

津波漂流物の衝撃力が建物の被害に与える影響について

On effects of impact force applied by tsunami debris on damages of buildings

磯部大吾郎*, 董 元奇**

Daigoro Isobe, Yuan Qi Dong

*博(工), 筑波大学教授, システム情報系構造エネルギー工学域(〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

**修(工), 日中コンサルタント(株)(〒134-0086 東京都江戸川区臨海町 3-6-3)

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

キーワード: 津波漂流物, 衝撃力, 崩壊解析, ASI-Gauss 法

1. 緒言

東日本大震災では, 津波が船舶やコンテナなどを押し流し, それらが衝突することによる建物の被害も多かったと言われている¹⁾. そのため, 多くの自治体で設置が検討されている津波避難ビルには, 地震や津波のみならず, 漂流物の衝突にも耐えることが要求される. 本稿では, S 造建物に対し 3 軸方向への地震力, 流体による浮力および抗力, 津波による漂流物を衝突させる解析を連続的に行い, それぞれの外力が建物に及ぼす影響について調査した. 解析には ASI-Gauss 法²⁾に基づいた崩壊解析コードを用い, 漂流物が建物に衝突する前後の抗力と速度, 建物の層間変形角の推移などを調べた. 建物の浸水部における壁の有無, 津波の速度・浸水深, 漂流物の衝突方向などを変化させ, 特に漂流物が建物に衝突する際の衝撃力の影響を調査した.

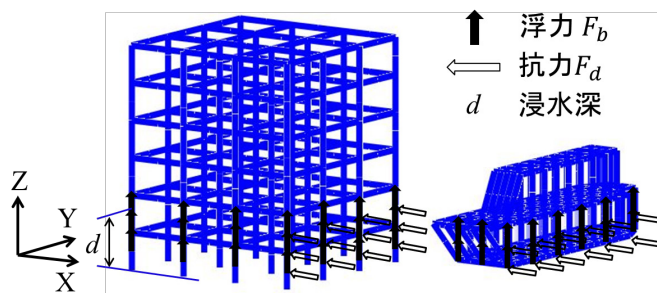


図-1 建物と漂流物に作用する浮力および抗力
(横向き衝突)

2. 解析モデルと解析条件

建物のモデルには, 図-1 に示すようなベースシア係数 0.3 として設計された 6 層 3 スパン (階高 3.6 m, 1

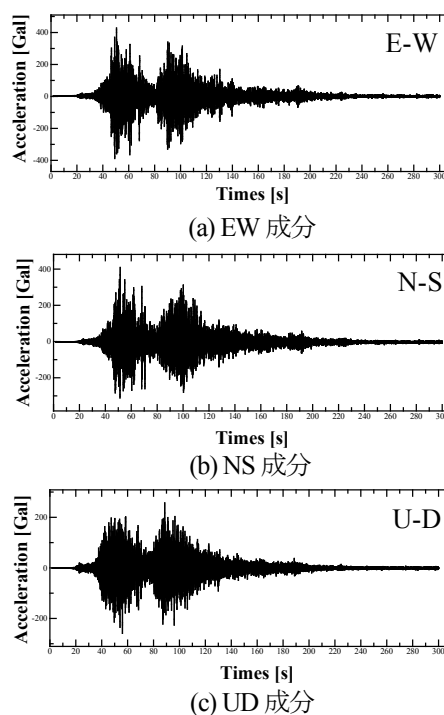


図-2 入力地震波 (気仙沼波 100%)

スパン 6 m) の S 造骨組構造を用いた. 床荷重は 400 kgf/m^2 とした. 初めに図-2 に示す気仙沼波を地震波として鋼構造モデルに時刻 $t=0 \text{ s}$ から $t=150 \text{ s}$ の間入力し, 続いて浮力を静的に, その後 $t=150 \text{ s}$ からの 1 秒間に抗力を動的に作用させた. 浮力には次式を用いた.

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

ここで, ρ_s : 瓦礫を含んだ海水の密度 $1,200 \text{ kg/m}^3$, g : 重力加速度, V : 物体が排した水の体積である. 建物の水面下体積は, 壁が全て健全に残っている状態を想定した場合は水面下の全体積とし, 壁が無い場合は水面下の柱およびはりの体積のみを V とした. 次に, 抗力には次

式を用いた.

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

ここで, A : 水面下の投影面積, C_d : 抗力係数, U : 津波と物体の相対速度である. 抗力係数に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³⁾. 建物の水面下投影面積は, 壁が全て健全に残っている状態を想定した場合は水面下全面の投影面積とし, 壁が無い状態を想定した場合は水面下柱側面のみの面積とした. 例えば津波の速度を 10 m/s, 浸水深を 6 m とすると, 建物の水面下の部分に作用する抗力は, 建物が静置されている状態で約 7.8 MN (壁が有る場合) と約 0.7 MN (壁が無い場合) と計算される.

漂流物モデルには, 重量 110 ton, 長さ 27 m, 幅 6 m, 高さ 8 m のアルミ合金製の船舶モデルを用いた. $t=151$ s に漂流物に初速度として 10 m/s を与え, 図-1 に示すように建物に横向きに衝突させた. 解析では $t=152.7$ s に漂流物が建物に衝突した. 船の喫水を 2 m とおくと, 漂流物の水面下側面に作用する抗力は, 初速度が与えられた状態では相対速度が 0 m/s のため 0 MN, 建物に衝突し絶対速度が 0 m/s となった状態では約 3.3 MN と計算される.

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

図-3 に示すように, 時刻 $t=150$ s まで気仙沼波を建物に入力し地震応答解析を行った結果, 多少の変形は生じたが大きな損傷には至らないことが分かった. 図中, 次を示す降伏関数の値によって要素ごとに色分けし表示している.

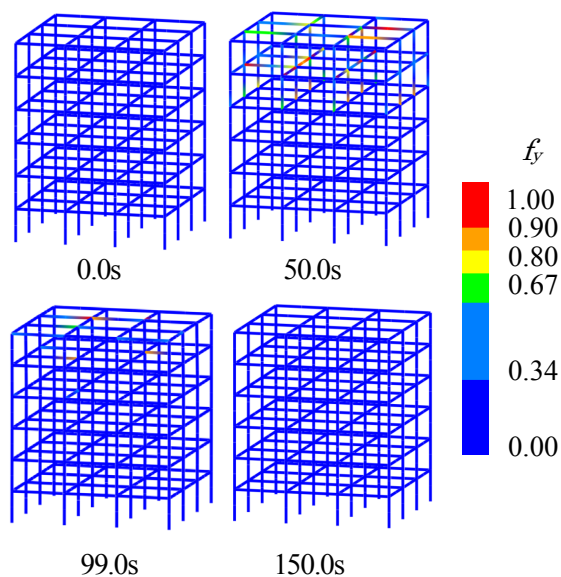
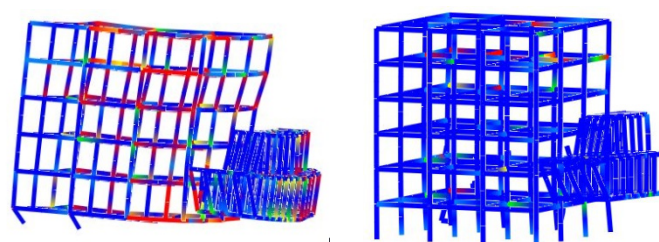
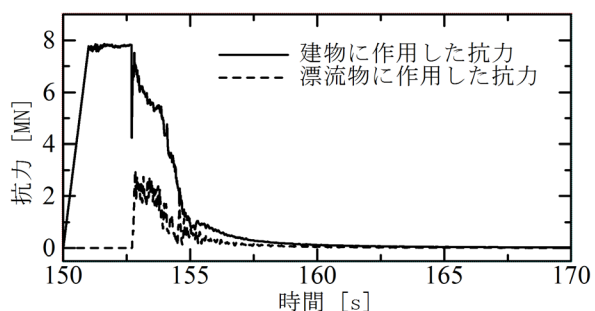


図-3 地震動下の建物の挙動

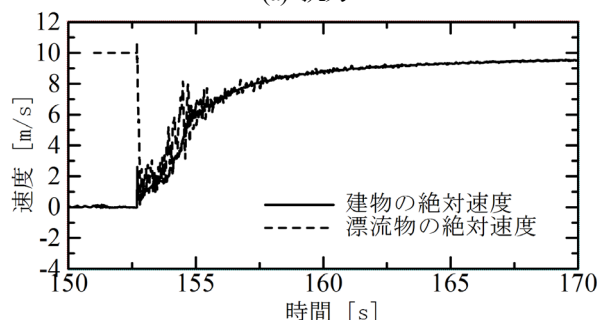


(a) 水面下に壁が有る場合 (b) 水面下に壁が無い場合

図-4 漂流物衝突後の建物の挙動

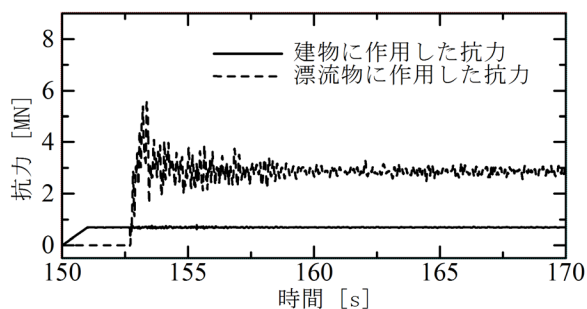


(a) 抗力

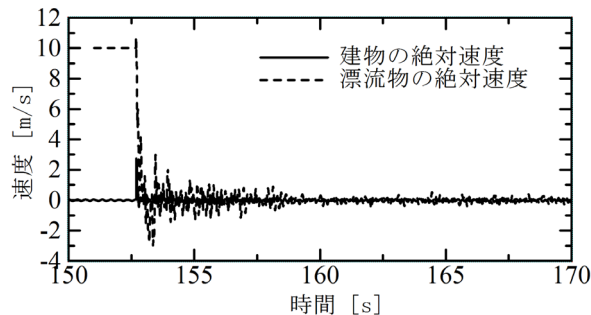


(b) 速度

図-5 建物と漂流物に作用する抗力および速度の推移 (水面下に壁が有る場合)

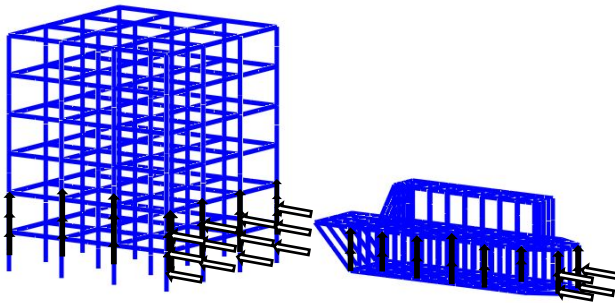


(a) 抗力

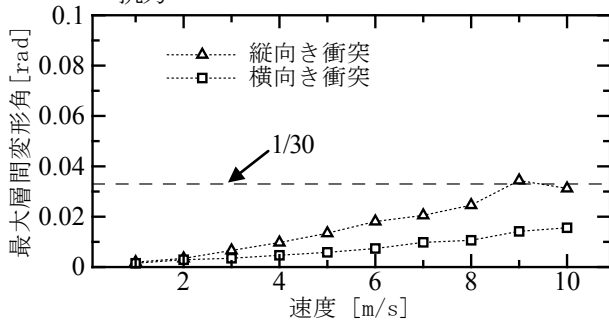


(b) 速度

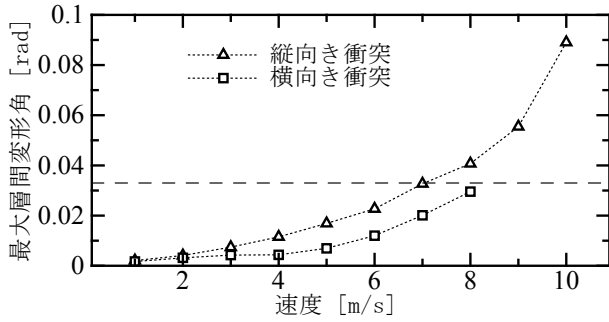
図-6 建物と漂流物に作用する抗力および速度の推移 (水面下に壁が無い場合)



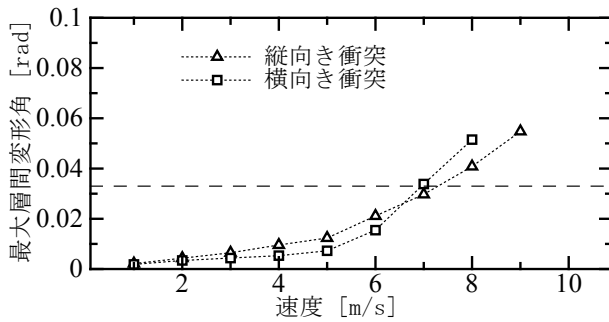
図ー7 縦向き衝突用のモデルと作用する浮力および抗力



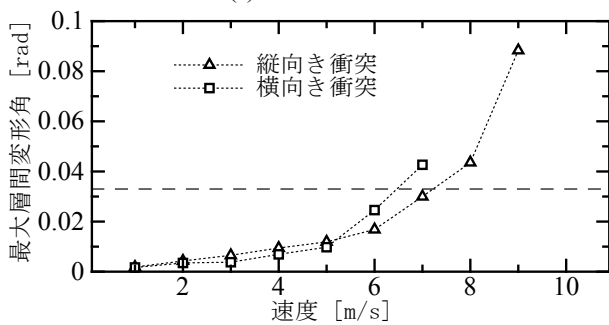
(a) 浸水深3mの場合



(b) 浸水深4mの場合

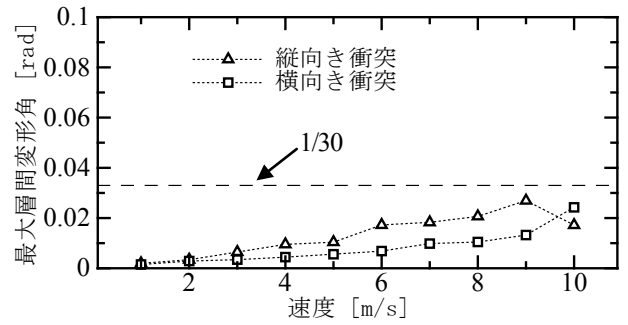


(c) 浸水深5mの場合

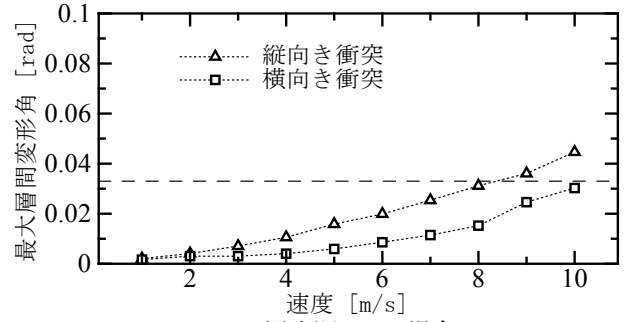


(d) 浸水深6mの場合

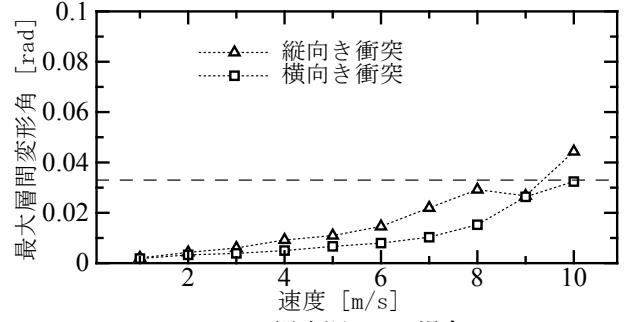
図ー8 流速と建物1階の最大層間変形角の関係
(水面下に壁が有る場合)



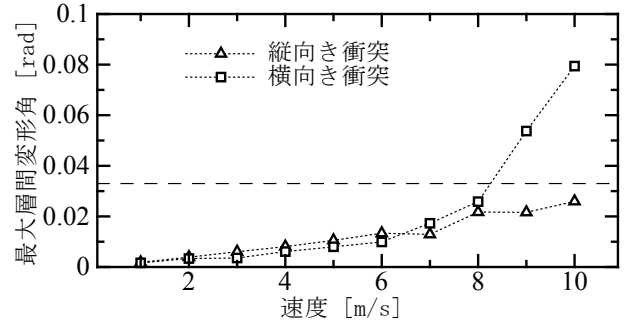
(a) 浸水深3mの場合



(b) 浸水深4mの場合



(c) 浸水深5mの場合



(d) 浸水深6mの場合

図ー9 流速と建物1階の最大層間変形角の関係
(水面下に壁が無い場合)

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

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。赤色は、要素が降伏していることを示す。

次に、建物と漂流物に浮力および抗力を作用させ、漂流物に初速度を与えて衝突させた際の様子(時刻 $t=154.8$

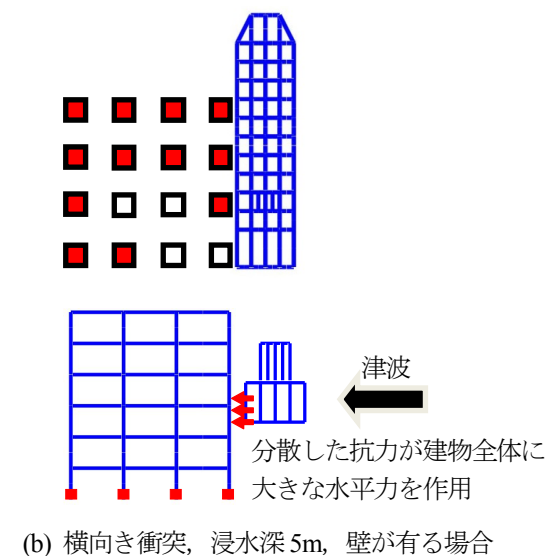
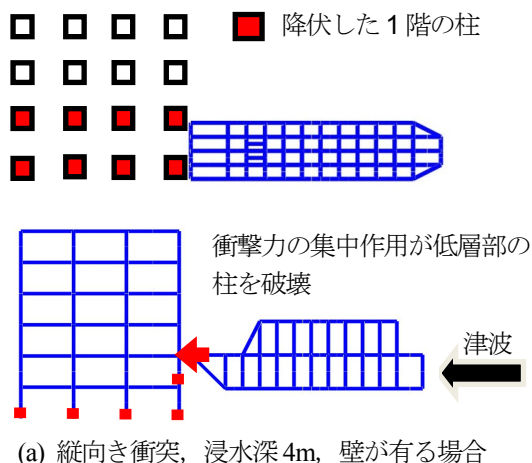


図-10 衝突方向と低層部の柱の損傷との関係

s) を図-4 に示す。図-4(a)は水面下に壁が有る場合の挙動，図-4(b)は壁が無い場合の挙動である。壁が有る場合には建物の低層部に大きな損傷が生じ，倒壊していることが分かる。これに対し，壁が無い場合には漂流物が衝突することによって多少の変形が生じているものの，倒壊には至っていないことが分かる。図-5 には壁が有る場合の建物と漂流物それぞれの抗力および速度の推移を，図-6 には壁が無い場合のそれらを示す。前節より，壁が有る場合には無い場合の 10 倍以上の抗力が建物に作用するが，図-5(a)に示すように漂流物が衝突する $t=152.7$ s までは建物に作用する抗力は一定であり，図-5(b)から速度も 0 m/s のままであることが分かる。つまり，抗力の作用のみでは建物は倒壊していない。しかし，漂流物が $t=152.7$ s に衝突した瞬間から建物が漂流物と同一速度で移動し，作用する抗力が減少している。すなわち，建物が倒壊し流されていることが分かる。一方，水面下に壁が無い場合には，図-6(a)に示すように建物に作用する抗力は非常に小さい。むしろ衝突後の漂流物に作用する抗力の方が大きく，ピーク時には定常時の 2 倍程度になることが分かる。漂流物に作用する抗力が図-5(a)の値より大きいのは，衝突した建物が移動をせず，

津波との相対速度が大きいまま維持されるためである。図-6(b)から分かるように，衝突後は建物と漂流物が一体化して速度 0 m/s を保っている。

次に，図-7 に示すような縦向き衝突用のモデルを作成し，横向き衝突の場合とともに，流速を変化させた場合の各浸水深における建物の最大層間変形角を調べた。水面下に壁が有る場合と無い場合について，それぞれ図-8 および図-9 に結果を示す。図中の水平な破線は，一般的に建物が大破と判断される層間変形角 ($1/30$) を示す。建物が倒壊した例については値をプロットしていない。図より，どの場合も流速が大きくなると最大層間変形角が大きくなることが確認できる。また，水面下の壁の有無に関わらず，浸水深小の場合は縦向き衝突の際に最大層間変形角が大きくなり，浸水深大の場合はある速度以上で横向き衝突の際に最大層間変形角が大きくなることが分かる。これは，図-10 の概念図に示すように，浸水深小では漂流物が低層部に衝突するため，その場合には集中的に衝撃力が加わる縦向き衝突の方が低層部の柱を損傷させる可能性が高く，浸水深大では漂流物が横向きに衝突し，抗力が広い範囲に作用する方が低層部の柱に損傷を与える可能性が高いからである。

4. 結言

本稿では，流体と物体の相対速度から求められる抗力を流体力として用い，建物の地震応答・流体力作用・漂流物衝突の連続解析を行い，特に漂流物の衝撃力が建物の被害に与える影響について調査を行った。壁が無い構造は抗力を逃すために津波に対し優位性が高いが，その場合にも漂流物の衝突力およびその後の抗力を受けるため，想定される漂流物の最大重量から衝突力のピーク値を見積もり，最大層間変形角が十分低くなるように設計する必要がある。また，浸水深が比較的小さい場合にも，漂流物の衝撃力により低層部の柱が損傷し，建物が倒壊する危険性があることが定量的に確認された。津波避難ビルを設置する際には，その周囲に漂流物の接近を防ぐ柵を設置するなどの方策も必要と思われる。

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) 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。
- 2) 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。
- 3) 佐藤恵一，木村繁男，上野久儀，増山 豊：朝倉書店，流れ学，2004。