

論文 津波漂流物の衝突に対する鉄筋コンクリート壁のエネルギー吸収

宮川 義範*1・甲斐田 秀樹*2

要旨：鉄筋コンクリート壁に、自動車や小型船舶として想定される範囲の質量、剛性を有する漂流物を 5～10m/s の速度で衝突させる解析を通して、波圧に対して強度で耐え、漂流物の衝突に対してはエネルギー吸収能力に期待するという考え方の有効性を示した。漂流物が有する運動エネルギーは、衝突後、多くが跳ね返った自体の運動エネルギーもしくは履歴エネルギーに転じ、壁の履歴エネルギーとして吸収される成分は少ないこと、終局に至るまでの衝突回数を評価する時、漂流物の強度や除荷剛性が有意であることが分かった。

キーワード：津波、防潮壁、漂流物、衝突

1. はじめに

2011 年の東北地方太平洋沖地震 (Mw=9.0) による津波被害を受け、各地の原子力発電所で防潮壁が構築された。津波来襲時に防潮壁が受ける主たる作用は波圧であり、これに対しては実用的な設計式が提案・活用されている。一方、津波によるもう一つの荷重発生要因として、丸太、車両、コンテナ、船舶などの漂流物の衝突が挙げられる。漂流物による衝突荷重の式もまた複数提案されているものの^{1)~3)}、影響因子が多岐に渡り、設計・性能照査で適用するための統一的な見解を得るには至っていないのが現状である。この背景から、防潮壁等に作用する漂流物の衝突荷重と応答に関する一連の研究が実施され^{4)~7)}、以下の点が明らかになった。

- ・丸太の衝突荷重は、衝突ばねや物性値の適切な設定により、良好に推定できる^{1)・2)・3)・6)}。自動車については、衝突速度に応じた軸剛性を推定式³⁾に適用することで、衝突荷重をより良く推定できる⁴⁾。
- ・防潮壁のように、被衝突体が波の進行方向と直交する方向に広がっている場合、反射波による衝突速度の低下が著しい。その効果は、壁幅の水路幅に対する比が 0.25 程度であっても発現する^{6)・7)}。

・鉄筋コンクリート壁に漂流物が衝突する程度の低速の衝突現象は、梁やソリッド要素で被衝突体をモデル化し、 1×10^{-4} 秒程度の時間刻みを設定すれば十分追跡できる⁷⁾。ただし、衝突作用を荷重として評価して耐力設計を行う考え方は、過剰に安全側の仕様を要求する可能性がある。設計の合理化を指向するとき、(i)上記の壁前面の流況による衝突速度の減少や衝突姿勢の変化、および(ii)壁側のエネルギー吸収能力を考慮することが重要と考える。本論文では、特に(ii)に着目し、波圧については壁の強度に、衝突に対してはエネルギー吸収能力に期待するという考え方の成立性を検討する。

具体的には、高さ 10m、幅 10m、厚さ 2m の壁を対象とした 2 シリーズの解析を行う。まず、2 章で衝突ばねに関する情報を整理した後、3 章で波圧を無視した状態で漂流物を衝突させる線形の三次元動的解析を行い、問題を二次元化する際の有効幅について検討するとともに、壁の損傷に対する典型的な漂流物の寄与の程度を把握する。続く 4 章では、二次元非線形梁モデルによって、津波波圧にかろうじて耐えられるレベルの設計がなされた壁に漂流物を衝突させた時の挙動を調べる。

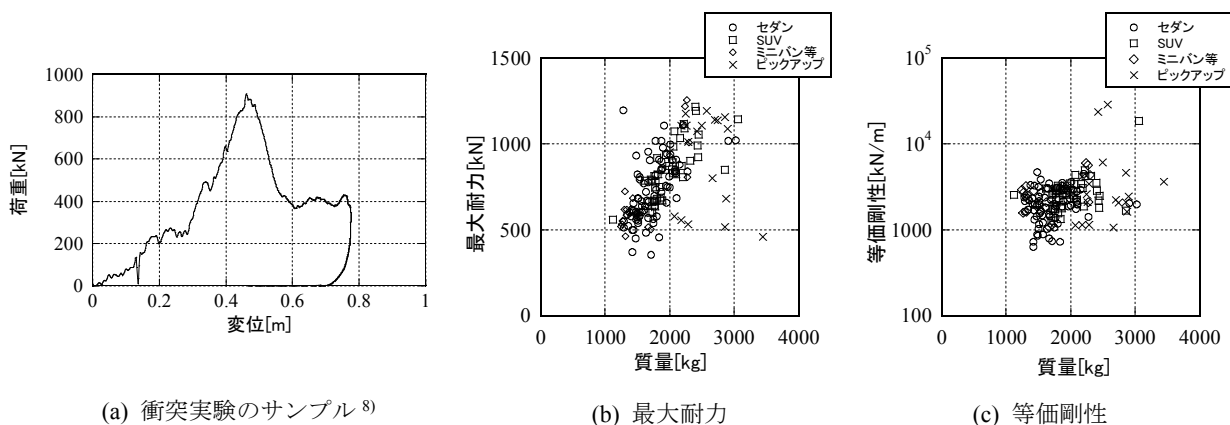


図-1 自動車の力学特性

*1 (一財) 電力中央研究所 自然外部事象研究チーム 工博 (正会員)

*2 (一財) 電力中央研究所 自然外部事象研究チーム 工修

2. 衝突ばねの特性に関する調査

衝突現象を解析するとき、衝突ばねの特性は重要な因子となるため、これに関する調査を行った。

まず、自動車の力学特性について、米国 National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) に集積・公開された 161 個の衝突実験データを荷重－変位関係の形に再整理した。その結果⁸⁾を図-1 に示す。(b)図のように、最大耐力 [kN] は質量[kg] に比例する傾向が認められた。4 つの車両タイプを含めた最大耐力／質量比の平均は 0.417、標準偏差は 0.089 であった。最大荷重点と同点に至るまでの履歴面積とから逆算した剛性についてもやや右上がりの傾向は認められるが (図-1(c))、縦軸を対数軸としていることから分かるように、ばらつきは大きい。ほとんどは $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^4 \text{ kN/m}$ の範囲にあり、一部に $1 \times 10^4 \text{ kN/m}$ を超えるサンプルが認められた。特に $2 \times 10^3 \text{ kN/m}$ 程度のサンプルが多かった。

船舶の力学特性については、文献⁹⁾を参照した。その中で、長沢らは、総トン数 500GT～4000GT 程度の船舶の船首変形量－荷重関係、および圧壊強度としてそれぞれ式(1)、式(2)を示している。

$$P = P_{cr} / \delta_F \cdot w \quad (1)$$

$$P_{cr} = 0.8\eta^{1/3} (6\eta^{1/6} + 3)^3 \cdot g \quad (2)$$

ここで、 P は荷重、 P_{cr} は圧壊強度、 w は船首変形量、 g は重力加速度である。 δ_F は船首の傾斜量で、 D を船の深さ、 θ を傾斜角として $D \tan \theta$ である。 η は総トン数 W に対して $\eta = W/500$ と定義されている。船首傾斜部分のパネルが座屈していく過程が式(1)の勾配を形成すると考えられており、船首が垂直の場合、 δ_F はゼロ、すなわち剛塑性になる。文献中では船首傾斜角として 15° 、 $D = 4.5\eta^{1/3} [\text{m}]$ という仮定が設けられており、500GT～4000GT に対して、剛性 (式(1)の P_{cr} / δ_F) は、 $4.74 \times 10^3 \sim 9.85 \times 10^3 \text{ kN/m}$ となる。この値の範囲は、先程整理した自動車のそれと大差が無い。また、式(2)による圧壊強度の評価値は $5.72 \times 10^3 \sim 2.38 \times 10^4 \text{ kN}$ となる。

3. 三次元弾性解析による予備検討

3.1 解析モデル

図-2 のような厚さ (X 方向) 2m、幅 (Y 方向) 10m、高さ (Z 方向) 10m の直立壁を対象とし、ばねで壁と結ばれた質点に初速度を与えて衝突させる三次元動的解析を行う。幅方向の寸法は、施工目地等で縁切りされた 1 ブロック分を想定した設定である。本章の検討では波圧を考慮しない。壁の材料としてはコンクリートを想定し、密度 2.35 t/m^3 、ヤング係数 $2.5 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 0.17 の弾性体とする。弾性論から導かれる高さ 9.5m の点への集中水平荷重に対する初期剛性は $5.83 \times 10^5 \text{ kN/m}$

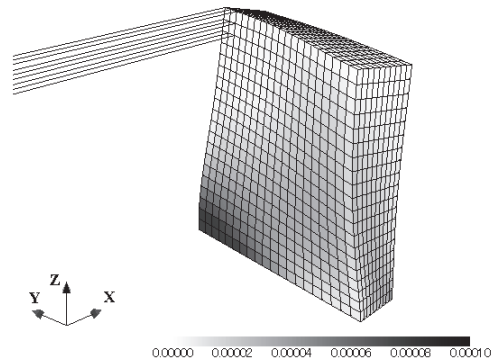


図-2 解析モデルと変形モードの例
(No.16, 衝突開始から 0.018 秒, 主引張りずみ)

であり、漂流物のそれよりもかなり大きい。壁は一次のソリッド要素で分割し、質量モデルは集中質量型とした。節点数は 4851、要素数は 4000 である。衝突ばねは圧縮に抵抗し、引張に抵抗しないようにした。解析プログラムとして E-FrontISTR (仮称) を用いた。ただし、引張に抵抗しないばねは実装されていないため、独自に変更を加えた。壁の固有値解析で得られた固有振動数 10.5Hz (面外曲げ 1 次)、70.6Hz (同 2 次) を参照して壁に 3% のレーリー減衰を設定した。減衰定数については、既往の実験結果⁷⁾を参照しつつ、やや小さめの値としている。漂流物を表す質点と衝突ばねに係る減衰定数はゼロとした。時間刻みは 1×10^{-4} 秒とし、ケースに応じて 3000～10000 ステップ、0.3～1 秒間の解析を行った。

3.2 解析ケース

壁の条件は固定して、以下に記すパラメータ設定による 39 ケースを設けた (表-1)。

- ・衝突体質量 m と衝突範囲 : (A) 2t, 1m×1m, (B) 2t, 10m の線上, (C) 100t, 5m×5m の 3 通りとした。(A) が自動車, (C) が小型船舶を想定している。(B) は, (A) と対比するために二次元に近い設定とした。軸が壁面に平行となる姿勢での丸太の衝突を想定したケースでもある。
- ・衝突ばね剛性 k : 先の調査結果に基づき, 1×10^3 , 1×10^4 , $1 \times 10^5 \text{ kN/m}$ の 3 通りとした。
- ・衝突位置 : 上記(A)～(C)に応じて図-3 に示す組合せとした。

なお、衝突速度 v は 5m/s としたが、線形弾性モデルであるため、荷重や壁の応答変形は、速度に比例する。

3.3 解析結果－基部反力の応答および有効幅－

線形ばねを介した質点と剛壁の衝突荷重は次式で表される。

$$F_i = v\sqrt{mk} \quad (3)$$

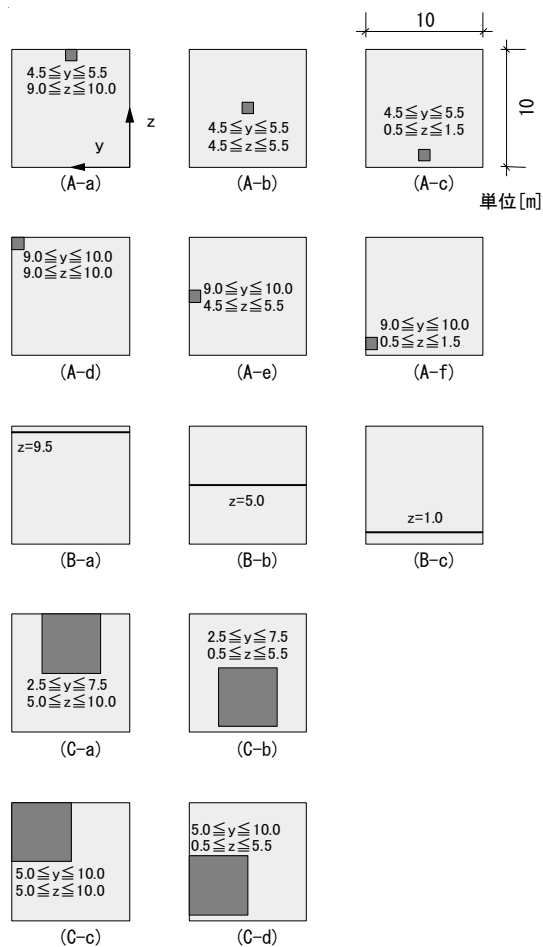
ここで、 v は衝突速度、 m は質量、 k はばね定数である。解析で得られた衝突ばねの発生応力 (複数のばねが並列

表－1 三次元線形解析のケース設定

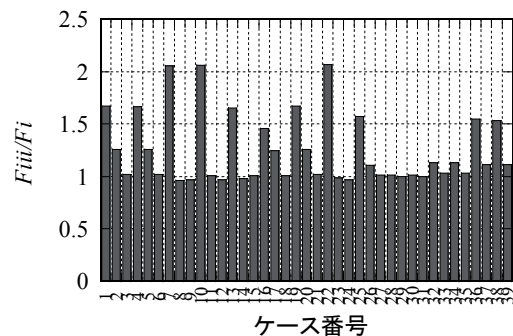
No.	質量m[t]	ばね剛性k (kN/m)	衝突位置	衝突面積
1	2	1000	A-a	1m×1m
2	2	1000	A-b	1m×1m
3	2	1000	A-c	1m×1m
4	2	1000	A-d	1m×1m
5	2	1000	A-e	1m×1m
6	2	1000	A-f	1m×1m
7	2	10000	A-a	1m×1m
8	2	10000	A-b	1m×1m
9	2	10000	A-c	1m×1m
10	2	10000	A-d	1m×1m
11	2	10000	A-e	1m×1m
12	2	10000	A-f	1m×1m
13	2	100000	A-a	1m×1m
14	2	100000	A-b	1m×1m
15	2	100000	A-c	1m×1m
16	2	100000	A-d	1m×1m
17	2	100000	A-e	1m×1m
18	2	100000	A-f	1m×1m

No.	質量m[t]	ばね剛性k (kN/m)	衝突位置	衝突面積
19	2	1000	B-a	10m
20	2	1000	B-b	10m
21	2	1000	B-c	10m
22	2	10000	B-a	10m
23	2	10000	B-b	10m
24	2	10000	B-c	10m
25	2	100000	B-a	10m
26	2	100000	B-b	10m
27	2	100000	B-c	10m

No.	質量m[t]	ばね剛性k (kN/m)	衝突位置	衝突面積
28	100	1000	C-a	5m×5m
29	100	1000	C-b	5m×5m
30	100	1000	C-c	5m×5m
31	100	1000	C-d	5m×5m
32	100	10000	C-a	5m×5m
33	100	10000	C-b	5m×5m
34	100	10000	C-c	5m×5m
35	100	10000	C-d	5m×5m
36	100	100000	C-a	5m×5m
37	100	100000	C-b	5m×5m
38	100	100000	C-c	5m×5m
39	100	100000	C-d	5m×5m



図－3 衝突位置・範囲の設定

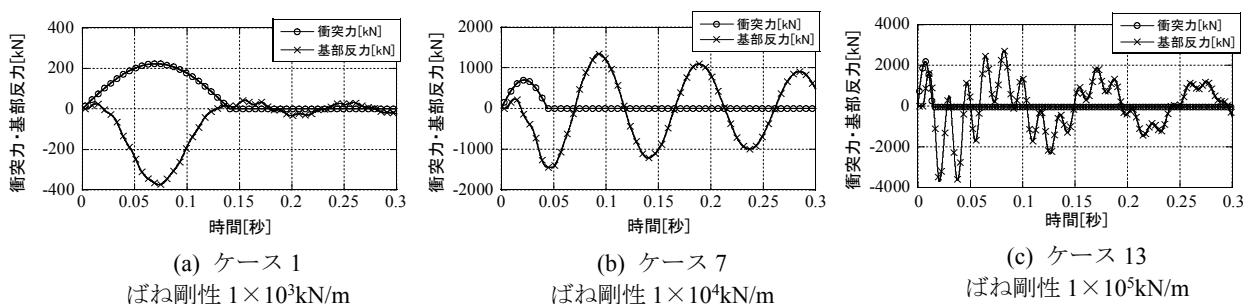


図－4 基部反力の理論衝突荷重に対する比

している場合はその合計) を F_{ii} と置いて、 F_i に対する比を整理すると、39 ケースの平均 0.991、標準偏差 0.020 となり、ほぼ理論に沿った値が得られた。

次に、壁下端面における反力の時間軸に沿った最大値 F_{iii} を整理した結果を図－4 に示す。全体を通して F_i に対する比が 1 を大きく下回るケースは無い。図－5 は、3 通りのばね剛性それぞれの例で、下流方向 (図－2 の X 方向) を正としている。基部反力が大きくなるのは、構造物の慣性力の影響と考えられる。衝突ばねの剛性をさらに 1, 2 桁大きくすると、衝突荷重より反力が小さくなる傾向が現れることを別途確認している。自動車や船舶と防潮壁との低速の衝突による荷重の発生時間は、基部まで伝達されなくなるほど瞬間的でないことが分かった。

No.19～27 では基部がほぼ様な曲げを受けるのに対し、No.1～18 は本来、衝突位置直下の曲げが卓越する三次元問題である。いま、基部曲げ引張縁の引張応力の最大値に着目し、No.1～18 における値と No.19～27 中で同じばね剛性と衝突高さを有するケースのそれとの比を



図－5 衝突ばねの剛性による基部反力時刻歴の違い

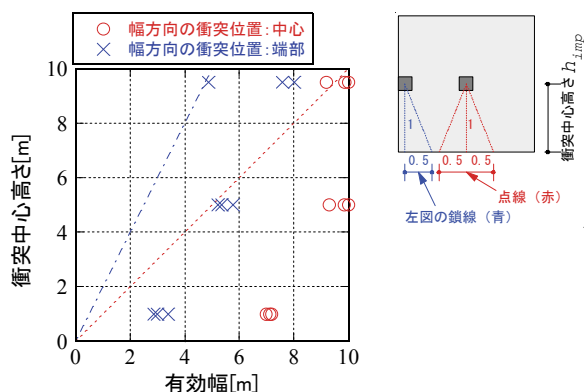


図-6 引張縁の応力から見た有効幅

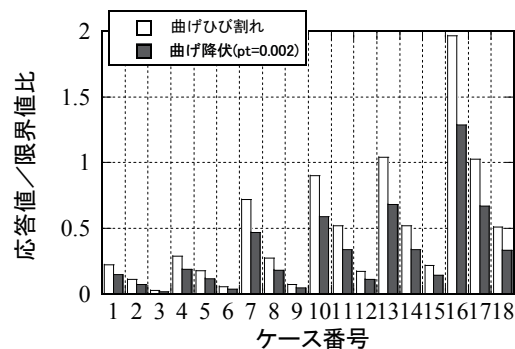
r_i (≥ 1) と置く。そして、壁の幅 10m を r_i で除した値を有効幅として図-6 に整理した。同図には、添え図に示す要領で、衝突中心から下ろした垂線から衝突中心高さの 1/2 の範囲を有効と仮定した場合を参照用に点線と鎖線で記入した。(片側当たりの) 有効幅と衝突中心高さとの比は、不利な条件でも 0.5 程度あることが分かった。部分的なひび割れや主筋の塑性化を許容するならば、応力の再分配が期待でき、より大きな有効幅を設定できると考えられるが、その効果を定量的に捉えるには三次元非線形解析が必要になるので今後の課題とする。

3.4 損傷の概略評価

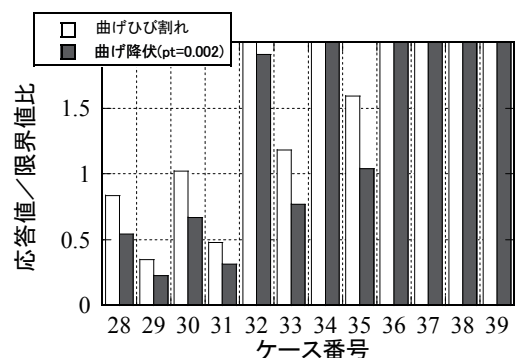
いま、コンクリートの圧縮強度 f'_c を 30 N/mm²、対応する引張強度として 2.22 N/mm² を仮定すると、引張縁が引張強度に達する条件から単位幅当たりの曲げひび割れモーメント耐力 1.48×10^3 kNm/m が得られる。また、引張鉄筋の降伏強度を 350 N/mm²、引張鉄筋比を鉄筋コンクリートとして最低限必要なレベルである 0.2% と仮定すると、建築学会の慣用式¹⁰⁾に基づく単位幅当たりの曲げ降伏モーメント耐力は 2.27×10^3 kNm/m となる。以上を仮の限界値とし、No.1~18, 28~39 について 2 つの損傷状態に関する応答値/限界値比を整理した結果が図-7 である。応答値側の曲げモーメントには、引張縁の引張応力が壁幅方向に沿って最大となる位置での値、すなわち平均化されていない最も厳しい値を用いている。No.1~18 では、一部のケースで曲げひび割れ、曲げ降伏基準への到達は認められるものの、多くは 1 を下回っている。最も縦軸値が大きい No.16 で生じている現象を見ると、図-2 に示すように、ねじりの影響であることが確認された。質量が 100t になると、(b)図のように、1 を超えるケースが多くなり、波圧の無い状態であっても耐力設計の観点からは厳しい条件であることが分かる。

4. 漂流物衝突に対するエネルギー吸収能力

本章では、波圧にかろうじて耐えられる防潮壁が、死荷重としての波圧と、動的な漂流物衝突とを受けたときのエネルギー吸収について検討する。



(a) ケース 1~18



(b) ケース 28~39

図-7 損傷の概略評価

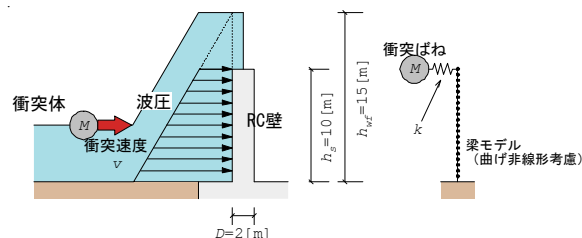


図-8 問題の設定

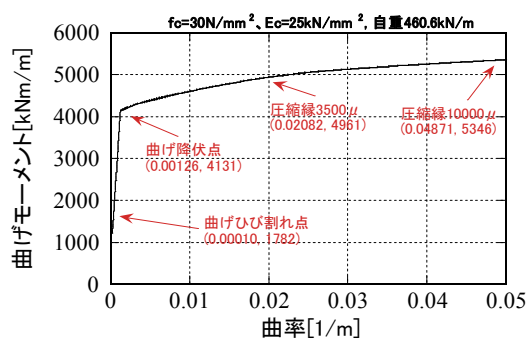


図-9 曲げモーメント-曲率関係

4.1 問題の設定

再び幅 10m、高さ 10m、厚さ 2m の壁を対象とする。コンクリートの圧縮強度は 30 N/mm² とする。図-8 に示すように、考慮する波圧の津波高さを 15m と想定し、波圧にかろうじて耐えられる条件として、引張鉄筋比を

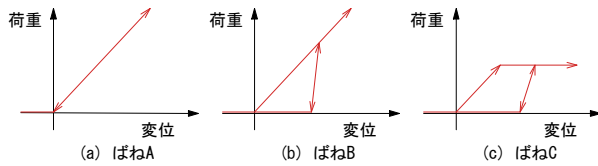


図-10 3種類の衝突ばねモデル

0.35%とする。適切にせん断補強されていると仮定する。図-9は、断面計算で求めた曲げモーメント-曲率関係である。波圧がもたらす基部の曲げモーメントは単位幅当たり $4.08 \times 10^3 \text{ kNm/m}$ であり、曲げ降伏の直前であることが確認できる。漂流物は、頂部中央に衝突するものとし、前章での検討から、全幅 10m を有効とする。

4.2 解析モデル

解析モデルは、高さ方向に 20 分割した梁モデルとした。図-9の i) 曲げひび割れ点、ii) 曲げ降伏点（曲率 $\phi_y = 0.0126 [1/m]$ ）、iii) 基部圧縮縁が 3500 マイクロに達する点（終局、 $\phi_u = 0.0208 [1/m]$ ）を結ぶトリリニア型で骨格を近似し、履歴のモデルは Takeda 型¹¹⁾とした。以降では、 ϕ_u を評価上の限界とする。

衝突体の質量を 2, 4, 6, 8, 10t の 5 通り、初期剛性を $1 \times 10^3, 1 \times 10^4, 1 \times 10^5 \text{ kN/m}$ の 3 通り、衝突速度を 5, 10m/s の 2 通り、衝突ばねのモデルを後述の A, B, C の 3 通りとし、それらの組合せによる 90 ケースを解析した。ここで取り上げている初期剛性 k は自動車等の弱部の損傷過程に対応しており、弾性体と違って除荷剛性が大きい。そこで、図-10のように、圧縮域を線形弾性としたばね A、除荷剛性が初期剛性より大きいばね B、2 章の整理に基づいて質量の 0.417 倍の強度を与え、なおかつ初期より大きな除荷剛性を有するばね C の 3 通りのモデルで比較し、その影響を調べた。ばね B, C の除荷剛性は一律 $1 \times 10^5 \text{ kN/m}$ とした。

4.3 解析結果

図-11は、質量 2t、衝突速度 10m/s のケース群の衝突荷重時刻歴を示している。ばね A の応答が正弦半波の様相を呈しているのに対し、ばね B, C では最大点以降の下り勾配が急激になっている。図-12は、図-11に示した 5 ケースのうち、同じ初期剛性 $1 \times 10^4 \text{ kN/m}$ を持つ

ばね A とばね C の 2 ケースにおけるエネルギーの時刻歴である。漂流物が有していた運動エネルギーの大部分は、ばね A の場合、一旦漂流物側の履歴エネルギーに転じた後、跳ね返った漂流物の運動エネルギーに戻っている。一方、ばね C では漂流物の履歴エネルギーに転じた後、跳ね返らずにその状態が維持されている。いずれにしても、壁の履歴エネルギーに転じる成分が小さい点で共通している。このことから、衝突体の運動エネルギー全てを吸収できるように壁を設計するのもあまり合理的ではないと考える。また、構造物の運動エネルギーは、他と比べると非常に小さいことも分かった。

壁は、波圧を受けて基部が曲げ降伏する直前の状態にあるので、漂流物が衝突すると、塑性変形が進行する。いま、衝突過程で生じた最下梁要素の最大曲率を ϕ_1 と置き、次式によって終局に至るまでの衝突回数を求めた。

$$n = \frac{\phi_u - \phi_y}{\phi_1 - \phi_y} \quad (4)$$

別途、漂流物を複数回衝突させる解析を行ったところ、塑性変形の増分は 2 回目以降少しずつ小さくなる傾向が認められた。これは、曲げモーメント-曲率関係における $\phi_y - \phi_u$ 間の緩やかな上昇勾配の影響と考えられる。したがって、1 回の衝突の解析に基づく式(4)で終局に至るまでの衝突回数は概ね安全側に見積もることができる。

90 ケース分を整理した結果を図-13に示す。壁の非線形性を考慮しても、漂流物の初期剛性が大きい方が不利である点は変わらないものの、平均的な自動車の質量である 2t 程度であれば 10 回以上、10t の漂流物でも数回の衝突に耐えられる結果が得られた。ばねタイプ間で比較すると、A, B, C の順に終局に至るまでの衝突回数は増大している。図-11で見たように、力積が減少したことが原因と考えられ、漂流物の特性を忠実に反映させることが合理的な評価につながることを示唆している。

エネルギー吸収に期待できる程度は、波圧を受けた状態で残されている余裕に依存するし、寸法・配筋が固定された今回の検討で得られた知見は、それらが著しく異なる場合に無作為に当てはまるとは言えない。しかし、壁の非線形特性を考慮することで、荷重と耐力の比較の

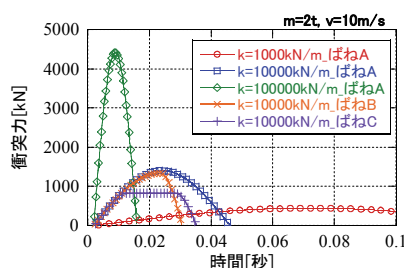
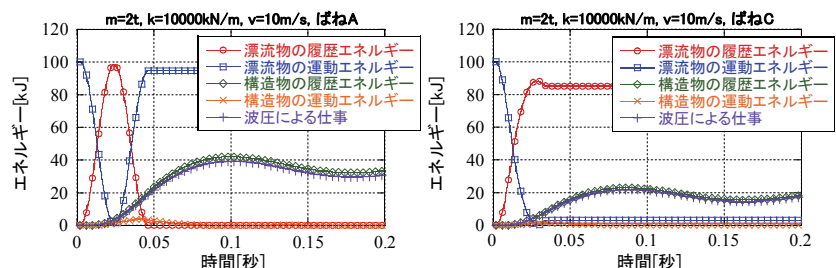


図-11 衝突荷重の時刻歴



(a) ばね A

(b) ばね C

図-12 衝突直後のエネルギーの推移

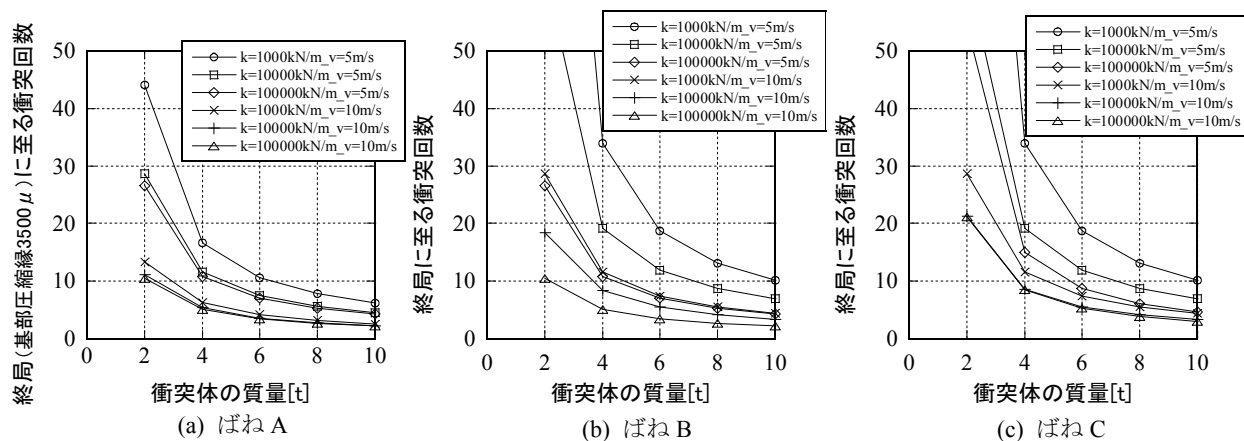


図-13 終局に至るまでの衝突回数

みによりより合理的な評価が可能となることは例示できた。本検討では、基礎、地盤の影響（ロッキングや逸散減衰）を無視しており、今後それらの影響度合について確認する必要がある。また、実際の性能照査への適用を想定するとき、波圧と衝突位置の組合せや、漂流物の個数を含めた適切な衝突条件を作成することも重要である。

5. まとめ

高さ 10m×幅 10m×厚さ 2m の鉄筋コンクリート壁に、自動車、丸太、小型船舶として想定される範囲の質量、剛性を有する漂流物を 5～10m/s の速度で衝突させる解析的検討を行い、以下の知見を得た。

- (1) 上記の衝突体・被衝突体の組合せ、速度による衝突では、概して衝突荷重より基部反力が大きくなった。
- (2) 荷重が幅方向に均一でなく集中していることや衝突位置の偏りに関して不利な条件を考慮しても、有効幅と衝突中心高さの比は概ね 0.5 以上であった。
- (3) 波圧によってほぼ曲げ降伏耐力に達する壁でも、エネルギー吸収能力によって漂流物の衝突に耐える可能性があることを示した。漂流物の運動エネルギーは、衝突後、多くが跳ね返った自体の運動エネルギーもしくは履歴エネルギーに転じ、壁側の履歴エネルギーに転じる成分は少なかった。
- (4) 漂流物の強度や、初期剛性よりも除荷剛性が大きい点を衝突ばねのモデルに反映させると、それらを考慮せずに初期剛性だけを用いて解析した場合よりも、終局に達するまでに受けられる衝突回数が増加した。

謝辞

E-FrontISTR (3 章) は、東京大学奥田研究室で開発された FrontISTR を基に、大成建設・アーク情報システム・東京大学地震研・防災科学技術研究所・東電設計・電力中央研究所の 6 機関が機能拡張を進めている版である。使用を許諾いただいた関係各位に謝意を表す。

参考文献

- 1) 松富英夫：流木衝突力の実用的な評価式と変化特性，土木学会論文集，o.621，pp.111-127，1999.
- 2) 有川太郎，織田朋哉，黒田豊和，下迫健一郎：消波工によるケーソン壁面衝突力に関する大規模実験，海岸工学論文集，第 50 巻，pp.716-720，2003.
- 3) Haehnel, R. B. and Daly, F. D.: Maximum Impact Force of Woody Debris on Floodplain Structures, *Journal of Hydraulic Engineering*, 130, No.2, pp.112-120, 2004.
- 4) 高島大輔，木原直人，宮川義範，甲斐田秀樹，柴山淳，池野正明：津波漂流物の衝突力推定における軸剛性モデル，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.71，No.2，p.I_1015-I_1020，2015.
- 5) 甲斐田秀樹，木原直人：原子力発電所における津波漂流物の影響評価技術一現状調査とその適用に関する考察一，電力中央研究所研究報告 O16010，2017.
- 6) 甲斐田秀樹，木原直人，高島大輔，柴山淳，宮川義範：実規模木材の水中・気中衝突実験，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，Vol.72，No.2，p.I_1159-I_1164，2017.11
- 7) 柴山淳，宮川義範，木原直人，甲斐田秀樹：津波波力と漂流物衝突力を受けるコンクリート壁の応答評価法の提案，電力中央研究所研究報告 O17002，2018.5
- 8) Kaida, H., Kihara, N. and Takabatake, D.: Impact Force of Flood-Borne Vehicles, *Proc. of 36th ICCE*, 2018.
- 9) 長沢準，有田喜久雄，谷政明，岡修二：通航船舶の橋脚衝突時の圧壊強度について，日本造船学会秋季講演会，pp.323-332，1977.11
- 10) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999.
- 11) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N.: Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, *Proc. of ASCE, Journal of the Structural Division*, pp.2557-2573，1970.