

東日本大震災の津波による建築被害

田村修次

要 旨

東日本大震災では、津波によって無数の建物が流され、壊滅的な被害を受けた。本稿では、地震発生から約1ヶ月後に行った女川町、気仙沼市、陸前高田市、石巻市の地震被害調査をもとに、津波による建築被害を報告する。戸建て住宅は基礎のみを残して流され、鉄骨造建物では外装材が流され柱・梁・床のみ残されるケースが多い。津波による構造的被害は鉄筋コンクリート造建物で最も軽微であった。ただし、フーチングと杭基礎の接合部が破壊して鉄筋コンクリート建物が流され転倒したケースがあった。津波避難ビルでは、基礎構造にも十分に留意する必要がある。

キーワード：2011年東北地方太平洋沖地震、津波、建物被害、基礎構造

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、津波によって無数の建物が流され、壊滅的な被害を受けた。本報告は、地震発生から約1ヶ月後に行った宮城県および岩手県沿岸部の地震被害調査をもとに、津波によ

る建築被害を報告するとともに、建物が転倒した要因を地盤・基礎構造の観点から考察する。なお、被害調査を行った日程は下記である。

4月14日、5月5日：女川町

4月15日：気仙沼市、陸前高田市

4月16日：石巻市



Photo 1 RC 4-story building A, tsunami reached 4th floor (Rikuzentakada-city)



Photo 2 Damage to building A possible caused by floating wreckage



Photo 3 RC 4-story building B, tsunami reached 4th floor



Photo 4 Scour around building B

2. 岩手県陸前高田市における建物被害

東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによると、陸前高田市の浸水高さは15mに達した。市内の低地は壊滅的な被害を受けた。

2.1 鉄筋コンクリート造建物の被害

Photo 1は、岩手県立T病院である。4階まで浸水している。浸水高さが14~15m程度であったことが分かる。洗掘によってフーチングが露出しているものの、建物の沈下・傾斜はない。漂流物の衝突によると思われる損傷があった (Photo 2)。ただし、構造体の損傷は軽微であった。

Photo 3は、鉄筋コンクリート造4階建ての集合住宅である。4階まで浸水し、建物4隅の周辺地盤に洗

掘の跡 (Photo 4) があるものの、構造体の損傷は軽微である。

住宅を思われる鉄筋コンクリート2階建ての建物が転覆していた (Photo 5)。Photo 6に示すようにフーチングには、杭の痕跡があった。フーチングと杭基礎との接合部は脆弱である。地震または波圧によって、フーチングと杭の接合部が破壊し、浮力によって浮上り、流され転覆したと思われる。周囲は瓦礫で覆われ、建設場所は不明である。同様に転覆した小規模RC建物は陸前高田市役所の近傍にもあった (Photo 7)。Photo 8は転倒した鉄筋コンクリート2階建て (直接基礎) である。

以上のように、中層の鉄筋コンクリート造では、柱・梁などの構造体の被害は軽微であった。ただし、小規模な鉄筋コンクリート造建物では浮力によって流さ



Photo 5 Overturned building C



Photo 6 Pile cap of building C



Photo 7 Overturned building



Photo 8 Toppled building



Photo 9 Damage of cladding of building D (Sea side)



Photo 10 Building D (Mountain side)



Photo 11 Damage to steel structure



Photo 12 Damage to steel structure



Photo 13 Damage to steel structure



Photo 14 Remained house's foundation

れ、転倒・転覆したケースがあった。

2.2 鉄骨造建物の被害

大型ショッピングセンターである鉄骨造3階建てでは、壁が破壊されていた(Photos 9, 10)。海側の壁は、外向き(山から海側)に破壊していた。鉄骨造の戸建て住宅の多くは、Photos 11, 12のように、外装材が流され柱・梁・床のみを残していた。また、Photo 13のように柱が塑性しているケースもあった。

2.3 木造家屋の被害

木造家屋は、Photo 14に示すように基礎のみを残し、流されるケースがほとんどであった。

3. 宮城県気仙沼市および石巻市における建物被害

浸水高さが5mに達する南気仙沼駅の周辺では、Photos 15, 16のように多くの木造家屋が流され、壊滅的な被害を受けた。鉄筋コンクリート3階建ての建物では2階まで浸水した(Photo 17)。2階の窓から脱出した形跡があった。1階からの脱出が水圧や瓦礫のため困難だったと思われ、また、気仙沼市では火災も発生し、Photo 18に示すように黒く焼けた建物が点在

していた。また、鉄骨造3階の鉄骨が折れ曲がっていた(Photo 19)。気仙沼港の近くでは、Photo 20に示すように大型船や漁船が陸に打ち上げられていた。

石巻市では地盤が流失し道がなくなり、建物が浸水していた(Photos 21, 22)。古地図によると、この場所は埋立地で、明治期には小川の河口に対応する。液状化して地盤のせん断剛性が低下した状態で、津波で来た可能性も考えられる。石巻市では、多くの戸建て住宅が津波によって流された。ただし、大型鉄筋コンクリート造建物(石巻市立病院)の背面(山側)の区画では、木造戸建て住宅が残っていた(Photo 23)。一方、その山側では、基礎を残して大部分の戸建て住宅が流された(Photo 24)。この隣接する2つの場所で浸水高さが異なっていたとは考えられず、大型鉄筋コンクリート造建物によって津波の影響が軽減した可能性が考えられる。

4. 宮城県女川町における建物被害

4.1 女川町における被害概要

Photos 25-28は、町立女川病院の駐車場から撮影した被災地の様子である。多くの建物が流失し、転倒した中層建物が点在していることが分かる。町立女川病院は、Photo 29に示すように標高15m程度の高台に位



Photo 15 View of Kesennuma-city



Photo 16 View of Kesennuma-city



Photo 17 RC 3-story building, tsunami reached 2nd floor



Photo 18 RC 3-story building, damage caused by Tsunami and fire



Photo 19 Damage to steel structure



Photo 20 Ship on land

置するが、その1階まで津波は到達した。低地の3階建て建物の屋上に車が残されていた(Photos 31)。東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによると、女川町の浸水高さは19mに達した。女川町では、建物の基礎構造に着目して建物被害を報告する。

4.2 杭基礎建物の被害

女川町では、杭基礎で支持された鉄筋コンクリート4階建ての建物が転倒していた(Photo 32)。この建物は、建設場所から山側に70m程度流され、転倒した(Photo 33)。Photo 34に示すように連続したフーチ

ングに直径300mmのPC杭基礎が1本ぶら下がっていた。この杭はほぼ無傷であった。それ以外の杭は、すべてフーチングと杭頭の接合部で破壊していた。建設地点には杭基礎が突出した状態で残されていた。残された杭基礎の破壊形態から曲げと引き抜き力が杭に作用したと思われる。

杭基礎で支持された鉄骨造4階建ての建物が山側に10m程度流され転倒した(Photos 35, 36)。建設場所と転倒場所の間に位置する駐車場では、建物が流された時にできたと思われる亀裂が1つあるものの、それ以外に目立った損傷はない(Photo 37)。これから、建物



Photo 21 Road washed away by tsunami
(Ishinomaki-city)



Photo 22 Road washed away by tsunami
(Ishinomaki-city)



Photo 23 Remained houses behind RC building



Photo 24 Remained house's foundation

は津波による浮力で浮き上がって移動した後、転倒したと思われる。この建物の基礎は、フーチングを杭が2本ないし3本で支持する形式である (Photo 38)。建物の基礎には、直径300mmのPC杭基礎が1本ぶら下がっていた。それ以外の杭は、すべてフーチングと杭基礎の接合部で破壊していた。この杭基礎のフーチングの接合部は、中詰めコンクリートであり、ぜい弱である。ほとんどの中詰めコンクリートが破壊し、鉄筋のみが残されていた。杭頭接合部が地震で損傷し、その後の津波で破断した可能性が考えられる。

杭基礎で支持された2階建ての鉄筋コンクリート建物(冷蔵倉庫と思われる)が転倒した (Photo 39)。この建物の基礎は、1つのフーチングを杭が4～5本で支持する形式である。この建物も海側から山側に7m程度流されて転倒した。その途中には高さ1m程度の壁があったが、それを乗り越えている。これから、1m以上浮上って流されて転倒したと考えられる。この建物の杭とフーチングの接合部もPhoto 40に示すように極めて脆弱なものであった。全ての杭がフーチングとの接合部で破断していた。

杭基礎で支持された2階建ての鉄筋コンクリート建物が転倒した (Photo 41)。この建物は、海からほぼ直角の方向に倒れていた。Photo 42に示すように、フーチングとの接合部で破壊した杭と接合部から1m

程度下で破壊した杭が混在していた。

Photo 43は海岸に隣接した大規模な観光施設(鉄筋コンクリート3階建て)である。この建物は竣工1994年 (Wikipedia)である。海に面していることから、津波の直撃を受けたと考えられる。基礎周辺では洗掘が激しく (Photo 44)、地盤も一部流失しているものの、傾斜や建物の移動はない。構造体の損傷も確認できなかった。

日本の建築物の耐震性能は、1981年の新耐震設計法の導入で飛躍的に高まった。しかし、杭基礎の耐震設計は義務化されず、杭の性能は鉛直支持性能だけで決まっていた。杭基礎の耐震設計は1984年から推奨され、2001年に建設省告示で義務化された。陸前高田市や女川町で杭が破壊された転倒した建物は、建設年代の古いものであった。一方、建設年代の新しい中層鉄筋コンクリート造建物の多くは津波に直撃されても残っていた。これは、杭の耐震設計が行われていたか、否かによる違いが大きかったと思われる。

4.3 直接建物の被害

直接基礎(べた基礎)で支持された3階建て鉄筋コンクリート建物が山側から海側に流され転倒した (Photo 45)。基礎の根入れ深さは1m程度であった。



Photo 25 View of Onagawa-chou



Photo 26 View of Onagawa-chou



Photo 27 View of Onagawa-chou



Photo 28 View of Onagawa-chou



Photo 29 Camera station of Photos 21-24



Photo 30 Car on steel 3-story building



Photo 31 Car on RC 3-story building



Photo 32 Topped RC 4-story building E



Photo 33 RC building E carried 70 m away and toppled



Photo 34 Pile of toppled building E



Photo 35 Toppled steel structure 4-story building F



Photo 36 Estimated location of building F



Photo 37 Toppled building F



Photo 38 Pile of toppled building F



Photo 39 Toppled RC 2-story building G



Photo 40 Pile cap of toppled building G



Photo 41 Toppled building H



Photo 42 Piles of toppled building H



Photo 43 RC 3-story building I at sea-side



Photo 44 Extensive scour around building I



Photo 45 Toppled RC 3-story building



Photo 46 RC exterior walls out-of-plane failure



Photo 47 Building J at sea-side



Photo 48 Extensive scour around building J



Photo 49 Damage to steel structure



Photo 50 Damage to steel structure



Photo 51 Tilted steel structure building K



Photo 52 Extensive scour around building K



Photo 53 Remained house's foundation



Photo 54 Damage to steel structure



Photo 55 Ground settlement around building nearby building E



Photo 56 Ground settlement around building nearby building H

4.4 建物の構造種別と津波被害

鉄筋コンクリート構造では、壁が破壊 (Photo 46) される被害があったものの、柱や梁などの構造体が破壊して倒壊したケースは無いと思われる。女川港に隣接した鉄筋コンクリート造2階建てでも、基礎周辺地盤に激しい洗掘の跡があったものの、構造的被害は軽微であった (Photos 47, 48)。

鉄骨造では、柱、梁の構造体を残し、壁が破壊されて流されるケースが多く見られた (Photos 49-52)。Photo 49のように、隣接する鉄筋コンクリート造建物では構造的被害が軽微なケースもあった。鉄骨造の津波に対する性能は、鉄筋コンクリート造に比べて劣ると思われる。なお、Photo 51の建物は、洗掘された跡に建物が落ち込み (Photo 52)、大きく傾斜していた。

木造家屋は、Photo 53に示すように基礎のみを残して流されるケースが多く見られた。女川町では津波の浸水域は、ほとんどの木造家屋は流されており、数m以上の浸水高さの津波に対しては、木造家屋は流されるリスクが極めて高い。なお、列車が丘の上まで流されていることが分かる。

4.5 建物に作用した荷重

女川魚市場の山側に位置する鉄骨造2階建て建物では、Photo 54に示すように、2階が塑性変形し、1階は概ね弾性変形だった。この建物の構造体の寸法を実測し、1階と2階の耐力を算定したところ、外力を20~25kN/m²程度の動水圧 (等分布) と仮定すると、実被害を説明することができた。一方、静水圧 (三角形分布) を仮定すると、1階が弾性で、2階が塑性というモードの説明は困難であった (林, 田村, 2012)。動水圧が建物に対する津波荷重で卓越するという考えは、前述の石巻市で大型鉄筋コンクリート造建物の背面 (山側) の区画で、木造家屋が流されずに残ったことと整合する。建物に作用する津波荷重については、更なる検討が必要である。

4.6 液状化の影響

女川町では、明治以降、沿岸部で埋立が行われた。前述の転倒した建物は、1949年以降に埋立されたエリアに集中している。埋土は標準貫入試験によると、N値3~7の「粘性土を多く含む砂礫」であり、液状化の危険性は高い (国総研, 建築研究所, 2012)。また、支持杭と思われる建物の周辺地盤は沈下しており (Photos 55, 56)、液状化したことを裏付けている。地盤のせん断剛性が著しく低下したときに、津波による水平力、浮力が作用すれば、杭基礎がほぼ無傷で引き抜かれたことも説明できる。ただし、女川原発で最大津波を観測した時刻は15:29であり、本震の発生から43分後である。15:06にはM7.4の余震 (125 gal, K-

Net 石巻) が観測されており、余震で再度、過剰間隙水圧が上昇した可能性が高い。また、残った建物の周辺地盤で洗掘が激しく起きており、津波によって表層の砂地盤で有効上載圧の低下、過剰間隙水圧の上昇した可能性もある。液状化と津波の複合災害は、今後の課題である。

5. 津波避難ビルについて

東日本大震災では、防波堤・防潮堤等では想定外の大津波を防ぎきれないことが明らかになった。人命を守るには、津波時に避難する建物 (津波避難ビル) が重要になる。今回の津波被害から、津波避難ビルに求められる要件を下記に述べる。

①建物の高さが津波よりも高いこと。

東日本大震災では4階まで津波が到達した。

②構造は鉄筋コンクリートとする。

波圧の設定は更なる検討が必要であるが、被害事例からは、ある程度の規模の鉄筋コンクリート建物では、新耐震レベルの耐震性があれば上部構造体の致命的な損傷は免れている。

③基礎は杭基礎とし、支持力に問題がなくても直接基礎としない。

杭基礎は、地震時における水平力のみならず、浮力による引抜き力に耐えるようにする。特に、フーチングと杭の接合条件や、既製杭の継ぎ手の強度にも十分な配慮が必要である。液状化の危険性が高い地盤条件では、液状化地盤内の周面摩擦をゼロとして、浮力に相当する引抜き力を考慮して設計する。

6. 津波による建物被害のまとめ

(1) 女川や陸前高田では、杭基礎が破壊して鉄筋コンクリート建物が流され転倒した。杭の破壊の多くは、フーチングと杭の接合部で発生していた。転倒した鉄筋コンクリート建物の建設年代は古く、杭基礎の耐震設計はされていない。そのため、フーチングと杭頭の接合部は脆弱であったためと考えられる。

(2) アスペクト比の小さい2階建て鉄筋コンクリート建物が転倒・転覆した事例が多くみられた。転倒した建物は、津波波圧のみならず浮力が大きく作用していたと考えられる。

(3) 女川町ではPC杭がほぼ無傷で引き抜かれていた。周辺地盤が沈下しており、液状化した可能性が高い。地盤が液状化して、地盤のせん断剛性が著しく低下しているときに津波による水平力、浮力が作用することを考えると、杭基礎がほぼ無傷で引き抜かれたことも説明できる。

(4) 建設年代の新しい大規模な鉄筋コンクリート造建

物では、津波の直撃を受けても建物の移動、傾斜は無く、基礎を含む構造体の損傷が確認されなかった。

(5) 女川町の鉄骨造2階建物の被害モードは、20～25kN/m²程度の動水圧(等分布)と仮定すると説明することができた。

謝 辞

被害調査は、京都大学防災研究所の林和宏博士 (JSPS特別研究員)、保木和明博士 (北九州大学講師、元防災研究所特定研究員)、鍾育霖博士 (台湾国立高雄応用科技大学、元JSPS外国人特別研究員)、古川幸博士 (東北大学助教、元京都大学大学院生)、伊藤麻衣博士 (防災研究所特別研究員、元京都大学大学院生)、榎田竜太博士 (京都大学特別研究員、元京都大学大学院生)、京都大学大学院生の栗木周君と行った。記して、感謝します。

参考文献

- 林 和宏, 田村修次 (2012) : 東北地方太平洋沖地震における津波が小規模建物に及ぼした水平力, 構造工学論文集, Vol.58B, pp.117-123.
- 国土技術政策総合研究所, 建築研究所 (2012) : 平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震被害調査報告, 国総研資料第674号, 建築研究資料第136号

(論文受理日 : 2012年6月25日)

Building Damage caused by Tsunami of the 2011 Great East Japan Earthquake

Shuji TAMURA

Synopsis

An innumerable number of houses were destroyed by tsunami of the 2011 Tohoku-Chiho taiheiyo-Oki Earthquake. This paper reports the building damage caused by the tsunami at Onagawa-cho, Isinomaki-city, Kesennuna-city and Rikuzentakada-city. In the investigated area, where tsunami was extremely high, many wooden houses were washed away, excepted houses on high ground. Most of the exterior walls of steel buildings were destroyed and washed away. Structural damage of RC building was relatively limited. However, RC 4-story building was swept away and topple, because the pile cap-pile joints were collapsed. This indicates that the seismic design of pile foundations is important for tsunami refuge buildings.

Keywords: The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Tsunami, Building damage, Pile foundation