女川町におけるRC構造物の2011年東北津波による被災メカニズムに関する研究 －杭が破断し転倒・流出したRC構造物の事例－

Damage Mechanism of the Pile-supported RC Building in Onagawa during the 2011 Tohoku Tsunami

奥村与志弘¹・佐藤祐子²・清野純史³

Yoshihiro OKUMURA, Yuko SATO and Junji KIYONO

RC buildings with piles had been expected to be resistant to tsunamis. However, pile-supported RC buildings were pulled up and toppled by the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake Tsunami. Damage mechanism of the pile-supported RC buildings due to tsunami has to be found out for tsunami evacuation countermeasures with tsunami evacuation buildings. In this study, we focus on one of the pile-supported RC buildings in Onagawa town, Miyagi Prefecture that was pulled up, toppled and moved during the 2011 tsunami and find out its damage mechanism by using tsunami inundation simulation and tsunami response analysis. As a result it was shown that liquefaction by ground motion and reinforcement of ground surface by Tsunami made shear failure in the piles and after that the building topped and moved by Tsunami.

1. 緒 論

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震に伴い発生した巨大津波（以下、2011年東北津波）は、杭基礎を有するRC構造物の転倒・流出という、津波災害では過去に例のない建物被害をもたらした。我が国では、津波避難ビルを避難場所の選択肢に含めた津波避難対策を進めており、2011年東北津波における同タイプの構造物の被災メカニズムの解明は避けては通れない課題である。

しかし、そうした課題を解決するためには、地震動による地盤の液状化や津波漂流物の衝突、津波による地盤の洗掘など様々な現象を考慮しなければならない。加えて、近年、奥村ら（2012）は、波浪による地盤の液状化（Sassaら（2001）など）にヒントを得て、単純なモデル地盤を用いた有効応力解析を実施することで、「津波による地盤の液状化」の発生可能性を指摘している。これは飽和地盤内の間隙水の圧縮性が原因で、間隙水の水圧変動が地盤上の水圧変動と完全には一致しないために有効

応力が増減し、生じると考えられる。これまで実際の津波災害で同現象の発生に関する報告はないが、もし実現象で発生するのであれば、杭基礎を有する構造物の津波被害に影響を及ぼしている可能性がある。ただし、津波による地盤の軟化だけではなく、硬化についても考慮されるべきである。

以上を踏まえ、本研究の目的は、2011年東北津波で杭基礎が破断し転倒・流出した写真-1に示す女川町の構造物に注目して、被災メカニズムを明らかにすることである。また、津波による地盤の硬化・軟化の発生可能性についても検討する。具体的には、まず2011年東北津波の再現計算から対象構造物周辺における津波氾濫流の浸水深と流速の時空間特性を明らかにする。次に、地震動と津波の地盤への影響に関して異なる状況を模擬した4通りの地盤条件を用いて、対象構造物の津波応答解析を実施する。最後に、それらの結果を踏まえて、2011年東北津波における対象構造物の被災メカニズムと津波による地盤の硬化・軟化の発生可能性について考察する。

2. 2011年東北津波の津波氾濫解析

本章では、2011年東北津波における対象構造物周辺の氾濫流の特徴を、数値計算によって明らかにする。

(1) 数値解析手法と解析モデル

数値計算には、非線形長波理論をstaggered格子を用いたleapfrogスキームによる有限差分法で解く津波氾濫解析手法（平面二次元）を用いる。計算時間間隔は0.2秒、計算時間は3時間とする。空間格子間隔は、1350m, 450m, 150m, 50m, 10mの5段階で領域を接続する。建物は陸域における抵抗として考慮し、厳密に一棟ずつを表現した

写真-1 対象構造物の被災後の様子

1 正会員 博(情報) 京都大学大学院助教 地球環境学堂
2 学生会員 京都大学大学院 工学研究科
3 正会員 工博 京都大学大学院教授 地球環境学堂

地形モデルではない。従って、1棟1棟の建物が津波の流れを局所的に変化させる状況までは表現できない。しかし、算出される津波の物理量は実際の物理量を空間平均したものともみなせる。また、堤防の破堤は考えない。

2011年東北津波の波源モデルは東北大モデルver.1.2（今村ら，2012）の断層モデルにMansinha and Smylie（1971）の方法を用いて作成する。地形、堤防、粗度の各データは中央防災会議のデータを使用する。ただし、10m格子の標高データは国土地理院の基盤地図情報（解像度0.2秒、約5m）をクリギング法で補間して作成する。

本研究で注目するRC構造物は、被災前は図-1に示すように女川湾の海岸線から約180m離れた場所に建っていた。背後には標高約16mの高台があったが、同構造物は西に約70m離れた場所で構造物陸側を下にして高台の斜面に押しつけられるように転倒していた。

(2) 数値解析結果

図-1に示す東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループのデータを実測値として、相田（1981）の方法を用いて計算結果の妥当性を確かめたところ、幾何平均0.96および幾何標準偏差1.07となった。土木学会（2002）が提案している痕跡高を用いた津波計算の妥当性の基準（ $0.95 < K < 1.05$, $\kappa < 1.45$ ）を満足しており、浸水深を良好に再現しているといえる。

図-2は対象構造物が建っていた地点（以下、原位置）における浸水深と流速の時刻歴波形を示したものであり、図-3は対象構造物周辺の浸水深と流速の時空間変化を示したものである。対象構造物の被災メカニズムを検討する上で注目すべき特徴は、同構造物の原位置における津波の1波目が最大浸水深（17.4m）に到達する前に内陸に向かう流れ（南西方向）から海側に向かう流れ（北東方向）へと流れの向きが変化していること、2波目以降の浸水深が最大でも5.7m程度であることの2点である。

対象構造物は、原位置よりも約70m内陸で構造物の陸側側面を下にして転倒していたことから、内陸に向かう流れ

図-1 対象構造物の被災前後の位置関係。図中の赤丸は東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループの実測値。背景は国土地理院のデジタル標高地形図。

図-3 津波の浸水深と流速の時空間変化

（図-2の第3象限）により転倒し流されたと考えられる。解析結果において、津波が内陸に向かう流れから海側に向かう流れに変わる前となると、第一波であれば地震発生後46分8秒（浸水深16.9m）よりも前、第二波であれば同76分47秒（同5.7m）よりも前、第三波であれば同101分39秒（同4.9m）よりも前、第四波であれば同165分1秒（同3.5m）よりも前となり、いずれも浸水深が増加するタイミングである。参考までに原位置における内陸向きの流速の大きさの時間積分を計算すると、第一波から第四波までそれぞれ825m, 504m, 550m, 519mとなる。これは引き抜かれさえすれば、第一波から第四波のいずれであっても十分に70m内陸に流される可能性があることを示唆している。

図-2 対象構造物の原位置における氾濫流の時空間特性。(a) 浸水深 η の時刻歴波形。(b) 流速 v_x, v_y の時刻歴波形。 v_x は西から東向きが正、 v_y は南から北向きが正。(c) 流速の方向。

3. 津波応答解析

本章では、地盤条件、杭基礎内の応力分布、津波外力の関係から被災メカニズムを検討するため、地震動と津波の地盤への影響に関する仮定が異なる4通りの地盤条件を作成し、それぞれの条件下で津波応答解析を実施する。ただし、考慮する外力は津波波力のみとする。

(1) 数値解析手法と解析モデル

数値解析手法は線形有限要素法 (FEM) に基づく静的解析法 (断面二次元) を用いる。構造解析モデルを図-4 に示す。構造物部分は概ね実際の寸法に従っている (松富ら, 2012)。地盤部分の解析領域は、鉛直方向に16.5m、水平方向に50.3mとする。国総研等 (2012) が行った対象構造物の原位置から東に約100m地点のボーリング調査を踏まえ、地下16.5mに工学的基盤面が存在すると仮定し、それより浅い部分を解析領域とする。要素は、構造物上躯体をビーム要素とし、フーチング、杭、地盤をソリッド要素とする。基礎と地盤、構造物上躯体の材料パラメータは表-1、表-2に示す。地盤の土質は砂質土とする。なお、本研究では、杭基礎内の応力状態を考察するにあたり4つの地盤条件の間の相対的な差異に注目することとし、杭と地盤の剥離を表現できるジョイント要素を含めた詳細な解析は実施しない。

数値解析に用いる地盤条件のうち初期状態を表したものを図-4に示す。そして、地震動と津波の地盤への影響に関して異なる状態を模擬して作成した3通りの地盤条件を図-5に示す。地盤が軟化した状態 (有効応力の減少) あるいは硬化した状態 (有効応力の増加) を、それぞれ地盤要素の剛性率を初期値の1/1000倍あるいは2倍にすることによって表現する。地震動に伴う地盤の流動特性を剛性率の低下として表現する方法は、安田ら (1999) によっても行われている。

各地盤条件が表現している状態について順に説明する。図-4に示すcase1は初期地盤の状態を模擬したものである。N1 (有効上載圧100kN/m²相当に換算したN値) が異なる2層の剛性率は、先述のボーリング調査で得られているN値を基にして計算したものである。図-5上段に示すcase2は、地震動によって地下9mまでが液状化した状態を模擬しており、対象構造物は杭全体が液状化地盤内に曝された状態となる。図-5中段に示すcase3は、津波による地盤上の水位の急速な上昇によって表層地盤が硬化した状態を模擬している。影響範囲を地下3mまでとしたのは以下の理由による。第一に、実際に来襲した津波の最大浸水深が約17mであったこと、第二に、奥村ら (2011) の解析結果から、地下3m地点まで津波によって地盤を軟化をさせるには来襲する津波の浸水深が20m以

上なければならないこと、第三に、水位上昇時の地盤硬化の深さ方向の影響範囲は水位降下時の地盤軟化の深さ

表-1 基礎と地盤の材料パラメータ (ソリッド要素)

材料パラメータ	杭 (PHC)	フーチング (C)	地盤 (N1=4.5)	地盤 (N1=2.8)
剛性率 G (kN/m ²)	1.03×10^7	9.45×10^6	3.58×10^4	3.21×10^4
ポアソン比 ν	0.20	0.20	0.33	0.33
単位体積重量 γ (kN/m ³)	1.12	25.5	17.6	17.6

表-2 構造物上躯体の材料パラメータ (ビーム要素)

材料パラメータ	柱 (RC)	屋上床 (RC)	各階床 (RC)
ヤング率 E (kN/m ²)	242	242	242
単位体積重量 γ (kN/m ³)	24.5	24.5	24.5
断面積 A (m ²)	1.26	7.02	9.54
断面二次モーメント I (kN/m ³)	0.503	87.2	219

図-4 構造解析モデル。地盤の剛性率は初期状態 (case1)。

図-5 地盤条件

方向の影響範囲と同程度であると考えられることである。なお、津波によって地盤の硬化や軟化が生じるためには地盤が飽和していなければならないが、前述のボーリング調査から地下水位が1.5mと予測されていることや津波の第一波が到達するまでに地面から泥水が噴出していったという証言も得られていることから、津波第一波到達までに地盤が飽和していたと仮定した。最後に図-5下段に示すcase4は、地震動によって地盤が液状化している状態で津波が来襲し表層地盤が硬化した状態を模擬している。津波の深さ方向への影響範囲はcase3と同じとした。ただし、対象構造物にはフーチングがあり、構造物内に浸入した海水が構造物直下の地盤内には浸透しないと考えるため、本ケースでは津波の影響は構造物直下には及ばないと仮定した。

次に、本解析で対象構造物に作用させる津波波力について述べる。杭基礎が破断したときの地盤条件を考察するためには、上述の4通りの地盤条件の解析結果を用いて杭基礎内における応力分布の相対的な差異を見ればよい。したがって、ここでは実際の津波の流体力を厳密に予測はせず、最大浸水深17.4mの津波の静水圧に相当する力を構造物の海側から作用させる。波力の入力箇所は、図-4に示すように構造物上躯体ビーム要素を構成する5つの節点とする。ただし、今後さらに定量的な分析を行うためには、構造物周りの3次元津波数値解析等によって得られる厳密な流体力を用いた検討を行う必要がある。

(2) 数値解析結果

図-6は津波波力作用下における杭基礎、地盤内の応力分布（軸応力とせん断応力）を地盤条件の検討ケース毎に示したものである。

case2, case4は杭基礎の浅い部分に大きな軸応力（引張）、せん断応力が作用しており、これは杭基礎内の両応力が概ね一様な他の2ケースとは傾向が異なる。とりわけ、case4の応力分布の不連続性は顕著である。他の地盤条件に比べて杭が破断する可能性が高いと言える。

case4の杭基礎内の最大軸応力は 1303kN/m^2 となっているが、杭の引張耐力は 2233kN/m^2 と算出できるため、実際に作用していた津波波力が最大浸水深17.4mの静水圧相当であれば引張応力で破断する可能性は低いと考えられる。なお、引張耐力は、杭の引張耐力がPC鋼線の引張耐力によって担われているとみなして算出した。直径9mmの鋼線一本あたりの引張耐力を 90.2kN （JIS PC鋼線丸線9mm）として、7本の鋼線が入っている同構造物の杭1本あたりの引張耐力を杭の断面積で割って得られた値を杭の引張耐力とした。一方で、同ケースの最大せん断応力は 498kN/m^2 となっている。同構造物の杭の単位面積当たりのせん断耐力が設計せん断耐力 87kN/m^2 と等し

図-6 異なる地盤条件下における津波波力に伴う杭基礎と地盤内の応力分布。軸応力 σ_{yy} は引張りが正。

いと仮定すると、ここでは定量的な検討はできないものの、少なくとも引張に比べればせん断による破壊の方が発生する可能性が高いと言える。なお、せん断耐力の計算の詳細についてはコンクリート標準示方書（2007）を参照した。

以上の結果から、case2, case4は他の2ケースに比べ杭基礎が破断する可能性が相対的に高い。特に、case4は不連続な応力分布がほぼすべての杭で見られ、多くの杭が破断する可能性がある。写真-1からは、破断した杭内の鋼線がせん断で破断しているように観察されるが、これは解析結果が示唆する結果と矛盾しない。なお、今後さらに定量的な検討を行うためには、本検討で用いた波力をより厳密に算出した値にすることや、漂流物による衝突や浮力などの影響も考慮することが求められる。

4. 杭基礎を有するRC構造物の津波被害発生メカニズムの考察

津波数値解析結果から、津波の第一波から第四波までのすべてが対象構造物を内陸に70m漂流させる可能性がある。発見された場所から考えると、同構造物が転倒・流出したときの氾濫流の流れは内陸方向でなければならず、それは第何波であろうと浸水深が上昇しているタイミングであることが分かった。これは、「津波による地盤の液状化」が発生するような地盤条件であれば、地表面付近の地盤が硬化している状態で転倒・流出した可能性があることを示唆している。

一方で、津波応答解析の結果は、津波による表層地盤の硬化と地震動による液状化が同時に発生していることを模擬した地盤条件 (case4) が、最も実際と矛盾しない多くの杭の破断が生じることを示唆するものであった。つまり、「津波による地盤の液状化」が発生するような条件であったことを支持する結果と言える。

以上を踏まえ、地盤が地震発生前と同程度の強度があるとして、浮力の影響も考慮して検討した。その結果、浸水深5mの静水圧に相当する津波波力を考えれば、杭の鋼線による引張抵抗、杭-地盤の間の周面摩擦、構造物の自重を考慮して計算される抵抗モーメントは津波による転倒モーメントよりも大きくなり同構造物は転倒しないことが分かった。ただし、これは対象構造物の杭32本がすべて残っていると仮定した場合であり、杭が19本にまで減少した状況では十分に転倒する。このことは、第一波で多くの杭が破断すれば、第二波目以降でも転倒する可能性があることを意味している。なお、構造物の抵抗モーメントと津波静水圧荷重による転倒モーメントは、国総研等 (2011) と同様の方法で計算した。

以上を踏まえ、次のような被災メカニズムが最も有力であると考えられる。地震動により地盤が液状化しているところに津波が来襲し、浸水深の上昇により地盤の表層付近が硬化した。第一波で対象構造物の多くの杭がせん断破壊した (case4)。このまま一気に第一波で転倒・流出したか、あるいは、第二波目以降で転倒・流出した。ただし、地盤の状態が地震動による液状化だけの場合 (case2) も被災メカニズムの候補として否定されたわけではない。

また、津波の水位上昇による地盤の硬化については、そのような現象が起きていたことを支持する解析結果であった。ただし、対象構造物直下に影響は及ばず、やや深い地盤で水平方向に影響が伝播したと考えられる。

5. 結 論

2011年東北津波で転倒・流出した杭基礎を有する鉄筋

コンクリート構造物の被災メカニズムの検討を、津波による地盤の硬化・軟化にも注目して、数値解析を用いて実施した。その結果、地震動による地盤の液状化と津波による表層地盤の硬化が発生したために、津波波力 (第一波) によりほとんどの杭が地下の浅い部分でせん断破壊を起こし、第一波か第二波目以降の津波により転倒・流出したと考えられることが分かった。また、本研究では、津波による表層地盤の硬化が起きていたことを示唆する解析結果が得られたが、同現象についてはこれまで一次元方向の性質しか検討されていないため、今後、有効応力解析等を用いた詳細な現象解明が求められる。

謝 辞：本研究は、JSPS科研費 (若手研究 (B) 26750130)、JSPS頭脳循環を加速する若手研究者戦略的海外派遣プログラム、京都大学防災研究所特別推進拠点研究費による支援を受けた。

参 考 文 献

- 相田 勇 (1981)：南海動沖の津波の数値実験，地震研究所彙報，Vol.56, pp.713-730.
- 今村文彦・越村俊一・馬淵幸雄・大家隆行・岡田清宏 (2012)：東北地方太平洋沖地震を対象とした津波シミュレーションの実施 東北大学モデル version1.2, http://www.tsunami.civil.tohoku.ac.jp/hokusai3/J/events/tohoku_2011/model/dcrc_ver1.2.pdf.
- 奥村与志弘・加藤亮輔・岡 二三生 (2012)：津波による地盤の液状化に関する1次元解析，土木学会論文集A1 (構造・地震工学)，Vol.68, No.4 (地震工学論文集第31-b巻)，pp.I-1171-I-1178.
- 国土技術政策総合研究所・建築研究所 (2011)：平成23年 (2011年) 東北地方太平洋沖地震 (東日本大震災) 調査研究 (速報)，6章5節 調査建築物の耐力及び津波波力の検討，pp.6.132-6.148.
- 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 (東日本大震災) 調査研究，6章2節 鉄筋コンクリート造建築物の被害，40p.
- 土木学会コンクリート委員会コンクリート標準示方書改訂小委員会 (編) (2008)：コンクリート標準示方書 設計編 (2007年制定)，丸善，623p.
- 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 本編，pp.1-26, 2002. <http://committees.jsce.or.jp/ceofnp/system/files/TA-MENU-J-01.pdf>, 2014年4月8日.
- 土木学会地震工学委員会 (2011)：土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書，第11章その他の被害，pp.11-1-11-16.
- 松富英夫・山口枝里子・直江和典・原田賢治 (2012)：東北地方太平洋沖地震津波における鉄筋コンクリート構造物と海岸黒松の被害条件，土木学会論文集B2 (海岸工学)，Vol.68, No.2, pp.I-351-I-355.
- 安田 進・吉田 望・安達健司・規矩大義・五瀬伸吾・増田民夫 (1999)：液状化に伴う流動の簡易評価法，土木学会論文集，No.638 / III-49, pp.71-89.
- Mansinha, L. and D.E. Smylie (1971)：The displacement fields of inclined faults, BSSA, 61, pp.1433-1440.
- Sassa, S., Sekiguchi, H. and Miyamoto, J. (2001)：Analysis of progressive liquefaction as a moving boundary problem, Geotechnique, 51(10), pp.847-857.