

津波漂流物衝突時の衝撃外力評価に基づく RC 造建築物の応答特性

その2 実験結果に基づく衝撃外力評価と非線形時刻歴応答解析による建物応答評価

正会員 ○板倉 正英*¹ 同 崔 琥*³
同 松川 和人*³ 同 浅井 竜也*²
同 中埜 良昭*⁴

反発係数 力積 応答塑性率

1. はじめに

本報(その2)では、前報(その1)で報告した縮小衝突実験結果の考察を行い、実大スケールにおける衝撃外力評価及びそれを用いた非線形時刻歴応答解析による建物応答評価を行う。

2. 実験結果の考察

その1で示した実験結果(Case1~Case3)で示した各パラメータと反発係数の関係について考察を行う。文献[1]によると衝突試験体の圧縮応力度 σ_0 は密度 ρ 、伝播速度 C_0 及び衝突速度 v_s で決定される($\sigma_0 = \rho C_0 v_s$)。Case1においては衝突試験体の ρ 、 C_0 に加えて断面積 A が等しいため圧縮力($\sigma_0 A$)は v_s に比例する。一般には、 v_s の増加に伴う圧縮力の増加が衝突による被衝突面の損傷を増大させ、それに伴い損失エネルギー ΔE も増加する。しかしながらCase1では、(1)式(その1の(6)式を引用)で表される反発係数を支配する変数の内、 v_s の増加に伴い ΔE が増加した一方で、衝突物の運動エネルギー($\frac{1}{2} m_s v_s^2$)も増加したために反発係数に変化が見られなかったと考えられる。Case2及びCase3においては ρ 、 C_0 及び v_s が等しいため、 σ_0 が等しくなり、圧縮力は断面積に比例することとなる。そこで、両Caseにおける断面積(= $m/\rho L$)に相当する因子として単位長さあたりの質量(= m/L 、本研究では密度 ρ は一定と仮定)をパラメータとし、これと反発係数の関係を図1に示す。同図より、単位長さあたりの質量が増加すると反発係数は減少するが、これは衝突による被衝突面の損傷が大きくなり、それに伴い ΔE も大きくなったためと思われる。

$$e = \sqrt{1 - \frac{m_s + m_b}{m_b} \cdot \frac{\Delta E}{\frac{1}{2} m_s v_s^2}} \quad (1)$$

3. 実大スケールにおける反発係数及び力積の評価

3.1 実大スケールの反発係数及び力積の換算

ここまでで述べた反発係数 e 及び力積 I の実験値は、被衝

突物であるスタブを反力床に完全固定したため、被衝突物の質量を無限大($m_s/m_b \rightarrow 0$)とみなした時の結果であり、この結果を実大スケールの建築物(ここでは文献[2]の6階RC造津波避難ビルを想定し、質量を5356tとした)へ適用するためには e 及び I の換算が必要である。そこで $m_b = \infty$ として(1)式から e を求め、これを再度(1)式に代入することで、(2)式と(3)式に示す実大スケールの反発係数 e' と力積 I' が得られる。

$$e' = \sqrt{1 - \frac{m_s + m_b}{m_b} \cdot (1 - e^2)} \quad (2)$$

$$I' = \int F \cdot dt = (1 + e') \cdot \frac{m_s m_b}{m_s + m_b} \cdot v_s \quad (3)$$

3.2 実大スケールの反発係数及び力積の評価

(3)式より漂流船舶の衝突による力積は、反発係数 e' が決まれば評価できるが、応答解析(4章)を行うためには、さらに衝突時間 dt 及び衝突力波形形状の評価が必要となる。

そこでまず、実大スケールに換算した反発係数 e' を図2に示す。また、その1で示した実験結果より衝突時間は船長(材長)の影響で変化するため、衝突時間を船長別に分類した(図3)。同図より、船長別の衝突時間にはばらつきが見られるものの、船長が長くなれば衝突時間は増加する傾向が見られた。また、本研究で想定した基準船舶(船長40m)であれば平均値でみると衝突時間は57ms程度となる。ここで、基準船舶(排水量300t、船長40m)と対象建物(質量5356t)の衝突を想定する。(3)式の右辺より算出した力積 I' と、衝突力波形の形状を三角形と仮定し、最大衝突力と衝突時間の実験値を相似率に従い実大換算($m_b = \infty$)して算出した力積(= $I/2 F_{max} dt$)をさらに質量換算($m_b = 5356t$)した力積 I'' (式(4))とを比較したものを図4に示す。同図より、両者は概ね一致していることから、衝突力波形形状は三角形と仮定した。この時、最大衝突力 F_{max} は(5)式で表される。

$$I'' = \frac{1+e'}{1+e} \cdot \frac{m_b}{m_s + m_b} \cdot \frac{1}{2} F_{max} dt \quad (4)$$

$$F_{max} = 2(1 + e') \cdot \frac{m_s m_b}{m_s + m_b} \cdot v_s \cdot \frac{1}{dt} \quad (5)$$

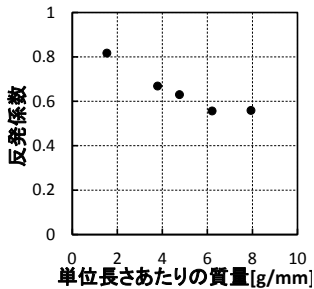


図1: 単位長さあたりの

質量と反発係数

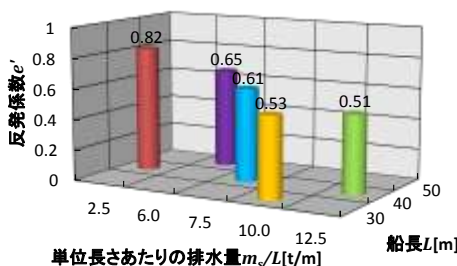


図2: 船舶の諸元と反発係数

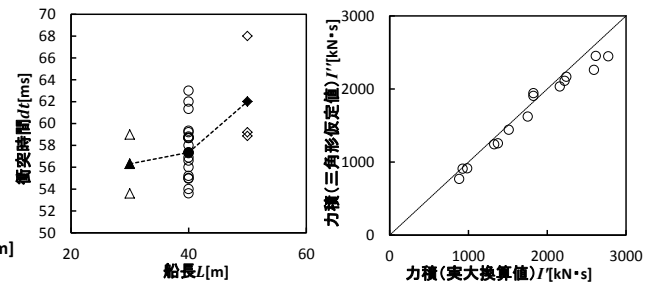


図3: 船長と衝突時間

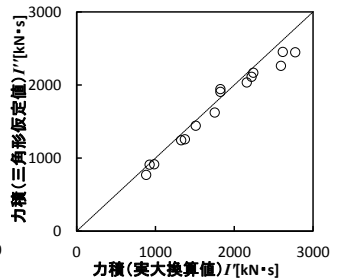


図4: 力積の比較

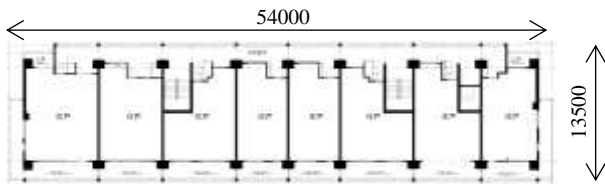
4. 非線形時刻歴応答解析による建物応答評価

4.1 解析対象建物のモデル化

解析対象建物は図5に示す階高2.85m、水深係数 $a=2.0$ 、想定浸水深 $h=10m$ で設計された6階建てRC造津波避難ビルである^[2]。本解析では、対象建物を6質点モデルに置換し、津波波力及び衝突力を外力として入力した。各層の骨格曲線は降伏変形角を $1/200rad$ で一定としたTri-Linear型を想定し、ひび割れ強度は降伏強度の $1/3$ 倍、ひび割れ変位は降伏変位の $1/10$ 倍とした。履歴特性はTakedaモデル(除荷時剛性低下指数は0.4)を用いた。減衰は瞬間剛性比例型とし、1次モードの減衰定数は0.02とした。数値積分はNewmark- β 法($\beta=1/6$)を用いて、積分時間刻みは2msとした。単位床面積重量 $12kN/m^2$ とし、ベースシア係数は1.34、弾性1次固有周期は0.22sである。

4.2 解析諸元

対象建物に作用する津波最大波力は浸水深 $h(=10m)$ に水深係数 $a(=2.0)$ を乗じた深さ ah の静水圧を考え、各階の床位置に上下階の階高の半分の波力が集中荷重として作用することとした。荷重は鉛直方向への浸水速度を $3.0cm/s$ とし^[3]、 $a=0$ から2まで増加させた。対象船舶は、基準船舶(排水量 $m_s=300t$ 、船長 $40m$)とし、最大浸水深到達時刻(333s)から60s後に4階質点部(5階床位置)に船舶が衝突するものとした。また、衝突力は図6に示す三角形パルス波とした。同図



(a)基準階平面図



(b)南立面図

図5：対象建物(単位：mm)

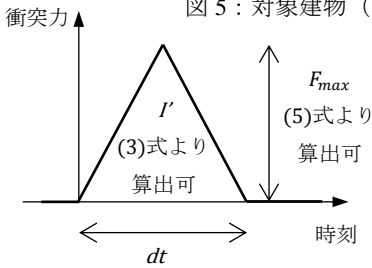


図6：入力パルス波

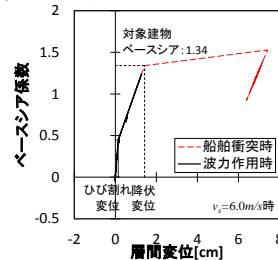


図7：ベースシア層間変位図

に示すとおり、力積 I' は(3)式より求め、反発係数 e' は図2より0.61($m_s/L=7.5t/m$ 、 $L=40m$)とした。

解析パラメータは衝突速度(1.0m/s, 3.0m/s, 6.0m/s)として建物の応答特性を比較検討した。衝突時間は60msとした。

4.3 解析結果

図7に排水量300tの船舶が衝突速度6.0m/sで衝突した時のベースシアと1階層間変位の関係を示す。同図より、津波波力のみが作用している段階では、降伏に至っていないものが、船舶の衝突を受けて降伏したことがわかる。また、図8は各階の最大層間変位を降伏変位(1.425cm)で除した最大応答塑性率について比較したものである。衝突速度1.0m/sであっても降伏に至る階(1階部)が生じることが分かる。これは図7より、波力のみ作用している段階においても1階は降伏変位近くまで変形するため、大型船舶が衝突すると低衝突速度であっても衝突力は大きく、降伏に至る恐れがあることを意味する。また衝突速度の増加に伴い、衝突力が大きくなるため、各階応答塑性率は大きくなる。さらに、船舶の衝突により、衝突階(4階部)のほか局所的に応答塑性率が大きくなる階(6階等)が生じる。

以上の結果より、波力に対する安全性を確保した対象津波避難ビルに300t船舶が衝突すると降伏に至る恐れがあり、津波避難ビルの設計の際には想定する漂流物の排水量や衝突速度によっては漂流物の衝突の影響を考慮する必要がある。

5. まとめ

本報では、前報(その1)の実験結果を踏まえた実大スケールにおける衝撃外力評価及び非線形時刻歴応答解析による建物応答評価を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 反発係数は衝突速度によらず一定となるが、質量と材長により変化し、単位長さあたりの質量をパラメータにとることにより反発係数の変動を評価できる。
- (2) 実大スケールで衝突力および力積の評価に必要な衝突力波形の形状と衝突時間及び反発係数は、船舶排水量と船長から評価が可能である。
- (3) 排水量300tの40m船舶が津波避難ビルに衝突すると、衝突速度が1.0m/sであっても降伏する恐れがある。

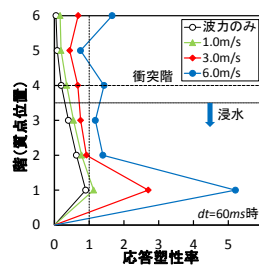


図8：最大応答塑性率

【参考文献】

- [1] 横山隆：衝撃工学の基礎と応用，共立出版，2014.05
- [2] 国土交通省国土技術政策総合研究所：津波避難ビル等の構造上の要件の解説，2012.2
- [3] 東京大学生産技術研究所：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

*1 三菱地所設計(元・東京大学大学院生)

*2 東京大学大学院工学系研究科 大学院生

*3 東京大学 生産技術研究所 助教・博士(工学)

*4 東京大学 生産技術研究所 教授・工博

Mitsubishi Jisho Sekkei Inc.(Former Graduate student, The Univ. of Tokyo)
Graduate Student, Graduate School of Engineering, The Univ. of Tokyo
Research Associate, Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo, Ph. D.
Professor, Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.