

津波による杭基礎建物の転倒に関する考察*

山形大学 三辻和弥 東北大名誉教授 杉村義広 東北大 株木宏明

1. はじめに

2011年3月11日に起きた東北地方太平洋沖地震では地震や津波によって多くの被害が生じた。甚大な津波被害を受けた町の一つである宮城県牡鹿郡女川町では、本震後に来襲した津波により、複数の建物が転倒した。その中には杭基礎で支持されていた建物も含まれている。著者らは津波により転倒した建物の被害調査を行い、特に杭基礎建物の転倒原因について考察を行った。

2. 津波によって転倒した建物の被害調査



図1 女川町で津波により転倒した建物の位置

(@2011 Google - 画像 @2011 Digital Globe,

GeoEye, 地図データ @2011 ZENRIN)

著者らが調査した範囲では、津波によって転倒した建物が5棟、そのうち杭基礎で支持されているものが3棟であった。以下、それぞれの被害について主に基盤構造の観点から報告する。図1に津波で転倒した5棟の建物の位置を示す。図中に示した番号は写真のキャプションに記した建物番号に対応している。No.1～No.3の建物は杭基礎建物、No.4およびNo.5は直接基礎建物である。なお、被災直後の映像などからは、No.3建物の近くにはもう1棟、津波によって転倒したと思われる建物があつたようであるが、著者らの調査した時点(2011年4月)では、すでに撤去された後様で、ここでは考慮していない。

転倒方向は、No.1、No.2、No.5については海から内陸へ、No.4は逆に陸から海へ、No.3は海岸線にほぼ平行する方向へ、とそれぞれ少しずつ違っているが、以下、被害の特徴とともに調査結果を述べる。

3. 津波によって転倒した建物の被害状況

写真1に示すNo.1建物は鉄骨造3階建て(一部4階)の水産会社建物である。基礎形式はパイルキャップ(以下、基礎と略記)形式の杭基礎で、写真右側に引き抜かれた杭が1本ぶら下がった状態で残っている。杭表面に記された表示から杭長は6m程度と見られる。この周辺の地盤はGL-15～20mの深さまではシルト層を中心に軟弱な地層であることが分かつており、深さ方向に2～3本の既製コンクリート杭を継いで用いていたと思われる。写真2は、その先端部を下から覗いたもので、端板が赤銅色に錆びていることから、継手の溶接が十分でなかったためにこの上杭だけが引き抜かれたものと推定される。杭断面は直径300mm、肉厚は60mmであり、杭種については、PC杭A種と判断した。

* Comments on damage mechanism of tumbled pile foundation buildings due to tsunami, Yamagata University by MITSUJI Kazuya, SUGIMURA Yoshihiro and KABUKI Hiroaki

写真3はNo.1建物が建っていた敷地から流失したNo.1の建物を見たものである。写真の左端に駐車場コンクリート面の損傷が見られるが、この建物が流された際にできた痕跡と判断される。このことから、建物の左側は地面を摺り、右側は浮いて傾いた状態で流れたことが考えられ、流失の直前まで左端部の杭頭はつながっていたと推測され、後述する左側基礎の中詰め縦筋が左へ大きく曲がっていた状況とも対応する。

写真4には転倒したNo.2建物の基礎底面の様子を示す。建物はRC造4階建てで、元の位置から約70m流されたことが指摘されており¹⁾、その位置関係を写真5に示す。



写真1 転倒した鉄骨造建物 (No.1) : 支持杭基礎



写真2 引き抜かれた杭の先端部 (No.1)



写真3 元の敷地から転倒したNo.1建物を見る



写真4 転倒したRC造建物 (No.2) : 摩擦杭基礎



写真5 元の敷地から転倒したNo.2建物を見る



写真6 転倒したRC造建物 (No.3) : 支持杭基礎

基礎底面の右側に先端ペンシル型の杭が 1 本ぶら下がっている状況が見られるが（写真 4），レーザー変位計で計測した結果，傾斜高さが 3.6m，水平面との角度が 120° であることから杭長は約 4m と計算される。その横に転がっている杭の断面を計測したところ，杭径 300mm，肉厚 60mm，鉄筋 6-φ8 であることが認められ，基礎底面での杭の破断跡観察結果からは，全部で 32 本であることが判明した。これらの杭本数，杭配置，杭断面諸元などから，RC 杭を用いた摩擦杭基礎であると推定された。写真 6 には No. 3 の建物の基礎底面の様子を示す。この建物は RC 造 2 階建ての交番であるが，パイルキャップ方式の全部で 14 本からなる杭基礎であることが見られる。転倒の方向は，No. 1，No. 2 の建物が東から西へ，海から内陸へ向う方向であったのに対し，北に向う海岸線とほぼ平行する方向であることが特徴である。津波の波力が作用する方向と No. 3 の建物の短辺方向すなわち弱軸方向とが一致していたこと，また，建物が建っていた元の位置には津波による洗掘と思われる大きな痕跡も認められており，その影響もあったかと考えられる。この事例で最も目立つのは杭の脆性的な破断面が杭頭より 1.5m 程度下がった位置で見られることである。このような破壊形式は，引張り力が作用している条件下で杭体がせん断力を受ける場合に起るのではないかを連想させる。杭断面の現地計測はかなり困難であったが，杭径 300mm，肉厚 60mm，7mm 筋が 6 本配置されていることを見出すことができた。

以上のことから，この建物では PC 杭 A 種で 2 本あるいは 3 本つなぎの長い支持杭基礎が採用されていたのではないかと推定される。

写真 7 には転倒した No. 4 の建物の様子を示す。この建物は RC 造 3 階建ての事務所ビルで，基礎形式はべた基礎形式の直接基礎である。転倒方向は No. 1 や No. 2 とは逆に，陸から海側（西から東側）に向かっている。このことから，この建物の場合は引き波によって転倒したのではないかと考えられる。基礎の大きさは長辺 10.4m，短辺 7.4m であり，写真 7 の左側に見られる水の溜まった敷地の寸法が一致したことから，これが元建っていた位置であることが判明した。

写真 8 には転倒した No. 5 の建物の基礎底面の様子を示す。レーザー変位計による計測の結果，長辺 20m，短辺 9.3m であり，基礎梁の間隔は中央で 6.6m であった。基礎形式はパイルキャップ方式のようにも見受けられたが，杭で支持されているような杭頭の痕跡は明確には見当たらない（杭は用いられていたとしても地盤改良のような目的であって），独立基礎形式の直接基礎であると判断することにした。

4. 杭基礎建物が転倒した原因について

ここでは，杭基礎建物である No. 1 および No. 3 建物に焦点を絞り，津波によって杭基礎建物が転倒した原因について考察する。

No. 1 建物の左側の基礎について少し詳しく，津波到来方向に対する，建物の前面側を写真 9 に，後面側を写真 10 に示す。ここで特徴的なのは，前面側，後面側ともに杭頭接合部の中詰コンクリート用鉄筋のうち縦筋のみが残っていることで，さらに左端の基礎では前面側，後面側とも 2 本ずつ 4 本すべてが左に大きく曲がっていることである。左から 2 番目の基礎に移ると，前面側，後面側ともほぼ垂直の状態に残っている中で，前面側の 3 本のうち下の 1 本がやや左に傾いているのが見られる。

写真 11 は元の敷地に残っていた杭頭を示す。元の位置にほぼ健全な姿のまま残ったものと推定出来る。この位置は前面側左から 2 番目の基礎の上側 2 本のうち左の杭であると判断された。また写真 12 は同じく元の敷地に残されていた，引き抜かれたと思われる杭である。この杭がどの位置の基礎に接合されていたものかは，今のところ不明である。



写真9 パイルキャップに残された鉄筋（前面側）



写真10 パイルキャップに残された鉄筋（後面側）



写真11 元の敷地で発見された地中に埋まつたままの杭



写真12 元の敷地で発見された引き抜かれた杭

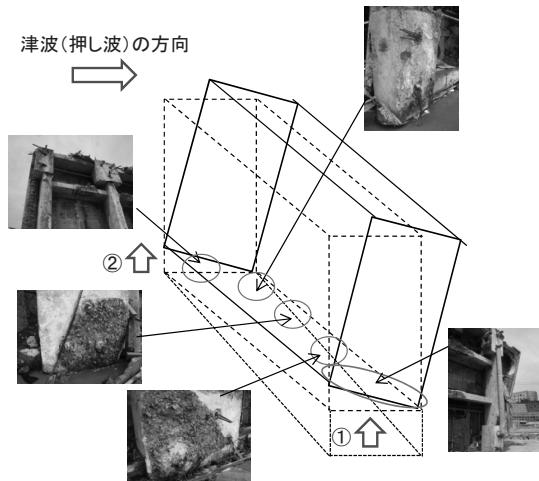


図2 No.1建物の転倒メカニズムの推定

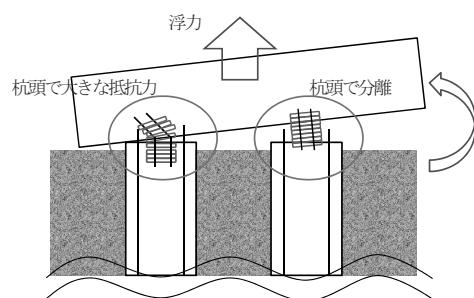


図3 前面側左から2番目の基礎の転倒イメージ

以上の状況から、図2に示すような転倒メカニズムを考えた。標高約15mに建つ町立女川病院の1階のかなりの高さまで浸水していたという証言などから、ほぼ海拔0mに建つこの建物は転倒時には完全に水没した状態であったと考えられる。したがって、その浮力によってすべての杭は引張り力を経験することになるが、前面側右端の1本の杭は継手の不良と、周面摩擦力の低下で、他よりも早く抜け上がってしまったと推定される。前面側中央の杭は中詰め縦筋のみが垂直に残っているものが多いが、浮力による引張り力に対しては、継手に不備はなかったために下方の周面摩擦力で抵抗していたが、杭頭の呑み込み長が小さかったために、そこで抜け出してしまったと推定できる。

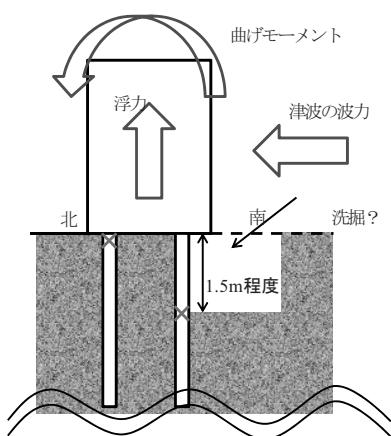


図4 No. 3 建物の転倒メカニズムの推定

右から2番目の基礎になると、前面側では垂直の中詰め縦筋だけが残る（すなわち杭頭が比較的素直に抜けてしまうような挙動をしている）のに対して後面側ではお辞儀をするような変形が残り、ある程度曲げモーメントに抵抗している状態となっている。

前面側左端の基礎に近づくほど、中詰め縦筋が左に曲がるものが多くなるが、これらは他の杭頭部が分離した時に杭頭接合部が比較的強かつたために分離が遅れたことが考えられる。建物が短辺方向の転倒を主体として挙動しながらも、長辺方向の動きもかなりあったであろうことが推定できる。それが左端部の中詰め縦筋の左への曲がりになって現れたものと思われる。

図3には図2の左側2つの基礎について杭頭部の状態を想定したものを示す。No. 3 建物は前述のように、津波の到来方向に対する前面（南面）の杭が基礎から約1.5m下がった位置で破断している（写真6の上側の基礎の杭）。北側にあたる、津波の到来方向に対する後面の杭（写真6の転倒した基礎底面では下側）は基礎に残されておらず、少なくとも南側の杭とは損傷の状況は異なるものと思われる。つまり、No. 3 建物については、図に示すように北側と南側で杭の破断位置が異なっていることが指摘できる。このような被害の状況を説明するために、以下のような転倒メカニズムを考えた。

- 1) 波によって水没していたことはNo. 1の場合と同様で、大きな浮力を受けていた。ただし、鉄骨造のNo. 1建物に比べると、浮力の影響は相対的に小さかったかもしれない。
- 2) 地震による液状化の発生も考えられ、杭の周面摩擦力のみでなく水平地盤反力もかなり低下し、ほぼゼロ状態になっていた。
- 3) 津波による洗掘の可能性もあり、地表面付近はかなりの深さまで露出していたことも考えられ、地盤による拘束効果自体が乏しかった。
- 4) 上記のような状態で津波による大きな水平力を受けたために、建物全体に作用する曲げモーメントの見掛け上の支点が杭頭部から1.5m程度下がった位置となり、曲げモーメントあるいはせん断力に杭体が耐えられずに杭が破断した。また、この破断面の位置は、杭頭ピン条件で水平力を受ける杭の最大曲げモーメントの発生位置を連想させるものもある。

- 5) 前面側の杭が液断したことが引き金となって建物の転倒が発生した。

5. まとめ

本論では、女川町で津波によって転倒した5棟の建物の被害調査について報告し、特に杭基礎建物2棟(No.1とNo.3)については、転倒した建物や周辺の被害状況から、その転倒メカニズムを考察した。建物転倒に及ぼした要因として以下の項目が挙げられる。

- 1) 津波による転倒モーメントの発生
- 2) 浮力による杭頭部での引張力の発生
- 3) 津波による洗掘の影響

これらの要因が複合的に働いたことにより杭基礎建物の転倒を引き起こしたと考えられる。また、No.1建物のように杭頭接合部で、杭の基礎への「のみ込み」が十分ではなく、津波によって浮力と転倒モーメントを同時に受けた際に、杭頭部で杭と基礎・上部構造とが簡単に分離してしまった可能性が考えられる。今後、実験・数値解析などを通して検討を進めたい。

謝辞：

被害調査を行うに当たりご配慮いただいた、東北大学大学院工学研究科土木工学専攻・風間基樹教授に感謝いたします。女川町での調査については東北大学大学院工学研究科土木工学専攻・株木宏明氏・中島悠介氏、モンカダ・ロペス・リゴベルト氏、金鍾官氏とともに行いました。ここに記して感謝致します。

震災でお亡くなりになった方々のご迷惑をお祈りいたしますとともに、被災地の一日も早い復興を願います。

参考文献

- 1) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震調査研究(速報)(東日本大震災),建築研究資料No.132,建築研究所,2011,<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/data/132/index.html>