

## 1. 背景と目的

平成 23 年 (2011 年) 東北地方太平洋沖地震津波では、杭基礎を有する RC 構造物の転倒・流出という過去に例のない被害が発生した<sup>1), 2)</sup>。一方、同災害以降も、津波に対して強いと考えられてきた同種の構造物を津波避難ビルとして活用する動きは益々活発化している。そのため、津波避難ビルの活用を前提とした津波避難対策に生かすべく、今回の被災メカニズムの早急な解明が求められている。

本研究では、宮城県女川町で実際に被災した杭基礎を有する RC 構造物のうちの 1 棟に注目して、津波氾濫解析と津波応答解析を実施し、対象構造物が津波によって転倒・流出したメカニズムを明らかにする。対象エリアのような軟弱地盤に 10m を超える津波が来襲した場合には、氾濫流の水位変動が地盤の有効応力に及ぼす影響が無視できなくなると指摘されおり<sup>3)</sup>、本研究ではその影響を考慮する。

## 2. 杭基礎を有する RC 構造物の津波被害発生メカニズムの検討

写真 1 は、対象構造物の被災後の様子である<sup>1), 2)</sup>。本研究では、同構造物の転倒・流出がいかなるメカニズムで起きたのかを、津波による地盤の軟化・硬化と地震動による地盤の液状化を考慮し解析的に検討した。

具体的には、まず 2011 年東北津波の再現計算を実施し、対象構造物周辺の津波氾濫流の浸水深と流速の時空間特性を明らかにした。ここでは、非線形長波理論を staggerd 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モデル (平面二次元) を用いた。対象構造物周辺の空間解像度は 10m とし、建物はマニングの粗度係数を用いて考慮した。

次に、津波氾濫解析結果を用い、津波外力として地盤条件の異なる 4 通りの津波応答解析を実施し、同構

造物の転倒・流出のメカニズムを検討した (表 1)。ここでは断面二次元の線形有限要素法を用いた。対象構造物の上躯体はビーム要素で、フーチング、杭、地盤はソリッド要素でモデル化した (図 1)。なお、ジョイント要素は配していない。地盤条件は、シナリオによって異なる地震動や津波による地盤の軟化・硬化の状況を、軟化あるいは硬化する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した。例えば、地盤条件の Case4 は、地震動により深さ 9m 以浅の地盤が液状化していたところに津波が来襲し、氾濫流の水位上昇によって、その影響が及ばないと仮定できる建物直下を除き、地下 3m までは地盤が硬化に転じている状況をモデル化したものである。

## 3. 主要な結果

以下に主要な結論をあげる。(1) 2011 年東北津波の再現計算によって、対象構造物の原位置における浸水深が最大 (16.9m) となった時には津波はすでに引きに転じていたことが分かった (図 2)。(2) 対象構造物は、原位置よりも内陸側に位置する場所で建物陸側側面を下にして転倒していた。このことから、同構造物は内陸に向かう流れにより転倒・移動したと考えられる。それは氾濫流の水位が上昇している段階、すなわち、表層地盤が津波により硬化している段階で同構造物が転倒したことを示唆している。(3) 対照的に、十分な抵抗モーメントが期待できる地盤条件においては、1 波目により杭が破断しなければ、対象構造物の自重、杭・地盤の間の周面摩擦、鋼線による引張抵抗を考慮した構造物の抵抗モーメントは最大浸水深より算出される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。実際の被害を踏まえれば、杭の破断は 1 波目の津波が原因であると考えられる。ただし、転倒・流出は 2 波目以降の可能性

もある。(4) 4通りの地盤条件が異なる下での津波応答解析結果では、地震動による地盤の液状化状態が継続中に津波の来襲によって浸水深が大きくなる過程ではその津波の影響が及ばないと考えられる対象構造物直下を除く表層地盤が硬化する(剛性が増大する)という状況を考えれば、杭にせん断破壊と引張破壊が生じることが分かった。実際の杭からは引張破壊が確認されており、上記の地盤条件が最も実際を説明し得る(図3)。(5) 引張破壊が生じるためには、最大浸水深16.9mから静水圧近似で求められる荷重だけでは不十分であり、海水が土砂を含んでいる影響や漂流物の影響などを踏まえた大きな水平力が荷重として作用していた可能性があることが分かった。

### 参考文献

- 1) 土木学会東日本大震災被害調査団(地震工学委員会): 緊急地震被害調査報告書, 2011.
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 独立行政法人建築研究所: 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), 2011.
- 3) 奥村ら: 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), I\_1171-I\_1178, 2012.



写真1 対象構造物の被災後の様子<sup>1), 2)</sup>

表1 検討する地盤条件

	G.L. 0.0m~-3.0m	G.L.-3.0m~-9.0m
Case1	$G_0$	$G_0$
Case2	$G_0/1000$	$G_0/1000$
Case3	$2G_0$	$G_0$
Case4	$2G_0^*$	$G_0/1000$

$G_0$ : N1値=4.5の地盤における剛性率( $=3.65 \times 10^3 \text{tf/m}^2$ )  
 $*$ 対象構造物直下は $G_0/1000$

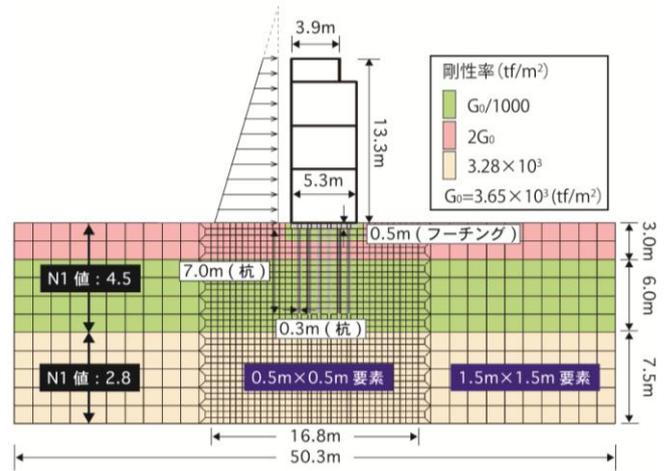


図1 構造解析モデル (Case4)

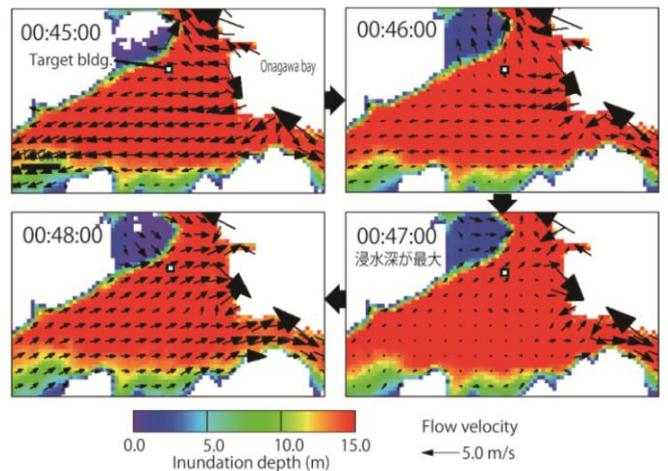


図2 津波の浸水深と流速の時空間変化

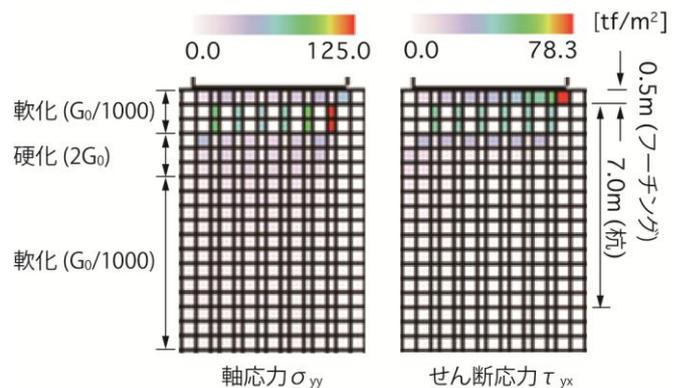


図3 応力分布(Case4)