

津波漂流物の衝突による建物の崩壊解析 Collapse Analysis of Building due to Tsunami Debris Impact

董 元奇 (筑波大院) 磯部 大吾郎 (筑波大)

Yuanqi DONG, Graduate School, Univ. of Tsukuba

Daigoro ISOBE, Univ. of Tsukuba

FAX: 029-853-5207, E-mail: s1220927@u.tsukuba.ac.jp

In the 2011 Great East Japan Earthquake, debris caused by tsunami such as cars and ships collided with buildings and expanded the damages. A finite element analysis of a steel framed structure is carried out, in this paper, to see the effects of seismic excitation, fluid force, buoyant force and impact force of the debris on the structure. While the impact force caused by the debris collision made the crucial damage to the structure, a large effect of the fluid force was confirmed from the numerical results.

1. はじめに

2011年の東日本大震災では、東北地方を中心に強い揺れと津波により太平洋沿岸の広い範囲で大きな被害を受けた。その中で、津波が港湾を襲った際に船やコンテナ等を押し流し、そのような漂流物が建物に衝突することによる被害が見られた。例えば定期検査中の観光船「はまゆり」

(Fig. 1) は岩手県大槌町の造船所から、津波によって防波堤を乗り越えて約 150 m 離れた民宿の屋根に乗り上げた。津波による流体力に漂流物の衝突力が加わると、建物に作用する荷重が増加し被害が増大することが懸念されている。したがって、浸水時に建物に作用する荷重のみならず、津波に先立ち発生する地震動による地震力と漂流物の衝突力を考慮し、解析を行うことが必要と考える。

本研究では、地震力、津波による流体力・浮力と漂流物による衝突力が建物被害に与える影響を調べるため、6層3スパンのS造骨組構造を加振させ、続けて船舶を模擬した漂流物モデルを建物に衝突させる地震応答・漂流物衝突解析を連続的に行った。解析にはASI-Gauss法¹⁾に基づいて開発された崩壊解析コードを用い、入力地震波には気仙沼市で観測された地震動、流体力には同じく気仙沼市で観測された津波の最大遡上高さおよび津波高さを使って計算したものを用いた。さらに、船を模擬したモデルに流体力、浮力と初速度を与えて漂流物の衝突を再現し、異なる海拔に建つ建物に対してそれぞれの荷重が与える影響の度合いを比較した。

2. 解析モデルと解析条件

解析モデルには、耐震性を考慮しベースシア係数 0.3として設計された6層3スパン、階高3.6mのS造骨組構造を用いた。なお、床荷重は400 kgf/m²とした。作成した解析モデルに対し、まず東日本大震災の際に気仙沼市で観測された地震波 (Fig. 2) を150sまで入力し、地震動のみによる損傷を調べた。次に、気仙沼市での観測情報²⁾に基づき最大遡上高さ $R^*=21$ m、津波高さ $h=15$ mの津波が到達したことを想定し、Fig. 3に示すように水面下の節点に浮力 F_b を静的に、流体力 F_d を動的にそれぞれ作用させた。



Fig. 1 A tourist ship washed up by tsunami (Otsuchicho, Iwate, Asahi Shimbun news)

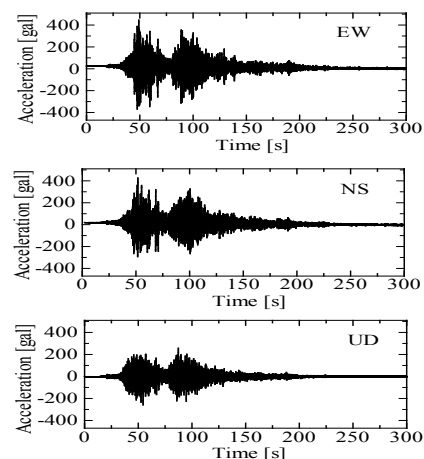


Fig. 2 Seismic wave observed in Kesennuma city

建物が海拔9mに建つ場合と、11mに建つ場合について解析を行った。浮力および流体力は以下のように計算した。

構造物の一部または全体が水没した場合に、構造物が排除した水の体積分の浮力は次式のように与えられる³⁾。

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

ここで、 ρ_s :瓦礫を含んだ海水の密度 1,200 kg/m³, g :重力加速度, V :構造物が排除した水の体積である。浮力は自重と反対方向に作用するため、建物が転倒しやすくなることが考えられる。解析では、建物には骨組部材の容積分の浮力を水面下の節点に加え、漂流物(船)には船の重量と同等の大きさの浮力を水面下の節点に加えた。

津波の速度が比較的大きい場合に、水の圧力差および構造物に作用する抗力からなる流体力は次式のように与えられる。

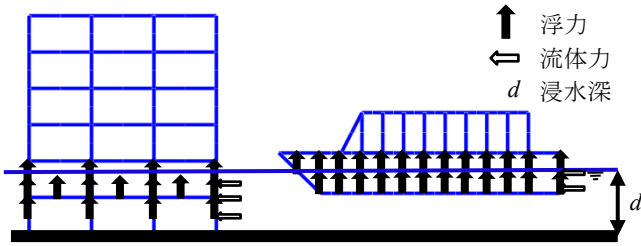


Fig. 3 Fluid force and buoyant force subjected to the building and tsunami debris

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_s C_d B (hu^2)_{\max} \quad (2)$$

ここで、 C_d : 抗力係数、 B : 構造物の幅、 u : 津波速度、 $(hu^2)_{\max}$: 流束運動量である。 $(hu^2)_{\max}$ を求める際には、近似的に次式を用いることができる³⁾。

$$(hu^2)_{\max} = gR^2 \left[0.125 - 0.235 \frac{z}{R} + 0.11 \left(\frac{z}{R} \right)^2 \right] \quad (3)$$

ここで、 R : 津波の設計遡上高さ $=1.3 R^*$ 、 z : 海拔である。解析では、漂流物側の建物の側面に水面下の投影面積分の流体力を、漂流物（船）の船尾には水面下の後方投影面積分の流体力を加えた。また、津波高さ h と海拔 z および浸水深 d の関係は次式で与えられる。

$$h = z + d \quad (4)$$

最後に、重量 110 ton の漂流物（長さ 27 m、幅 6 m、高さ 8 m のアルミ合金造の船を想定）に初速度 10 m/s を与えて S 造骨組構造に衝突させた。以上の一連の過程を連続的に解析し、それぞれの過程における解析モデルの挙動を調べた。解析結果では、次に示す降伏関数の値によって要素ごとに色分けし表示した。

$$f_y = \left(\frac{M_x}{M_{x0}} \right)^2 + \left(\frac{M_y}{M_{y0}} \right)^2 + \left(\frac{N}{N_0} \right)^2 \quad (5)$$

ここで、 M_x 、 M_y 、 N はそれぞれ x 、 y 軸回りの曲げモーメントおよび軸力である。各項の分母は、各々の断面力が部材断面に単独で作用した場合の全断面塑性値である。動的解析での時間増分を 1 ms とし、時間積分法には数値減衰を考慮した Newmark の β 法 ($\beta=4/9$ 、 $\delta=5/6$) を用いた。

3. 解析結果

気仙沼波を建物に入力した際の最大振幅時の変形の様子を Fig. 4 に示す。地震動により建物に多少の変形が生じたが、損傷には至らなかった。この後に、建物が海拔 9 m（すなわち(4)式より浸水深 $d=6$ m）および 11 m（浸水深 $d=4$ m）に建つ場合の、それぞれ浮力と流体力を作用させた際の挙動を Fig. 5 および Fig. 6 に示す。その結果、海拔 9 m に建つ建物は倒壊したが、海拔 11 m に建つ建物は永久変形を生じたものの、倒壊には至らなかった。次に、船を模擬した漂流物モデルに初速度 10 m/s、浮力および流体力を作用させ、海拔 9 m の建物および 11 m の建物に衝突させた際の変形の様子を Fig. 7、Fig. 8 にそれぞれ示す。損壊

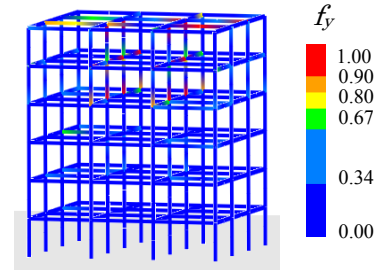


Fig. 4 Behavior of the building under seismic excitation

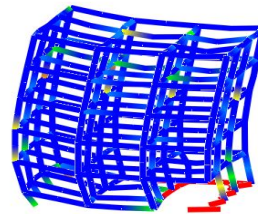


Fig. 5 Behavior of the building under fluid force and buoyant force (9 m above sea level)

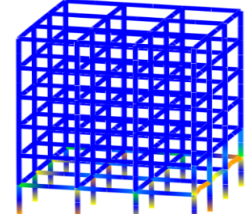


Fig. 6 Behavior of the building under fluid force and buoyant force (11 m above sea level)

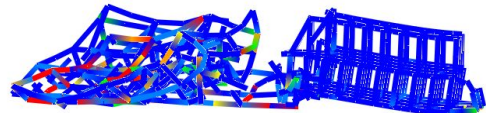


Fig. 7 Collapse of the building model due to tsunami debris collision (9 m above sea level)

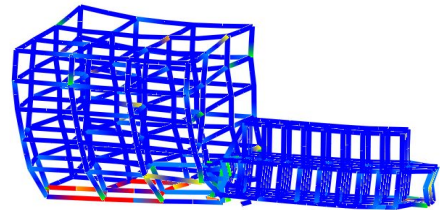


Fig. 8 Collapse of the building model due to tsunami debris collision (11 m above sea level)

度合いの差異はあるものの、いずれの建物も倒壊した。

4. 結言

本稿では、ASI-Gauss 法による崩壊解析コードを用い、建物の地震応答および津波漂流物の衝突現象を連続的に解析・再現した。海拔の異なる位置に建つ建物に地震力・浮力・流体力が及ぼす影響の度合いを比較した結果、漂流物の衝突による影響は大きい、それ以上に流体力（特に遡上高さ）の影響が大きく、海拔の高い位置にある建物の被害が小さくなる可能性が高いことが確認された。今後は、流体力の影響をさらに詳細に調べる予定である。

参考文献

- 磯部大吾郎, チョウミョウリン: 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, 2004, pp. 39-46.
- 東日本大震災 1 年記録 (みやぎの住宅社会資本再生, 復興の歩み), 宮城県土木部, 2012.
- 平成 23 年東北地方太平洋沖地震調査研究 (速報), 国総研資料第 636 号, 建築研究資料第 132 号, 2011.