

地震・津波作用下における津波避難ビルの動的解析

Dynamic Analysis of Tsunami Refuge Building Subjected to Earthquake and Tsunami

荻野弘明¹⁾, 磯部大吾郎²⁾

Hiroaki Ogino and Daigoro Isobe

1) 筑波大学大学院 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: cherbourg92@yahoo.co.jp)

2) 博(工) 筑波大学 教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.tsukuba.ac.jp)

Since the 2011 Great East Japan Earthquake, the need for tsunami refuge buildings which contribute to protect human lives during tsunami disasters has been increased. The main objective of this study is to carry out safety evaluation of a tsunami refuge building by dynamic analysis using the Adaptively Shifted Integration (ASI)-Gauss code. This code is a finite element code that provides higher computational efficiency than the conventional code and can cope with strong non-linear and discontinuous behaviors such as member fracture and elemental contact. In this study, the following two load conditions were considered; a seismic excitation, a fluid force which contains buoyant force and tsunami force. By performing the analysis with the loads consecutively applied to the tsunami refuge building, it was confirmed that a tsunami load had a great effect on the damage of the building.

Key Words : *Tsunami Refuge Building, Dynamic Analysis, The Great East Japan Earthquake, ASI-Gauss Code*

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損壊し、柱脚部の破壊や1階の層崩壊、杭の破壊や引き抜きによる転倒などの被害が見られた。地震動を受けた鋼構造建物に津波が押し寄せ、建物に作用する荷重が増加したことで被害が拡大したものと考えられている。この震災を受け、構造上安全性の高い津波避難ビルの必要性が高まり、高台が近くに存在しない海岸地域では、多くの自治体で避難ビルの設置を検討している。また、各関係機関は、津波避難ビル等の構造上の要件に係わる暫定指針[1]を提案した。この指針では、浮力や津波荷重の設計式の提案、建物の倒壊や転倒などの複合的な被害に対して検討されており、指針に基づいて津波避難ビルの具体的な設計例[2]も示された。

このように、津波避難ビルの設置に向けて様々な自治体や機関が多角的な検討を行っている。しかし、津波の被害を受ける建物に対して地震の影響を定量的に評価することは困難である点、漂流物の衝突力の統一的な評価方法が確立されていない点など、依然として多くの課題が存在すると考えられている。そこで、董らは、津波に先立ち発生する地震の影響を考慮し、数値解析によって地震力、流体力および漂流物の衝突力のそれぞれが建物の倒壊被害に与える影響について調査した[3]。しかし、地震による建物の損傷を考慮し、浮力と津波荷重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ない。

本稿では、東北地方太平洋沖地震で観測されたデータを利用し、鋼構造建物の津波避難ビルに対して地震力と流体力を連続的に作用させる動的解析を実施した。得ら

れた解析結果から、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し、津波避難ビルの安全性を検討した。なお、数値解析には、大規模骨組構造の構造解析において最小限のコストで精度の高い解析が可能である、ASI-Gauss法[4]を基に開発された有限要素解析コードを利用する。

2. 数値モデル

津波避難ビルのモデルを図-1に示す。避難ビル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、標準階高が3.95m(1階のみ4.60m)、階層が10階、階高が40.15mであり、ベースシア係数0.16として設計されている。床荷重は、屋上を670 kgf/m²、床を540 kgf/m²と設定し、総重量を設計例と同等の58,901 kNに合わせた。各部材の材種は、柱が

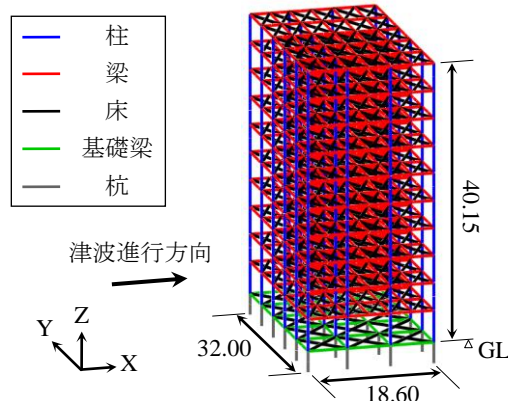


図-1 建物モデル鳥瞰図 (単位: [m])

BCP325, 梁がSN490B, 床がコンクリートであり, 建物の減衰比は2%とした. モデルの1次固有周期を算出した結果, 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. モデルの総要素数は3,904, 総節点数は2,455である.

3. 荷重条件

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, 図-2に示す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, 0秒から150秒まで入力した.

浮力 F_B には次式を適用した.

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

ここで, ρ_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て静的に1ステップで作用させた.

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, γ 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

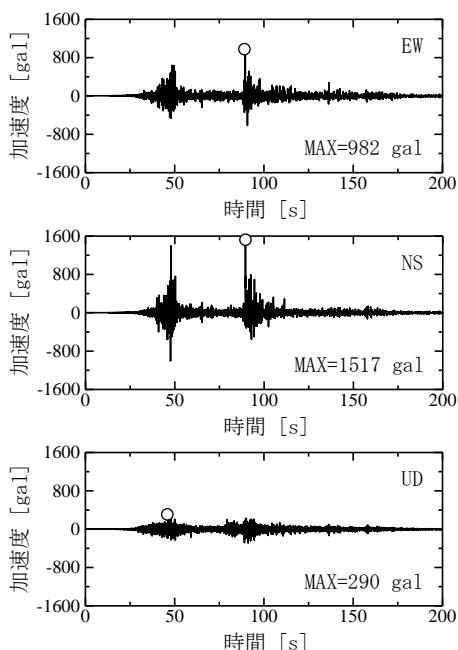


図-2 入力地震波 (K-NET 仙台波 100%)

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り, この係数を導入することで開口部による津波荷重の低減を考慮した. 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, 図-3に示すように, 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. 転倒モーメントは, 建物の倒壊・転倒被害を評価するための重要なパラメータであり, 各荷重による転倒モーメント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, M_B は浮力による転倒モーメント, M_S は静水圧荷重による転倒モーメント, M_D は抗力による転倒モーメント, L は建物の津波進行方向の長さであり, 各転倒モーメ

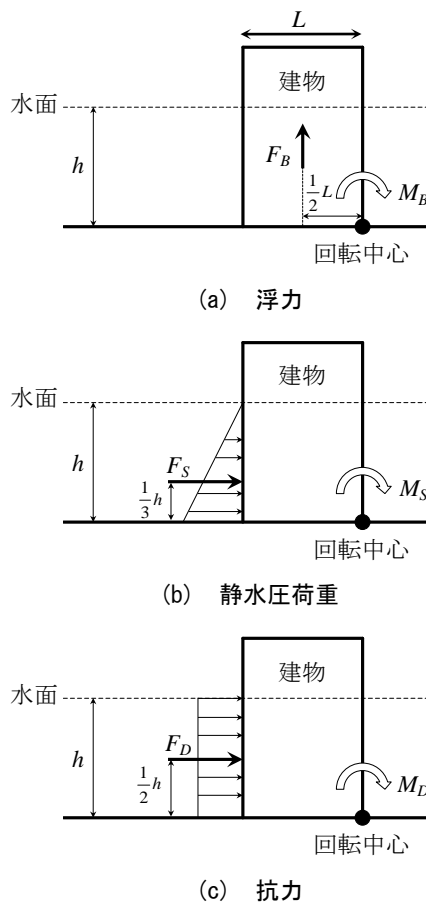


図-3 流体力が建物に作用する様子

ントの和が流体力による転倒モーメント M_T となる。

次に、東北地方太平洋沖地震で津波の被害を受けた15地域の観測データ[5]を表-1に示す。フルード数 F_r は津波の流勢を表す指標であり、浸水深 h と流速 u を用いて次式で求められる。

$$F_r = \frac{u}{\sqrt{gh}} \quad (7)$$

表-1の浸水深と流速を用いて算出した各地域の浮力（式(1)）、津波荷重（式(2)・(3)）および転倒モーメント（式(4)・(5)・(6)）を表-2に示す。これらは、瓦礫を含んだ海水の密度 ρ_S を1,200 kg/m³、抗力係数 C_D を1.2、開口低減係数 γ を0.90として算出した。

4. 部材の降伏・破断条件と杭の引抜条件

ASI-Gauss法[4]に基づく解析コードに破断アルゴリズムを導入した有限要素解析手法では、弾性状態から塑性、破断状態までシームレスな解析が可能である。降伏と判定された部材の破断条件としては、部材を構成する各要素の曲率、せん断ひずみおよび引張軸ひずみによる次式を用いた。

$$\left| \frac{\kappa_x}{\kappa_{x0}} \right| \geq 1 \text{ or } \left| \frac{\kappa_y}{\kappa_{y0}} \right| \geq 1 \text{ or } \left| \frac{\gamma_{xz}}{\gamma_{xz0}} \right| \geq 1 \text{ or } \left| \frac{\gamma_{xy}}{\gamma_{xy0}} \right| \geq 1 \text{ or } \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_{x0}} \geq 1 \quad (8)$$

ここで、 κ_x 、 κ_y 、 γ_{xz} 、 γ_{xy} 、 ε_x はそれぞれx軸、y軸回りの曲率、x軸、y軸方向のせん断ひずみ、引張軸ひずみであり、下添え字“0”は破断臨界値であることを示す。これらの破

断臨界値は、ボルト締めされた継手の曲げ試験[6]や引張試験[7]の結果、および、鋼材の物性値から入手できる。本稿では、破断臨界値として $\kappa_{x0} = \kappa_{y0} = 3.333 \times 10^{-4}$ 、 $\gamma_{xz0} = \gamma_{xy0} = 1.300 \times 10^{-2}$ 、 $\varepsilon_{x0} = 0.17$ の値を用いた。

建物の転倒の原因となる杭の引き抜きの表現方法を図-4に示す。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。

$$N_i - N_0 > R \quad (9)$$

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り、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、本稿では水平力による杭の破壊は考慮していない。

5. 解析結果

建物モデルに地震波を入力した後、表-2に示す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、転倒モーメントが最も大きい女川町（OG）の条件の解析で得られた、杭の引張軸力の増加分を図-5に示す。図の数値は浮力を作用させたときの値を表す。いずれの杭も引抜抵抗力12,955 kNには及ばず、引抜条件を満たしていない。対象とした津波避難ビルの場合、浮力が建物の転倒被害に及ぼす影響は小さいと考えられる。

解析結果の例として、図-6に女川町（OG）の条件における流体力作用時の建物の様子を示す。地震動のみによつては残留変形が生じたが、建物は崩壊に至らなかった。しかし、流体力の作用により建物は低層部を中心に変形が著しく進み、流体力が作用してから1.7秒後には、受圧面の1階柱脚部の要素が破断している（図-6(a)）。その0.3秒後には、1階柱脚部の要素がすべて破断し（図-6(b)）、

表-1 観測データ

調査地域	h [m]	u [m/s]	F_r
気仙沼市 (KS)	5.1	4.62	0.65
山田町 (YM)	5.7	6.29	0.84
仙台市 (SD)	6.0	8.86	1.15
大槌町① (OT①)	7.0	4.34	0.52
大船渡市① (OF①)	8.2	8.88	0.99
大船渡市② (OF②)	8.4	6.37	0.70
大槌町② (OT②)	9.5	7.73	0.80
宮古市① (MK①)	11.5	5.56	0.52
宮古市② (MK②)	11.5	7.51	0.71
陸前高田市① (RK①)	13.0	3.42	0.30
陸前高田市② (RK②)	13.0	5.83	0.52
陸前高田市③ (RK③)	14.0	5.20	0.44
田野畑村 (TH)	14.0	8.02	0.68
南三陸町 (MS)	15.0	4.67	0.38
女川町 (OG)	15.0	9.47	0.78

h：浸水深，u：流速， F_r ：フルード数

表-2 津波荷重と転倒モーメント

調査地域	F_B [MN]	F_S [MN]	F_D [MN]	$F_T (=F_S+F_D)$ [MN]	M_B [MN・m]	M_S [MN・m]	M_D [MN・m]	$M_T (=M_B+M_S+M_D)$ [MN・m]
気仙沼市 (KS)	4.99	4.41	2.26	6.67	46.41	7.50	5.76	59.66
山田町 (YM)	5.04	5.51	4.68	10.18	46.87	10.46	13.33	70.66
仙台市 (SD)	5.06	6.10	9.77	15.87	47.06	12.21	29.30	88.57
大槌町① (OT①)	5.15	8.31	2.73	11.04	47.90	19.38	9.57	76.85
大船渡市① (OF①)	5.25	11.40	13.40	24.80	48.83	31.16	54.96	134.95
大船渡市② (OF②)	5.27	11.96	7.06	19.02	49.01	33.49	29.66	112.16
大槌町② (OT②)	9.91	15.30	11.76	27.06	92.16	48.45	55.87	196.48
宮古市① (MK①)	10.08	22.42	7.37	29.78	93.74	85.94	42.35	222.03
宮古市② (MK②)	10.08	22.42	13.45	35.87	93.74	85.94	77.34	257.02
陸前高田市① (RK①)	14.76	28.65	3.15	31.80	137.27	124.14	20.47	281.88
陸前高田市② (RK②)	14.76	28.65	9.16	37.81	137.27	124.14	59.54	320.95
陸前高田市③ (RK③)	14.85	33.23	7.85	41.08	138.11	155.05	54.95	348.11
田野畑村 (TH)	14.85	33.23	18.67	51.90	138.11	155.05	130.71	423.87
南三陸町 (MS)	14.93	38.14	6.78	44.92	138.85	190.71	50.88	380.44
女川町 (OG)	14.93	38.14	27.89	66.04	138.85	190.71	209.21	538.77

F_B ：浮力 F_S ：静水圧荷重 F_D ：抗力 F_T ：津波荷重

M_B ：浮力による転倒モーメント M_S ：静水圧荷重による転倒モーメント

M_D ：抗力による転倒モーメント M_T ：流体力による転倒モーメント

最終的に建物全体が流される(図-6(c)). 田野畑村 (TH) と南三陸町 (MS) の条件でも1階が破断し建物が流出した. 流出した3つの条件の解析では, 1階柱脚部の要素はすべてせん断変形によって破断した. ただし, 実際の柱脚部は地中に埋め込まれ, コンクリートや鉄筋によって固定されているため, あまり変形しないことが予想される. 今後, 破断条件について詳しく検討する必要がある.

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-7(a)と図-7(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-7(a)に示すように, 津波荷重が35 MN程度を超えると変形が増大している. 層間変形角が1/100 radを超える宮古市② (MK②), 陸前高田市② (RK②) および陸前高田市③ (RK③) の条件では, 流体力の作用によって1階柱脚部の要素はすべて塑性化する. 図-7(b)を見ると, 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く, 津波荷重が建物の変形量を決定づけていることが確認できる. 津波による建物の倒壊被害を適切に評価するためには, 浸水深と流速を正確に把握した上で津波荷重を算定する必要があると考えられる.

6. 結言

鋼構造建物の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結果, 津波による転倒被害は確認されず, 浮力が建物被害に及ぼす影響は小さいことがわかった. 一方, 津波荷重が建物の変形量に大きく影響を及ぼし, 建物被害の程度を左右する要因となることがわかった. また, 津波荷重によって建物の変形量が一意的に定まる傾向が見られ, 津波荷重の大きさから建物被害の程度予測が可能であることが示唆された.

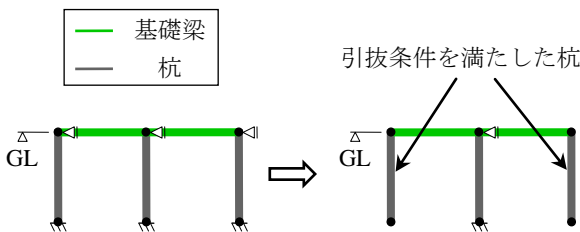


図-4 流体力作用時の杭の引き抜きの表現

-759	-88	-81	-81	-96	-767	(X4)
476	210	200	201	213	481	(X3)
612	551	594	594	547	599	(X2)
1,863	1,923	1,960	1,961	1,933	1,874	(X1)
(Y6)	(Y5)	(Y4)	(Y3)	(Y2)	(Y1)	

単位: [kN]

図-5 杭の引張軸力の増加分 (解析条件: 女川町 (OG))

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] 董 元奇, 磯部 大吾郎: 津波と津波漂流物の衝突による建物の崩壊解析, 計算工学講演会論文集, Vol.28, 2013.6.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 濱田 直之, 平島 岳夫, 上杉 英樹: 高力ボルト梁継手の高温時における純曲げ実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.41-42, 2007.8.
- [7] 藤本 健太郎, 濱田 直之, 瀬川 紘史, 平島 岳夫, 上杉 英樹, 安部 武雄: 高力ボルト継手の耐火性に関する実験的研究(その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-2, pp.105-110, 2006.9.

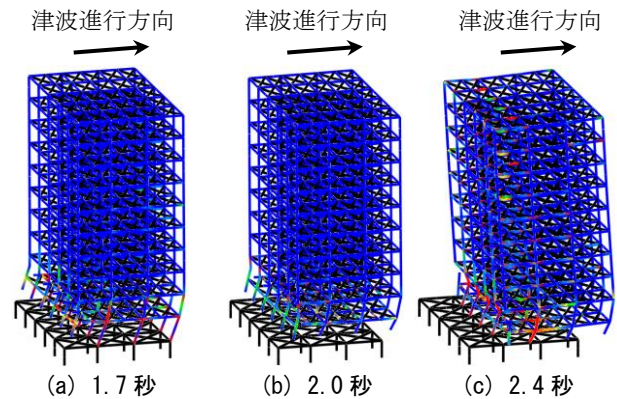
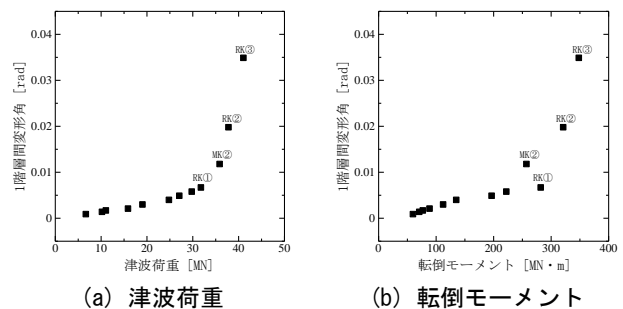


図-6 流体力作用時の建物の様子 (解析条件: 女川町 (OG))

※時間は流体力が作用してからの経過時間



(a) 津波荷重

(b) 転倒モーメント

図-7 荷重と1階層間変形角の関係