも粗く、道路などの経路や建物、標高などを考慮できていない）などの問題があった。

個々のメッシュはその場の状況に応じたポテンシャルを持つ。このポテンシャル場は、避難者ごとに定義され、避難者の場所・時間が変わることにより変化するモデルとなっており、以下の式（1）で表される。

$$\begin{aligned} \Omega_N(X, t) = & \sum_j \Omega_{Nj}(X, t) + \sum_k \Omega_{Nk}(X, t) \\ & + \sum_l \delta_{Nl}(t) \Omega_{Nl}(X, t) \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ここに、

$\Omega_N(X, t)$ ：場所 X ・時刻 t における、避難者 N に対するポテンシャル分布

$\sum_j \Omega_{Nj}(X, t)$ ：全避難者に共通する要因による、場所 X ・時刻 t における避難行動への影響を表すポテンシャル分布

$\sum_k \Omega_{Nk}(X, t)$ ：避難者 N の場所 X ・時刻 t における個人特性の差異を表すポテンシャル分布

$\sum_l \delta_{Nl}(t) \Omega_{Nl}(X, t)$ ：災害要因による、場所 X ・時刻 t における避難者 N に対するポテンシャル分布

各避難者はこのようにして決められた対象空間において、各時間ステップにおいて周囲の8つのメッシュからポテンシャルの一番低いところを選んで進み、最終的に目的地に到達する。

本モデルでは、最終的に経路判断は、(1)式のポテンシャル値（内生的）と避難先との距離（外生的）が要素を加えて、経路（方向）を決めている。これにより、道路などのリンクノードに限定されない経路の選択が可能となるが、格子サイズの選定は十分配慮しなければならない。

4. 仙台港への適用

(1) 遡上計算結果

レーザ・プロファイラーによるデータを作成し、2 m 格子間隔の情報を持つ地形データ・モデルを開発する事が出来た。この地域での最大の影響を及ぼす津波（昭和三陸地震型）を想定した結果の1つとして、図-4に最大浸水域を示す。道路や建物間を複雑に浸水している様子がわかる。これは通常の住宅に対しても十分な分解能を持ち、複雑な大小の構造物、道路などの土地利用を持つ領域に対して、津波の陸上での挙動を詳細に推定できると考えられる。

また、4 m 格子間隔のシミュレーションも併せて行い図-5のような時系列を比較した。この差（最大12%）は、対象領域の陸上構造物の地盤からの高さの頻度分布解析（図-6）で対応関係を説明することができる。

(2) 地震動

図-7に詳細検討領域での地表の揺れと構造物の変位応答の分布（地盤の速度）の一例を示す。工学的基盤から一様な地震波が入力されているので、構造物が何もない一様な応答になるはずであるが、地表形状及び構造物があるため応答が複雑な分布になっていることが分かる。具体的には、夢メッセなど比較的面積は小さいが

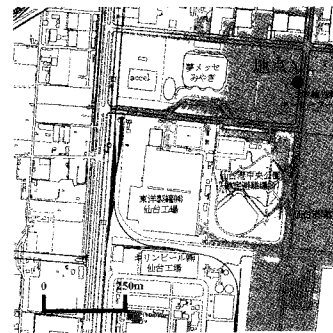


図-4 陸上への最大浸水の状況

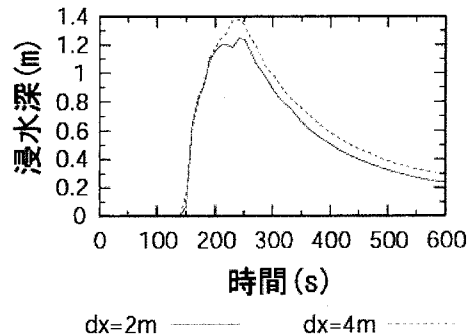


図-5 地点A（地盤高さ2.7 m）での遡上高さの変化

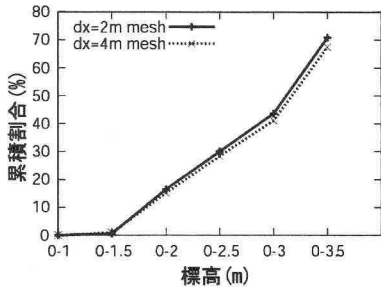


図-6 標高と地上データ出現頻度の分布

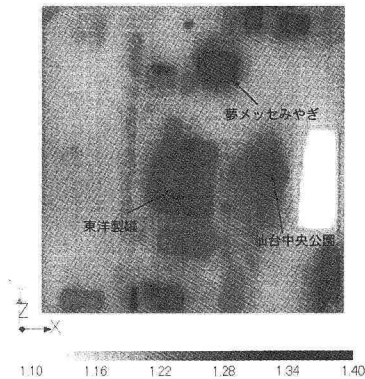


図-7 地震発生から115秒後の地盤速度分布(無次元速度)

高い建物での速度値が大きい、一方、中央公園や東洋製缶などは小さい。この結果より、桟橋での釣り人など建物外では揺れ自体を感じ難いことや、建物を避難地とする場合、十分な地震強度を確認する必要があることが示された。

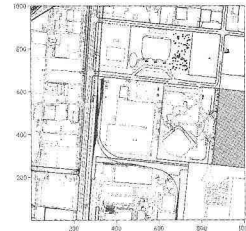
一つ一つの構造物だけを対象としているときには予測が難しかった、全体での応答の様子、また、連成している応答の様子などを低い精度ではあるものの予測することができており、このようなアプローチの有用性を示していると思われる。

(3) 避難シミュレーション結果

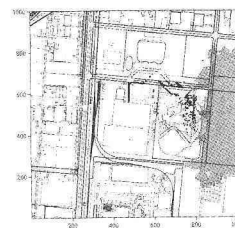
表-2に設定した避難開始位置、避難者数、避難先を示す。夢メッセみやぎでのイベント(催し物)を考慮した対象人数や場所を想定し、避難シミュレーションを実施した。結果の一部を図-8に示す。避難開始時刻70分、津波来襲が約71分の状況下での、浸水と避難状況が示されている。図中の黒丸が避難者を示しており、(a)の避難開始後に仙台中央公園と東洋製缶に向かって移動している。(b)では、津波の浸水が始まり、(c)ではその範囲が大きくなっている。避難行動を詳細に見ると道路に限定されなく2カ所の避難所に移動していることが分かる。なお、各道路にはフェンスがあり避難場所へ直線的に移動できてはならず、この効果は予想以上の大きく避

表-2 仙台港での避難シミュレーション設定条件

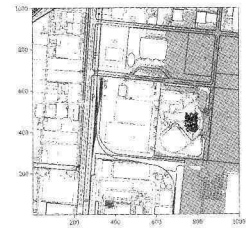
		避難先	
		(5) 仙台港中央公園	(6) 東洋製缶
避難開始位置	(1) 夢メッセ出入口	500人	500人
	(2) 夢メッセ駐車場	50人	50人
	(3) トヨタ輸送モータープール	10人	0人
	(4) 仙台港デッキ	10人	0人



(a)



(b)



(c)

図-8 70, 72, 75分後の避難状況(避難開始時刻70分)

死亡率(%) (総避難者数1120人)

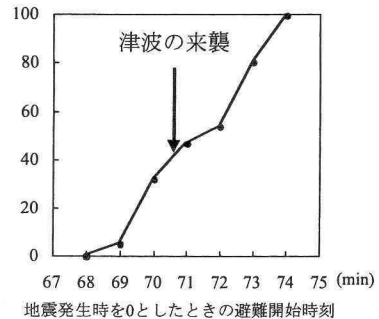


図-9 避難開始時間と生存率の関係

難経路を大きく変え、最終的な避難所要時間に大きな影響を与えた。

本手法を用い、避難者の避難開始時刻を変化させ、避難開始時刻と死亡率(浸水高さ50 cm)との関係を調べた。その結果を図-9に示し、避難開始時刻が遅れるごとに、犠牲者数が増加することが分かる。特に、避難開始時刻が地震発生から68分以降になると犠牲者数が発生

し、その後著しく増加することが言える。この地域では、来襲の前の3分前には避難を開始しなければならないことが具体的に示された。

ここでは、まだ地震動などによる建物倒壊による移動障害(佐藤ら, 2002)や、非常時での集団行動心理などは考慮されておらず、ダメージを受けない理想的な状況下であることを了解しておかねければならない。

5. おわりに

レーザ・プロファイラーによるデータを作成し、2 m 格子間隔の情報を持つ地形データモデルを開発し、地震動と津波浸水シミュレーションを実施した。さらに避難行動モデルを融合させ、夢メッセみやぎでのイベント(催し物)を考慮した対象人数や場所を設定し、避難シミュレーションを実施した。避難開始時間を変化させたシミュレーションを実施し、僅か6分の違いが避難率のゼロから100%まで変化する事が分かった。本研究でのモデルは、沿岸部での地震津波の統合型予測シミュレーションのプロトタイプとなると考える。

今後、液状化や火災などの2次的な現象の追加、さらには、強震動による建物・施設破壊による津波浸水の変化などの効果を入れていく必要がある。

謝辞: 本研究の一部は、科研費基盤(B)(2)(12574016)の補助を受けた。土木学会地震工学委員会統合地震シミュレータ研究小委員会の委員各位、東京大学地震研究所堀宗朗教授から有益な助言をいただいた。また、国際航業(株)にはデータ作成に対して多大な協力を得た。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 油屋貴子・今村文彦(2002): 合成等価粗度モデルを用いた津波氾濫シミュレーションの提案, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 276-280.
- 今村文彦・鈴木 介・谷口将彦(2001): 津波避難数値シミュレーション法の開発と北海道奥尻島青苗地区への適用, 自然災害科学, Vol. 20, No. 2, pp. 183-195.
- 今村文彦・高橋智幸(2004): 2003年9月26日十勝沖地震津波の発生と残された教訓, 消防科学総合センター, Vol. 75, No. 1, pp. 7-20.
- 越村俊一・片田敏孝・桑沢敬行・石橋晃睦(2003): 津波による人的被害軽減のための避難戦略の評価手法に関する研究, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1336-1340.
- 小谷美佐・今村文彦・首藤伸夫(1998): GISを利用した津波遡上計算と被害推定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 356-360.
- 佐藤広章・村上仁士・島田富美男・上月康則・倉田健吾・大谷 寛(2002): 地震動による家屋倒壊を考慮した津波来襲時における避難に関する一考察, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 311-315.
- 島田富美男・村上仁士・上月康則・杉本卓司・西川幸治(1999): 津波による人的被害予測に関する一考察, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 361-365.
- 消防科学総合センター(1984): 地震被害予測システム研究開発報告書—津波による浸水および避難について—, 161 p.
- 中央防災会議(2003): 東南海、南海地震に関する報告, 東南海、南海地震等に関する専門調査会資料.
- 目黒公郎・原田雅也(1997): 最適避難誘導のための基礎研究, 地域安全学会論文報告集, pp. 354-359, 1997.
- Ichimura, T., M. Hori, K. Terada, T. Yamakawa, (2004): On integrated earthquake simulator prototype: Combination of numerical simulation and geographical information, J. Struct. Mech. Earthquake Eng., JSCE, (in press).
- Yang, F., T. Ichimura, and M. Hori (2002): Earthquake simulation in virtual metropolis using strong motion simulator and geographic information system, Journal of Applied Mechanics, JSCE, Vol. 5, pp. 527-534.