論文　段波の先端付近を漂流する丸太とコンクリート壁の衝突実験

宮川　義範[*1]・柴山　淳[*2]・高畠　大輔[*2]・木原　直人[*3]

要旨：厚さ 300mm の鉄筋コンクリート製防潮壁に，波の力によって質量約 200kg の丸太を衝突させる実験を行った。段波の高さが，壁の高さに比して或る程度小さいという条件下では，丸太より僅かに先行した水隗が壁の手前で跳ね上がってクッションとなり，丸太が減速して衝突が穏やかになるという結果が得られた。壁を梁要素，衝突体である丸太を質点でモデル化する形式の解析において，この効果を取り入れるための簡易モデルを作成したところ，丸太軸と壁面が平行する場合については，衝突時の壁の加速度や変位の最大振幅を概ね再現することができた。

キーワード：津波，段波，漂流物，防潮壁，衝突

1. はじめに

2011 年の東北地方太平洋沖地震における津波被害を受けて，津波に対する施設防護のあり方は再考を迫られている。防潮壁に対する安全性の高い設計が重要であることは論を待たないが，今後は，単一の物理障壁に完全に依存するのではなく，設計想定を超えて破壊にまで至るリスクを評価し，緊急時対応・復旧計画のようなソフト面での対策を組み合わせたシステムを構築することが重要と考えられる。こうした背景から，本研究では，諸々の漂流物を想定した津波防護施設の損傷確率を評価することを最終的に目指している。

$$P=\int p(v,h)\cdot\max_i\left\{f\left(v,h,m_i,k_i,\mathbf{x}_i\right)\right\}dvdh \qquad (1)$$

ここで，P は損傷確率，p は流速 v，水位 h の津波の発生確率（ハザード情報）である。m_i，k_i，$\mathbf{x}_i$ は，それぞれ漂流物の質量，剛性，初期位置で，下付き文字 $i\left(1\le i\le n\right)$ は漂流物の識別番号，f はそれらの条件下における損傷確率を表す。本論文では，この中の関数 f の整備に資する基礎的な実験について述べる。なお，今回の実験シリーズでは，段波の高さ h が壁の高さに比して或る程度小さい（おおよそ 1/2 以下）という条件下での衝突現象を扱う。これは，単純な手続きによって実験が可能なケースから着手するためであって，他の条件については，今後改めて検討されなければならない。

漂流物の衝突については，これまで，衝突力の評価式の提案[例えば 1), 2)]や，数値解析による現象の追跡[例えば 3), 4)]が行われている。衝突力評価式は一見簡潔であるが，衝突体・被衝突体の力学特性を，質量 m，剛性 k といった少数の指標で代表させるため，適用の前後で結局，相応の構造計算が必要になる。逆に，衝突体・被衝突体を詳細にモデリングした FEM によると，式(1)を計算する際に多くの労力が必要となる。そこで，本研究の範疇では，式(1)の f を求める手段として，可能な範疇で自由度削減に配慮したモデルによる数値解析を想定する。

2. 漂流物とコンクリート壁の衝突実験

実験の概要を**図－1** に示す。電力中央研究所の津波・氾濫流水路（横断面は幅 4m，高さ 2.5m）に鉄筋コンクリート製の壁を設置，上流に丸太を置いて段波を発生させ，丸太を壁に衝突させる。以降では，これを漂流物衝突試験と称して，2.3 節の気中衝突試験と区別する。

2.1 計画

(1) コンクリート壁の特性

図－2 に，壁模型の形状と寸法，配筋を示す。直立部は高さ 1.59m であるが，基部 0.09m 分は水路への設置に際してモルタルで固めている。1.2625m 幅のものを 2 体，1.375m 幅のものを 1 体，計 3 体（総幅 3.9m）作成し，水路への設置時にモルタルで一体化した。このとき，意図せず模型と水路との境界にもモルタルを流し込んだ。

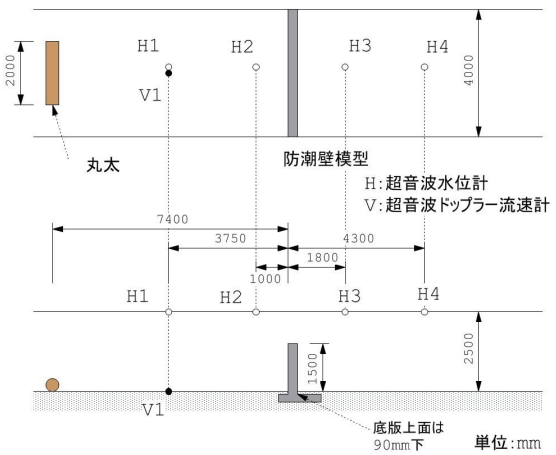
材料試験で得られたコンクリートのヤング係数は，28303N/mm^2，圧縮強度は 31.1N/mm^2 であった。水位 1.5m，すなわち満水状態の静水圧によって生じる壁頂部の水平変位は，計算上 0.0405mm となる。また，かけやによる打撃で得られた固有振動数は，3 体を一体化して水路に固定した状態で 80Hz であった。

(2) 丸太の特性

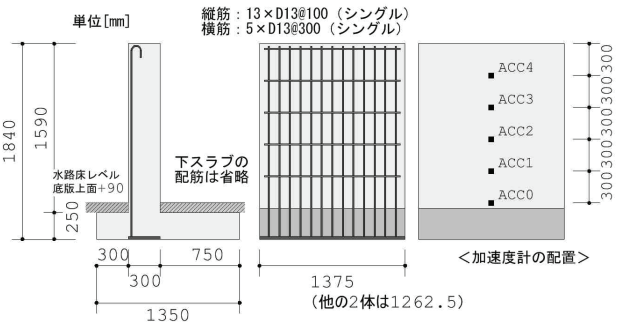
丸太は半径 191mm，長さ 2000mm のスギで，漂流物衝突試験時に 213kg（密度 0.929），また，漂流物衝突試験の後，時間が経過してから実施した後述の気中衝突試験時に 152kg（密度 0.663）の質量を有していた。

漂流物衝突試験を行う前に，一端にマイクロホンを設置した状態で，他端をハンマで打撃し，取得した音波を

*1 （一財）電力中央研究所　構造工学領域　工博　(正会員)
*2 （一財）電力中央研究所　構造工学領域　工修
*3 （一財）電力中央研究所　流体科学領域　理博



図－1　実験の概要（上）平面（下）立面



図－2　壁模型の寸法と配筋

フーリエ変換して固有振動数を読み取った。そして，これを次式に代入して，縦弾性係数 9.1kN/mm^2 を得た。

$$E_L = \left(2L_{wd} f_{wd}\right)^2 \rho_{wd} \tag{2}$$

ここで，E_L が縦弾性係数，L_{wd} は丸太の長さ，f_{wd} は固有振動数，ρ_{wd} は密度である。気中衝突試験の後，軸方向 330mm 分を切り出して，割裂試験と同じ要領で横圧縮を行ったところ，剛性として 37425kN/m が得られた。

(3) 計測計画

下流側壁面の**図－2** に示す 5 点に容量 10G の一方向加速度計を，また，壁中に鉄筋ひずみゲージを設置した。これらのサンプリング周波数は 10kHz とした。流体については，**図－1** に示す 4 点に超音波水位計を，また，壁から 3.75m の位置に超音波ドップラー流速計を設置した。

(4) 実験ケース

実験ケースの一覧を**表－1** に示す。表中で”type”に続く数字は，波形の識別番号であり，小さい数字ほど入力レベルは大きい。つまり，type2 の 5 ケースは同じ入力制御を行っており，type2_1～type2_4 は再現性・ばらつきを捉えることを意図している。

丸太は，壁から 7.4m の位置に**表－1** に示す向きに直置きした。以降，丸太軸と壁面が平行である場合を平行配置，直交する場合を直交配置と記す。壁上流側の初期水位をゼロにすると，特に平行配置の場合に丸太の回転運動が卓越し，衝突挙動への影響が懸念された。回転は小さい方が現実の漂流に近いと考え，必要最低限として 0.1m 以下の初期水位を与えたところ，回転は抑制された。また，丸太が壁を超えて落下する場合に備えて，壁下流側にも初期水位を与えた。実験時には制御項目とみなしていなかったため，**表－1** に示すとおり値は一定でない。

2.2 結果

(1) 水位・流速・丸太の速度および波圧

図－3 に，壁から上流側 3.75m の位置における水位の時刻歴を示す。水位には，0.3m 程度と，1.5m 程度の 2 つの段が認められるが，漂流物は前者に乗っており，後者は壁で反射した成分を含んでいる。超音波ドップラー流速計による開始 2 秒後の水位と流速は，type2 で（0.35m, 5.2m/s），type3 で（0.27m, 4.6m/s），type4 で（0.21m, 3.5m/s）であった。精度面でやや劣るものの，**表－1** に示している超音波水位計の立ち上がり時刻からもおおよそ 3～5m/秒程度の流速であったことが分かる。丸太の速度を計測するための機器は設けていなかったので，**表－1** 中の丸太の速度は，ビデオ映像からの判読に寄っている。それでも，壁の手前 1.0～0.6m の区間まで，水とほぼ同等の速度をもって流れている様子が窺われる。

波圧については，本シリーズに先立って，同じ壁模型に水だけを流す実験を行い，詳細を別途報告している[5)]。

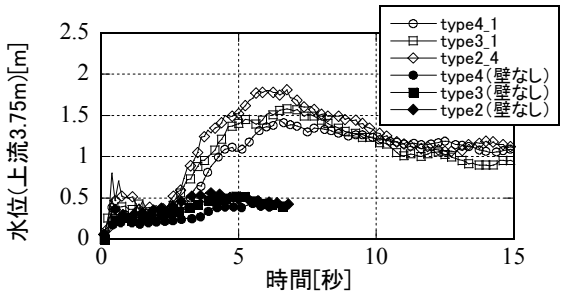
(2) 目視観察の結果

今回の条件下では，**図－4 左**のような現象が発生した。丸太よりも僅かに先行する水隗が壁に衝突し，その水平

表－1　各ケースの実験条件

ケース名	水位が0.2mを超えた時間[秒]※1		平均流速[m/s]	下流側初期水深[m]	丸太の向き（壁に対して）	丸太の速度[m/s]※2		
	上流3.75m	上流1.00m				上流1.80m-1.40m間	上流1.40-1.00m間	上流1.00-0.60m間
type4_1	0.25	1.08	3.35	0.01	平行	3.3	3.8	3.9
type3_1	0.25	0.91	4.13	0.69	平行	3.7	4.0	3.8
type2_1	0.23	0.87	4.30	1.04	平行	判読不能	4.4	4.3
type2_2	0.22	0.85	4.37	0.64	平行	4.0	4.1	4.0
type2_3	0.24	0.86	4.45	0.79	平行	4.2	4.1	4.1
type2_4	0.22	0.79	4.80	0.59	平行	3.7	4.2	4.1
type2_5	0.26	0.84	4.71	0.69	直交	3.1	3.5	3.6

※1：超音波水位計のサンプリングは0.1秒間隔。0.2mを挟む2データから線形補間
※2：ビデオ映像からの判読による



図－3　水位の時刻歴

速度がほぼゼロになって，上方に跳ね上がる。丸太は，その速度ゼロの水隗に向かって或る速度をもって進行するため，進行速度を低下させる向きの抗力を受ける。これにより，気中の場合よりも衝突の様相は穏やかなものとなった。本実験では，衝突体である丸太のスケールが小さいため，付加質量効果（衝突体が水をせき止めることによって生じる，衝突力を増大させる効果，**図－4 右**）よりも，被衝突体である壁が水をせき止めることによって生じる，衝突力を減少させる効果が卓越したものと考えられる。なお，一連のケースを経て，コンクリート壁にはほとんど損傷が認められなかった。

(3) コンクリート壁の応答

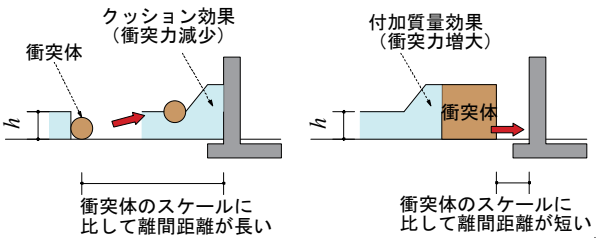
図－5 に，type2_4 ケースにおける加速度時刻歴の例を示す（**図－3** の横軸とは同期していない）。波の先端の衝突は図より先の時間に生じており，なおかつ微小であったので，同図にはほとんど寄与していないと考えてよい。今回の実験では変位データが得られなかったので，参考値として，これを 1 回，または 2 回積分して，速度，変位の時刻歴を得た。ただし，加速度データに含まれるノイズの影響等により，積分した時刻歴には基線ズレが生じる。そこで，壁が弾性挙動を超えるほどの入力を受けていない（残留変位はほぼゼロ）ことも踏まえ，以下の手続きを用いてデータを補正した。

i) 衝突前後の 1 秒間分の加速度データを抽出

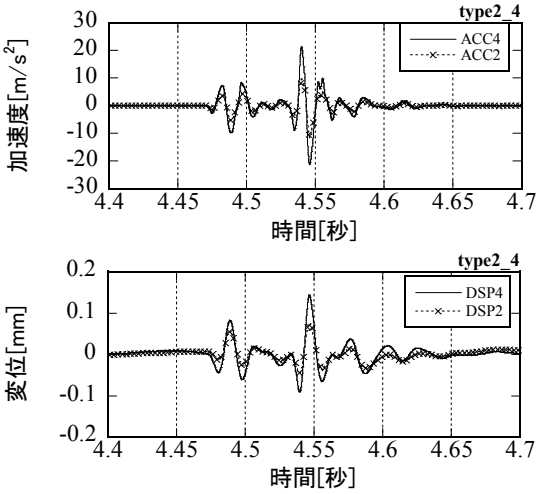
ii) 500Hz のローパスフィルタにより加速度データのノイズを低減

iii) 積分の実行

iv) 変位時刻歴の基線ズレを $y = at^2$ 形式の 2 次関数（ここで，t は切り出した区間の先頭をゼロとした時間）



図－4　クッション効果と付加質量効果



図－5　衝突直後の壁の応答[type2_4 の例]
（上）加速度（下）変位

で近似して除去，速度時刻歴から $\dot{y} = 2at$ を差し引く

v) 5Hz のハイパスフィルタを速度・変位時刻歴に適用して低周波のうねりを除去

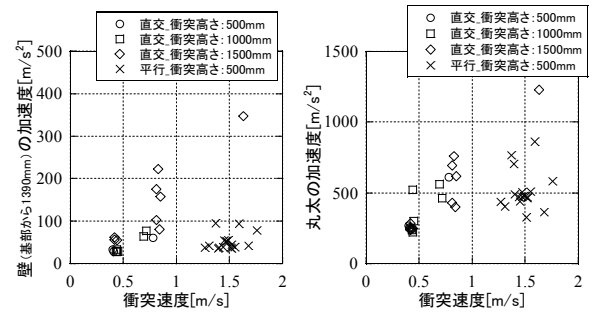
こうして得られた波形の絶対値最大を整理したのが，**表－2** である。type2_1～type2_4 の比較，およびそれらと type3_1 の大小関係を見ると，現象のばらつきは大きい。それでも，type4_1 の応答は明らかに他のケースよりも小さいことが分かる。また，直交配置の type2_5 ケースの加速度応答も他よりやや小さく，先の丸太の衝突速度が若干小さかったことと対応している。

2.3 補足実験（気中衝突）

漂流物衝突試験では，衝突直前の丸太の速度が未知であるため，気中で簡単な衝突実験を行った。被衝突体は，漂流物衝突試験の後に撤去した 1.2m 幅の壁模型で，PC 鋼棒を介して反力床に固定した。門型フレームからチェ

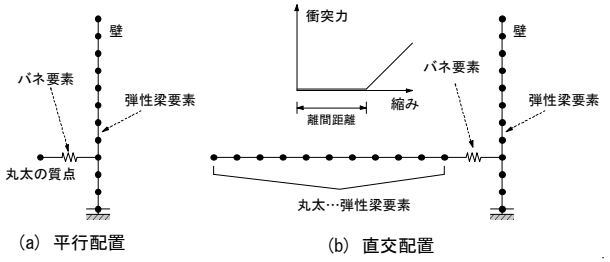
表－2　実験結果（壁の加速度と変位）

FILE	卓越振動数 [Hz]	加速度[m/s²]					変位[mm]				
		ACC4	ACC3	ACC2	ACC1	ACC0	DSP4	DSP3	DSP2	DSP1	DSP0
type4_1	71	7.34	5.05	3.81	3.28	1.60	0.037	0.031	0.021	0.014	0.016
type3_1	58	28.04	17.12	11.53	7.91	6.18	0.125	0.093	0.070	0.049	0.015
type2_1	58	12.99	9.24	6.17	4.41	2.56	0.078	0.067	0.039	0.028	0.008
type2_2	69	33.80	25.20	17.44	10.70	3.19	0.181	0.137	0.093	0.056	0.019
type2_3	65	11.82	8.88	6.12	3.58	1.27	0.108	0.094	0.069	0.051	0.017
type2_4	69	21.21	16.39	11.59	7.36	2.30	0.143	0.111	0.076	0.048	0.016
type2_5	58	9.51	7.20	5.03	3.15	0.85	0.098	0.073	0.051	0.034	0.020



(a) 壁上部　　(b) 丸太

図－6　気中衝突実験における加速度応答最大値



(a) 平行配置　　(b) 直交配置

図－7　解析モデル（二次元モデル）

ーンブロックを介して丸太をぶら下げ，人力で丸太を引いて振り子の要領で壁に衝突させた。衝突速度は，丸太を引く距離でおおまかに調節した程度で，細かな制御は行っていない。丸太後方から，レーザー変位計により変位を計測し，衝突直前・直後の速度が得られるようにした。なお，この実験時には，先述のように丸太の乾燥が進行していたし，試験直前に無筋側基部に曲げひび割れが発生するアクシデントが発生し，壁模型側の状態にも変化があった。したがって，本実験は，あくまで衝突速度が既知の条件下における壁と丸太の加速度最大値のおおよその桁を捉えるという位置付けである。**図－6** では，衝突速度を横軸に取り，直交配置 20 回，平行配置 17 回分の加速度の最大値を，壁上部と丸太それぞれについてプロットした。直交配置の場合，加速度最大値がおおよそ 10^2m/s^2 のオーダーの値を示し，なおかつ丸太の方が 3～4 倍程度大きくなる傾向が捉えられた。平行配置の場合，壁の加速度の桁は 10^1m/s^2 とやや小さかった。

3. 解析的検討

3.1 気中衝突の解析

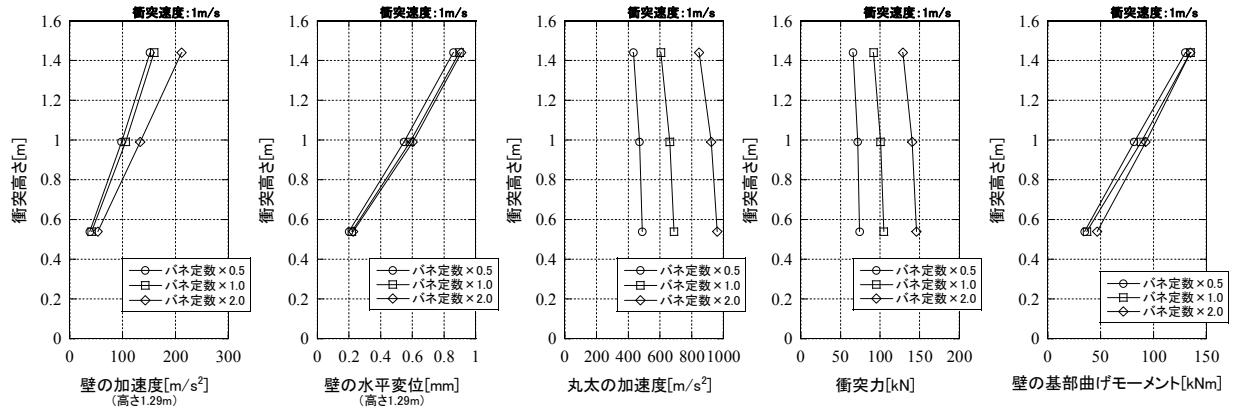
図－7 に示すように，壁を梁要素で，丸太を質点または梁要素でそれぞれモデル化した。丸太を表す質点と，衝突高さに対応する壁の節点を結ぶバネ要素を設けた。このバネ要素には，初め無抵抗で，所定の距離だけ縮んだ以降に線形の抵抗を示す特性を与えた。接触時のバネ定数は，以下の要領で設定した。平行配置のケースにおいては，74850kN/m（横圧縮試験で得た 37425kN/m の 2 倍［半円分］）を基本値とした。ただし，この値は信頼性が十分でないので，基本値の 0.5 倍，2 倍の場合についても合わせて解析して，感度を確認した。一方，直交配置ケースのバネ定数は，次の形式で規定することとした。

$$k = E_L A_{RT} / l_{ch} \tag{3}$$

ここで，E_L は丸太の縦弾性係数，A_{RT} は丸太の断面積である。特性長さ l_{ch} は，端面の平滑度・成形性など，衝突位置近傍の局部的な特性を代表させるための実験パラメータと位置付けており，直接何らかの物理的な長さを表すものではない。

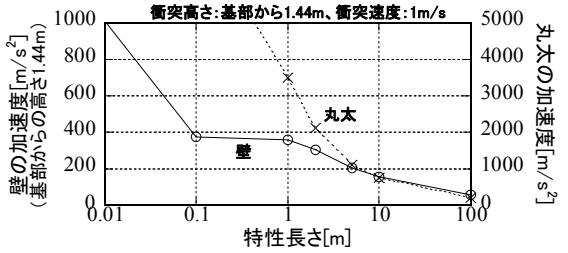
丸太に対して，衝突速度を初速度として与え，時間刻み 10^{-4} 秒で解析した。時間積分については Newmark の β 法を適用し，$\beta = 0.25$，$\gamma = 0.5$ とした。壁を構成する要素には，暫定的に 5%の剛性比例減衰を付与した。ただし，1～5%程度の変動であれば，後続の波形の収束には影響するものの，衝突直後の振幅への影響は小さかった。

図－8 では，平行配置の場合を対象に，3 通りの衝突高さと 3 通りのバネ定数の組み合わせ計 9 ケースの解析から得られた最大値をまとめた。衝突高さが 0.5m のとき，壁上部の加速度が 10^1m/s^2 のオーダー，丸太の加速度が 10^2m/s^2 のオーダーであり，**図－6** の結果と概ね符合している。衝突力と基部曲げモーメントの比率は一定でない



図－8　気中衝突の解析結果（平行配置）

［左から壁上部の加速度，変位，丸太の加速度，衝突力，壁基部の曲げモーメント］



図－9　特性長さと壁・丸太の加速度との関係
［解析］（直交配置）

こと，バネ定数の影響は壁上部の変位や基部の曲げモーメントに対して小さいことが分かる。

図－9 には，直交配置で，基部からの高さ 1.44m の点に衝突させたときの，特性長さと，壁・丸太の加速度最大値との関係をまとめた。**図－6** の結果と概ね合致する特性長さは，5～10m 程度であることが分かった。

3.2 先行する水隗による減速効果の推定

次に，漂流物衝突試験のシミュレーションを行う。流体連成でない解析上で減速の効果を考慮するため，ここでは水の流れを以下のように簡略化して捉える。壁の上流側 L の位置に速度ゼロの衝突体があるとし，これが流速 v，水位 h の段波から受ける抗力によって加速する。水が壁に達して以降，**図－10 右**に示すように，水隗を流速 v・水位 h の区間（長さ L_1）と，流速ゼロ・水位 $2h$ の区間（長さ L_2）にブロック分けする。長さ L_2 は体積保存の関係から，次式で表されるものとする。

$$L_2(t) = vt - L \quad \left(\frac{L}{v} \le t \le \frac{2L}{v}\right) \tag{4}$$

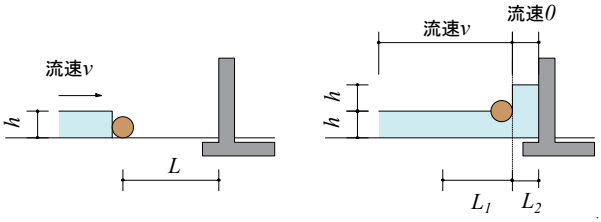
ここで，時間 t は初期の衝突体の位置（直交配置の場合は左端）を波の先端が通過した時点を起点とする。衝突体（左端）が L_1 の区間にあるとき，右に向かって

$$F = \frac{1}{2}\rho_w \{v_{wd}(t) - v\}^2 SC_D \quad (v_{wd}(t) < v) \tag{5}$$

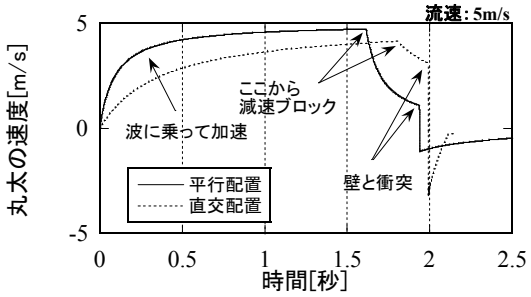
衝突体（右端）が L_2 の区間にあるとき，左に向かって

$$F = \frac{1}{2}\rho_w \{v_{wd}(t) - 0\}^2 SC_D \quad (v_{wd}(t) > 0) \tag{6}$$

を抗力として与える。ここで，S は壁面への衝突体の投影面積，C_D は抗力係数（平行配置のとき 1.2，直交配置のとき 2.0 とした）である。流速 v は 5m/s，衝突高さは水位の 1～2 倍程度と考えて 0.45m（底版上面から 0.54m）とした。流速ゼロのブロックの水位を $2h$ とした点については，今後，改良の余地がある。水をせき止める壁前面の最大水位はフルード数に依存することが知られている[例えば 6)]ので，流速ゼロのブロックの水位にも，同じくその依存性を与えた方が適切な可能性がある。付加質量付きのモデルを用いた予備検討によれば，1m の下流側初期水位の壁振動への影響は小さかったので，以降では，上流側も含めその影響は無視できると判断した。



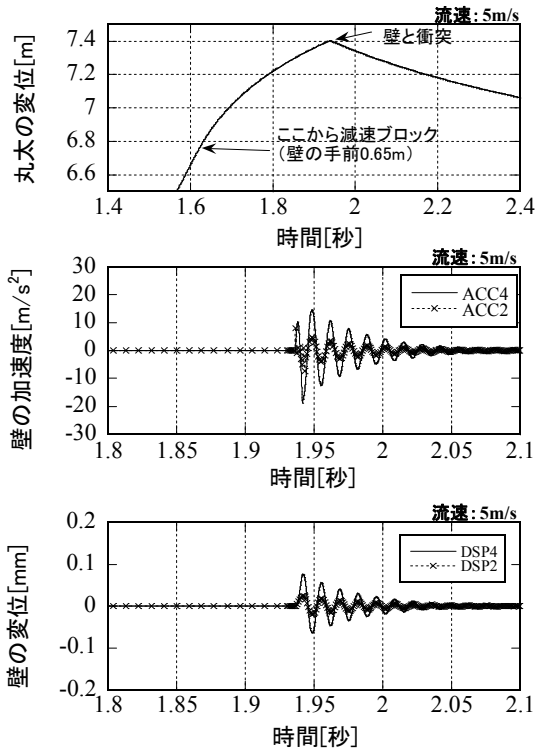
図－10　クッション効果のモデル化



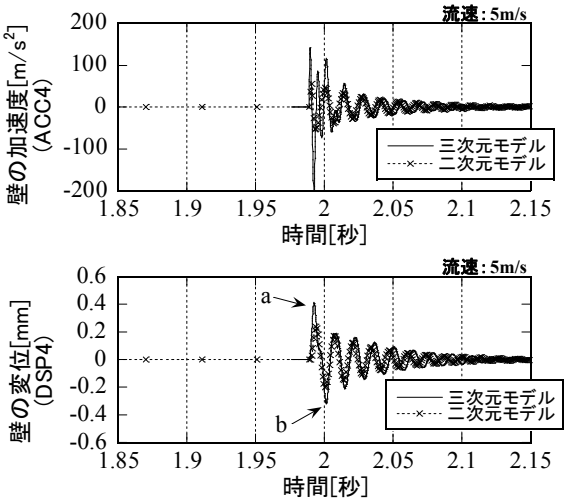
図－11　丸太の速度時刻歴［解析］

まず，平行配置の場合の結果から述べる。二次元解析を行うに当たって，壁の有効幅を設定する必要があるが，壁幅との比がせいぜい 1:2 であることから，模型の総幅 3.9m を有効とした。**図－11** に示す衝突前の丸太の動きを見ると，最初の 0.3 秒間で約 4m/s まで加速し，以降 1.6 秒辺りまで流速 5m/s に漸近する挙動を示している。1.6 秒を僅かに経過した時点で流速ゼロのブロックに入って急激に減速し，壁と衝突する時点の丸太の速度は 1m/s 程度になっている。減速区間は，距離にして 0.65m であり（**図－12**），実験結果において壁の直近まで丸太が減速していなかったことと矛盾しない。ACC4 に対応する高さの加速度と変位を，**図－5** と**図－12** とで比較すると，振幅が概ね整合している。ただし，解析では理想的な衝突をするため，**図－5** で見たような複雑な波形にはならず，単調に減衰が進行している。

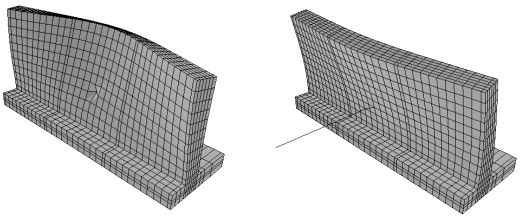
次に，直交配置の場合について述べる。平行配置と同様に有効幅 3.9m の二次元解析を行った場合と，三次元ソリッド要素で壁をモデリングした場合（壁幅方向端面は拘束していない）の 2 通りの解析を行った。式(3)の特性長さは，気中衝突の検討を踏まえて 5m とした。**図－11** の丸太の速度時刻歴を見ると，抗力を受ける面積が小さくなるため，開始直後の加速が緩やかになっている。実際，**表－1** において，type2_5 ケースの丸太の速度は他のケースよりも若干小さかった。しかしながら，実験では，直交配置の方がより穏やかに衝突したにもかかわらず，解析では，減速の効果も弱くなって，結局，衝突速度（3.1205m/s），壁の加速度，変位のいずれも平行配置の場合より大きくなった。三次元モデルでは，最初の 2 往復程度は，**図－14** に示すように，壁幅方向の変位分布が一様でない。また，上記の過大評価の傾向は，三次元モデルにおいてむしろ顕著であった。実験時（type2_5），



図－12　漂流物衝突試験の解析（平行配置）
（上）丸太の変位（中）壁の加速度（下）壁の変位



図－13　漂流物衝突試験の解析結果（直交配置）
（上）壁の加速度（下）壁の変位



図－14　三次元モデル変形図（×1000，前図 a,b 点）

壁手前でせき止められた水隗とともに丸太の下流側端部が上方に持ち上げられる様が目視・映像で確認されているので，こうした丸太の姿勢変化を無視していることが原因として考えられる。

4. まとめ

厚さ 300mm の鉄筋コンクリート製防潮壁に，波の力によって質量約 200kg の丸太を衝突させる実験を行った。段波の高さが，壁の高さに比して或る程度小さい（おおよそ 1/2 以下）という条件下では，丸太より僅かに先行した水隗が壁手前で跳ね上がってクッションとなり，丸太が減速して衝突が穏やかになるという結果が得られた。

この効果を解析に取り入れるため，丸太の初期位置と壁の間の区間を流速の異なる 2 ブロックに分け，丸太が通過中のブロックに応じて与える抗力を変化させるという簡易モデルを作成した。その結果，丸太軸と壁面が平行する場合については，衝突時の壁の加速度や変位の最大振幅を概ね再現することができた。しかし，丸太軸が壁面と直交する場合については，衝突直前の丸太の姿勢の変化を考慮していないため，衝突時の各種応答指標を軒並み過大に評価した。衝突現象を単純化された質点モデルで解析する場合，信頼性のある解が得られる範囲は狭まると推察される。今後，適用範囲を明確化するとともに，壁が非線形挙動を呈する場合への検討対象の拡張も進めたいと考えている。

謝辞

データ整理に当たり，（一財）電力中央研究所の甲斐田秀樹研究員に協力をいただいた。ここに謝意を表する。

参考文献

1) 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.
2) 水谷法美，高木祐介，白石和睦，宮島正悟，富田孝文：エプロン上のコンテナに作用する津波力と漂流衝突力に関する研究，海岸工学論文集，第 52 巻，pp.741-745, 2005.
3) 清宮理，宮城敏明，石川雅美，門倉博之：船舶と橋梁の杭式緩衝工との衝突解析，土木学会論文集，No.540/VI-31, pp.49-57, 1996.6
4) 磯部大吾郎，董元奇：津波漂流物衝突解析による鋼構造建築物の構造設計に関する考察，日本機械学会第 26 回計算力学講演会 CD-ROM 論文集, 2013.11
5) 木原直人，太田一行，高畠大輔，宮川義範，松山昌史：直立防潮堤に作用する津波波圧の大規模実験，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.70, No.2, I_826-I_830, 2014.
6) 榊山勉：陸上遡上津波の伝播と構造物に作用する津波波圧に関する研究，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68, No.2, I_771-I_775, 2012.