東北地方太平洋沖地震津波による浸水域被害と構造物被害予測法

Damage in inundation area by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake tsunami and the prediction method of building damage

山本吉道¹・成吉兼二²・石井俊輔³

Yoshimichi YAMAMOTO, Kenji NARIYOSHI and Syunsuke ISHII

For the preparedness against huge tsunamis, the following were conducted: An investigation of buildings damaged by a huge tsunami caused by the earthquake off the Pacific coast of Tohoku was executed for April 9-15, 2011. Wooden buildings had suffered heavy damage when inundation depths exceeded 1.5m and rein-forced concrete buildings had broken when inundation depths exceeded 5m. Then, the comparison between these damage data and diagrams of Yamamoto et al. (2011) for predicting a building destruction grade was executed, and it turned out that the diagrams could explain the actual building damage well. Finally, it was also shown that the method of applying inundation depths got using a numerical simulation model of Yamamoto et al. to the diagrams predicts the actual damage with sufficient accuracy.

1. はじめに

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震津波では、青森県～千葉県にかけての太平洋沿岸域で甚大な浸水被害が発生し、これの被害調査結果が多数報告されている。特に東大生産研(2011)は避難ビル設計法見直しを目的に、津波力評価法、鉄筋コンクリート建物やコンクリート構造物などの破壊限界津波圧、漂流物の衝突力等について詳細に検討している。しかし、主要部材の寸法の違いまで考慮した普遍的な破壊限界調査報告は見当たらなかった。それゆえ、近い将来の南海トラフ境界型巨大地震津波発生が予想され、一層の防災・減災の研究が必要であることから、著者達は2011年の大津波による構造物被害に焦点を当てた現地調査を行い、整理した構造物被害データとの比較から、山本ら(2011)の構造物破壊限界算定図と平面二次元遡上数値計算による構造物被害予測法が日本でも有効であることを明らかにする。

2. 浸水域構造物被害実態調査

2011年4月9日～15日間に、地震被害を無視出来ない石巻周辺部と福島第一原発事故による立入禁止区域を除いた岩手県宮古市以南～茨城県日立市以北沿岸の津波浸水域において、鉄筋コンクリート建物、木造家屋、コンクリートブロック塀、および、鉄骨建物の破壊状況を重点的に調べ、緯度、経度、浸水深、柱や壁の材質、基本寸法、破壊状況等を表-1～表-3に示すように整理した。図-1～図-7は、上記調査時に撮影した各種構造物の被災写真の代表例である。

図-1 鉄筋コンクリート家屋、浸水深5.5m, 山田町

図-2 鉄筋コンクリート建物、浸水深10m, 陸前高田町

図-3 鉄筋コンクリート建物、浸水深9m, 全体転倒, 女川町

図-4 木造家屋、浸水深2m, 壁破壊, 北茨城市

図-5 ブロック塀、浸水深2m, 塀転倒, 北茨城市

図-6 鉄骨建物、浸水深7.5m, パネル壁破壊, 山田町

図-7 鉄骨建物、浸水深7.5m, 船衝突, 気仙沼市

1 フェロー 博(工) 東海大学 教授
2 学生会員 修(工) 東海大学大学院 総合理工学研究科
3 修(工) 首都高技術株式会社

各種建物等の津波による破壊特性について、これらの a) 鉄筋コンクリート建物の場合、窓や扉は表面積の半
表や写真などから、以下のようにまとめられる。 部程度以上漬かると破れ始めるが、壁が壊れ始めるの

表-1 2011 東日本大震災における鉄筋コンクリートビルディング被害調査結果一覧

県名	岩手県									
市町名	宮古市					山田町			釜石市	
緯度	39° 38' 28"	39° 38' 25"	39° 38' 22"	39° 28' 17"	39° 28' 17"	39° 28' 17"	39° 28' 33"	39° 28' 33"	39° 18' 37"	39° 15' 59"
経度	141° 52' 46"	141° 57' 56"	141° 58' 10"	141° 57' 15"	141° 57' 14"	141° 57' 14"	141° 57' 17"	141° 57' 17"	141° 53' 19"	141° 53' 11"
浸水深(m)	4.8	5.0	6.0	6.0	5.5	5.5	6.5	6.5	5.0	6.5
階数	2	2	2	3 ~ 4	3	2	4	2	2	4
柱幅(m)	0.44	0.63	0.85	0.50	0.55			0.49	0.53	0.65
柱高さ(m)	3.3	3.2	3.5	3.2	4.5			4.0	3.5	3.5
柱間隔(m)	6.0	6.0	5.5	6.5	6.0			4.0	4.5	5.0
柱の破壊	無し	無し	無し	無し	無し			無し	無し	無し
壁厚さ(m)					0.3	0.25	0.24	0.10	0.17	0.30
壁高さ(m)					4.0	中窓破損	大窓破損	3.5	3.2	大窓破損
壁の破壊	無し	無し	無し	無し	無し	無し	無し	破壊	破壊	無し
県名	岩手県									
市町名	大船渡市					陸前高田市				
緯度	39° 4' 1"	39° 4' 1"	39° 4' 1"	39° 3' 58"	39° 4' 7"	39° 0' 36"	39° 0' 32"	39° 0' 52"	39° 0' 51"	39° 0' 51"
経度	141° 43' 18"	141° 43' 18"	141° 43' 14"	141° 43' 15"	141° 43' 19"	141° 38' 38"	141° 38' 42"	141° 38' 22"	141° 38' 02"	141° 38' 02"
浸水深(m)	6.5	6.5	5.0	6.5	8.0	10.0	9.0	8.5	8.5	8.5
階数	3	2	2	2	3 ~ 4	5	2	3	2	2
柱幅(m)	0.65	0.45	0.75	0.40	0.75		0.75	0.61	0.60	0.55
柱高さ(m)	3.5	3.1	3.4	3.2	4.0		3.5	3.5	3.7	3.5
柱間隔(m)	4.8	5.2	5.8	3.5	15.0		6.6	9.4	3.8	5.0
柱の破壊	無し	無し	無し	無し	無し		無し	無し	無し	無し
壁厚さ(m)	0.23	0.21	0.20	0.20	0.20	0.27	0.20	0.17	0.18	0.22
壁高さ(m)	3.4	中窓破損	中窓破損	中窓破損	大窓破損	大窓破損	大窓破損	大窓破損	3.5	中窓破損
壁の破壊	部分破壊	無し	無し	無し	無し	無し	無し	無し	破壊	無し
県名	宮城県									
市町名	気仙沼市				仙台市		福島県		茨城県	
緯度	38° 54' 57"	38° 54' 58"	38° 54' 44"	38° 16' 28"	38° 13' 23"	38° 13' 20"	37° 49' 38"	36° 49' 49"	36° 47' 44"	36° 34' 41"
経度	141° 34' 55"	141° 34' 58"	141° 34' 51"	141° 0' 20"	140° 59' 05"	140° 58' 51"	140° 58' 23"	140° 47' 32"	140° 45' 15"	140° 39' 28"
浸水深(m)	8.0	7.0	7.2	5.0	7.5		6.0	2.7	2.0	3.5
階数	3	2	2	2	2	4	2	2 ~ 3	2	2
柱幅(m)	0.40	0.76	0.52	0.82	0.77	0.60	1.20	0.44	0.27	0.90
柱高さ(m)	2.7	4.0	3.5	3.7	3.0	3.4	3.5	3.4	3.1	4.0
柱間隔(m)	3.5	5.0	3.8	6.5	7.4	4.5	20.0	3.6	3.7	6.0
柱の破壊	無し	無し	無し	無し	無し	無し	無し	無し	無し	無し
壁厚さ(m)	壁無し				0.21	0.20	壁無し	0.20		0.23
壁高さ(m)		中窓破損	中窓破損	中窓破損	中窓破損	大窓破損		3.2	大窓破損	3.5
壁の破壊		無し	無し	無し	無し	無し		無し	無し	無し
備考	柱間隔は津波侵入方向に平行な値である。図-9上に2・3階建ての、図-9下に4・5階建てのデータを使用する。									

表-2 2011 東日本大震災における木造家屋被害調査結果一覧

県名	岩手県				宮城県		福島県	茨城県		
市町名	宮古市				気仙沼市	仙台市	いわき市	北茨城市		日立市
緯度	39° 38' 28"	39° 38' 28"	39° 38' 28"	39° 38' 28"	38° 54' 18"	38° 16' 41"	36° 51' 39"	36° 49' 49"	36° 47' 44"	36° 47' 29"
経度	141° 52' 45"	141° 52' 45"	141° 52' 45"	141° 52' 46"	141° 34' 58"	140° 59' 23"	140° 47' 25"	140° 47' 32"	140° 45' 15"	140° 44' 59"
浸水深(m)	2.9	2.2	2.9	3.7	2.7	1.4	2.0	2.0	2.0	1.3
階数	2	2	2	2	2	1	2	2	1	2
柱幅(m)	0.34	0.12	0.12	0.15	0.12	0.12	0.20	0.20	0.15	0.12
柱高さ(m)	3.0	2.7	3.0	3.0	2.7	2.7	2.7	3.1	2.7	2.7
柱間隔(m)	6.2	1.8	4.8	2.5	1.8	3.7	3.6	3.6	3.7	3.6
柱の破壊	無し	無し	破壊	破壊	破壊	無し	無し	無し	無し	無し
壁の構造	板+モルタル		板+モルタル				板+モルタル	土+竹+板	土+竹+板	板+モルタル
壁厚さ(m)	0.15		0.12				0.10	0.15	0.10	0.10
壁高さ(m)	2.9		2.9				2.6	3.0	2.5	2.6
壁の破壊	破壊	破壊	破壊	破壊	破壊	無し	破壊	部分破壊	破壊	無し
備考	柱間隔は津波侵入方向と平行な値である。									

表-3 2011 東日本大震災におけるコンクリートブロック塀被害調査結果一覧

市町名	宮古市		仙台市				北茨城市			
緯度	39° 36' 54"	38° 16' 41"	38° 16' 41"	38° 14' 11"	38° 13' 46"	36° 49' 49"	36° 47' 44"	36° 47' 29"	36° 47' 29"	36° 47' 29"
経度	141° 57' 27"	140° 59' 23"	140° 59' 23"	140° 57' 39"	140° 58' 19"	140° 47' 32"	140° 45' 15"	140° 44' 59"	140° 44' 59"	140° 44' 59"
浸水深(m)	0.5	1.0	1.0	0.9	2.0	2.0	2.0	1.3	1.3	1.3
塀の構造	無筋コンクリート ブロック	穴開き鉄筋 コンクリートブロック	無筋コンクリート ブロック	鉄筋コンクリート ブロック	鉄筋コンクリート ブロック	鉄筋コンクリート ブロック	鉄筋コンクリート ブロック	鉄筋コンクリート ブロック	鉄筋コンクリート ブロック	無筋コンクリート ブロック
塀の破壊	無し	無し	破壊	無し	破壊	破壊	破壊	破壊	破壊	破壊

は窓占有比が30%程度以下、壁厚が23cm程度以下で、浸水深が5m以上になった時である。柱の破壊事例は無かったが、基礎部の耐震設計が不十分な古い建物の場合、女川町の事例のように、基礎部が壊れ、建物全体が転倒していた。

- b) 木造家屋の場合、浸水深が1.2m程度以上で、窓や扉は容易に破損し、壁も厚さ10cm程度の場合は壊れ始める。柱は浸水深が2.5m以上になると倒れる可能性が高い。
- c) コンクリートブロック塀（規格厚さ10cm）については、浸水深が無筋の場合で1m以上、鉄筋が入っている場合で1.3m以上になれば、転倒する可能性が高い。
- d) 鉄骨建物については、紙面の制約からデータ一覧表を載せられなかったが、船舶や自動車のような大型の漂流物が衝突した場合を除いて、主鉄骨が壊れた事例は無い。ただし、壁はパネル状で薄いため、浸水深が3m程度以上になると破れる可能性が高い。

3. 建物等の破壊限界寸法

津波による建物破壊の評価は、従来の建物設計法を用いて高い精度で行えるが、専門家による複雑な検討が必要のため、そのコストは一軒当たり十万元以上と高く、市町村が従来の設計法から被害を想定して、防災・減災計画を策定することは極めて困難である。一方、多くの被災実態データから、構造タイプ毎に浸水深（または浸水流速）と破壊程度との関係を調べて、この評価に用いる極めて簡便な方法も有るが、主要部材の代表寸法の違いが破壊程度に及ぼす影響までは分らない。それゆえ、山本ら（2011）は以下に述べる簡便評価法を提案している。

一般的な建物は、二本の柱と一本の梁から成るラーメン構造で荷重を支えるように設計されている。さらに、1993年北海道南西沖地震津波、2004年インド洋大津波による建物破壊に対する聞き取り調査によると、建物が破壊されるほどの津波来襲の場合、瞬時に窓や扉が破損し、建物内外の水平静水圧が相殺されると共に、壁が間を開けず破れ出し、柱が破壊される場合は根元から折れて、“全壊”の状態になる。柱が破壊されない場合は“半壊”の状態である。この破壊状況は2011年の大津波時も同様であったことから、柱は基盤と一体であり壁に比べて強く、壁には瞬時に壊れる窓や扉が適度に有るとの条件下で、図-8に示す津波力と屋根等の上部荷重が作用する門型ラーメンを仮定し、津波力が直接作用する柱基部の応力から、浸水深と壊れない限界柱幅との関係を求められる。

津波力算定式には、フルード数の大きな海岸線近傍で使える朝倉ら（2000）の式、勢いが低減した内陸での飯塚・松富（2000）の式などがあり、東大生産研（2011）

図-8 門型ラーメン・モデルの説明図

は、避難ビル設計を目的に相当安全側に津波力算定基準を提案しているが、本研究では若干安全側ながら、実際に近い被害想定を目指すため、海側に遮蔽物があれば、遮蔽物背後の建物より陸側を、遮蔽物が無い場合は海岸線から津波高の二十倍以上陸側を対象に飯塚・松富の次式を用いる。

$$F = \frac{C_f}{2} \rho B h v^2 = \frac{C_f}{2} \rho B h (F_r \sqrt{g h})^2 \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 F は津波力、 C_f は流体力係数（ $=2$ ）、 ρ は海水密度、 B は津波力作用幅、 h は建物前面浸水深、 v は浸水速度、 F_r はフルード数（ $=1.1$ ）、 g は重力加速度。

さらに、建物の主要部材の寸法は人間の代表寸法で基準化されているため、柱間隔や柱高さの様な基本寸法の組合せは限られる。本章では、使用頻度の高い柱間隔と柱高さ等の限られた組合せに対して、任意の浸水深に対する破壊限界となる柱幅と壁厚を求める算定図を紹介し、2011年の大津波による被災データとの対応を確認する。

(1) 鉄筋コンクリート建物の柱の破壊限界幅

一階ラーメン部の柱間隔は、被災実態データ内での頻度特性から半間（ ≈ 1 ヤード）の整数倍＋丸め値とし、一階ラーメン部の柱高は高頻度の中央値3.35mとし、柱の断面構造も頻度の多さから、海側と陸側に鉄筋棒を配列する複鉄筋の矩形断面とした、そして、二階建てと五階建ての場合について、津波の浸水深を変えて柱の根元の曲げ・剪断応力を計算し、部材強度と比較することから、浸水深と壊れない限界幅との関係を求めて、図-9に曲線で示した。ここで、安全側の結果を出すため、上部荷重と見なす二階以上の部分は、やや過大な6.4m×柱間隔×（0.25m×階数）のコンクリート塊でモデル化し、鉄筋比に下限値に近い0.05を、被り厚に収集データ内で有効柱幅が最小になる5.0cmを採用し、帯鉄筋の効果も無視している。そして、コンクリートの圧縮曲げ強度には下限値に近い20N/mm²を、剪断強度にはその1/10を、鉄筋棒の引張曲げ強度には下限値に近いこととヤング係数比の標準値（15）に配慮して300N/mm²を用いた。

図-9の上図に表-1の二・三階建て、図-9の下図に表-1の四・五階建ての非破壊データを白丸でプロットし、すぐ傍に柱間隔の数値（単位はm）を付記した。各白丸の柱間隔に対応する曲線が概ね右下にくることから、本算定図の適用性は高いと言える。本条件下の破壊形式は主

に鉄筋の引張曲げ破壊であり、耐震設計された六階建て以上の場合、津波力が地震力を上回る可能性は低く、津波に対する安定性検討の必要性は低い。

(2) 木造建物の柱の破壊限界幅

木造家屋の木製柱へ門型ラーメンを適用した場合の適用性も、山本ら（2011）は1993年北海道南西沖地震津波による被災データを用いて、図-10のように示している。一階部の柱高には安全側を考慮して高めの3.3mを、柱断面には矩形を設定している。一階建ての上部荷重は、屋根を柱間隔×柱間隔×0.1mの木質塊（密度500kg/m³）と柱間隔×柱間隔×3.5cmの瓦部（密度2000kg/m³）で、二階建ての場合は二階部分の屋根以外を柱間隔×柱間隔×0.4mの木質塊でモデル化している。木製柱の曲げ強度と剪断強度については、平成12年建設省告示1452号を参考に、各々中級材の20N/mm²と2.4N/mm²を用いている。

図-10には表-2の被災データもプロットし、柱間隔の数値（単位はm）も付記した。白丸は非破壊、灰色丸は部分破壊、黒丸は全破壊事例であり、各白丸の柱間隔に対応する曲線は右下に、各灰色・黒丸に対する曲線は左上にくることから、本算定図は部材の強さを適切に評価していると言える。

(3) 鉄筋コンクリート建物の壁の破壊限界厚

建物の壁を自立壁と仮定して片持ち梁で計算した場合、壁の強さを過小評価したので、海陸両側の壁と上部床板が柱と梁を介してラーメン構造になっていると仮定し、壁の破壊限界厚さを求める。海側の壁に津波力が作用し、上部荷重は柱で全て支えられ壁に作用しない条件下で、津波の浸水深を変えて壁の根元の応力を計算し、部材強度との比較から破壊限界の壁厚さを求めると図-11を得る。壁間隔として2.8mと6.4mの2種類を考え、各々を実線と破線で示し、一階部高さには3.35mを用いた。鉄筋は壁断面の中心線に沿って一列で配置し、鉄筋比を0.0133（壁厚10cmの場合、直径1.3cmの鉄筋を10cm間隔で配置）とし、部材強度は柱の場合と同じに設定した。

図-11に表-1の非破壊データを白丸で、破壊データを黒丸でプロットした。白丸が曲線上にあり、黒丸が右下にくることから、本算定図の適用性は高いと言える。本条件下での破壊形式は鉄筋の引張曲げ破壊である。

(4) 木造建物の壁の破壊限界厚

木造家屋の壁には多様なタイプがあり、破壊限界厚さを精度良く評価するには、タイプ毎に複雑な構造をモデル化して解析する必要がある。ここでは、大雑把な目安を得るために、山本ら（2011）が単一材料で造られた門型ラーメンに津波力のみが作用する場合の応力を計算し、破壊状態が北海道南西沖地震津波による被災事例（主に曲げ破壊）と最も良く一致する部材強度（曲げ強度3N/mm²、剪断強度1N/mm²）で作成した図-12を示す。

本図にも北海道南西沖地震津波による被災データがプロットされているが、表-2の被災データもプロットした。白丸は非破壊、灰色丸は部分破壊、黒丸は全破壊事例で

図-9 浸水深と鉄筋コンクリート柱の破壊限界幅との関係

図-10 浸水深と木製柱の破壊限界幅との関係

図-11 浸水深と鉄筋コンクリート壁の破壊限界厚との関係

あり、白丸が曲線の左上に、黒丸が右下にくることから、本算定図の適用性は低くないようである。

(5) コンクリートブロック塀の転倒限界水深

ブロック（規格厚さ10cm×長さ40cm）を積上げた塀について、各コンクリート強度に対する壊れない限界の浸水深を、片持ち梁に津波力だけが作用する場合と海側水平方向静水圧も無視できない場合で検討し、その結果を図-13に示す。本図の左側は無筋の場合、右側はブロック1個毎に直径1.3cmの鉄筋を1本挿入している場合である。この条件下では鉄筋の引張曲げ破壊となり、この強度にコンクリート圧縮曲げ強度の15倍の値を用いた。本図にも北海道南西沖地震津波による被災データが載っているが、表-3の被災データもプロットした。白丸は非破壊、黒丸は全破壊事例であり、白丸が曲線の下に、黒丸が上にくることから、本算定図の適用性は高いと言える。

4. 現地海岸での津波被害予測法の精度

山本ら（2011）が提案した津波遡上計算法を、2011年の大津波来襲時の陸前高田町と気仙沼市に適用した結果を図-14～15に示す。両図共に、最大浸水域は国土地理院等のホームページにある実測図と概ね一致しており、図中要所の浸水深も比較的良く一致していた。それゆえ、紙面の制約から計算表を省いたが、これらの浸水深の計算値を図-9～13に示す算定図に当てはめて求めた建物等の柱と壁の破壊限界値は、実際の破壊程度を良く説明している。以上から、予め、対象地域の全建物の主要な柱と壁の代表寸法を求め、前述の算定図に不足があれば補充しておき、想定津波に対する遡上計算を上記の計算法で行い、得られた浸水深の計算値を該当算定図に当てはめれば、既往津波被害データの分析結果をそのまま当てはめるより、詳細で精度の高い被害予測が可能となる。

5. 主要な結論

2011年東北地方太平洋沖地震津波による建物等の被害特性を現地調査から把握し、その時の被災データを用いた検討から、本論文での津波遡上数値計算法と門型ラーメンモデルに基づく建物の柱と壁の破壊限界値算定法による津波被害予測法が有用であることを確認できた。

参 考 文 献

- 朝倉良介・岩瀬浩二・池谷 毅・高尾 誠・金戸俊道・藤井直樹・大森政則（2000）：護岸を越流した津波による波力に関する実験的研究，海岸工学論文集，第47巻，pp.911-915。
 飯塚秀則・松富英夫（2000）：津波氾濫流の被害想定，海岸工学論文集，第47巻，pp.381-385。
 東大生産研究所（2011）：平成23年度建築基準整備促進事業中間報告その2，東大生産研究所2011年10月公表，85p。
 山本吉道・N. Charusrojthanadech・成吉兼二（2011）：津波による陸側構造物被害の合理的評価法の提案，土木学会論文集B2（海岸工学），Vol.67, No.1, pp.72-91。

図-12 浸水深と木造家屋壁の破壊限界幅との関係

図-13 壊れない限界の津波浸水深

図-14 陸前高田町に於ける津波来襲31分後の浸水状況

図-15 気仙沼市に於ける津波来襲25分後の浸水状況