

津波避難ビルの安全性評価に関する数値解析的研究

正会員
同○荻野 弘明*¹
磯部 大吾郎*²津波避難ビル
鋼構造建物動的解析
ASI-Gauss 法

東北地方太平洋沖地震

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、各関係機関は津波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、津波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 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。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。

2. 数値モデル

津波避難ビルのモデルを図-1に示す。この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、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。総重量は設計例と同等の58,901kN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。

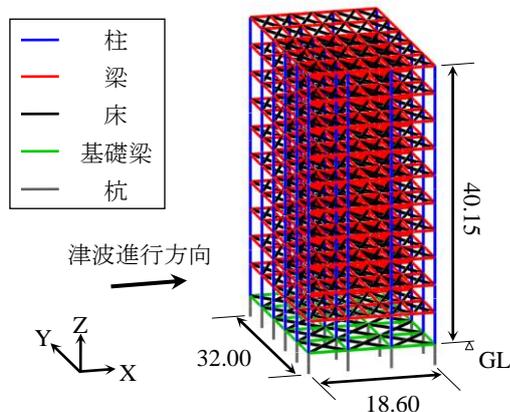


図-1 建物モデル鳥瞰図 (単位: [m])

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、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、 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、 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。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。

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、瓦礫を含んだ海水の密度 ρ_S を $1,200 \text{ kg/m}^3$ 、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. 杭の引抜条件

建物の転倒の原因となる杭の引き抜きの表現方法を図-2 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。

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

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 $12,955 \text{ kN}^2$ 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。いずれの条件でも杭は引抜条件を満たさないことが確認されたため、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。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、破断条件についてはさらに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-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増大している。さらに、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ため、浮力の影響よりも津波荷重の影響を重視し建物の倒壊被害を評価することが適切であると思われる。また、そのためには、浸水深と流速を正確に把握した上で適切な津波荷重を算定する必要がある。

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の予測が可能であることが示唆された。

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.

表-1 観測データおよび流体力と転倒モーメント

調査地域	h [m]	u [m/s]	F_B [MN]	F_T [MN]	M_T [MN・m]
気仙沼市 (KS)	5.1	4.62	4.99	6.67	59.66
山田町 (YM)	5.7	6.29	5.04	10.18	70.66
仙台市 (SD)	6.0	8.86	5.06	15.87	88.57
大槌町① (OT①)	7.0	4.34	5.15	11.04	76.85
大船渡市① (OF①)	8.2	8.88	5.25	24.80	134.95
大船渡市② (OF②)	8.4	6.37	5.27	19.02	112.16
大槌町② (OT②)	9.5	7.73	9.91	27.06	196.48
宮古市① (MK①)	11.5	5.56	10.08	29.78	222.03
宮古市② (MK②)	11.5	7.51	10.08	35.87	257.02
陸前高田市① (RK①)	13.0	3.42	14.76	31.80	281.88
陸前高田市② (RK②)	13.0	5.83	14.76	37.81	320.95
陸前高田市③ (RK③)	14.0	5.20	14.85	41.08	348.11
田野畑村 (TH)	14.0	8.02	14.85	51.90	423.87
南三陸町 (MS)	15.0	4.67	14.93	44.92	380.44
女川町 (OG)	15.0	9.47	14.93	66.04	538.77

h : 浸水深, u : 流速, F_B : 浮力,
 F_T : 津波荷重, M_T : 流体力による転倒モーメント

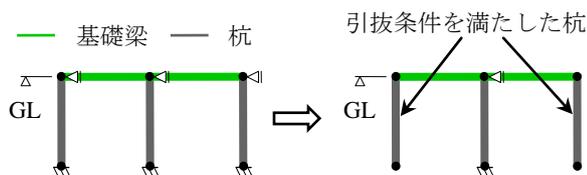


図-2 流体力作用時の杭の引き抜きの表現

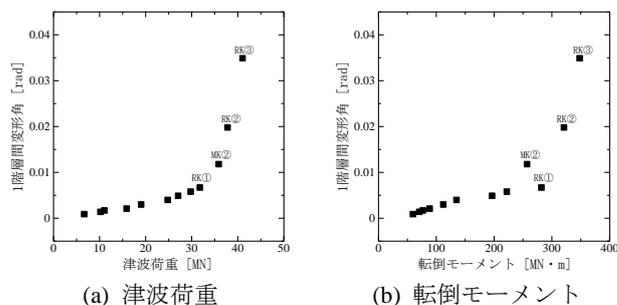


図-3 荷重と 1 階層間変形角の関係

*1: 筑波大学大学院システム情報工学研究科 大学院生
 *2: 筑波大学教授 博 (工)

*1: Graduate Student, Univ. of Tsukuba
 *2: Professor, Univ. of Tsukuba, Dr. Eng.