

## 地震応答・津波作用解析による津波避難ビルの安全性評価

## Safety Evaluation of Tsunami Refuge Building by Seismic Response and Tsunami Analysis

○学 荻野 弘明 (筑波大院)  
Hiroaki OGINO,  
Graduate School, Univ. of Tsukuba,  
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

非 田中 聖三 (筑波大)  
Seizo TANAKA,  
Univ. of Tsukuba,  
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

正 磯部 大吾郎 (筑波大)  
Daigoro ISOBE,  
Univ. of Tsukuba,  
1-1-1 Tennodai, Tsukuba-shi, Ibaraki

Key Words: *Tsunami Analysis, Tsunami Refuge Building, ASI-Gauss Code, Stabilized FEM, VOF Method*

## 1. 緒言

2011年の東北地方太平洋沖地震では、多くの鋼構造建物が低層階の層崩壊、杭の破壊や引き抜きによる転倒などの被害を受けた。構造上安全性の高い津波避難ビルの必要性が高まり、防災関係機関は避難ビルの設計に資する暫定指針[1]を提案し、指針に基づいて避難ビルの具体的な設計例[2]も示した。このように、避難ビルの設置に向けて様々な機関が多角的な検討を行っている。しかし、地震による建物の損傷を考慮し、浮力と津波荷重のそれぞれが建物の倒壊や転倒などの複合被害に及ぼす影響を詳細に検討した例は少ない。そこで本研究では、東北地方太平洋沖地震で観測されたデータを利用して、鋼構造建物の津波避難ビルに対して ASI-Gauss 法[3]による地震応答解析と津波作用解析を連続的に実施した。解析結果から、浮力および津波荷重のそれぞれが建物の倒壊・転倒被害に及ぼす影響を数値的に評価することを試みた。

他方、津波に対する建物の挙動を高い精度で評価するためには、建物に作用する津波力の大きさとその作用位置を正確に把握する必要がある。そこで、本研究では、界面関数を用いて自由表面形状を間接的に表現する界面捕捉法を実装した安定化有限要素法による流体シミュレーションも試みた。本稿では、建物の開口部が無い簡易的なモデルに対して行った流体シミュレーションについて報告する。

## 2. 津波避難ビルの構造解析モデル

津波避難ビルのモデルを図1に示す。この建物は鋼構造建物であり、設計例[2]に準じて基礎梁と杭を含めて構築した。実際の杭は直径2mの円断面、長さ30mのコンクリート杭であるが、モデルでは長さを3mとし、強度は同等にして表現した。建物の上部構造は、階層が10階、全高が40.15mであり、ベースシア係数が0.16として設計されている。総重量は設計例と同等の約60MNである。各部材の材種は、柱がBCP325、梁がSN490B、床がコンクリートであり、建物の減

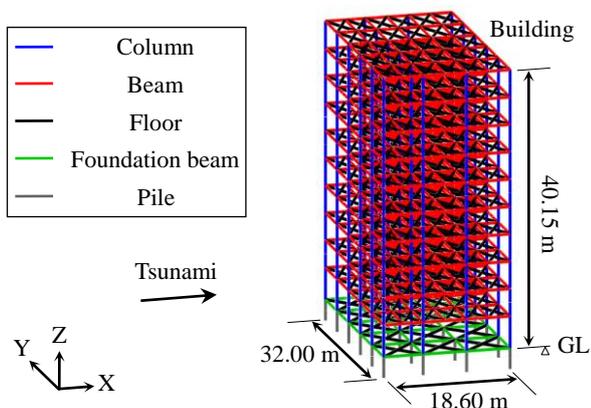


Fig.1 Numerical model

衰比は2%とした。モデルの1次固有周期を解析によって算出した結果、X軸方向は1.36秒(設計例:1.37秒)、Y軸方向は1.37秒(設計例:1.38秒)となり、設計例と良好に一致している。

## 3. 荷重条件と杭の引抜条件

本稿では、建物に地震波を入力した後、浮力と津波荷重の流体力を作用させる解析を実施した。地震波には、東北地方太平洋沖地震で観測された K-NET 仙台波 100%を用いた。

浮力  $F_B$  には次式を適用した。

$$F_B = \rho_s g V \quad (1)$$

ここで、 $\rho_s$  は瓦礫を含んだ海水の密度、 $g$  は重力加速度、 $V$  は建物が排した水の体積である。解析では、津波により開口部が設けられ、建物内に水が流入する状況を想定した。すなわち、建物が排した水の体積は、構造部材(柱、梁、床)の体積分と床下の空気溜まりの体積分とした。式(1)で算出された浮力は、水面下に存在する節点に対し鉛直上向きに静的に1ステップで分布させた。

津波荷重  $F_T$  には、次式の静水圧荷重  $F_S$  と抗力  $F_D$  の和を適用した。

$$F_S = \gamma \rho_s g \int_{z_1}^{z_2} (h-z) B dz \quad (2)$$

$$F_D = \frac{1}{2} \gamma \rho_s C_D u^2 A \quad (3)$$

ここで、 $\gamma$  は開口低減係数、 $z_1$  は受圧面の最小高さ、 $z_2$  は受圧面の最高高さ、 $h$  は浸水深、 $z$  は当該部分の地盤面からの高さ、 $B$  は当該部分の受圧面の幅、 $C_D$  は抗力係数、 $u$  は物体と津波の相対速度、 $A$  は津波荷重を受ける受圧面の面積である。なお、受圧面は開口部を含めた津波荷重を直接受ける水面下の面と定義する。開口低減係数は、受圧面の面積から開口部の面積を除外した面積を受圧面の面積で除した値である。津波進行方向は、建物の側面の面積が大きい+X方向(図1参照)とし、静水圧荷重は静的に1ステップ、抗力は動的に1秒間増分的に作用させた。これらの津波荷重は、受圧面に存在する節点に分布させた。

以上までに述べた浮力、静水圧荷重および抗力が建物に作用すると、それぞれの荷重によって建物に転倒モーメントが発生する。浮力による転倒モーメント  $M_B$ 、静水圧荷重による転倒モーメント  $M_S$  および抗力による転倒モーメント  $M_D$  はそれぞれ次式で与えられる。

$$M_B = F_B \times \frac{1}{2} L \quad (4)$$

$$M_S = F_S \times \frac{1}{3} h \quad (5)$$

$$M_D = F_D \times \frac{1}{2} h \quad (6)$$

ここで、 $L$ は建物の津波進行方向の長さであり、各転倒モーメントの和が流体力による転倒モーメント  $M_T$  となる。本稿では、解析で得られた津波荷重および転倒モーメントと層間変形角の関係を考察し、津波荷重と浮力のそれぞれが建物の倒壊被害に及ぼす影響を評価することを試みる。

次に、東北地方太平洋沖地震で津波の被害を受けた15地域の浸水深と流速の観測データ[4]と、式(1)~(6)で算出された流体力および転倒モーメントを表1に示す。流体力と転倒モーメントは、 $\rho_S$ を1,200 kg/m<sup>3</sup>、 $C_D$ を1.2、 $\gamma$ を0.90として算出した。 $\gamma$ は建物の開口部の割合が最も小さい側面に津波が来襲することを想定して定めた。

建物の転倒被害を評価するために、建物の転倒の原因となる杭の引き抜きを表現する手法を解析コードに導入した。図2に杭の引き抜きの表現方法を示す。流体力が作用する直前に地表面の鉛直方向のみの拘束を自由とし、杭に引抜力のみを伝達させる。そして、以下の引抜条件を満たした場合、地表面と杭下端部の拘束を完全に自由とし、建物の転倒に対する杭の抵抗を消失させて杭の引き抜きを表現する。

$$N_i - N_0 > R \quad (7)$$

ここで、 $N_i$ は*i*ステップ時の杭の引張軸力、 $N_0$ は地表面の拘束解除時の杭の引張軸力、 $R$ は杭1本当たりの引抜抵抗力である。左辺に杭の引張軸力の増加分を用いた理由は、地盤と杭のそれぞれに上部構造の重量がどの程度伝わるかが不明確であると考えられ、転倒被害を安全側に評価するためである。地盤は液状化が起きない地盤を想定し、引抜抵抗力は周面摩擦力と杭自重の和の12,955 kN[2]と設定した。なお、本研究では水平力による杭の破壊は考慮していない。

#### 4. 構造解析結果

建物は地震動のみの作用で残留変形が生じたが、崩壊には至らなかった。ここでは、地震波入力後に表1の15種類の流体力を作用させた解析結果について述べる。まず、転倒被

Table.1 Observational data, fluid force and overturning moment

	$h$ [m]	$u$ [m/s]	$F_B$ [MN]	$F_T$ [MN]	$M_T$ [MN·m]
Kesennuma (KS)	5.1	4.62	4.99	6.67	59.66
Yamada (YM)	5.7	6.29	5.04	10.18	70.66
Sendai (SD)	6.0	8.86	5.06	15.87	88.57
Otsuchi① (OT①)	7.0	4.34	5.15	11.04	76.85
Ofunato① (OF①)	8.2	8.88	5.25	24.80	134.95
Ofunato② (OF②)	8.4	6.37	5.27	19.02	112.16
Otsuchi② (OT②)	9.5	7.73	9.91	27.06	196.48
Miyako① (MK①)	11.5	5.56	10.08	29.78	222.03
Miyako② (MK②)	11.5	7.51	10.08	35.87	257.02
Rikuzentakata① (RK①)	13.0	3.42	14.76	31.80	281.88
Rikuzentakata② (RK②)	13.0	5.83	14.76	37.81	320.95
Rikuzentakata③ (RK③)	14.0	5.20	14.85	41.08	348.11
Tanohata (TH)	14.0	8.02	14.85	51.90	423.87
Minamisanriku (MS)	15.0	4.67	14.93	44.92	380.44
Onagawa (OG)	15.0	9.47	14.93	66.04	538.77

$h$ : Inundation height,  $u$ : Tsunami velocity,  
 $F_B$ : Buoyant force,  $F_T$ : Tsunami force,  
 $M_T$ : Overturning moment

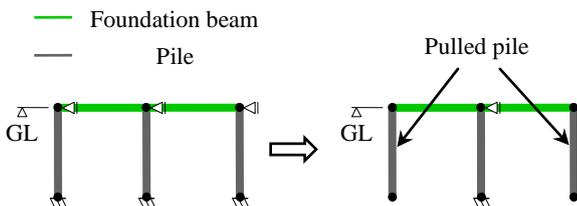


Fig.2 Expression of piles pulled under tsunami

害について考察する。いずれの解析条件でも杭は引抜条件を満たさないことが確認され、さらに、建物内に水が流入しないと仮定し、建物の容積分の浮力を作用させた解析を行った場合にも、杭の引き抜きは確認されなかった。

次に、倒壊被害について考察する。田野畑村 (TH)、南三陸町 (MS)、女川町 (OG) の3つの条件では、せん断変形によって1階柱脚部の要素がすべて破断し建物が流出した。ただし、実際は津波の作用で建物の外壁が破壊され開口部が広がることが予想され、開口部の割合を常に1割とした今回のケースの場合、建物の被害を過大に評価している可能性がある。続いて、津波荷重および流体力による転倒モーメントと1階層間変形角の関係をそれぞれ図3(a)と図3(b)に示す。これらは、解析終了時の層間変形角を表し、建物の1階が破断した結果はプロットしていない。図3(a)に示すように、津波荷重が35 MN程度を超えると変形が顕著に進行している。宮古市② (MK②)、陸前高田市② (RK②) および陸前高田市③ (RK③) の条件では、1階柱脚部の要素がすべて塑性化を起こしていた。図3(b)には、転倒モーメントと1階層間変形角の関係にも、勾配が急激に変化する傾向が見られる。しかし、MK②は陸前高田市① (RK①) に比べ転倒モーメントが小さいにも関わらず層間変形角が大きい。浮力による転倒モーメントは後者の方が約45 MN·m大きい、津波荷重による転倒モーメントはより変形が進んだ前者の方が約20 MN·m大きい、したがって、浮力よりも津波荷重の方が被害に対して影響が大きくなる場合があることを確認した。

#### 5. 流体シミュレーション

本研究では、将来的に、建物に及ぼす津波力の大きさとその作用位置を流体シミュレーションによって正確に把握し、ASI-Gauss 解析コードを用いて津波力を外力として建物に付加させる構造解析を行うことを検討している。ここでは、開口部が無い簡易的な建物モデルに対して行った流体シミュレーションについて述べる。

##### 5-1 数値解析手法

津波を再現する場合、巻き込みや砕波といった複雑な自由表面形状を表現する必要がある。そのため、流体シミュレーションには、自由水面形状を関数値で間接的に表現することで複雑な水面形状を有する現象へも適用可能な界面捕捉法が適しているといえる。本研究では、界面捕捉法の代表的な手法であるVOF法を実装した安定化有限要素法のコード[5]を用いた。この手法には、領域分割法に基づく並列計算手法(MPIにより通信)と、OpenMPを用いたスレッド並列を組み合わせたhybrid並列計算手法が導入されており、大規模数値計算が可能である。なお、上記の解析コードを用いたシミュ

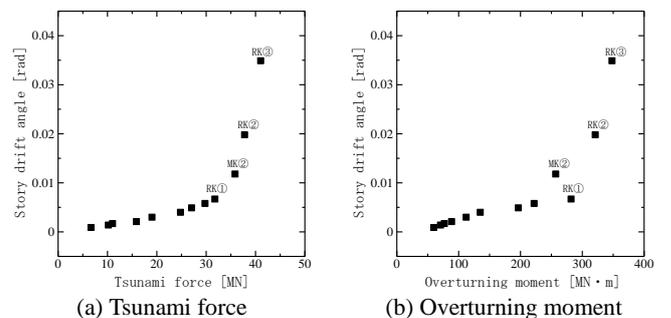


Fig.3 Relationship between forces and story drift angle of the first floor

レーションでは、港湾空港技術研究所の大規模波動地盤総合水路で行われた動的津波荷重によるコンクリートの破壊実験[6]で得られた結果との比較検証を通して、流れの現象だけでなく流体力までが精度良く求まることが確認されている。解析手法の詳細については文献[5]を参照されたい。

### 5-2 解析モデルと解析結果

図4に有限要素メッシュによる解析モデルを示す。流体領域は全長が240 m、幅が180 m、高さが80 mであり、津波避難ビルは開口部を考慮せずにモデル化した。モデルはすべて四面体要素を用いて要素分割を行い、総節点数、総要素数はそれぞれ約300万と約1,700万である。津波を再現するために、図5に示すように、左方の壁面に液体が高さ8 m、流速9 m/s（フルード数が約1.0）で流入する条件を与え、非圧縮性流体を扱っていることから流体領域の上部壁面の右方にトラクションなしに流出が可能な自由流出境界条件を与えた。その他の壁面にはslip条件を課した。上記のモデルと境界条件に対し、時間増分を0.01 sとして30秒間の解析を行った。

解析結果として、図6に各時刻の水面形状と津波避難ビル前面の圧力分布を示す。圧力の大きさは色の違いで示している。水面形状の結果から、津波が造波され、沖から伝播し、建物に衝突する現象を再現できていることがわかる。衝突後、津波が壁面に沿って上昇する現象も表現できている。圧力分布を見ると、津波が建物に到達してから常に低層部に大きな圧力が作用していることがわかる。浸水深の上昇につれて建物の中層部の圧力も大きくなっていくが、低層部に比べるとその大きさは小さい。今後、得られた圧力分布から津波力の時刻歴を求める予定である。

### 6. 結言

建物の転倒の原因となる杭の引き抜きを表現する手法をASI-Gauss解析コードに導入し、津波避難ビルに対し東北地方太平洋沖地震で観測された地震動と流体力を作用させる連続解析を実施した。杭の引き抜きの状況や建物に作用する荷重と建物の変形の関係について考察し、建物被害の評価が可能となることが確認された。

流体シミュレーションでは、津波の来襲を再現でき、津波避難ビル前面における圧力分布が得られた。今後は、開口部

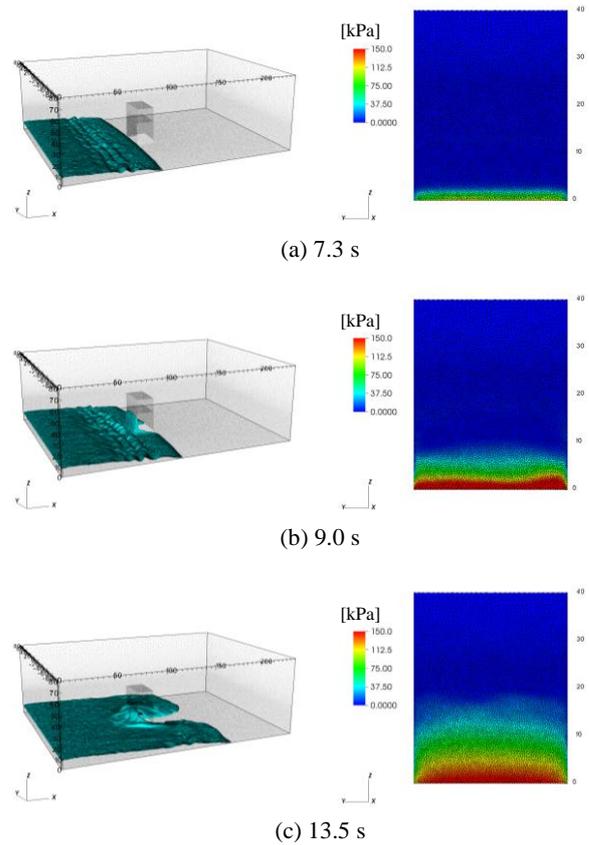


Fig.6 Time snapshots of wave motion (left) and pressure distribution on front wall of the tsunami refuge building (right)

を設けた建物モデルに対する流体シミュレーションを行い、圧力分布から津波力の時刻歴を算出し、それを外力として建物に付加させる構造解析を行っていく予定である。

### 謝辞

本研究はJSPS 科研費 25420567 の助成を受けたものである。

### 参考文献

- [1] 国土交通省住宅局, 国土交通省国土技術政策総合研究所: 東日本大震災における津波による建築被害を踏まえた津波避難ビル等の構造上の要件に係わる暫定指針, 2011.11.
- [2] 日本建築防災協会: 津波避難ビル等の構造上の要件の解説, 2012.2.
- [3] 磯部 大吾郎, チョウ ミヨウ リン: 飛行機の衝突に伴う骨組鋼構造の崩壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第579号, pp.39-46, 2004.5.
- [4] 東京大学生産技術研究所: 平成23年度 建築基準整備促進事業 40. 津波危険地域における建築基準等の整備に資する検討 中間報告書 その2, 2011.10.
- [5] 田中 聖三, 孫 方涛, 堀 宗朗, 市村 強, ラリス マッデゲダラ: 動的津波荷重による構造物の破壊解析の基礎的研究, 土木学会論文集, Vol.69, pp.903-908, 2013.
- [6] 有川 太郎, 中野 史丈, 大坪 大輔, 下迫 健一郎, 石川 信隆: 遡上津波力による構造物の変形・破壊挙動の検討, 海岸工学論文集, Vol.54, pp.841-845, 2007.

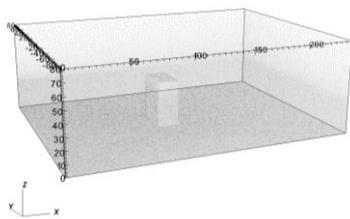


Fig.4 Numerical model

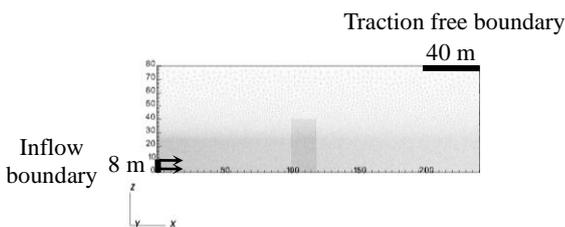


Fig.5 Boundary conditions