津波漂流物の衝突力に及ぼす剛性の影響

大成建設（株）技術センター　社会基盤技術研究部　正会員　○織田　幸伸
大成建設（株）技術センター　社会基盤技術研究部　正会員　橋本　敦史
大成建設（株）技術センター　社会基盤技術研究部　正会員　橋本　貴之

１．目的

津波漂流物の衝突力については，流木やコンテナを対象に既にいくつかの研究が報告されており，剛性あるいは衝突時間の評価が重要であることが指摘されている．本研究では，防潮堤等に大きな被害を与える可能性のある鋼製の漂流船舶を主な対象とする．この場合，船体の一部が降伏に達すれば衝突力は低減すると考えられる．そこで，複数の船舶模型を対象に気中衝突試験を実施し，最大衝突力を発生するまでは線形剛性を保持するという安全側の仮定に基づき，線形理論により剛性と衝突力の関係について検討した．また防潮堤のような，複数の固有モードで変形するため剛性評価が難しい，板状構造物への衝突力評価手法についても検討した．

２．試験方法

図-1 に，試験方法の概要を示す．漂流物模型はアクリル製の船舶模型とし，船長 100～260mm，重量 30～500g の 6 種類の模型を用いた（**表-1**）．一定の高さから振り子状に漂流物を衝突させることで，ロードセルによる衝突力および堤体模型に生じるひずみ分布を計測した．衝突高さ h は，5～25cm の間で 2.5cm おきに変化させた．堤体模型は，幅 4cm，高さ 60cm，厚さ 0.8cm の短冊状のアルミ板とし，下端を剛に固定した．試験に先立ち，漂流物模型およびロードセルの軸剛性 k_d, k_s を載荷試験により計測した．結果を**図-2**，**表-1** に示す．**図-2** では，船舶模型の変位が小さい間は線形剛性を適用できるが，変位の途中から傾きが小さくなっている．これは，部材圧縮に加えて模型の形状変形の影響が大きくなるためと考えられる．ここでは初期の傾きを採用し，また質量が船体中央に位置すると仮定して船長の半分を対象とすることで，傾きの 2 倍として剛性を求めた．

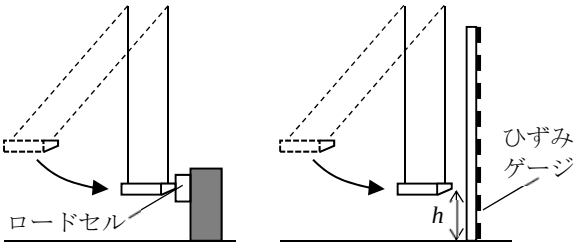


図-1 試験方法

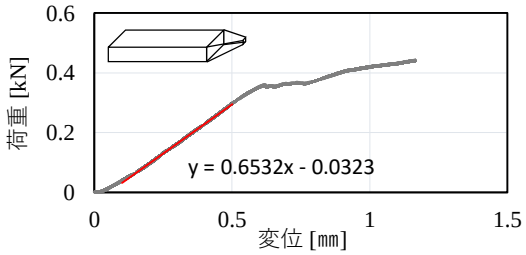


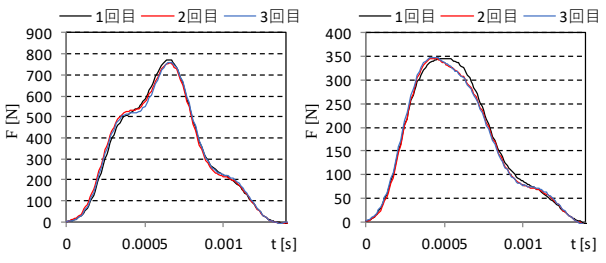
図-2 載荷試験結果(TypeA)

表-1 模型諸元

Type	A	C	D	E	F	G	LC
船長 [mm]	175	209	100	260	117	263	-
船幅 [mm]	60	50	34	40	40	90	-
M [g]	154	155	31	150	44	503	-
k_d, k_s [$\times 10^6$ N/m]	1.3	1.3	0.7	1.6	3.0	5.7	6.4

３．ロードセルによる衝突力計測

ロードセルによる衝突力 F の時系列計測結果を**図-3** に示す．衝突速度 V_0 は高速度カメラの画像より求めた．衝突速度が 1.0 m/s の時は正弦波形状に荷重が増加しており，これは線形理論に一致する．一方，衝突速度 1.9 m/s の場合，二山状に F が増加している．これは，上述の剛性の非線形性の影響が表れているためと考えられる．**図-4** に，衝突速度と最大衝突力の関係を示す．これによると，衝突力は衝突速度にほぼ比例することが分かる．一方，衝突開始から最大衝突力発生までの時間を衝突時間 Δt とし，衝突速度との関係を**図-5** に示すが，衝突時間は衝突速度に因らずほぼ一



(a) V_0=1.9m/s　　(b) V_0=1.0m/s

図-3 衝突力計測結果（TypeA）

キーワード　津波，漂流物，衝突力，ひずみエネルギー，防潮堤
連絡先　〒245-0051　横浜市戸塚区名瀬町 344-1　大成建設（株）技術センター　ＴＥＬ080-9579-4361

© Japan Society of Civil Engineers

定になっている．線形剛性を仮定した場合，衝突力と衝突時間には ASCE[1]の式，

$$F = aV_0\sqrt{kM}\,,\quad \Delta t = \pi\sqrt{M/4k},$$
$$1/k = 1/k_s + 1/k_d$$

が適用出来るが，**図-4, 5** の関係は，これに整合する．なおここで，a は構造物の重要度や衝突角度の不確実性を表す係数であり，ここでは 1 とする．**図-6, 7** は，上式の関係と試験結果を比較したものである．**図-7** の TypeG の結果を除き，試験結果は上式に良く一致している．TypeG は，衝突力時系列の二山形状が顕著であり，そのため Δt の線形理論からのずれが大きいと考えられる．ただし，**図-6** では線形理論からのずれは小さく，衝突力の評価においては，剛性の非線形性の影響は小さいことが推察される．

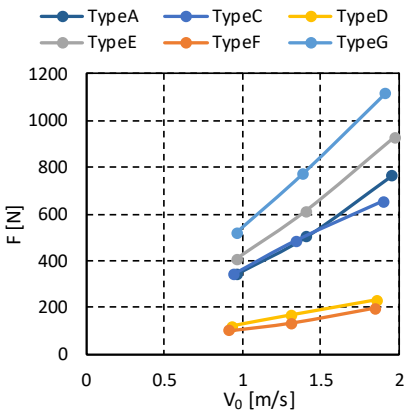


図-4 衝突速度と衝突力の関係

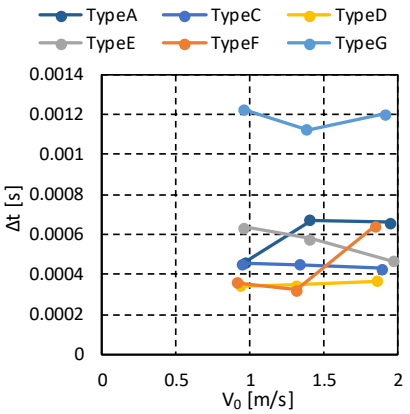


図-5 衝突速度と衝突時間の関係

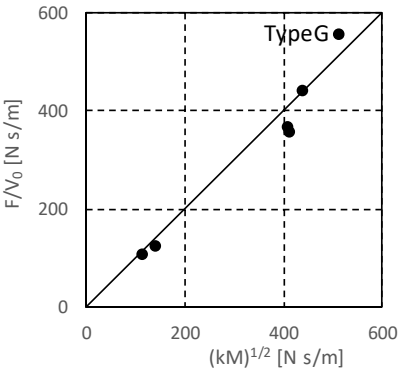


図-6 kM と F/V_0 の関係

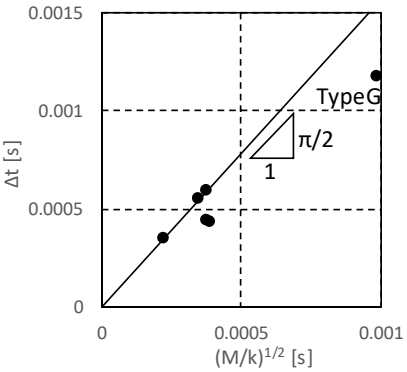


図-7 M/k と衝突時間の関係

4．ひずみ分布計測

図-8 に，ひずみ計測とそこから算出したひずみエネルギーの時系列を示す．$\varepsilon 1$～$\varepsilon 10$ は，下端から 5cm 間隔に貼付したひずみゲージの値を示す．なお，**図-8** の衝突位置は $\varepsilon 4$ である．衝突後，複数のモードで自由振動するため，ひずみは複雑に変動し，また，ひずみエネルギーについても，運動エネルギーとのエネルギー交換により一定にはならないため，堤体模型側の剛性を定義出来ない．そこで，ひずみエネルギー最大（図中の赤破線）となるまでの時間を衝突時間 Δt とし，線形理論からこれに相当する k_s を求め，堤体模型の見掛けの剛性とした．なお Δt は，衝突高さや衝突速度によらず一定であることを確認している．求めた見掛けの剛性 k_s を，**図-9** に示す．漂流物質量により堤体の変形特性が異なるため，k_s は漂流物質量に依存している．また，堤体模型において衝突力を定義することは出来ないが，この k_s を用いることで，衝突エネルギーを間接的に評価した相当衝突力を定義することが可能となる．

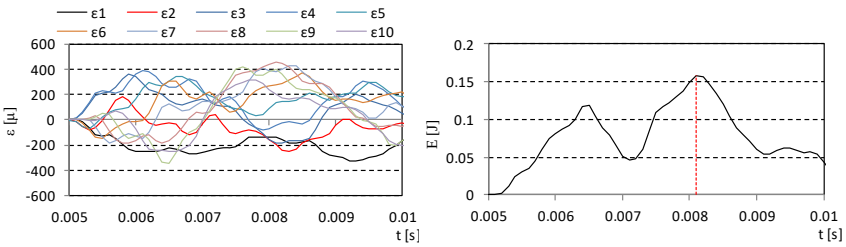


図-8 ひずみとひずみエネルギーの時系列
（TypeA，衝突高さ 15.0cm，V_0=1.7m/s）

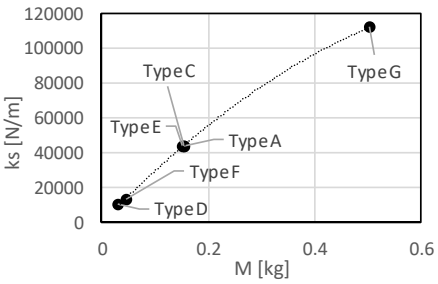


図-9 Δt から求めた見掛けの剛性

5．まとめ

気中衝突試験の結果から，漂流物及び被衝突物の剛性と，衝突力や衝突時間の関係を線形理論で評価出来ることを示した．また壁状構造物に対し，直接計測出来ない衝突力を，見掛けの剛性を用いることで評価する手法を提案した．なお本研究は，原子力規制庁の令和 2 年度原子力施設等防災対策等委託費により実施したものである．ここに記して，関係各位に謝意を表す．

参考文献

1) ASCE: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures, ASCE/SEI Std 7-16, 2016.

© Japan Society of Civil Engineers