



東北地方太平洋沖地震の津波被害現地調査結果に基づく 非住家建物を対象とした津波損傷度曲線

奥野峻也¹⁾、登柳正夫²⁾、山口亮³⁾、山本治貴⁴⁾、越村俊一⁵⁾

- 1) 正会員 (株) 構造計画研究所
e-mail : shunya-okuno@kke.co.jp
- 2) 非会員 (株) 構造計画研究所
e-mail : tonagi@kke.co.jp
- 3) 正会員 損害保険料率算出機構
e-mail : makoto_yamaguchi@giroj.or.jp
- 4) 非会員 損害保険料率算出機構
e-mail : haruki_yamamoto@giroj.or.jp
- 5) 正会員 東北大学災害科学国際研究所、教授 博士 (工)
e-mail : koshimura@irides.tohoku.ac.jp

要 約

2011年東北地方太平洋沖地震による津波被害の現地調査データから、個々の非住家建物の被害割合を推計し、建物の再調達価額に対する修復費用の割合（損傷度）を算出した。算出した損傷度と津波による浸水深の分布を整理した上で、データの多いS造建物についてはその用途別（「工場・倉庫」および「一般」）に、データの少ないRC造建物に関しては用途を分けずに津波損傷度曲線を算定した。その結果、S造建物はRC造建物と比べて同一の浸水深に対して同程度以上の損傷度となり、S造建物の用途別には、3.5m程度までの浸水深では「一般」、それ以上の浸水深では「工場・倉庫」の損傷度が大きくなる傾向が見られた。

キーワード： 津波、津波損傷度曲線、津波被害調査、東北地方太平洋沖地震

1. はじめに

津波による建物被害を想定する際、一般的に津波浸水深と既往の被害実績から求められる浸水深と被害率の関係（津波被害関数）に基づいて建物被害棟数を算出することが行われている。首藤(1992)¹⁾は既往の津波被害実績から、津波強度指標として浸水深と家屋被害の関係をまとめた表を作成し、その成果は津波による被害想定指標として広く利用されてきた。近年では、首藤の提示した指標を高度化し、地震工学の分野で用いられる被害関数の概念を津波工学に拡張した津波被害関数が提案・利用されている。越村ら(2009)²⁾は、津波による家屋被害の程度を被害率として確率的に表現し、津波浸水深、浸水高、氾濫流速、波力といった津波の流体力学的諸量の関数として記述した。津波被害関数の概念は内閣府中央防災会議においても採用され、南海トラフの巨大地震想定³⁾においても津波被害関数によって建物構造

(木造・非木造)別の全壊棟数・半壊棟数が算出されている。

津波波力による被害形態を考えたとき、建物間口の大きさや建物の規模など、建物の用途によって特徴づけられる要素も被害の発生率に影響すると考えられる。しかしながら地震動の慣性力による被害を対象とした被害関数に比べ、津波波力による被害を対象とした被害関数の研究事例は少なく、これまで建物の構造を区別して被害関数を導出している事例³⁾⁴⁾はあるが、住家以外の用途を区別しているものは見当たらない。津波の影響を受ける可能性がある海岸付近には、規模の大きな工場や倉庫などの非住家建物が多く存在する地域もあり、被害関数に非住家建物の区別を導入する意義は大きい。そこで本研究では、東北地方太平洋沖地震後の現地調査で得られた非住家建物の津波被害データに基づき、津波の浸水深を説明変数とした被害関数を導出する。

なお、既往の津波被害関数²⁾³⁾⁴⁾は、建物群を対象とした被害の程度(流失、全壊、大破など)の発生率を評価するものであるが、本研究で取り扱う被害関数は、個々の建物の損傷度合(以下、損傷度)を評価対象とするもので、ここではこれを津波損傷度曲線と記述する。

2. 津波被害現地調査結果に基づく損傷度の算出

2.1. 津波被害現地調査の概要

津波損傷度曲線の算出にあたり、東北地方太平洋沖地震による津波被害の把握のため、東北大学工学部災害制御研究センター(現東北大学災害科学国際研究所)が実施した現地調査(責任者:越村俊一)の結果を利用する。この調査は、2011年5月~6月に宮城県石巻市・名取市・岩沼市・亶理町の一部の地域(図1)における4910棟の被害を調査したもので、建物ごとに、所在地(緯度・経度)や建物用途・構造、被害判定、浸水深が調査され、多方向から撮影された4~5枚の写真とともに次のとおりデータ化されている。構造は木造、S造、RC造の3種類、用途は工場・作業場、倉庫、事務所、店舗、宿泊施設、官公庁舎・公共施設、併用住宅、専用住宅の8種類に整理されている。用途別の調査棟数を図2に示す。データの多くは専用住宅である。また調査では被害が判別可能であった建物に関して、流失、全壊、大破、中破・小破、浸水のみ、浸水なしの6通りに被害状況が分類されているが、本論文ではこれらの分類をそのままは利用せず、2.2節で述べる方法により被害割合を推計した。浸水深については全棟のデータはなく、痕跡を確認し実測できたもののみ10cm単位で整理されている。また本論文では利用しなかったが、建物の地上階数、瓦礫の有無等も整理されている。



図1 調査対象地域

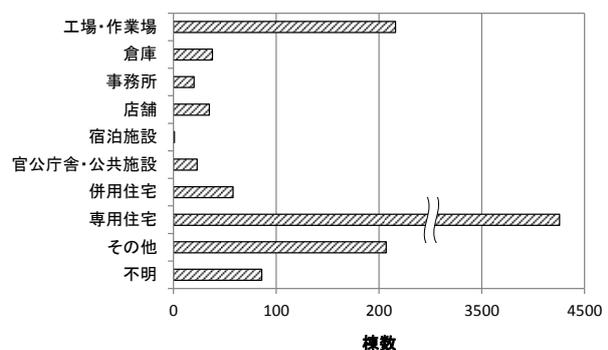


図2 用途別調査棟数

2.2. 用いたデータ

本論文では、先の津波被害現地調査結果を利用し、建物用途として「工場・倉庫」と「一般」、建物構造として「S造」「RC造」を対象として津波損傷度曲線を導出する。本論文における「工場・倉庫」は工場・作業場・倉庫を指し、「一般」は事務所・店舗・宿泊施設・官公庁舎・公共施設を指す(専用住宅・併用住宅は含まない)。なお建物用途は、調査時の写真やGoogle Street Viewによる震災以前の写真などで再度確認して現地調査結果を適宜再分類し、また、建物写真が存在しないデータも複数あったため、それらはデータから除外した。最終的に津波損傷度曲線の導出対象とした用途・構造別の建物数

を表1に示す。RC造に関しては工場・倉庫用途の建物が非常に少なく、また存在しても小規模なものであり、写真で類似した構造であることが確認できたため、以降の検討では「工場・倉庫」と「一般」の区別はせず、単に非住家建物として取り扱う。

各構造・用途の床面積を図3に、建物高さを図4に示す。S造「工場・倉庫」では床面積が500m²を超える建物が多く見られる。また、建物高さは3~12mのものが多く、平屋~3階建ての低層の建物が中心のデータとなっている。

津波損傷度曲線の説明変数には浸水深を用いる。浸水深は、現地調査での実測値を基本とするが、前述したように痕跡高が見つけれなかった調査地点の浸水深は欠測している。津波損傷度曲線の算出には被害データと浸水深のひも付が必要であるため、浸水深が欠測である調査点に対しては国土交通省5mメッシュ浸水深データ⁵⁾により、当該地点を包含するメッシュの浸水深を代用することで欠測値を補間した。

浸水深の分布と調査対象地域との関係を図5に示す。調査対象地域は、比較的なだらかな地形が広がる浸水深が3m前後の場所が多い。ここで、5mメッシュ浸水深データによる補間結果を確認するため、現地調査結果による浸水深（実測値）と、同一地点の浸水深が欠測しているとして、5mメッシュ浸水深データにより補間した値（補間値）を比較した結果を図6に示す。実測値と補間値が等しい場合は、図中の直線上にプロットされる。補間値と実測値の差（誤差）はおおむね±2m程度の範囲内に分布しており、誤差の標準偏差は0.83m、誤差の絶対値平均は0.53mである。石巻市周辺のデータにおいて実測値2m、補間値5mの領域に誤差の大きい4点のプロットがみられるが、これは旧北上川の河口付近で標高が急変しているごく狭い地域内のプロットであり、対象とする建物のうちこの地域内で浸水深が欠測しているデータはないため、結果的にこの地域のデータは利用していない。この4点を除いた両者のデータの相関係数は0.71であるが、図6にはバイアスは見られず、相田⁶⁾による K, κ （実測高との比の幾何平均および幾何標準偏差）を算出したところ、土木学会による再現性の目安⁷⁾ $0.95 < K < 1.05$ かつ $\kappa < 1.45$ を満たす良好な結果（ $K=0.96, \kappa=1.20$ ）が得られている。

表1 津波損傷度曲線の導出対象とする用途・構造別建物数

建物用途名	内訳	S造	RC造
工場・倉庫	工場・作業場・倉庫	178件	3件
一般	事務所・店舗・宿泊施設 官公庁舎・公共施設	58件	29件
計	—	236件	32件

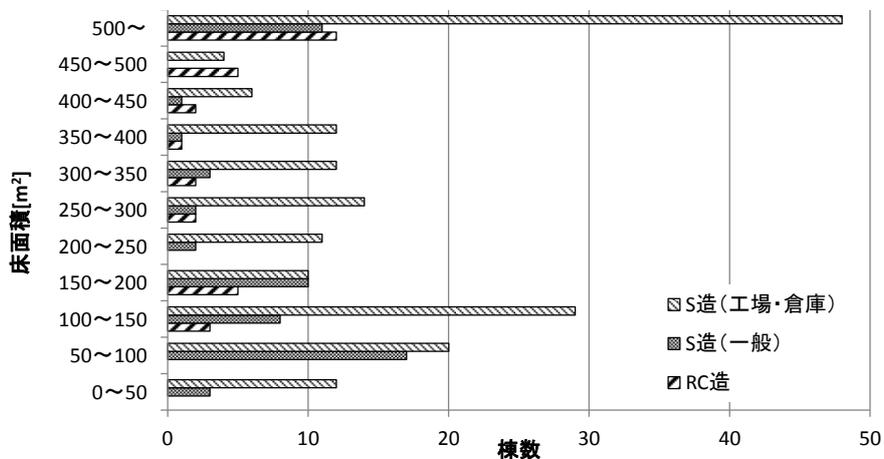


図3 床面積頻度分布

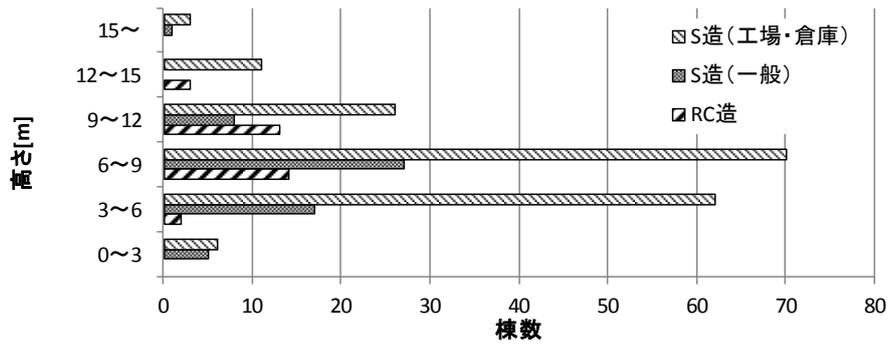


図4 建物高さ頻度分布

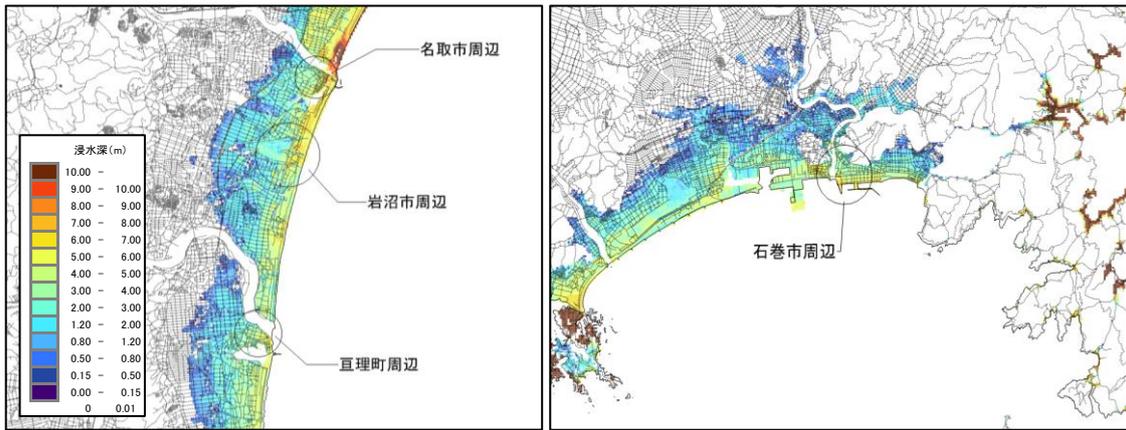


図5 調査対象地域周辺の浸水深の分布⁵⁾

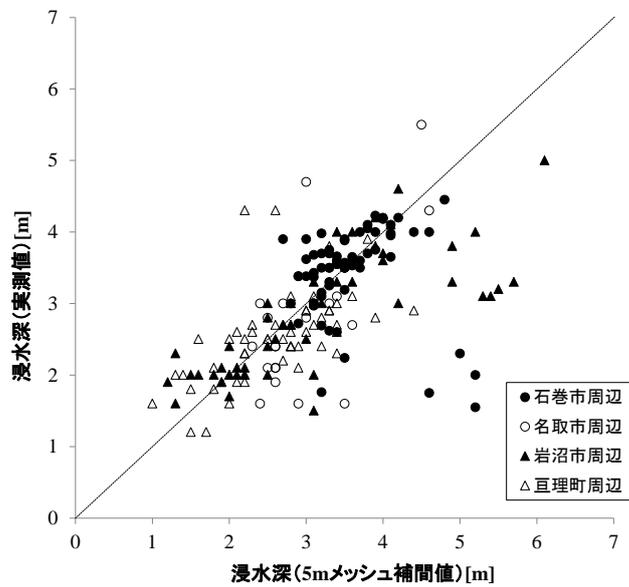


図6 5mメッシュ値による補間値と実測値との比較

2.3. 損傷度の算出方法

津波による建物毎の被害程度を示す尺度として損傷度（%）を定義する。損傷度は、津波による建物被害を復旧するための修復費用の、建物の再調達価額に対する割合を推定したものである。推定した損傷度と実際の見積もりによる損傷度との適合は確認できていないが、第三者の一級建築士事務所において、下記の方法により1名が算定し、他の1名がその結果の確認を行う方法を採用し、評価結果の客観性を確保するよう努めた。

まず、建物の躯体（フレーム）の損傷が大きく改修が技術的に困難であると考えられる場合や、流失している場合などは損傷度を100%としている。次に、損傷度を100%とした建物以外の各建物の損傷度の算出には、表2に示す①～⑦までの工事科目を考慮し、工事ごとに修復費用の見積もりを行う。このとき、各工事科目の建物価格に占める割合の違いから、建物を表3に示すA～Gまでの建物仕様に分類する。分類した建物数も表中に合わせて示している。なお、損傷が小さく分類の必要がない建物、および損傷が大きいあるいは流失している場合などで損傷度を100%とした建物は分類を行っていないため、建物数には含んでいない。S造（A～E）は、A～Eの順に電気工事・空調設備工事・内部仕上工事・衛生設備工事の割合が増えて全体的な仕様のグレードが上がり、上部躯体工事の割合が減っていく構成としている。各仕様に対し、本検討を行った時点における直近の建築コスト情報⁸⁾を参考にその工事費割合を表4に示すように定める。なお、工事費には地域差や震災後の資材価格・人件費の高騰等の影響が見られるが、工事費割合でみるとその影響は小さいと考え、それらの影響については考慮しないものとし、全国の平均的な工事費割合を参考に工事別工事費割合を決定した。また⑦修繕・改修工事の経費等（その他工事・仮設・諸経費）のその他工事には、土工・地業工事、基礎躯体工事を含む。

表4のA～Gに分類した調査建物について、①～⑥の各工事別の被害割合を写真等により算定する。被害割合の算定にあたっては、調査写真および震災後のGoogle Street Viewを参考に評価を行う。調査写真は一つの建物に対し、様々な角度から4～5枚程度撮影されており、目視でも外観の損傷を比較的正確に判定することができる。電気工事・空調設備工事・内部仕上工事・衛生設備工事など外観写真からは判定が困難な項目に関しては、写真に基づく津波痕跡高を参考に各機器の浸水状況を推定し、被害割合を算出した。また被害状況によっては写真から内装を判定できる建物も多く、こうしたケースに関しては写真から直接推定を行った。

建物*i*、工事*j*（*j*は①～⑥）の工事別工事費割合を r_{ij} 、算定した工事別被害割合を d_{ij} として、(1)式のとおり損傷度 D_i を定義する。

$$D_i = (1 + c) \sum_j r_{ij} \cdot d_{ij} \quad (1)$$

参考として建物毎に算出した d_{ij} を付録に示す。①～⑤は10%単位で、工事別工事費割合の高い⑥は1%単位で算出し、修繕・改修工事の経費等の諸経費⑦は①～⑥の総コストに比例すると考え、 $c=30\%$ として $c \times \sum_j r_{ij} \cdot d_{ij}$ により評価を行った。(1)式による損傷度は、80%～95%程度が最大となるが、これは津波によって基礎部分の損傷度が100%に至ることは少ないと考えられるためである。係数*c*により⑦の損傷度を算定した理由は、⑦については、基礎部分の土工・地業工事、基礎躯体工事を含むが、現地調査の写真で基礎部分の被害割合を算定することが困難なためである。なお、写真に基礎の損傷が認められる建物は、上部構造に倒壊等の大きい被害を受けており、(1)式によらず建物全体の損傷度を100%と算定しているケースが多い。

表2 各工事における工事科目¹

工事	工事科目
① 外部仕上工事	外壁、外部開口部
② 電気工事	受変電、幹線・動力、電灯コンセント、照明器具、電話、弱電、防災
③ 空調設備工事	熱源、空調、換気、ダクト、配管
④ 内部仕上工事	内壁、内部床、内部開口部、内部天井
⑤ 衛生設備工事	給水、給湯、排水、衛生器具、ガス、消火
⑥ 上部躯体工事	鉄筋、コンクリート、型枠、鉄骨（土間コンクリート・RC 立上壁を含む）
⑦ 修繕・改修工事の経費等 （その他工事・仮設・諸経費）	—

表3 建物分類A～Gの概要と建物数

構造	分類	概要	工場・倉庫	一般
S 造	A	③空調・④内部仕上・⑤衛生設備の無い工場・倉庫等	38 件	1 件
	B	④内部仕上の無い工場・倉庫等	23 件	2 件
	C	簡易な④内部仕上のある工場・倉庫等	30 件	2 件
	D	一般的な S 造で仕様のグレードが低いもの	7 件	24 件
	E	一般的な S 造で仕様のグレードが中程度のもの	2 件	12 件
RC 造	F	一般的な RC 造	17 件	
	G	一般的な小学校	4 件	

表4 工事別工事費割合(%)の分類

工事	S 造分類					RC 造分類	
	A	B	C	D	E	F	G
① 外部仕上工事	15	15	15	12	12	10	10
② 電気工事	7	8	10	11	11	13	8
③ 空調設備工事	—	5	5	7	7	5	6
④ 内部仕上工事	—	—	7	10	12	12	15
⑤ 衛生設備工事	—	3	3	5	6	7	8
⑥ 上部躯体工事	40	35	30	28	25	22	23
⑦ 修繕・改修工事の経費等	38	34	30	27	27	31	30
計	100	100	100	100	100	100	100

¹クレーンガーター、冷凍設備など付属する設備工事と外構工事は含まない。

2.4. 用途・構造別の損傷度算出結果

図7～図9に現地調査を基にした損傷度算出結果を示す。表3に示したように、S造「工場・倉庫」は、500m²以上の床面積の建物も多いが、床面積が500m²未満のデータと500m²以上の2つの集団に分けて浸水深と被害割合の関係を確認し、両者に大きな違いがなかったため、床面積による区分をせずに分析を行った。全体の傾向として損傷度は0~70%に広く分布し、70%以上100%未満の損傷度を持つ建物は存在しない。これは、損傷度が高くなるにつれて改修が困難な躯体の損傷が多くみられるようになり、損傷度が70%以上の建物に関しては結果的に損傷度が100%となったためである。また浸水深の補間値に関して、S造（工場・倉庫）については全体の86%の標本に補間値を利用しており、S造（一般）については72%、RC造については69%の標本に補間値を利用している。図7～図9では、浸水深の実測値・補間値の違いによる損傷度の分布には大きな差異が見られない。

用途・構造別に見てみると、S造（工場・倉庫）は、浸水深2m程度から損傷度が大きくなり、他と比べて傾きが急である。S造（一般）とRC造は、2m以下の浸水深においても10~30%程度の損傷度が観測されており、S造（工場・倉庫）と比較して傾きが緩やかであるように見えるが、RC造についてはS造（一般）よりも損傷度のばらつきが大きい。

損傷度が100%となった建物の割合を見てみると、S造（工場・倉庫）では38%、S造（一般）では24%、RC造（工場・倉庫・一般）では15%となった。標本となる建物の浸水深分布が必ずしも同一でないことから単純には比較はできないが、同じS造であれば一般用途の建物の方が、構造で見るとS造よりRC造の方が全壊には至りにくい傾向にあると言える。

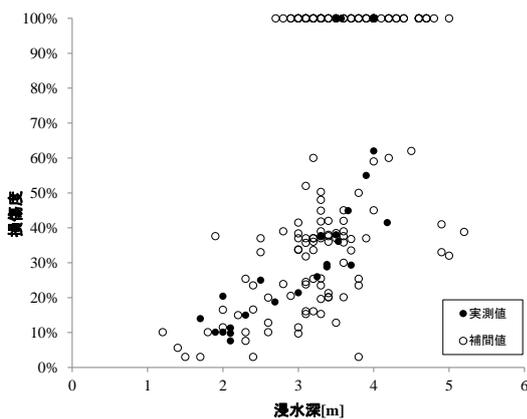


図7 S造(工場・倉庫)損傷度分布

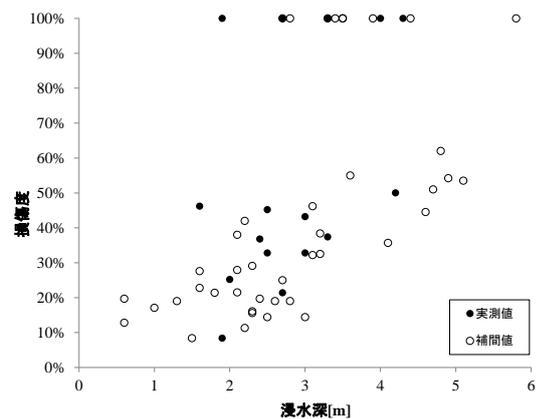


図8 S造(一般)損傷度分布

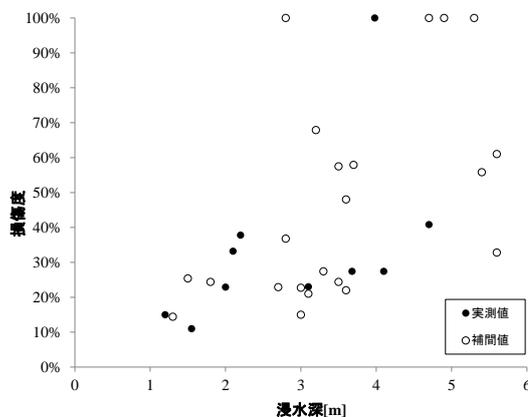


図9 RC造損傷度分布

3. 津波損傷度曲線の算出

3.1. 導出手法

前述のように、損傷の度合いが大きくなると改修が困難になると想定され、損傷度が100%と評価されることから、結果的に損傷度が70%~100%の建物は存在していない。そのため、損傷度100%の建物とそれ以外の建物とは損傷の過程に差があると考えられ、津波損傷度曲線の算出にあたっては損傷度100%の建物と0~70%の建物を分離して取り扱う。ここで、損傷度が100%となる被害関数（以降、損傷度100%被害関数） $p(x)$ と、損傷度が0~70%となる津波損傷度曲線（以降、損傷度70%曲線） $v(x)$ を考える。すなわち、損傷度が100%となる事象は被害関数 $p(x)$ により確率的に定まるものとし、0~70%の損傷度は別事象として $v(x)$ により関係付けられるものとする。ここで、損傷度100%被害関数 $p(x)$ は建物の損傷度が100%になる事象に関して、浸水深を説明変数として確率論的に表現したものであり、被害発生確率の次元を持つ。一方、損傷度70%曲線 $v(x)$ は浸水深を説明変数として建物損傷度を決定論的に表現したもので、損傷度の次元を持つ。すなわち、確率 $p(x)$ で損傷度が100%となり、確率 $(1-p(x))$ で損傷度が $v(x)$ となる。このとき、浸水深 x による建物の損傷度 $e(x)$ は、 $p(x)$ および $v(x)$ から期待値として次式で表現できる。

$$e(x) = p(x) + v(x) \cdot (1 - p(x)) \quad (2)$$

ここでの損傷度 $e(x)$ を、本論文における津波損傷度曲線として定義する。

$p(x)$ の導出には最尤法を適用する。 $p(x)$ として対数正規分布

$$p(x) = \Phi\left(\frac{\ln x - \lambda_p}{\xi_p}\right) \quad (3)$$

を仮定する。 λ_p 、 ξ_p はそれぞれ $\ln x$ の平均値と標準偏差である。浸水深 x_i の建物 i において観測結果 X_i が得られた時、その確率は次のようなベルヌーイ分布に従う確率密度関数 $f(X_i, x_i; \lambda_p, \xi_p)$ で表現できる。

$$f(X_i, x_i; \lambda_p, \xi_p) = \left[\Phi\left(\frac{\ln x_i - \lambda_p}{\xi_p}\right) \right]^{X_i} \cdot \left[1 - \Phi\left(\frac{\ln x_i - \lambda_p}{\xi_p}\right) \right]^{1-X_i} \quad (4)$$

ただし、 X_i は確率変数で、 $X_i = 1$ のとき損傷度100%、 $X_i = 0$ のとき余事象を表す。したがって最尤法に基づき、 λ_p 、 ξ_p は次のように推定できる。

$$(\hat{\lambda}_p, \hat{\xi}_p) = \arg \max_{\lambda_p, \xi_p} \ln \prod_i f(X_i, x_i; \lambda_p, \xi_p) \quad (5)$$

$v(x)$ に関しては以下の関数を仮定する。

$$v(x) = 0.7 \cdot \Phi\left(\frac{\ln x - \lambda_v}{\xi_v}\right) \quad (6)$$

ここで、村尾・山崎⁹⁾の方法に倣い λ_v 、 ξ_v を推定する。すなわち、浸水深 x_i で損傷度 D_i が観測されたとき、確率紙上で横軸に Φ の逆関数 $\Phi^{-1}(D_i/0.7)$ を、縦軸に $\ln x_i$ をプロットする。このとき、回帰直線を最小二乗法により求めることで、その傾きおよび切片から λ_v 、 ξ_v が求まる。

3.2. 導出結果

図10~図12にS造（工場・倉庫）、S造（一般）、RC造の津波損傷度曲線、および津波損傷度曲線の導出に用いた損傷度70%曲線、損傷度100%被害関数を示す。縦軸は津波損傷度曲線・損傷度70%曲線が損傷度[%]、損傷度100%被害関数が被害発生確率[%]に対応する。S造（工場・倉庫）の津波損傷度曲線には、浸水深が2m強よりも低い範囲で損傷度を過小評価する傾向が見られ、同様の傾向は、S造（一般）の1m強以下、RC造の2m強以下にも見られる。この浸水深では、損傷度が100%と評価された建物はないため、損傷度70%曲線の過小評価が原因と考えられ、本研究ではこの曲線の関数形として対数正規分布を仮定したが、より適切な関数形を与えることで改善される可能性がある。表5に各曲線の母数を示す。

図13に津波損傷度曲線を用途・構造別に比較した図を示す。図13を見ると、曲線の立ち上がりはS造

(一般)が最も早い、勾配はS造(工場・倉庫)の方が大きく、3.5m付近を境に大小関係が逆転する結果となった。RC造に関しては、立ち上がりはS造(工場・倉庫)とほぼ同じで勾配も緩やかであり、S造と比較して津波被害に対する耐性が強くなる結果となった。なお、浸水深6m以上についてはデータがないが、参考のため分布関数を外挿したものを表示している。

また、損傷度曲線のばらつきを調べるため、ブートストラップ法¹⁰⁾により信頼区間の算出を行った。すなわち、標本集団から乱数にもとづき復元抽出を行い、新たに生成された標本集団(ブートストラップ標本)から再度損傷度曲線の算出を行う。本研究では10,000回のブートストラップ標本を用い、パーセントイル法により信頼区間の導出を行った。図14~図16に損傷度曲線の95%信頼区間を示す。図に示すように、S造と比較するとRC造では標本が少ない上ばらつきが大きく、信頼区間が広い結果となった。

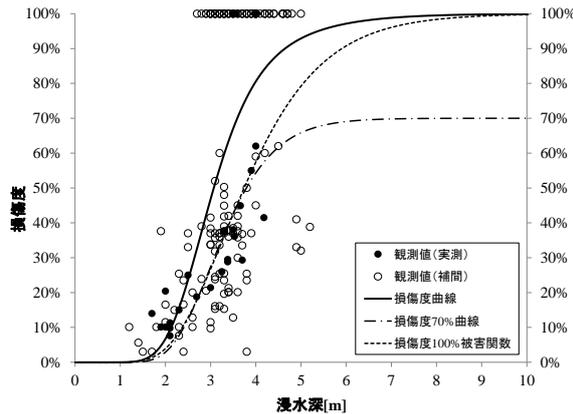


図10 S造(工場・倉庫) 津波損傷度曲線

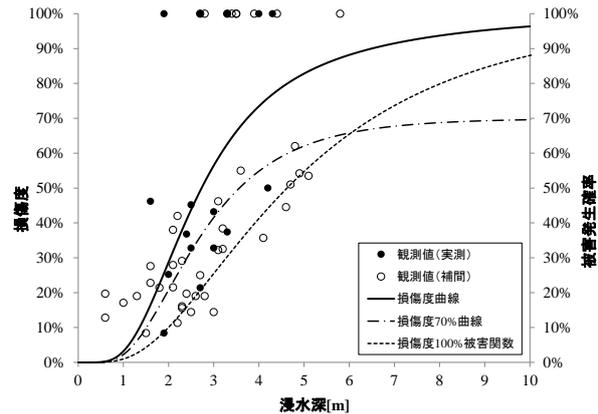


図11 S造(一般) 津波損傷度曲線

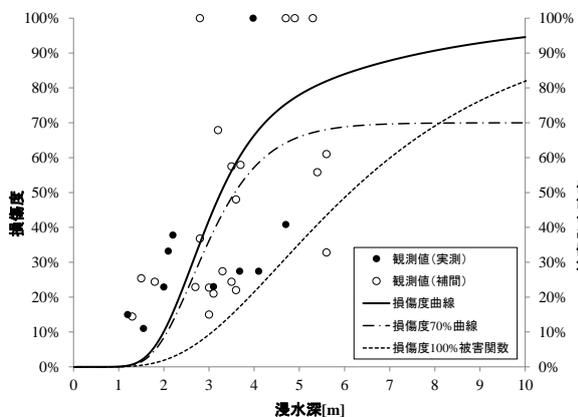


図12 RC造 津波損傷度曲線図

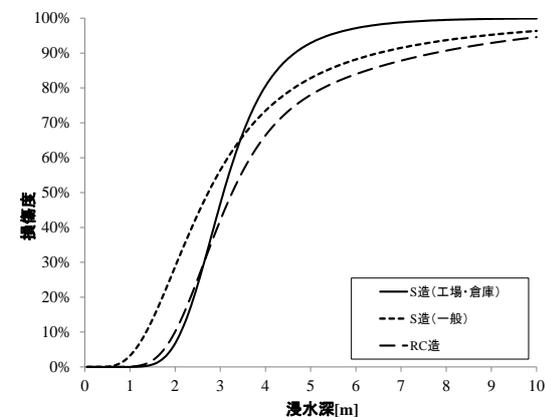


図13 用途・構造別津波損傷度曲線

表5 導出結果

母数		S造(工場・倉庫)	S造(一般)	RC造
損傷度70%曲線 $v(x)$	λ_v	1.18	0.97	1.08
	ξ_v	0.28	0.53	0.33
損傷度100%被害関数 $p(x)$	λ_p	1.32	1.53	1.81
	ξ_p	0.36	0.66	0.54

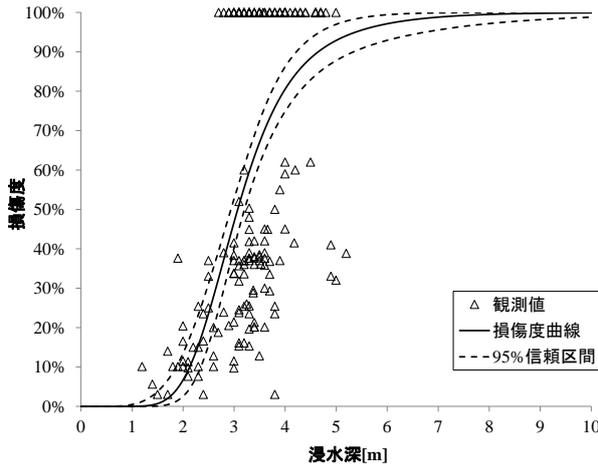


図 14 S 造(工場・倉庫)95%信頼区間

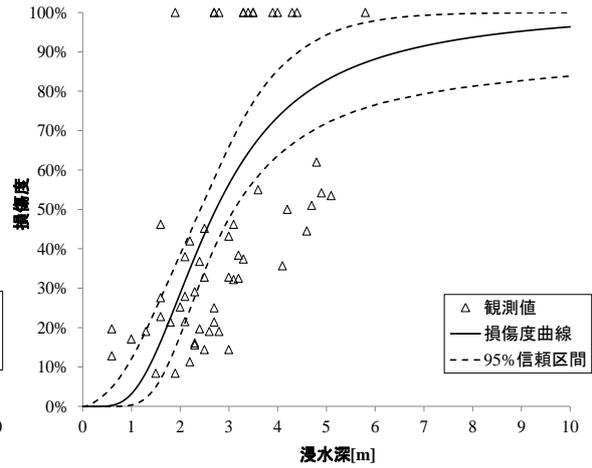


図 15 S 造(一般)95%信頼区間

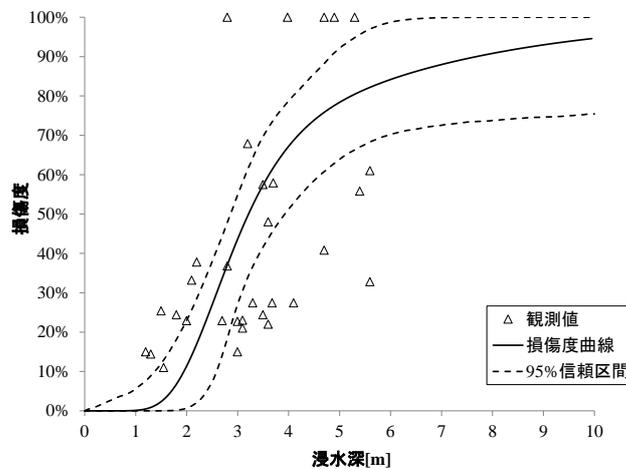


図 16 RC 造 95%信頼区間

3.3. 考察

図17に損傷度70%曲線を用途・構造別に比較した図を示す。損傷度の定義から、内装・電気工事等の工事費の比率が高い建物は、構造に関わらず小さい浸水深でも損傷度は高くなると考えられる。内装・電気工事は「工場・倉庫」よりも「一般」用途の方が工事費の比率が高くなる傾向がある。図17に示す曲線の立ち上がりにおいて、S造に関する用途別の大小関係はこれと整合している。RC造に関しては、表1に示したとおり「一般」用途が多数を占めているが、後述するように、RC造の方がS造よりも津波外力への耐力が一般的に高いと考えられ、浸水深が4m程度まではS造（一般）よりも小さい損傷度となっている。

図18に損傷度100%被害関数を用途・構造別に比較した図を示す。浸水深が3m以上では構造・用途の間で顕著な違いが見られ、S造（工場・倉庫）の被害発生確率が最も大きくなる傾向にあり、次いでS造（一般）、RC造の順に被害が発生しやすい（損傷度が100%になりやすい）結果となった。一般に、S造は単位重量が軽く長い梁を利用できることから、RC造に比べ柱のスパンを広くとり、柱の本数を少なく設計できる。一方、津波外力への耐力という観点からは、柱の本数が少ないS造の方が外壁の強度が弱く、損傷しやすいと考えられる。また、「工場・倉庫」はその用途から安価に広大な空間を確保するため、「一般」用途と比較して柱のスパンが広く、外壁もスレート等を利用するため強度が小さい。加えて工場や倉庫は低層建築物であることが多く、大きい浸水深では特に甚大な被害が発生すると考えられる。

以上より、津波損傷度曲線は小さい浸水深では構造に依存しない内装・電気工事等の設備の影響が強く、大きい浸水深においては各構造の津波外力への耐力の影響が支配的となり、図13の結果が得られたと考えられる。

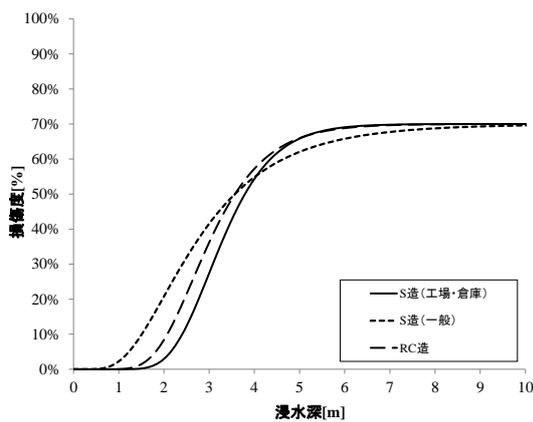


図17 用途・構造別損傷度70%曲線図

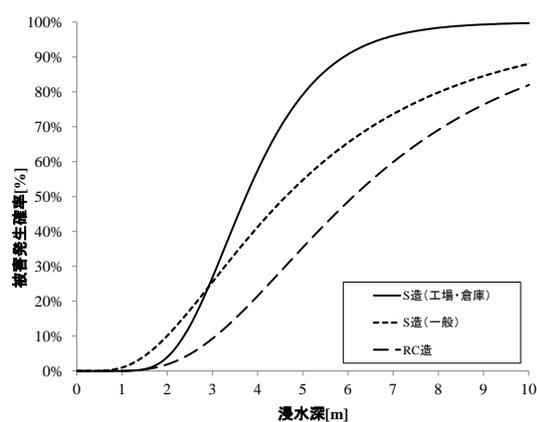


図18 用途・構造別損傷度100%被害関数

4. 結論

2011年東北地方太平洋沖地震による津波被害現地調査データから、非住家建物を対象として個々の損傷度を推計し、浸水深を説明変数として建物の損傷度を表現する独自の津波損傷度曲線を導出した。その結果、同じ浸水深でもS造の方がRC造より損傷度が大きくなり、用途別に導出したS造の津波損傷度曲線で比較すると3.5m以下の浸水深では「一般」用途の損傷度が大きく、逆に3.5mを超える浸水深では「工場・倉庫」の損傷度が大きくなる傾向にあった。これは、小さい浸水深では内装等の設備の損傷による影響が強く、大きい浸水深では各構造の津波外力への耐力が支配的であることに起因するものと考えられる。

本研究では、津波の浸水深のみをパラメータとして津波損傷度曲線を作成したが、津波被害は同じ浸水深でも流速・抗力など他の流体力学的な諸量の違い、さらにはその時間的变化、漂流物の影響等により被害状況が異なることが知られている²⁾。こういった流体力学的な諸量の考慮については、今後の研究課題である。

謝 辞

津波被害現地調査に係われた多くの方々に感謝いたします。現地調査に基づく損傷度の算出にあたり、株式会社土屋建築研究所にご協力いただきました。また、浸水深の補間に利用した5mメッシュ浸水深データは国土交通省都市局よりご提供いただきました。記して御礼いたします。

参考文献

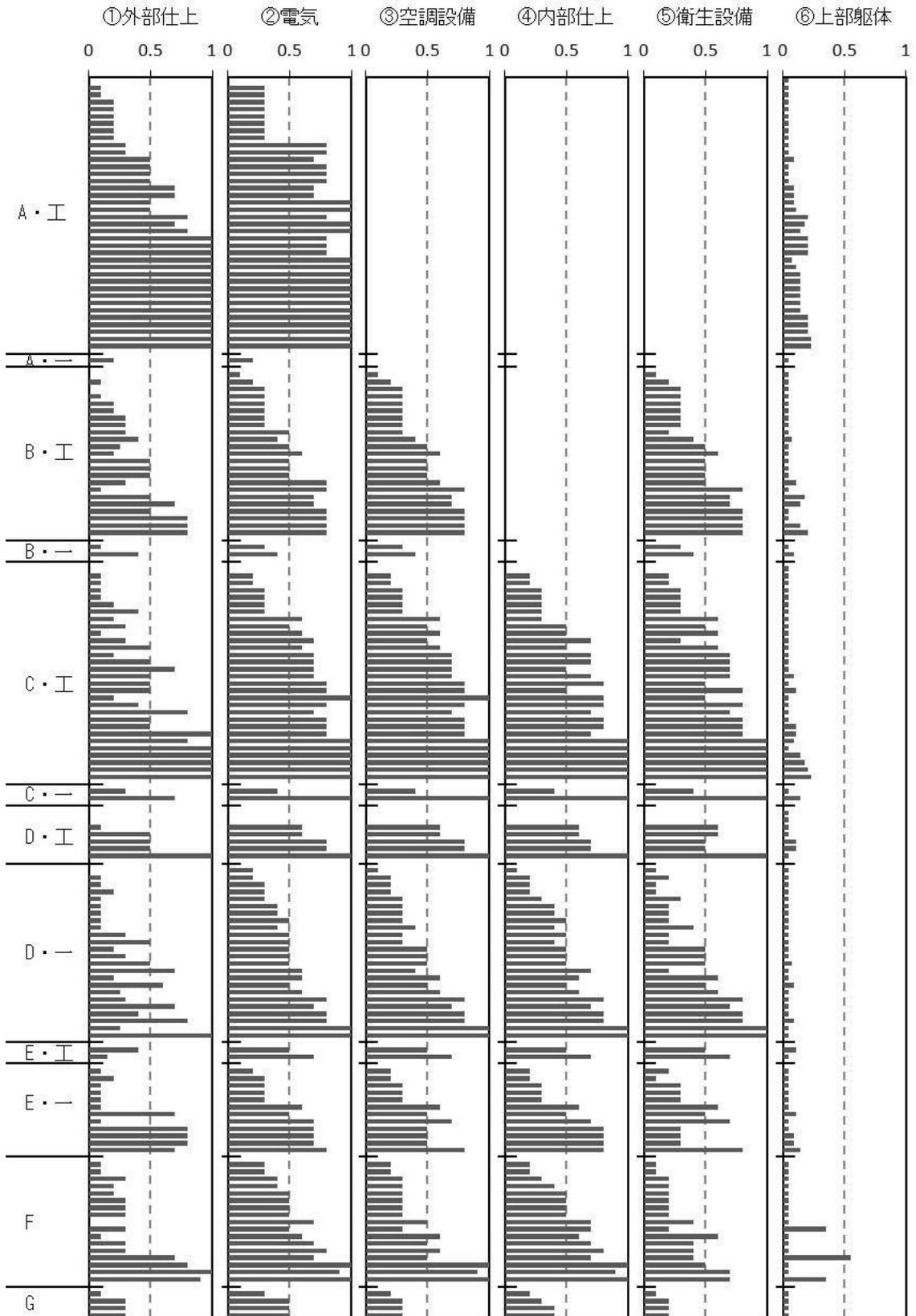
- 1) 首藤伸夫：津波強度と被害、東北大学津波工学研究報告、第9号、1992年、pp.101-136
- 2) 越村俊一、行谷佑一、柳澤英明：津波被害関数の構築、土木学会論文集B、Vol.65、No.4、2009年、pp.320-331
- 3) 内閣府：南海トラフの巨大地震 建物被害・人的被害の被害想定項目及び手法の概要、http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/2_2.pdf（アクセス日：2012年10月28日）
- 4) 村尾修、仲里英晃：スリランカにおける2004年インド洋津波の建物被害関数、日本都市計画学会都市計画報告集、No.8、2009年、pp.21-26
- 5) 国土交通省都市局：国土交通省都市局『復興支援調査アーカイブ』データ
- 6) 相田勇：三陸沖の古い津波のシミュレーション、東京大学地震研究所彙報、Vol.52、1977年、pp.71-101
- 7) 土木学会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、2002年
- 8) 建物物価調査会：建築コスト情報 2013年 01月号、2012年
- 9) 村尾修、山崎文雄：自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数、日本建築学会構造系論文集、第527号、2000年、pp.189-196

10) Efron, B. : Bootstrap methods: Another look at the jackknife, *Annals of Statistics*, Vol. 7, 1979, pp. 1–26,

(受理 : 2014年5月29日)

(掲載決定 : 2014年9月25日)

付録 建物分類A~G別 建物用途別 工事別被害割合 (d_{ij})
 (工は工場・倉庫、一は一般を表す)



**Tsunami vulnerability functions for nonresidential buildings
based on damage survey data of the 2011 Tohoku earthquake**

OKUNO Shunya¹⁾, TONAGI Masao²⁾, YAMAGUCHI Makoto³⁾,
YAMAMOTO Haruki⁴⁾ and KOSHIMURA Shunichi⁵⁾

1) Member, Kozo Keikaku Engineering Inc.

2) Kozo Keikaku Engineering Inc.

3) Member, General Insurance Rating Organization of Japan.

4) General Insurance Rating Organization of Japan.

5) Member, Professor, International Research Institute of Disaster Science, Tohoku University, Ph. D.

ABSTRACT

We estimate restoration cost of damaged nonresidential buildings from tsunami damage survey data from the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, and calculate the ratio of the cost to its replacement cost for each building. Using the damage ratio and inundation depth, vulnerability functions are developed for steel industrial plants (including depositories), steel nonresidential buildings excepting the former, and reinforced concrete buildings. In comparison between the obtained three functions, the damage ratios of steel buildings are equal to or higher than the one of RC buildings at the same inundation depth, steel industrial plants are more vulnerable than steel buildings of the other use for the depth less than about 3.5m, and the relation is reversed for deeper inundation depth.

Keywords: Tsunami, vulnerability function, Tsunami damage survey, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake