

# 杭基礎建物の被災状況を踏まえた 2011年東北地震津波による女川町の 地盤応答特性の推定

佐藤 祐子<sup>1</sup>・奥村 与志弘<sup>2</sup>・米山 望<sup>3</sup>・渡辺 健<sup>4</sup>・清野 純史<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: sato.yuko.87@rtri.or.jp

<sup>2</sup>正会員 関西大学准教授 社会安全学部 (〒569-1098 大阪府高槻市白梅町 7-1)  
E-mail: okumura@kansai-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 京都大学防災研究所准教授 流域災害研究センター (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)  
E-mail: yoneyama.nozomu.4w@kyoto-u.ac.jp

<sup>4</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)  
E-mail: watanabe.ken.08@rtri.or.jp

<sup>5</sup>正会員 京都大学大学院教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)  
E-mail: kiyono.junji.5x@kyoto-u.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震津波は、宮城県女川町において杭基礎鉄筋コンクリート造建物の転倒・流出被害をもたらした。対象構造物周辺の地盤は軟弱であり、本被災メカニズム検討には、多数の堅牢建物の存在により複雑化した津波挙動とともに、地震および津波の地盤への影響を考慮する必要があると思われるが、十分な検討はなされていない。本研究では、被災建物のうちの1棟に注目して、三次元津波解析と二次元構造解析に基づき、本被害発生当時の地盤状態の推定を試みた。この結果、被災当時地盤は液状化していた可能性が高いことが明らかとなった。また、フーチング横および下の地盤剛性が杭の損傷状態および対象建物上躯体の回転量に与える影響が大いいため、津波によるの地盤剛性の増大が杭の損傷状況に影響を与えることが明らかとなった。

**Key Words:** Tsunami, Pile, RC Building, Ground softening, Ground Reinforcement

## 1. 結論

2011年東北地方太平洋沖地震（以下、2011年東北地震）に伴う巨大津波（以下、2011年東北津波）は、宮城県女川町において杭基礎を有する鉄筋コンクリート造建物（以下、杭基礎 RC 建物）の転倒・流出という、過去に例のない被害をもたらした。一方で、我が国では、高台避難が困難な地域における一時避難場所として、津波避難ビルの活用を含めた津波避難対策を進めており<sup>1)</sup>、堅固な中層建物に分類される杭基礎 RC 建物は津波避難ビルとして指定される可能性がある<sup>2)</sup>。このため、2011年東北津波における同種の建物の被災メカニズムの解明は喫緊の課題であり、同被災メカニズムの検討が行われている<sup>3)</sup>。

本研究では、2011年東北津波により転倒した杭基礎

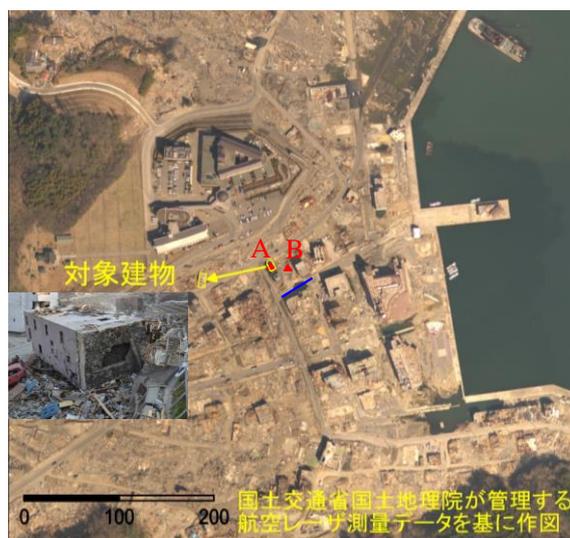


図-1 被災後の対象地域と対象建物の写真<sup>8),9)</sup>



	降伏時	降伏	破断時	破断
	荷重	強度	荷重	強度
	kN	N/mm <sup>2</sup>	kN	N/mm <sup>2</sup>
Sample 1	17	267	26.3	413
Sample 2	19.3	304	26.2	412

表-1 杭の鉄筋の引張試験結果

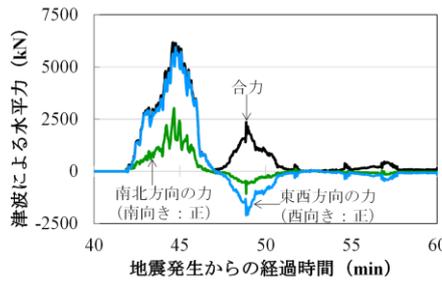


図-6 対象建物に作用する津波水平力

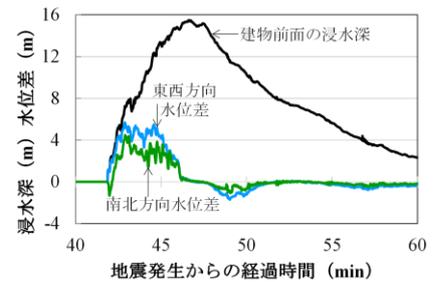


図-7 対象建物周りの浸水深・水位差

により転倒したと考えられる。

対象建物基礎の被災状況を記す。対象建物の底面には杭頭部がフーチングに埋め込まれたまま折損した杭断面が 20 ほど認められるが、その配置は被災後の状況からは断定できない (図-5)。また、PC 鋼線で建物と繋がっておりほとんど無損傷のペンシル型の杭が 1 本、流出した後折損したと考えられる杭が 1 本確認された。建物原位置でも、少し引き抜けた状態の杭が 4 本発見された。破断した断面は外径 300mm、内径 170mm で 9mm の PC 鋼線が 7 本引き出されて露出しており、PC 鋼線の破断した先端は 4mm 程に細くなっていた。これらの被災状況から、杭には曲げと引抜き力が作用し、主に杭頭付近で損傷したと思われる。また、杭は断面寸法から直径 300mm の PHC 杭 A 種と推定される<sup>19) 20)</sup>。杭長は途中で破断するなどして不明であるが、確認された中で最も長い杭は 6.5m であった<sup>17)</sup>。

杭の PC 鋼線の強度は被災後に強度試験が行われている<sup>14)</sup>。この試験結果から得られた破断時荷重は、JIS 規格に定められた公称径 9mm の PC 鋼線の最大荷重の 2 分の 1 以下であった (表-1)。この要因として、津波による塩分の供給と、被災後サンプル採取まで約 3 か月の間暴露ことなども挙げられるが、本研究ではこの値を被災当時の PC 鋼線の強度とした。

## (2) 対象建物周辺地盤

対象建物周辺は干拓・造成地であり、被災後に対象建物原位置において行われた表面波探査とラムサウンディング試験によっても、330gal 程度の地震波により液状化する可能性が高いことが示されている<sup>13)</sup>。2011 年東北地震本震により、対象地に近い地震計 (K-NET 石巻, K-NET 牡鹿, 女川原子力発電所 (解放基盤面)) では、最大加速度 436.1gal から 939.2gal が観測されており、本地震により対象建物周辺の地盤は液状化していたと考えられる。しかしながら、三次元津波解析によると対象建物に津波が到達したのは本震から 43 分後であり、本震による液状化は消散した可能性が高い。一方で、上田ら<sup>11)</sup>は本震により液状化していれば、余震による加速度振幅が 45gal 程度と小さくても再液状化することを示唆してい

る。三次元津波解析によると、対象建物に津波の第一波が到達したのは 15 時 25 分であるが、この時刻に K-NET 石巻, K-NET 牡鹿, 女川原子力発電所では、それぞれ 56.1gal, 43.5gal, 20.0gal の余震が観測されており、対象建物周辺では、余震による再液状化が発生していた可能性がある。

ところで、津波により表層地盤がかき乱されるために、被災後に地震動および津波による対象建物周辺の地盤剛性の履歴を確認することはできない。しかしながら、そのような軟弱な砂質地盤に 2011 年東北津波のような波高・波長の津波が作用すると、津波により地盤の有効応力が変化する可能性も指摘されている (図-3)<sup>12)</sup>。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することで生じると考えられる。まず押し波時には、間隙水の圧縮性が原因となり、津波による水位上昇に伴う全応力増分の間隙水への伝搬に遅れが生じる。この差分が有効応力の増分となり、地盤剛性が高まる。次に押し波時には、間隙水の圧縮性により、水位低下が地盤内に瞬時に伝搬せず、間隙水圧の低下に伴う上向き浸透流が生じることで、有効応力が低下する。これにより、地盤剛性が液状化と同程度まで低下する<sup>12)</sup>。

## 3. 津波解析

対象建物の周囲は、津波に対して堅牢な建物が多数存在していた影響により津波挙動が複雑化することから、三次元津波解析を行うことで、2011 年東北津波により対象建物に作用する力を推定した。

### (1) 津波解析モデル

RANS に基づく VOF 法を用いて、対象建物周辺の南北 750m 東西 600m の領域における 2011 年東北津波の再現解析を行った<sup>7)</sup>。この領域における空間解像度は、全方向 2m である。この際、上記の領域よりも広い領域においても平面二次元解析を行い、相互に情報を交換すること

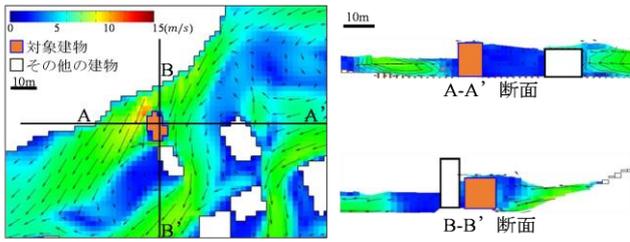


図-8 対象建物に最大津波水平力が作用する時の流速

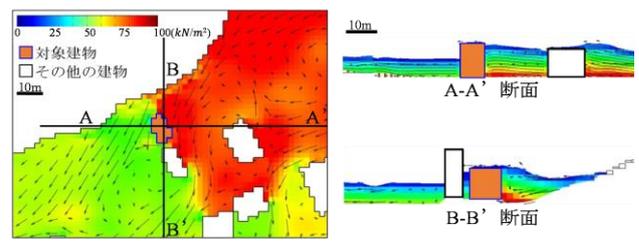


図-9 対象建物に最大津波水平力が作用する時の水圧

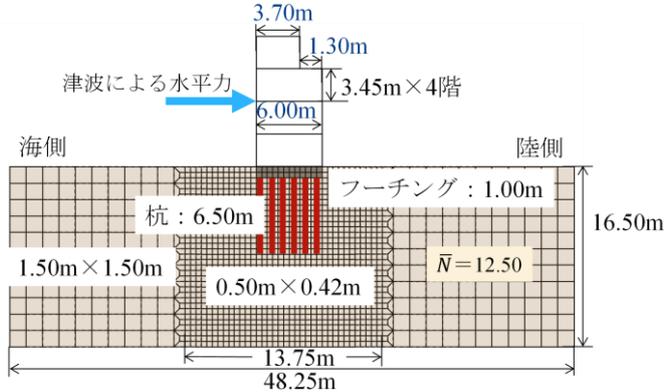
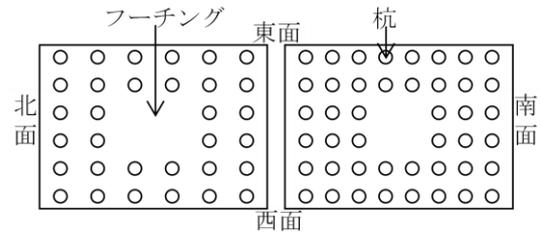


図-10 断面二次元構造解析モデル



(a) 杭本数 32本 (b) 杭本数 44本

図-11 想定した杭の配置状況

で、波源の影響も考慮した。解析においては、衛星画像から残存が確認できた 43 棟に加えて、対象建物流出時には残存していたと考えられる 6 棟の鉄筋コンクリート造および鉄骨造建物も地形としてモデル化した。その他詳しい解析条件および解析結果は既報<sup>7)</sup>で述べているため、本研究においては、対象建物に作用する津波水平力に注目して述べることにする。

## (2) 津波解析結果

対象建物に作用する津波水平力の変化を図-6 に、対象建物前面の浸水深および側面の水位差の変化を図-7 に、対象建物に最大津波水平力が作用する時の流速を図-8、水圧を図-9 にそれぞれ示す。なお、津波水平力は建物周りの水圧を面積分することで算定した。

図-6 のように、対象建物に作用する津波水平力は刻々と変化する。津波水平力は、建物に津波が到達した直後には静水圧よりも大きな衝撃波圧として作用するが、その時間は極わずかであり、水位は 2m 以下と低い。このため、段波作用時ではなく、定常流作用時の最大浸水深到達以前で、建物前面（東側）と背面（西側）の水位差が最大の時に津波水平力も最大となった（図-6、7）。なお、浸水深 4m 以上では流速に関わらず静水圧と 98% 以上の近似を見せることを確認している（図-8、9）。

また、対象建物フーチング陸側下端を回転中心とした転倒モーメントと抵抗モーメントの比較からも、最大浸水深到達時よりも最大津波水平力作用時の方が、建物前面と背面の水位差が大きく、不安定であり、転倒の可能性が高いことを確認した<sup>7)</sup>。したがって、構造解析では

作用力として最大津波水平力を用いることにした。

## 4. 構造解析

対象建物フーチング陸側下端を回転中心とした転倒モーメントと抵抗モーメントの比較による検討によると、対象建物が転倒するのは、ほぼ全ての杭が破断した時、または液状化状態まで地盤が軟化した時に限られる<sup>7)</sup>。しかしながら、地震動と津波の双方の影響を受ける可能性がある地盤が、津波来襲時にどのような状態であったかは明らかとなっていない。そこで、静的線形有限要素法（解析コード：Mr.Soil）による二次元構造解析を行い、杭が破断する地盤条件すなわち被災当時の対象建物周辺の地盤状態の推定をした。

### (1) 構造解析モデル

構造解析に用いたモデルを図-10 に示す。建物上躯体と杭をビーム要素、フーチングと地盤をソリッド要素とし、断面二次元でモデル化した。なお、杭およびフーチングと地盤の間には剥離を表現するためにジョイント要素を配した。各要素の諸元を表-2~4 に示す。諸元は、杭の PC 鋼線の降伏強度のみ試験値を用い、その他は同様の建築物における一般的な値とした。

被災状況からは杭の配置が断定できない。このため、対称性を考慮して、図-11 のように杭本数 32 本のもの、44 本のを推定し、奥行方向の杭本数を考慮した諸元とすることで、解析モデルに杭配置を反映した。

表-2 ビーム要素の諸元

		柱 (RC)	各階・屋上床 (RC)	杭 (PHC) 一本当たり
ヤング率	kN/m <sup>2</sup>	2.27×10 <sup>7</sup>	2.23×10 <sup>7</sup>	3.78×10 <sup>7</sup>
単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	24.5	24.5	25.5
断面積	m <sup>2</sup>	1.26	0.80	4.52×10 <sup>2</sup>
断面二次モーメント	kN/m <sup>2</sup>	5.15×10 <sup>2</sup>	2.67×10 <sup>3</sup>	3.46×10 <sup>4</sup>

表-4 ソリッド要素の諸元

		フーチング (C)	地盤			
			要素 1	要素 2	要素 3	要素 4
			V <sub>s</sub> = 212m/s	$\bar{N}$ = 12.5	軟化地盤	硬化地盤
剛性率	kN/m <sup>2</sup>	2.23×10 <sup>7</sup>	1.26×10 <sup>5</sup>	3.50×10 <sup>4</sup>	1.26×10 <sup>2</sup>	2.53×10 <sup>5</sup>
ポアソン比		0.17	0.30			
単位体積重量	kN/m <sup>3</sup>	24.0	17.7			

表-3 ジョイント要素の諸元

		コンクリート-地盤間
一軸圧縮強度	kN/m <sup>2</sup>	4.90×10 <sup>4</sup>
せん断剛性率	kN/m <sup>2</sup>	5.88×10 <sup>4</sup>
垂直剛性率	kN/m <sup>2</sup>	8.82×10 <sup>4</sup>
摩擦角	°	30

表-5 解析モデルにおける地震動および津波の地盤状態への考慮有無

	地震動の影響	津波の影響
Case1	未考慮	未考慮
Case2	未考慮*	未考慮
Case3	考慮	未考慮
Case4	未考慮	考慮
Case5	考慮	考慮

\*液状化は考慮していないが、Case1と比較してやや塑性化した状態

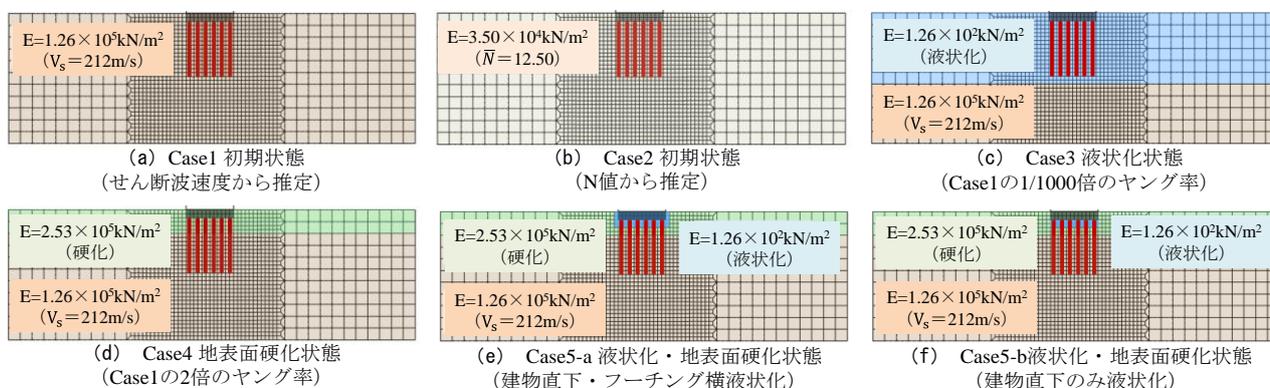


図-12 想定した地盤状態およびそれに基づく解析ケース

対象地盤では、地下20mまでせん断波速度が260m/s以下であり、それ以浅には基盤面が存在しない。一方で、杭の長さは6.5mと推定されたため、モデル境界の影響が出ない十分に大きな領域として、地盤の解析範囲は地下16.5m、幅48.25mとした。なお、地震後津波到来までに地面から泥水が噴出していたという証言から、地盤は完全に飽和していたと仮定し、地下水位は考慮していない。モデル境界では、地盤の左右両端は水平方向、下端は水平・鉛直方向を拘束した。

作用力は、最大津波水平力とし、1ステップで载荷した。対象建物内部の構造が不明であり、内部の浸水状況の推定が困難であるため、浮力は考慮していない。最大津波水平力は、三次元津波解析で算出されたものをその作用方向と投影受圧面積から、構造解析における作用方向および受圧面積における作用力に修正して、2.58×10<sup>3</sup>kNとした。これによって、三次元津波解析において対象建物を正方形の集合体として表現したことおよび、津波が対象建物に対して直角に作用しないことにより生じた三次元津波解析モデルの受圧面積と構造解析モデルの受圧面積の相違による津波水平力の相違を修正した。

対象建物は、寸法を除いて詳細な情報を得ることがで

きていない。また、軸力が作用しているPHC杭の耐力および応力とひずみの関係は明らかとなっていないところが多い。このため、本研究においては、あくまで定性的に今後注意すべき地盤状態としての被災当時の地盤状態を知るために、静的線形解析を行うこととした。

## (2) 構造解析ケース

対象建物の杭本数を断定できないため、杭本数32本のをCase-i、杭本数44本のをCase-iiとし解析を行い、検討を行った。被災当時の対象建物周辺の地盤状態は、地盤状態の異なる複数の解析モデルによる解析結果から、被災後の杭の損傷状況を再現しうるものを抽出することで推定した。

ところで、三次元津波解析では、最大津波水平力は生じたとき波は押し波であった。したがって、以下の検討では、津波の影響は地盤剛性の増大として考慮することとした。なお、地震動による影響は最も地盤剛性の減少した時、すなわち液状化として表現した。

地震動と津波の双方の地盤への影響を考慮するために、表-4に示す通り、剛性の異なる4種類の地盤要素を定め

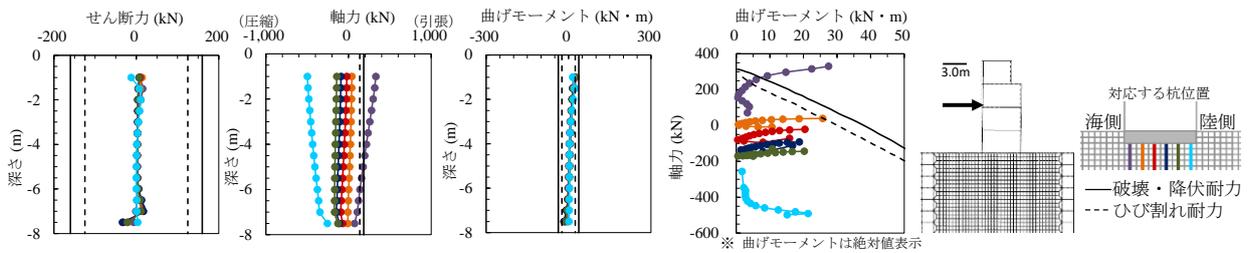


図-13 津波水平力により杭生じた力と曲げモーメント (Case1-i 初期状態 (せん断波速度から推定, 杭 32 本))

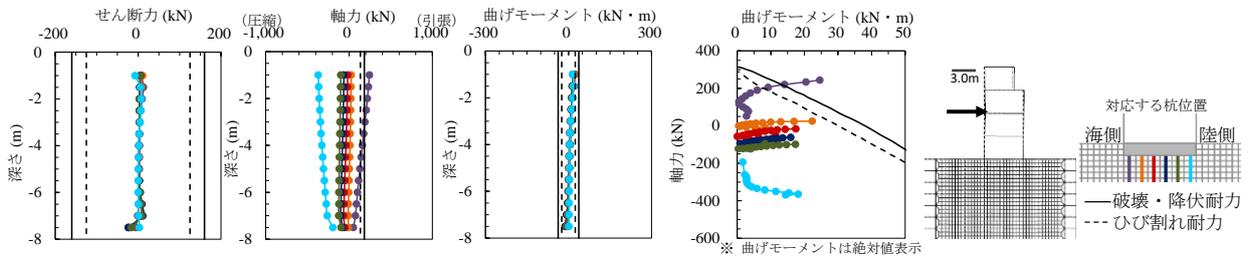


図-14 津波水平力により杭生じた力と曲げモーメント (Case1-ii 初期状態を模擬 (せん断波速度から推定, 杭 44 本))

た。地盤要素 1 は、せん断波速度から地盤剛性を定めた。地盤要素 2 は、N 値から地盤剛性を定めた。地盤要素 3 は、軟化した地盤として、液状化の表現として設計などで一般的に用いられている値を参考に、地盤要素 1 の剛性を 1000 分の 1 倍した。地盤要素 4 は、硬化した地盤として、一般に地盤硬化の過程において、地盤剛性は有効応力の倍率の平方倍となることから、対象地盤の N 値と推定された津波の波高、波長から既往の研究を基に、地盤要素 1 の剛性を 2 倍した。なお、基準としてせん断波速度を用いたのは、N 値から算出される地盤剛性は、せん断波速度から算出したものよりもやや塑性化した状態を表していると思われたためである。

最大津波水平力作用時に、地震動ならびに津波の地盤への影響があったか否かは定かではない。そのため、地震動ならびに津波の地盤への影響の考慮の是非を表-5 のように定め、以下の 5 つの地盤を作成した (図-12)。Case1 は、全て地盤要素 1 を用いており、均一な砂質土地盤での応答を見ることができる。Case2 は、すべて地盤要素 2 を用いており、やや塑性化した状態を表していると思われる。なお、Case1, 2 は、地盤が地震動と津波どちらの影響も受けない場合もしくは、地震動により液状化した地盤剛性が回復した後に津波が来襲し、津波は地盤に影響しない場合を表している。

Case3~5 は、Case1 を基本とし、言及する部分の剛性を Case1 の剛性から変化させた。Case3 では、地震動により地表面から地下 9.0m までが液状化したとし、この範囲を要素 3 でモデル化した。液状化範囲は地盤 N 値等を基に定めた。Case4 では、地震動による液状化の影響がない地盤に、津波が来襲することで地盤表面が硬化した場合を想定し、地表面から地下 3.0m までを要素 4 でモデル化した。津波の地盤への影響範囲は津波の周期・波高

および地盤 N 値から定めた<sup>12)</sup>。Case5 では、地震動により地盤が液状化したうえで津波が到達し、地表面付近は地盤硬化している場合を想定した。ただし、建物直下 1m は津波による浸透圧の影響が十分に到達しないために液状化したままとした。また、建物周辺における津波の地盤への影響範囲は断定できないため、フーチング横の 1 メッシュも液状化しているものを Case5-a、建物直下のみが液状化しているものを Case5-b とした。

### (3) 構造解析結果

杭に生じる力および曲げモーメントを、図-13~19 に示す。なお、ここでは杭 1 本あたりの値を示しており、せん断力および曲げモーメントの正負は津波水平力に準じる。また、ここに示した各種耐力は、JIS 規格<sup>19)</sup>ならびに基礎構造設計マニュアル<sup>20)</sup>に記載されている値およびそれらを基に算出した値である。特に、曲げひび割れ強度ならびに曲げ降伏強度と軸力の関係は、杭径 300 mm の PHC 杭 A 種の規格値を示しているが、対象建物の杭は、一般的な同種の杭よりも PC 鋼線の本数が少なく、被災当時材料強度が大幅に低下していた可能性もあることに注意が必要である。

地盤全域で剛性が極端に小さい Case3 を除いて、変位に大きな差はない。したがって、ここでは応力状態に着目して検討する。はじめに、標準的な地盤状態において、杭本数による差を検討する。図-13 の Case1-i (杭 32 本) と、図-14 の Case1-ii (杭 44 本) に示す力およびモーメントの分布は酷似していた。したがって、以下では杭本数 32 本のケース (Case1-i) のみ実施することにした。杭本数が減少すると、杭 1 本あたりが負担が増加し、Case1-i で示唆されていた杭頭付近で曲げモーメントによるひび

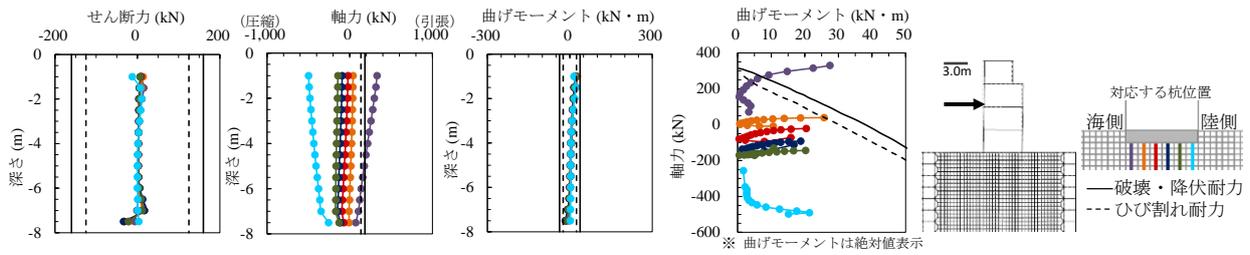


図-15 津波水平力により杭生じた力と曲げモーメント (Case2-i 初期状態を模擬 (N値から推定))

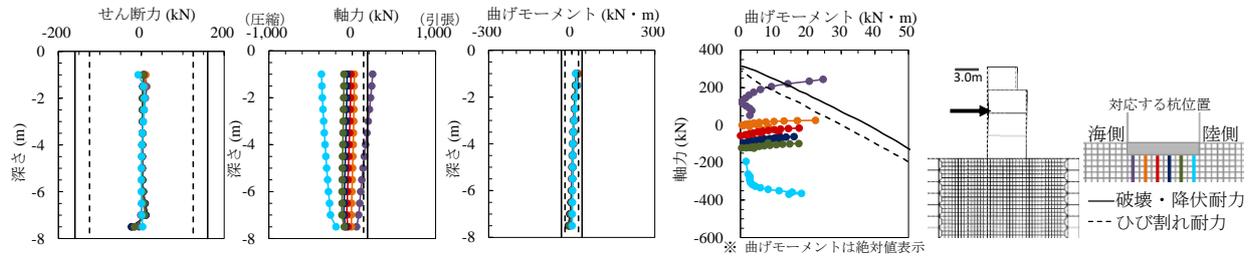


図-16 津波水平力により杭生じた力と曲げモーメント (Case3-i 地震動による液状化状態を模擬)

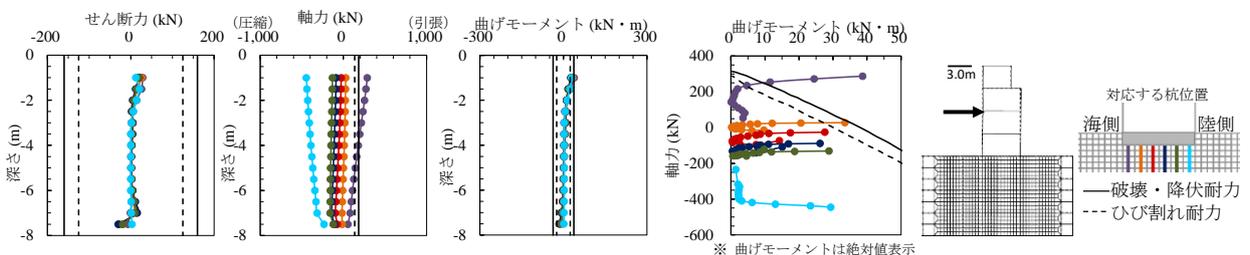


図-17 津波水平力により杭生じた力と曲げモーメント (解析結果 Case4-i 津波による地表面硬化状態を模擬)

割れが、Case1-ii では示唆されなかった。すなわち、一部の杭が損傷すると、その他の杭 1 本あたりの負担が増加し、他の健全な杭にも損傷の可能性が生じると言える。

続いて、全ケースに共通する事項を述べる。いずれのケースも、両端の 2 本の杭以下、両端の杭) とその他の杭 (以下、内側の杭) で、力と曲げモーメントの分布形状が異なり、両端の杭に大きな力および曲げモーメントが生じ易いことが分かった。また、軸力の分布から、引張力が生じるのは海側の 2 本のみであり、その他の杭には圧縮力のみが生じていた。このことから、対象建物の回転中心は、海側から 2 本目と 3 本目の杭の間 (フーチング海側端から 2m 付近) と推測される。

次に、地盤状態による違いをケース毎に検討する。

Case1-i では、最も海側の杭が杭頭から約 2m で曲げ破壊し、その隣の杭も杭頭付近でひび割れが生じる可能性がある (図-13)。また、最も陸側の杭頭には、建物の回転に伴い津波水平力と逆向きのせん断力が作用している。その結果、杭頭付近では曲げモーメントの減少がみられた。

Case2 では、応力分布の傾向は Case1 と同様である (図-15)。ただし、Case1 よりも多い海側から 3 本分の杭に杭頭付近から曲げ破壊またはひび割れが生じる可能性がある。また、建物の回転量が増加したため、最も海側の

杭の杭頭にも津波水平力と逆向きのせん断力が作用した。

Case3 では、三次元津波解析における最大津波水平力を作用させると、地盤剛性が小さいため、今回の解析におけるジョイント要素等の適応範囲を超えた結果となった。そのため、作用力を 50kN ずつ漸増させ、適応限界であった 650kN 載荷時の結果を示す (図-16)。この時、全ての杭に同程度の軸力が作用しており、建物上躯体の回転・移動は地盤の変形によるものであることが分かる。一方で、せん断力および曲げモーメントは他のケースよりも大きく、地盤が杭をほとんど支えていないと言える。特に、両端の杭に大きな力が作用し、海側から 4 本目を除く全ての杭で曲げ破壊またはひび割れが示唆された。なお、650kN 以上の水平力が作用した場合には、杭に損傷が生じると同時に、健全な杭も引抜けて、対象建物は流出すると推察される。

Case4 では、Case1 および Case2 とよく似た応力分布である (図-17)。ただし、より大きなせん断力が作用した結果、最も陸側の杭の杭頭のせん断力が負に至らず、Case1 および Case2 よりも大きな曲げモーメントが生じた。その結果、杭頭から 1.5m ほど曲げ破壊し、その隣の杭も杭頭付近でひび割れが生じる可能性がある。

Case5-a では、その他のケースと異なり、特に両端の杭の杭頭付近にせん断ひびわれの発生が示唆された (図

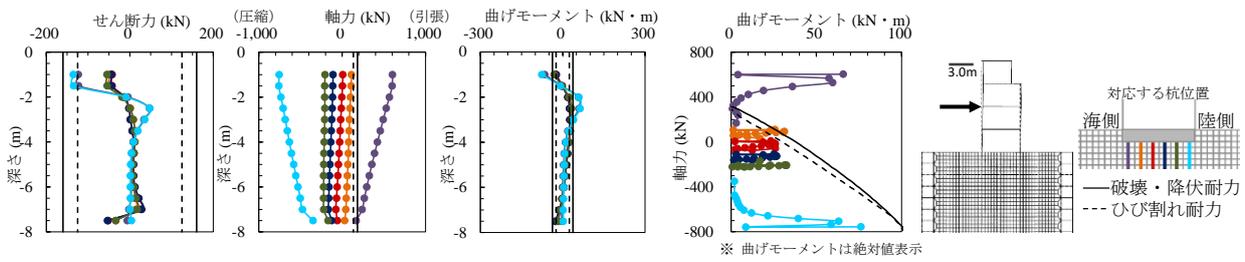


図-18 津波水平力により杭生じた力と曲げモーメント  
(解析結果 Case5-a-i 地震動により液状化・津波により地表面硬化状態を模擬)

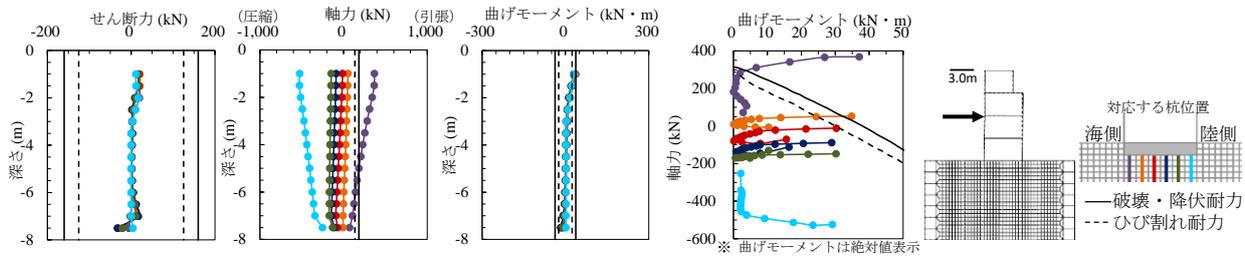


図-19 津波水平力により杭生じた力と曲げモーメント  
(解析結果 Case5-b-i 地震動により液状化・津波により地表面硬化状態を模擬)

-18). また、軸力も相対的に大きく、海側から 2 本目の杭にも引張による降伏が示唆された。また、最も海側の杭が杭頭から 5.0m ほど曲げ破壊し、その隣の杭も杭頭から 0.5~3.0m 付近で曲げ破壊およびひび割れが生じる可能性がある。これらは、フーチングの下に加えて、横も剛性の小さな要素としたことにより、建物上躯体の回転および移動が抑制されなくなったためと考えられる。

Case5-b では、Case5-a と比べて陸側、海側両端の杭に作用していたせん断応力が大幅に減少し、せん断破壊が示唆されなかった(図-19)。曲げ破壊も、最も海側の杭が杭頭から 2.0m ほどと、その隣の杭の杭頭付近で発生の可能性が示唆される結果となり、Case5-a と異なる。このことから、フーチング横の要素の地盤剛性を高めたことにより、建物上躯体の移動が抑えられたことが分かる。ただし、比較的大きな軸力が生じており、フーチング下の要素の剛性が低いことで、建物上躯体の回転は助長されたと考えられる。

続いて、各ケースの比較を行い、地盤状態の変化が杭の損傷に与える影響を検討する。Case1 と Case2, Case4 のように均質な地盤では、杭に生じる力の分布は地盤剛性に寄らずほぼ等しく、海側の杭から順に杭頭付近で破断していく可能性が高いことが分かる。ただし、建物上躯体の回転量が異なるため、特に押し込まれる側の杭の杭頭付近では力の分布に差が生じる。また、せん断力と曲げモーメントは地盤剛性が大きいほど、全ての杭と同様に生じるようになることが分かった。

Case3 から液状化地盤では三次元津波解析の最大津波水平力以下で、対象建物が流出する可能性が示された。三次元津波解析において建物に 650kN 以上の水平力が作用するのは、地震発生から 42 分 19 秒後の対象建物平均

浸水深が前面で 3.70m、背面で 0.60m の時である。すなわち、液状化が発生している場合、浸水深 3.70m の津波で、海側から 4 本目を除くすべての杭で曲げ破壊またはひび割れが生じる可能性があり、海側から 4 本目は損傷がないまま、建物が流出するという示唆を得た。ただし、杭が損傷すると応力状態が変化するため、2 番目にいずれの杭が損傷し、どの杭が最後まで残されるかは、本研究における静的線形解析では明らかにならない。

Case5-b は、Case5-a とその応力状態が大きく異なる。一方で、Case4 とはよく似た応力状態であり、フーチングの左右 1 メッシュの液状化の有無が建物上躯体の移動および杭に生じるせん断力と曲げモーメントの大きさに大きな影響を与えるといえる。

また、Case3 を除くケースの比較から、地盤剛性が小さいと両端の杭に生じるせん断力が大きくなり、地盤剛性が大きいと内側の杭のせん断力が大きくなることが分かった。ただし、内側の杭に生じるせん断力の大きさと全ての杭における軸力の大きさ、上躯体の回転量はフーチング下の地盤剛性の影響が大きいと思われる、地盤剛性が小さいほど大きな値となった。

本研究で行った 5 ケースは、いずれも海側から 2 列目の杭の破断およびひび割れの可能性が示唆されているが、実際の被害ではこの杭のうち一本は建物に付随した形で発見されている。杭が破断すると応力が再分配され、徐々に他の杭も破断すると考えられるが、本研究で検討したケースの中で、実被害を再現しうるのは陸側の杭の破断を示唆した Case3, Case5-a のみである。このうち、Case3 では海側から 2 本目の杭が杭頭付近で破断する結果となり、実被害に近い結果であったが、Case5-a はより深い場所での破断および被災状況からは確認できない

せん断ひび割れを示唆している。しかしながら、Case3では海側から4本目の杭が最後まで残る可能性が高い結果となっている。このように被災状況を完全に模擬する地盤状況は設定したケースの中にはなかったが、Case3やCase5-aのように地盤剛性が変化していた可能性が高いことが分かった。なお、被災状況を再現するためには、より実物に即した材料諸元を用いるとともに、浮力や津波水平力の作用方向、地盤の有効応力の変化の検討・考慮が必要となると思われる。

## 5. 被災メカニズムの検討

以上より、対象建物は2011年東北地震およびそれに伴い発生した津波により、以下のようなメカニズムで被災したと推定される。2011年東北地方太平洋沖地震により対象建物周辺の地盤が液状化した。その後、本震から43分経過しても、余震などの影響により液状化状態が継続していた。そこに最大浸水深15.52mの津波が来襲し、津波水平力が建物に作用した。これにより、杭にせん断応力、引張応力、曲げモーメントが作用し、一部の杭が破断した。杭の破断によって抵抗モーメントが減少し、対象建物が転倒した。対象建物は開口部が小さいため水の流入量が少なく、建物内部に建物が浮上るのに十分な量の空気が残されていたため、押し波により陸側へ約70m流された。

## 6. 結論

2011年東北津波で転倒・流出した杭基礎RC建物のうちの1棟に注目して、有限要素法による構造解析を行うことで、津波による杭基礎RC建物の転倒被害発生時の地盤状態の推定ならびに同被災メカニズムの推定を試みた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 対象建物の回転中心は、地盤が完全に液状化している場合を除き、杭の軸力分布からフーチング海側端から2m付近と推測される。
- (2) 地盤が地震等により完全に液状化している場合、三次元津波解析による最大津波水平力以下の作用力により、対象建物は流出する可能性が高い。
- (3) フーチング横の地盤剛性が小さいほど、建物上躯体の移動および杭に生じるせん断力と曲げモーメントが大きくなった。
- (4) フーチング下の地盤剛性が小さいほど、両端を除く杭に生じるせん断力および全ての杭における軸力、上躯体の回転量が大きくなった。
- (5) 地盤剛性が小さいと両端の杭に生じるせん断力が

大きくなり、地盤剛性が大きいと内側の杭のせん断力が大きくなった。

- (6) 実被害状況を模擬する地盤状態は、地震等により液状化していた時のみであると推定された。また、津波による地盤剛性の増大が、杭の損傷状況に影響を与えると思われる。

**謝辞:**本研究は、JSPS 科研費(基盤研究(A)17H01287)による支援を受けた。また、防災科学技術研究所のK-NETの強震記録および、日本地震工学会の東北電力株式会社記録の女川原子力発電所における「平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震」の余震等の加速度時刻歴データを使用した。

## 参考文献

- 1) 津波避難ビル等に係るガイドライン検討会、内閣府政策統括官(防災担当):津波避難ビル等に係るガイドライン(オンライン), <http://www.bousai.go.jp/kohou/oshirase/h17/pdf/guideline.pdf>, 2016-03-26参照, 2005.
- 2) 国土交通省 国土技術政策総合研究所:津波避難ビル等の構造上の要件の解説(オンライン), 国土技術政策総合研究所資料, <http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryounn/tnn0673pdf/ks0673.pdf>, 2016-03-26参照, 2012.
- 3) ファムバン フック, 今津雄吾, 佐川隆之, 長谷部雅伸: VOF法を用いた東北地方太平洋沖地震津波にの再現と建物の転倒メカニズムの解明, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, I\_156-I\_160, 2014.
- 4) 奥村与志弘, 佐藤祐子, 清野純史: 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 -, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.70, No.2, I\_1006-I\_1010, 2014.
- 5) 飛田哲男, 井合進, 大内俊介: 津波と液状化の複合作用による杭基礎を有する建築物の転倒メカニズム, 自然災害科学113Vol.34, No.1, pp.23-39, 2015.
- 6) Okumura, Y., Yane, T. and Kiyono, J.: Tsunami Response Analysis of Pile-supported RC Building in Onagawa Town due to the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami, Coastal Structures & Solutions to Coastal Disasters Joint Conference, Boston, MA, ASCE, 9pp, 2015.
- 7) 佐藤祐子, 米山望, 奥村与志弘, 清野純史: 杭基礎建物の津波転倒メカニズム検討のための三次元津波氾濫解析, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.72, No.2, I\_961-I\_966, 2016.
- 8) 国土交通省国土地理院: 基盤地図情報(オンライン), <http://www.gsi.go.jp/kiban/>, 2016-02-05参照.
- 9) 東北大学防災科学研究拠点 みちのく震録伝: 東北大学研究者による復興写真マップ(オンライン), [http://www.informatix-inc.com/top/disaster\\_photomap.htm](http://www.informatix-inc.com/top/disaster_photomap.htm), 2014-01-26参照.
- 10) William Pringle, 米山望: 2011年東北地方太平洋沖地震津波に関する二次元・三次元ハイブリッドモデルの適用, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.306-310, 2013.
- 11) 上田恭平, 井澤淳, 室野剛隆, 井合進: 余震の発生が地盤の液状化挙動に及ぼす影響に関する解析的検討,

- 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.70, No. 4 (地震工学論文集第 33 巻), I\_578-I\_585, 2014.
- 12) 奥村与志弘, 加藤亮輔, 岡二三生: 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 3 1-b 巻), I\_1171-I\_1178, 2012.
- 13) 規矩大義, 菅野高弘, 山口恵美, 砥綿翔平, 松本愛貴, 土屋智仁, 福島華恵, 木村太亮: 津波により転倒した杭基礎構造物の周辺地盤における原位置調査と液状化の検討, 第 47 回地盤工学研究発表会, C-03, 920, 2012.
- 14) 中埜研究室: 東北地方太平洋沖地震による被災建築物・構造物の復旧復興状況調査報告書, 東京大学生産技術研究所, 2013.
- 15) 土木学会: 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, 土木学会, 第 11 章その他の被害, 2011.
- 16) 田村修次: 東日本大震災の津波による建築被害, 京都大学防災研究所年報, 第 55 号 A, 2012.
- 17) 独立行政法人建築研究所, 国土交通省・国土技術政策総合研究所: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震被害調査報告, 2012.
- 18) 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ: 東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ統一データセット(オンライン), <http://www.coastal.jp/ttjt/>, 2015-07-07 参照.
- 19) 遠心力高強度プレストレスコンクリート杭 JIS A537 3(プレキャストプレストレスコンクリート製品)-2004
- 20) 社団法人コンクリートパイル建設技術協会: 既成コンクリート杭-基礎構造設計マニュアル-建設編, 2009.
- 21) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造物計算基準・同解説, 2010.
- 22) 土木学会: コンクリート標準示方書, 2007.
- 23) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001 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.

(2017.? 受付)

## CONSIDERING SOIL CONDITION FOR THE DAMAGE MECHANISM OF THE PILE-SUPPORTED RC BUILDING

Yuko SATO, Yoshihiro OKUMURA, Nozomu YONEYAMA, Ken WATANABE,

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 the soil condition at that time with FEM analysis using tsunami horizontal force getting by three dimensional tsunami analysis. As a result, it was shown that liquifution was occurred under the building when the biggest tsunami horizontal force act upon the building and piles were broken, and the soil condition of side and under the footing was most important factor to plie damage and amount of the building rotatin by tsunami.