

# 津波と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 and Tsunami Debris Impact

董元奇<sup>1)</sup>, 磯部大吾郎<sup>2)</sup>

Yuanqi Dong 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: s1220927@u.tsukuba.ac.jp)

2) 博(工) 筑波大学准教授 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1, E-mail: isobe@kz.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 also confirmed from the numerical results.

**Key Words :** *Tsunami Debris, Impact, Collapse Analysis, ASI-Gauss Technique*

### 1. はじめに

東日本大震災の際、津波で流された大型船などの漂流物が建物を破壊し、被害をより一層拡大させていた可能性が指摘されている(図1)。例えば宮城県気仙沼市では、波の跡より高い場所でも建物が大きく損壊しており、船舶などの漂流物によって破壊されたものと考えられている[1]。気仙沼港に到達した津波の高さは約6mと推定されているが、この場合でも6~7m/sの速度で波が押し寄せると10 tonf/m<sup>2</sup>程度の力が作用するため、このような津波による流体力にさらに漂流物の衝突力が加わり、建物の被害が増大した可能性がある[2]。

本研究では、地震力、津波による浮力・流体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、続けて流体力および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[3]に基づいて開発された崩壊解析コード、入力地震波には気仙沼市で観測された地震動を用いた。先の研究[4]では、衝撃的に津波荷重が作用する場合の経験式[5]を用いて流体力を算定したが、その場合には流体力を大きめに考慮してしまう可能性があった。そこで、本研究では一般的に用いられる抗力[6]を使って計算した流



図-1 津波で打上げられた船(宮城県気仙沼市, 産経デジタルニュースより)

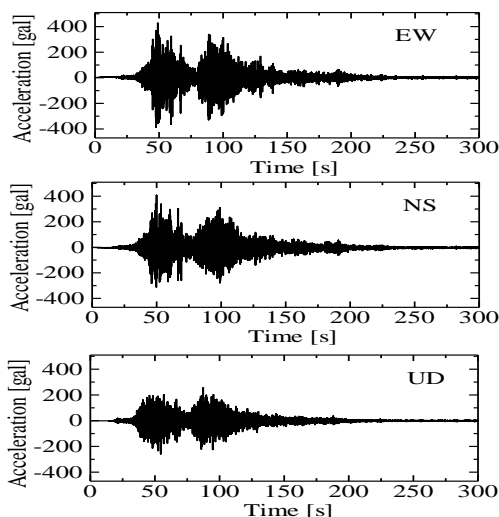


図-2 気仙沼波(解析では150 sまでを入力)

体力を用いた。さらに、船を模擬したモデルに浮力・流体力と初速度を与えて漂流物の衝突を再現し、浸水深が異なる場合に建物の挙動に与える影響の相違を比較した。

### 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/m<sup>2</sup>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(図2)を150sまで入力し、地震動のみによる損傷を調べた。次に、速度10m/sの津波が到達したことを想定し、図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。

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 $F_b$ は次式のように与えられる。

$$F_b = \rho_s g V \tag{1}$$

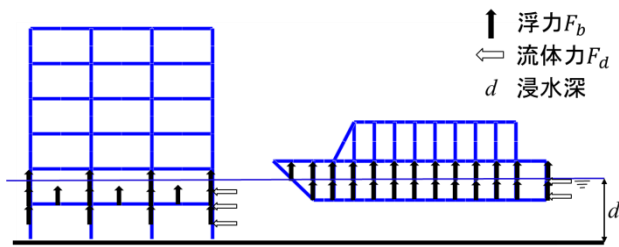


図-3 建物と漂流物に作用する荷重

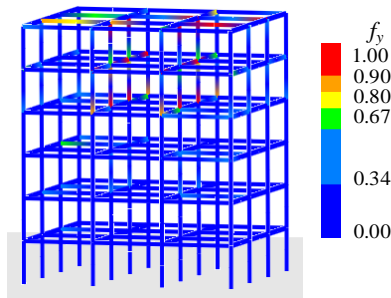


図-4 入力加速度最大振幅時(49.8 s)の変形の様

ここで、 $\rho_s$ :瓦礫を含んだ海水の密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$ 、 $g$ :重力加速度、 $V$ :構造物が排除した水の体積である。建物には水面下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。

流れの中に物体が置かれた時、物体表面に作用する抗力からなる流体力 $F_d$ は次式のように与えられる[6]。

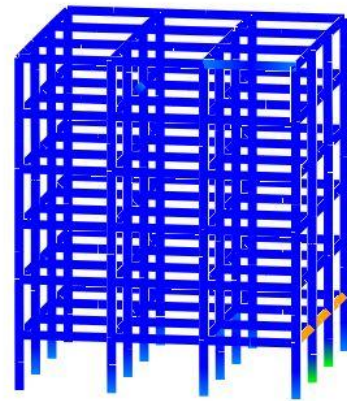
$$F_d = \frac{1}{2} \rho_s A C_d U^2 \quad (2)$$

ここで、 $C_d$ :抗力係数、 $U$ :津波と物体の相対速度、 $A$ :水面下の投影面積である。抗力係数は、長方形の面に抗力が作用した場合の値を用い、1.2とした[6]。建物の水面下投影面積は、壁が全て健全に残っていると仮定し、全面の面積とした。解析では津波の速度を $10 \text{ m/s}$ とし、建物と津波の速度差により計算された流体力を動的に建物に作用させた。

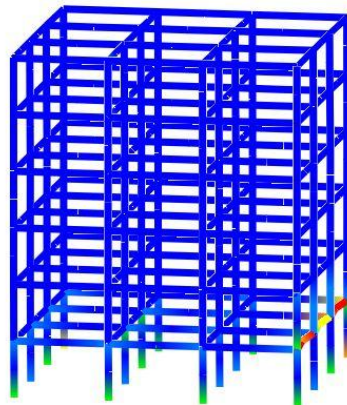
最後に、重量 $40 \text{ ton}$ の漂流物(長さ $27 \text{ m}$ 、幅 $6 \text{ m}$ 、高さ $8 \text{ m}$ のアルミ合金造の船を想定)に初速度を与えてS造骨組構造に衝突させた。初速度は津波の速度と同じとしたため、初期の漂流物に作用する流体力の大きさは $0$ である。以上の一連の過程を連続的に解析し、それぞれの過程における解析モデルの挙動を調べた。解析結果では、次に示す降伏関数の値によって要素ごとに色分けし表示した。

$$f_y = \left( \frac{M_x}{M_{x0}} \right)^2 + \left( \frac{M_y}{M_{y0}} \right)^2 + \left( \frac{N}{N_0} \right)^2 \quad (3)$$

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 $1 \text{ ms}$ とし、時間積分法には数値減



(a) 浸水深 4 m



(b) 浸水深 6 m

図-5 建物に浮力・流体力を作用させた際の変形の様子

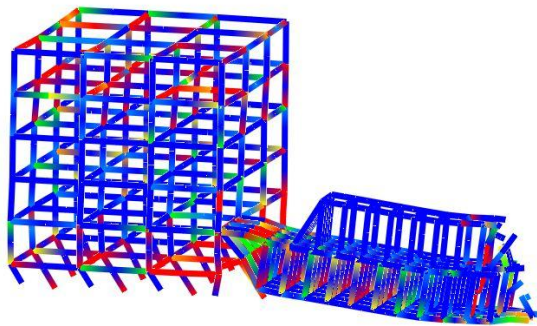
衰を考慮したNewmarkの $\beta$ 法( $\beta=4/9$ 、 $\delta=5/6$ )を用いた。

### 3. 解析結果

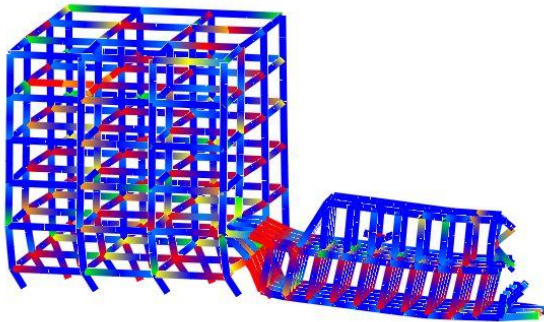
気仙沼波を建物に入力した際の最大振幅時の変形の様子を図4に示す。地震動により建物に多少の変形が生じたが、大きな損傷には至らなかった。この後に、浮力と流体力を作用させた際の挙動を浸水深 $4 \text{ m}$ の場合を図5(a)に、浸水深 $6 \text{ m}$ の場合を図5(b)に示す。図に示すように、いずれの場合も建物は倒壊しなかったが、浸水深 $6 \text{ m}$ の場合には建物の低層部に比較的大きな永久変形が生じた。衝撃的に流体力を加えた既報の解析結果[4]では、浸水深 $6 \text{ m}$ の場合に流体力のみで倒壊しており、結果に差異があることが分かった。次に、船を模擬した漂流物モデルに津波と同じ速度 $10 \text{ m/s}$ を与え、浮力および流体力(初期は $0$ )を作用させ、浸水深 $4 \text{ m}$ および $6 \text{ m}$ の場合に建物に衝突させた際の変形の様子を図6(a)、6(b)にそれぞれ示す。損傷度合いの差異はあるものの、この場合は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。建物に地震力・浮力・抗力から与えられる流体力を作用させた結果、いずれの場合でも建物は



(a) 浸水深 4 m



(b) 浸水深 6 m

図-6 漂流物衝突時の建物の変形の様子

倒壊しなかった。また、これに漂流物を衝突させると、いずれの場合でも建物が倒壊した。今後、引き続き津波の速度の影響などを調べる予定である。

#### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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，pp. 39-46，2004.
- [4] 董 元奇，磯部大吾郎：津波漂流物の衝突による建物の崩壊解析，第62回理論応用力学講演会論文集 CD-ROM, 2013.
- [5] Guidelines for Design of Structures for Vertical Evacuation from Tsunamis, FEMA P646, 2008.
- [6] 佐藤恵一，木村繁男，上野久儀，増山 豊：朝倉書店，流れ学，2004.