

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1 縮小試験体を用いた振り子衝突実験

鉄筋コンクリート建築物 津波漂流物 衝突実験

正会員 ○松川 和人\*<sup>3</sup> 同 板倉 正英\*<sup>1</sup>  
同 崔 琥\*<sup>3</sup> 同 浅井 竜也\*<sup>2</sup>  
同 中埜 良昭\*<sup>4</sup>

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震時に併発した津波により、数多くの建築物が被害を受けたが、その中には船舶等の漂流物の衝突によって大破した建築物も複数報告されている<sup>[1]</sup>。津波漂流物の衝突に関する研究<sup>[2]</sup>は発災以前より行われてきているが、建築物に及ぼす影響に関する研究は少ないのが現状であり、津波避難ビルの設計指針<sup>[3]</sup>においても漂流物の衝突に対する明確な要求性能、想定すべき外力等は示されていない。そこで本研究では、漂流船舶の衝突が鉄筋コンクリート造（以下、RC造）建築物に及ぼす影響を把握するため、実験的及び解析的検討により想定漂流船舶の衝撃外力の評価及びそれによる建物応答評価を行う。

2. 振り子を用いた縮小衝突実験

2.1 試験体及び加力計画

衝突実験を行う際に想定した衝突物は排水量（質量）300tの鋼製船舶で、概ね200総トンに相当し船長及び船首曲率半径はそれぞれ40m、2.5mとした<sup>[4]</sup>。衝突実験は1/40スケールで行い、主に最大衝突力、衝突時間、力積の特性及び反発係数を把握することを目的とする<sup>[2]</sup>。縮小の際、反発係数の速度依存の可能性を考慮して速度は縮小せず実スケール、即ち速度の目標相似率を1として各物理量の相似率を定めた（表1）。衝突試験体は船舶を一様棒と仮定し、丸鋼で製作した。質量4.8kg（≒300t×1/40<sup>3</sup>）、材長1000mm（=40m×1/40）の試験体を基本に、質量及び材長を変化させた計5体の衝突試験体を用いた。また衝突現象を再現するため、各試験体の船首衝突面には同一の曲率半径（60mm）をもたせた。被衝突試験体には反力床に完全固定した質量無限大（ $m_s/m_b \equiv 0$ ）とみなせる圧縮強度28.8MPaのコンクリートスタブで簡略化し、実建物を想定した質量の影響は別途考慮することとした（その2に後述）。加力は衝突試験体を吊した簡易振り子を用いて（図1）、目標衝突速度に応じて衝突試験体を所定の高さまで引き上げ衝突させた。また本来漂流物が衝突する際は、水の影響による付加質量を考慮すべきであるが、特に船首衝突の場合はその影響が小さいと考えられるため<sup>[2]</sup>、本実験では空中衝突とした。

2.2 力積及び反発係数の評価式の導出

(1)式に示すように外力が作用しない系においては衝突前後の運動量は一定に保たれる。一方、力学的エネルギーは衝突

による材料塑性化等のエネルギー損失を伴うため、衝突前後の釣り合い式は損失エネルギー $\Delta E$ を用いて(2)式で表される。さらに、衝突前後の相対速度の比から求まる反発係数 $e$ （(3)式）と、運動量変化が衝突時に与えられた力積 $I$ と等しい（(4)式）ことを利用し、さらに本研究対象である被衝突物（建築物）は衝突前の速度 $v_b$ がゼロであるとしてこれらを解くと、衝突物・被衝突物双方に作用する力積 $\int F \cdot dt$ 及び反発係数 $e$ はそれぞれ(5)式及び(6)式となる。

$$m_s v_s + m_b v_b = m_s v_s' + m_b v_b' \tag{1}$$

$$\frac{1}{2} m_s v_s^2 + \frac{1}{2} m_b v_b^2 = \frac{1}{2} m_s v_s'^2 + \frac{1}{2} m_b v_b'^2 + \Delta E \tag{2}$$

$$e = -\frac{v_s' - v_b'}{v_s - v_b} \tag{3}$$

$$I = \int F \cdot dt = m_s v_s - m_s v_s' \tag{4}$$

$$\int F \cdot dt = (1 + e) \cdot \frac{m_s m_b}{m_s + m_b} \cdot v_s \tag{5}$$

$$e = \sqrt{1 - \frac{m_s + m_b}{m_b} \cdot \frac{\Delta E}{\frac{1}{2} m_s v_s^2}} \tag{6}$$

ここで $m_s$ 及び $m_b$ は衝突物及び被衝突物の質量[t]、 $v_s$ 及び $v_s'$ は衝突物の衝突前後の速度[m/s]、 $v_b$ 及び $v_b'$ は被衝突物の衝突前後の速度[m/s]、 $F$ は衝突力[kN]、 $dt$ は衝突時間[s]である。

表1：各物理量の相似率

速度	1	与条件としての相似率
長さ	1/40	
変位	1/40	
時間	1/40	与条件から定まる
加速度	40	
質量	1/40 <sup>3</sup>	相似率
力	1/40 <sup>2</sup>	

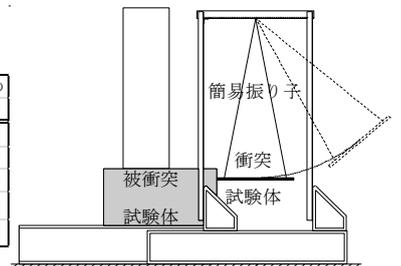


図1：衝突実験概要図

2.3 計測計画

写真1に示すようにハイスピードカメラを設置し、10000コマ/sの撮影間隔で衝突直前・直後の様子を撮影した。この時、衝突試験体に追尾マークをつけておくことで（写真2）、画像解析により衝突試験体の変位時刻歴波形を得ることができる。ただし、この波形は画像解像度に起因する追尾誤差による高周波成分を含んだ波形であるため、1000Hzのローパスフィルタで平滑化した。また、変位から速度及び加速度を算出し、加速度に衝突試験体質量を乗じた値を換算衝突力とした。ここで、最大衝突力は衝突力波形のピーク値、そのピーク値以前及び以後で初めて0kNとなった時刻を衝突開始時刻及び衝突終了時刻との区間を衝突時間と定義した（図2の左）。さらに、衝突開始及び終了時刻における速度を衝突直前及び直後の速度と定義

し、反発係数を算出した (図 2 の右)。実験パラメータは表 2 に示すとおり、衝突速度のほか、衝突試験体の質量 (実大で 100t, 300t, 500t) 及び材長 (実大で 30m, 40m, 50m) とし、それぞれ 3 回ずつ実験を実施した。

表 2: 実験パラメータ

	衝突速度[m/s]	質量[g]	材長[mm]	径[mm]
Case1	1	4762	1000	28
	2			
	3			
	4			
	5			
	6			
Case2	3	1542	1000	16
		4762		28
		7940		36
Case3	3	4662	750	32
		4762	1000	28
		4740	1250	25

## 2.4 実験結果

各計測ケースにおける衝突力時刻歴波形及び各ケースのパラメータと反発係数の関係を図 4～図 6 にそれぞれ示す。

図 3(a), 図 4(a)及び図 5(a)より、衝突速度 (Case1) 及び質量 (Case2) が増加すると最大衝突力は増加するが、材長 (Case3) が増加すると最大衝突力は減少することが分かった。一方、衝突速度と質量が増加しても衝突時間はほぼ一定となるのに対し、材長が増加すると衝突時間も増加する傾向が見られた。衝突時間は材長及び衝突により発生した材中を伝播する応力波の速度に依存<sup>[5]</sup>し、本実験で用いた衝突試験体の材料定数 (密度  $\rho$  及びヤング係数  $E$ ) は実験パラメータによらず一定であるため、伝播速度 ( $C_0 = \sqrt{E/\rho}$ ) は等しく、衝突時間の変化は材長の変化のみによるものと考えられ、本実験結果は文献[5]と同様の傾向を示した。

図 3(b), 図 4(b)及び図 5(b)より、反発係数は衝突速度 1.0m/s の場合を除いて 0.6 とほぼ一定となるが、質量及び材長が増加すると反発係数はそれぞれ減少及び増加することが分かった。ここで、Case1 における衝突速度 1.0 m/s 時の反発係数が他より大きい値を示したのは、このケースについてのみ試衝突を含め衝突位置を逐一変化させず同位置で衝突させたために、コンクリート面が圧密されたためである。これについては別途検証を行い、同位置に衝突させると反発係数が増加することを確認した (図 5(b))。

## 3. まとめ

本報では縮小衝突実験の概要及び実験結果について述べた。実験結果の考察については続編 (その 2) で報告する。

### 【参考文献】

- [1]独立行政法人港湾空港技術研究所: 2011 年東日本大震災による港湾・海岸・空港の地震・津波被害に関する調査速報, 2011.4 [2]水谷法美, 宇佐美敦浩, 中村友昭, 白石和睦: 津波による小型船舶の漂流特性とその衝突力に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第 23 巻, 2007.7 [3]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 [4]庄司邦昭, 高林時子: 橋脚衝突時の船首強度計算式に対する船体諸寸法の影響, 日本航海学会, 1999.5 [5]横山隆: 衝撃工学の基礎と応用, 共立出版, 2014.05

\*<sup>1</sup> 三菱地所設計(元・東京大学大学院生)  
 \*<sup>2</sup> 東京大学大学院工学系研究科 大学院生  
 \*<sup>3</sup> 東京大学 生産技術研究所 助教・博士(工学)  
 \*<sup>4</sup> 東京大学 生産技術研究所 教授・工博



写真 1: 撮影の様子



写真 2: 追尾マーク

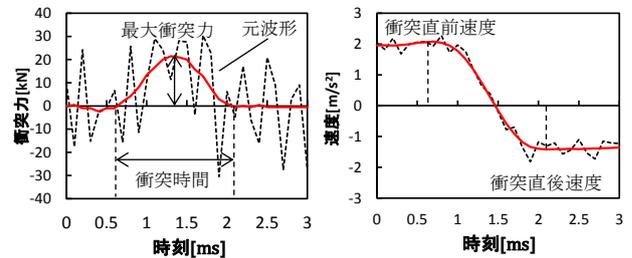


図 2: 各計測値の定義

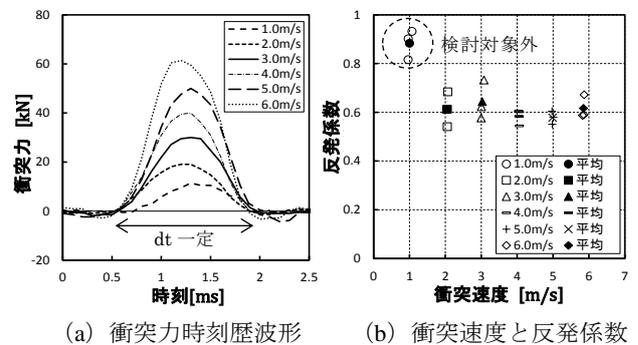


図 3: 実験結果 (Case1)

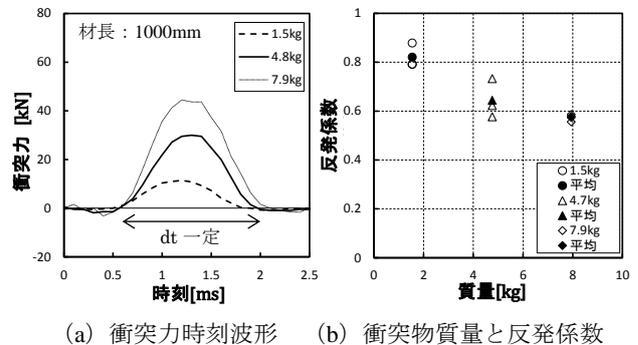


図 4: 実験結果 (Case2)

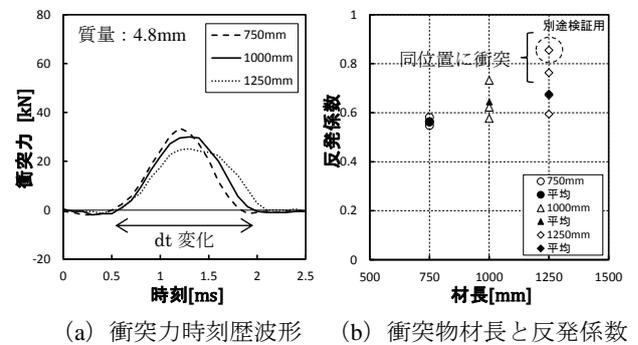


図 5: 実験結果 (Case3)

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.