千葉県旭市の被害データに基づく津波被害関数の構築と建物被害予測

DEVELOPMENT OF TSUNAMI FRAGILITY FUNCTION BASED ON BUILDING DAMAGE DATASET IN ASAHI CITY, CHIBA PREFECTURE AND ITS APPLICATION FOR DAMAGE ASSESSMENT

11TM0315 北村 健 Ken Kitamura 指導教員 丸山 喜久

SYNOPSIS

Tsunami fragility function is developed to assess damage to buildings because of tsunami. The fragility functions are expressed with respect to the inundation depth to predict the damage ratio of buildings. Asahi City, Chiba Prefecture, suffered from serious damage after the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and Tsunami. Hence, the fragility function is constructed using the results of numerical simulation of tsunami propagation and the building damage dataset compiled by Asahi City after the earthquake. Employing the fragility function, the number of damaged buildings in Chiba Prefecture is estimated assuming the occurrences of historical earthquakes.

1. はじめに

津波による建物被害の定量的な推定手法としては,首藤 の津波強度指標¹⁾が一般的である.例えば木造家屋につい ては,浸水深が2m以上で全壊,1m以上2m未満で部分的 破壊という評価指標が提示されている.これは過去の津波 災害事例から構築された指標であるが,一方で津波氾濫の 局所性や家屋被害発生の不確実性を考慮するための新しい 指標として,津波被害関数が提案されている²⁾.津波被害 関数とは,対象地域の津波浸水深や流速等の津波外力指標 と建物被害率の関係を確率分布関数によって表現するもの である.

本研究では、2011 年東北地方太平洋沖地震津波で千葉県 内最大の被害が生じた旭市を対象地域として、津波数値解 析の結果と旭市が発行した罹災証明に基づく建物被害デー タから新たに津波被害関数を構築した.さらに、構築した 被害関数を用いて、千葉県に影響を及ぼすと想定されてい る歴史地震が発生した場合の千葉県内における被害建物棟 数を算出した.

2. 千葉県旭市における津波被害の把握

2.1 現地調査と画像判読による津波浸水域の推定

2011年東北地方太平洋沖地震の発生後,千葉県旭市にて 計3回の現地調査を実施した.1回目の調査では主に旭市 の津波被害状況を把握し,2回目の調査で現地の震災ボラ ンティアが作成した津波浸水域地図や津波の遡上痕から, 浸水域の推定を行った.また,3回目の調査では地域の住 民にヒアリング調査を行うことで,より詳細な浸水域を特 定するための情報を収集した.

地震直後の津波被災地における高解像度衛星画像が, Google 社による Crisis Response で一般公開されている.こ の画像を用いて,植生の流出や漂流物の散乱,道路や芝生 等の色調の変化といった要因から,津波の浸水範囲を判定 した.さらに,国土地理院では同様に,航空写真や衛星画 像の判読による浸水域の推定が実施されており,現地調査 と目視判読の結果と統合することで,図1に示すように, 千葉県旭市における東北地方太平洋沖地震津波の浸水域を 推定した.



図1 千葉県旭市における東北地方太平洋沖地震の津波浸水域



図2 東北地方太平洋沖地震の津波波源モデル (左:初期すべり量分布 右:海底地形の鉛直変位)

2.2 東北地方太平洋沖地震の津波数値解析

津波数値解析の波源モデルとしては,藤井・佐竹による 津波インバージョン解析に基づいた 40 枚の小断層からな るモデル (Ver. 4.2)³⁾を使用した. 図2には,初期すべり 量分布図と,Okada の式⁴⁾から求めた海底地形の鉛直変位 を示す.数値計算は,非線形長波理論に基づく Staggered leap-frog 差分法を用い,以下に示す連続の式(1)と運動方程 式(2),(3)を解く⁵⁾.式中の η は水位,Dは海底から水面ま での全水深,gは重力加速度を表し,nは表1に示す土地利 用条件に従った Manning の粗度係数⁶⁰で運動方程式中の摩 擦項に含まれ津波の遡上に対する抵抗値として扱う.

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

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

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) = -gD \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2}$$
(3)

数値解析では,格子間隔 1350m の外洋部から陸域に向け てメッシュサイズを 1/3 ずつ細分化して進める.津波数値 解析によって得られる津波外力指標は,最大浸水深,最大 流速,家屋壁面単位幅あたりの最大津波抗力²⁾である.津 波抗力とは,浸水深と流速から求められる津波外力指標の 一つである.図3は,数値解析結果の一例としてとくに建 物被害の集中した旭市東部の飯岡地区における最大浸水深, 最大流速を示している.数値解析の妥当性評価のため,東 北地方太平洋沖地震津波合同調査グループが現地観測によ り調査した旭市飯岡の数地点における津波浸水高⁷⁾と比較 を行ったところ,図4に示すように,とくに住宅地(10~16 番)では精度よく再現できていることが分かった.

土地利用(国土数值情報)	粗度係数(m ^{-1/3} s)	
住宅地	0.040	
農地	0.020	
林地	0.030	
水域	0.025	
その他(空地・緑地)	0.025	

表1 Manning 粗度係数の設定値⁶⁾



(a)最大浸水深(b)最大流速図3 千葉県旭市飯岡地区の津波数値解析結果の例





3. 東北地方太平洋沖地震における千葉県旭市の建物被害

千葉県旭市は、内閣府が定める災害時の住家被害認定基 準⁸⁾に則った罹災証明を発行しており、これに基づいて被 害を受けた住家の位置と、その被害程度や被害要因(地震 動,津波,液状化)を建物被害データとしてまとめている. 図5によれば、旭市における津波による建物被害は著者ら が作成した旭市における浸水範囲の内部に収まっており、 さらに旭市東部の飯岡地区に集中していることから、被害 関数の構築に用いる建物被害率を算出する地域を、飯岡地 区(飯岡、下永井、行内、横根、萩園、平松の6地域)に



図5 千葉県旭市が発行した罹災証明に基づく被害建物位置





限定することとした.その結果,本研究での解析対象にあたる飯岡地区の津波を被害要因とする被害建物棟数は,全壊 178棟,大規模半壊 157棟となった.

4. 津波被害関数の構築

4.1 建物被害率の算出と被害関数の構築

被害関数とは、構造物の被害率 P_D と外力の関係を対数 正規分布や正規分布の確率分布関数として表現したもので ある.津波数値解析で得られる $50/3 \times 50/3$ m 領域毎の最大 浸水深、最大流速、最大津波抗力の 3 種類の津波外力指標 と、各領域に含まれる建物の全壊率および大規模半壊以上 の被害率を用いて、確率紙上にて最小二乗法にもとづく回 帰分析を行う.関数形には、式(4)に示した対数正規分布を 仮定する.ここで、x は地震や津波外力の指標値、 λ 、 ξ は ln x の平均値、標準偏差を表す.

$$P_{o}(x) = \Phi\left[\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right]$$
(4)

建物被害率は,地理情報システム(GIS)を用いて津波 外力ごとの被害建物棟数と建物総数を集計し,これらの比 をとることで求める.被害率を算出する際の分母となる建 物総数は,建物面データ(ゼンリン Zmap-TOWN II,2009 年度版)を使用して集計した.ただし,現地調査と目視判 読の結果から作成した千葉県旭市における津波浸水域内に ある住家建物のみを集計の対象とした.以上により構築し た津波外力指標ごとの津波被害関数を図6に示す.

4.2 津波被害関数の比較

本研究で構築した津波被害関数を既往の研究において構築された津波被害関数と比較する.津波外力に浸水深を用いて構築した被害関数に関しては、国土交通省が東北地方 太平洋沖地震津波の浸水区域全域を対象に実施した被災現 況調査結果⁹を用いて、同様の手順で構築した被害関数との比較を行う. 越村らは、1993年北海道南西沖地震津波における北海道 奥尻島青苗地区や、2004年スマトラ島沖地震津波における インドネシアの Banda Aceh での建物被害を被災前後の衛 星画像から目視判読し、津波数値解析の結果と対応させて 被害関数を構築している²⁾.これらの被害関数と本研究で 構築した被害関数を比較すると、図6に示したように、浸 水深に関する被害関数については、奥尻島青苗地区の建物 被害率から構築された被害関数と近い傾向を示しているこ とが分かる.一方で、流速や津波抗力に関する被害関数に ついては、本研究の方が被害率はやや小さい.このような 差異が生じた主な理由として、本研究の数値解析では津波 漂流物が流速に与える影響を充分に考慮できていないこと が考えられる.なお、インドネシアの Banda Aceh における 被害関数は、対象としている建物の構造種別が大きく違う ことから、他の被害関数と異なる傾向を示している.

次に,国土交通省の被災現況調査結果から回帰分析によ って被害関数を構築し、これを千葉県旭市の飯岡地区にお ける建物被害データに基づいた被害関数と比較したところ, 大規模半壊以上の建物被害率を表す被害関数については両 者が近い傾向を示した.このことから、本研究で構築した 被害関数は限られた地域における詳細な建物被害データを もとにしたものであるが、広域の津波被害の傾向をある程 度説明することができるものと考えられる.一方で,全壊 率に関する被害関数は、旭市飯岡地区では浸水深が 6m 以 上となる地域がほとんど存在しなかったことなどが影響し て,浸水区域全域のものと比較すると被害率が全体的に小 さくなる傾向を示した.以上のことから,次章にて行う建 物被害の推定では、大規模半壊以上の被害建物棟数には本 研究で構築した津波被害関数を,全壊棟数には千葉県旭市 飯岡地区の被害関数と,国土交通省の被災現況調査結果に 基づいた被害関数の両方を用いることとする.

5. 千葉県の津波による建物被害想定

5.1 被害建物棟数の推定

本研究で構築した津波被害関数を用いて,千葉県に被害 を及ぼすと考えられる歴史地震が発生した場合の被害建物 棟数を算出する.自治体が地震津波被害想定に使用してい る震源断層モデルを用いて津波数値解析を実施し,解析結 果として得られた最大浸水深と構築した津波被害関数によ って,建物全壊率および大規模半壊以上の被害率を求める.

次に GIS を使用して,地震被害想定¹⁰⁾に用いられている 千葉県内の建物棟数分布と解析領域ごとの被害率を統合し, 両者を乗じることで被害建物棟数を推定する.以下には想 定した歴史地震のうち,とくに千葉県において大きな被害 が推定された1703年元禄関東地震,1677年延宝房総沖地 震,1605年慶長地震が発生した場合の建物被害の推定結果 をまとめる.

5.2 1703 年元禄関東地震

元禄関東地震は房総半島南部近傍を震源とし,房総半島 から相模湾沿岸で最大 5m 以上の津波が観測されたと推定 されている¹¹⁾.被害建物棟数を算出するための津波数値解 析には,図7(a)に示す震源断層モデル¹²⁾を使用する.数値 解析結果によると,震源に近い房総半島南端に位置する館 山市や南房総市においては浸水深が最大で 5~8m に達す る地域が見られ,また浸水が広域に拡大した九十九里・外 房地域では 5m 程度の浸水深が予想された.東京湾内への 津波の流入は少なく,千葉市や浦安市などでは浸水深は 1m 以下となった.

津波数値解析の結果と,構築した津波被害関数によって 算出される千葉県内の被害建物棟数は,大規模半壊以上が



図7 想定した歴史地震の津波波源モデル

約22,000棟,全壊棟数は旭市飯岡の被害関数を使用した場 合で約9,500棟,国交省の被災現況調査結果に基づいた被 害関数を使用した場合で約15,000棟と推定された.とくに, 大網白里町やいすみ市,勝浦市といった九十九里・外房地 域での被害が顕著となった.

5.3 1677 年延宝房総沖地震

延宝房総沖地震は房総半島東方沖を震源として,福島県, 茨城県,千葉県の沿岸地域で津波が観測されたことが過去 の被害記録から分かっている¹³⁾.津波数値解析に使用する 震源断層モデルは,図7(b)に示す千葉県が被害想定で使用 しているモデル¹⁴⁾とする.震源に近い九十九里・外房地域 では浸水深が最大で5m程度まで達し,千葉県内における 浸水深の分布は,地域差はあるものの元禄関東地震津波と 同程度の結果が得られた.また,東京湾内への津波の流入 は極めて少なかった.

千葉県内の被害建物棟数は,大規模半壊以上で約22,000 棟,全壊棟数は旭市飯岡の被害関数を使用した場合で約 9,800 棟,国交省の調査結果に基づく被害関数を使用した 場合で約15,000 棟と推定された.勝浦市,いすみ市,鴨川 市など,震源域に近い九十九里・外房地域を中心に,元禄 関東地震津波と同程度の被害が見込まれ,御宿町では全棟 数の3割近くにあたる約1,500棟が大規模半壊以上の被害 を受ける結果となった.また,東北地方太平洋沖地震津波 では,旭市の大規模半壊以上の被害棟数は335棟であった が,この津波では約740棟と2倍程度の被害が推定された.

5.4 1605 年慶長地震

南海トラフ沿いが震源域と推定される慶長地震は,地震動による被害は少なかったが,太平洋沿岸の広範囲で津波が観測され甚大な被害を出したと考えられている¹⁵⁾.震源断層モデルとして,図7(c)に示す神奈川県が津波浸水予測図の作成に用いた東海道沖の断層モデル¹⁶⁾を使用し,津波数値解析を実施した.前述した2つの津波と比較して,慶長地震津波では内房地域の浸水被害が非常に大きく,東京湾の入口に位置する富津市や館山市では浸水深が10m以上に達するという結果が得られた.一方で九十九里・外房地域では,元禄関東地震津波や延宝房総沖地震津波に比べて浸水範囲は小さいものの,勝浦市や鴨川市の一部地域では最大で7m程度の浸水深が予測された.

慶長地震津波による千葉県内の被害建物棟数は,大規模 半壊以上で約52,000棟,全壊棟数は旭市飯岡の被害関数を

地震名		大規模半壊以上	全壊(飯岡データ)	全壊(国交省データ)
元禄関東地震		21,951	9,485	14,778
延宝房総沖地震		21,650	9,778	14,850
慶長地震	千葉	52,441	28,981	39,457
	神奈川	67,586	37,828	51,048
	東京	431	116	250
	合計	120,458	66,925	90,755

表2 歴史地震ごとの建物被害想定結果



図8 最大被害を与える歴史地震津波の市町村別比較

使用した場合で約29,000棟,国交省の調査結果に基づいた 被害関数を使用した場合では約39,000棟と推定された.館 山市では全壊棟数だけでも 10,000 棟を超えることが想定 されるほか、富津市や木更津市など内房地域を中心に被害 が拡大した.東京湾内へも津波が流入することから、千葉 市中央区や船橋市など中心部への被害も懸念される.

慶長地震が発生した場合、千葉県だけでなく神奈川県の 相模湾沿岸に対しても非常に大きな津波を引き起こすこと が予想される.本研究では、慶長地震津波に対しては神奈 川県と東京都を含めた1都2県の被害想定を併せて行った. この際には、両都県の地震被害想定17,18)で用いられている 建物棟数データを使用した. その結果, 大規模半壊以上の 被害棟数は1都2県の合計で約120,000棟と推定され,全 壊棟数は旭市飯岡の被害関数を使用した場合で約 67,000 棟、国交省の調査結果に基づく被害関数を使用すれば約 90,000棟という推定結果となった(表 2).慶長地震を含め た南海トラフ沿いの大地震が発生した場合には、津波によ る被害だけでも東北地方太平洋沖地震津波を上回る被害が 予想される.

最後に、千葉県内の各市町村に対して最も大きな被害を 及ぼすと想定される歴史地震を図8のように示した.この 図によれば, 延宝房総沖地震津波と元禄関東地震津波は九 十九里・外房地域に,慶長地震津波は房総半島南部から内 房地域に対して被害を及ぼしており、地域ごとに被害が最 大となる地震津波が異なることが分かった.

6. 結論

2011 年東北地方太平洋沖地震津波において,千葉県内で 最大の被害が生じた旭市を対象地域とした津波数値解析の 結果と、千葉県旭市が発行した罹災証明に基づく建物被害 データを使用して、津波被害関数を構築した. これを用い て,千葉県に被害を及ぼすと考えられる歴史地震津波が発 生した場合の県内における被害建物棟数を推定した.

津波被害関数は、浸水深、流速、津波抗力の3つの津波 外力に対して構築したが、津波漂流物の影響を受けやすい と考えられる流速や津波抗力に対する被害関数は、既往の 研究結果との整合性が取れなかった,一方,浸水深に関す る被害関数は,大規模半壊以上の被害率に着目すれば,本 研究で構築した旭市の罹災証明データに基づく被害関数と 国土交通省が浸水域全域についてまとめた被害データを使 用した場合で大きな差異は見られなかった.このことから, 本研究で構築した被害関数は、限られた地域の詳細な被害 データをもとにしたものであるが、津波による広域の被害 傾向を表現できるものと考えられる.

歴史地震の発生を仮定し、千葉県を対象として建物被害 想定を行ったところ、1605年慶長地震津波では大規模半壊 以上の建物が 50,000 棟以上と推定されたが、九十九里・外 房地域においては 1677 年延宝房総沖地震津波や 1703 年元 禄関東地震津波が発生した場合による被害の方が大きくな る地域が多かった.慶長地震津波について,東京都と神奈 川県についても同様に建物被害を予測したところ、大規模 半壊以上の被害棟数が1都2県の合計で100,000棟を超え る結果となった.

今後より詳細な建物被害想定を行うための課題として, 多様な対象地域を選定し、その地形的特徴や建物群の構造 種別ごとにタイプ分けを行い、数パターンの被害関数を構 築する必要がある.これによって,被害想定を行う地域に 適合した被害関数を選択することができ、

津波被害関数を 用いた被害想定の高度化に寄与できるものと考える.

謝辞 本研究で使用した津波数値解析プログラムである TUNAMI-CODE は、東北大学災害科学国際研究所の越村俊一教授に提供していただいた. 記して謝意を表する.

参考文献

- 首藤伸夫:津波強度と被害,津波工学研究報告,第9号,pp.101-136,1992. 1) 越村俊一, 行谷佑一, 柳澤英明:津波被害関数の構築, 土木学会論文集 B, Vol. 65, No. 4, pp. 320-331, 2009. 2)
- 藤井雄士郎, 佐竹健治: 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震の津波波源(暫 3)
- 定結果, Ver. 4.2), 独立行政法人建築研究所 HP (http://www.knekne.go.jp/), 2011. 4) Okada, Y .: Surface Deformation Due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space
- Bulletin of the Seismological So-ciety of America, Vol. 75, No.4, pp.1135-1154, 1985. Koshimura, S., Imamura, F., and Shuto, N.: Characteristics of on-slope taunami propagation and the accuracy of the numerical model, Tsunami Research at the End of 5) a Critical Decade, pp.163-177, 2001.
- 小谷美佐, 今村文彦, 首藤伸夫: GIS を利用した津波遡上計算と被害推定法, 6) 海岸工学論文集, 第45巻, pp.356-360, 1998.
- 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ:痕跡調査結果, 7)
- http://www.coastal.jp/ttjt/, 2012 年 3 月 21 日閲覧. 内閣府:災害に係る住家の被害認定基準運用指針(内閣府), 2009. 8)
- 国土交通省:東日本大震災による被災現況調査結果(第1次報告)関連資料に 9) ついて,国土交通省 HP (http://www.mlit.go.jp/toshi/city_plan/crd_plan_tk_000005 .html), 2012 年 9 月 20 日閲覧.
- 10)千葉県:千葉県地震被害想定調査報告書, 2008.
- 羽鳥徳太郎:東京湾・浦賀水道沿岸の元禄関東(1703),安政東海(1854)津波とそ 11)の他の津波の遡上状況, 歴史地震, 第21号, pp. 37-45, 2006.
- 12) 行谷佑一,佐竹健治, 宍倉正展:南関東沿岸の地殻上下変動から推定した 1703 年元禄関東地震と1923年大正関東地震の断層モデル,活断層・古地震研究報告,
- No.11, pp.107-120, 2011. 竹内仁,藤良太郎,三村信男,今村文彦,佐竹健治,都司嘉宣,宝地兼次,松 13) 浦健郎:延宝房総沖地震津波の千葉県沿岸〜福島県沿岸での痕跡高調査,歴史 地震, 第22号, pp. 53-59, 2007.
- 千葉県県土整備部:平成17年度 県単海岸調査委託(津波対策・シミュレーシ 14)ン業務)報告書,2006.
- 15) 宇佐美龍夫:新編日本被害地震総覧(増改訂版 416-1995),東京大学出版会, pp. 493, 1996.
- 神奈川県県十整備局:新たな津波浸水予測図解説書,神奈川県 HP 16) (http://www.pref.kanagawa.jp/cnt/f360944/), 2012 年 1 月 23 日閲覧.
- 17) 神奈川県:神奈川県地震被害想定報告書, 2009.
- 東京都:首都直下地震委による東京の被害想定,2006.