

鉄筋コンクリート防潮堤への津波漂流物である大型流木の衝突に関する検討

Study on impact of large driftwood caused by tsunami to reinforced concrete seawall

堀口 朋裕*, 丹羽 一邦**, マドウラペルマ マノチュ***,
Tomohiro Horiguchi, Kazukuni Niwa, Manoj Madurapperuma

*博(理), 株式会社テラバイト (〒113-0034 東京都文京区湯島 3-10-7 NOV ビル 3F)
**取締役, 株式会社テラバイト (〒113-0034 東京都文京区湯島 3-10-7 NOV ビル 3F)
***博(工), 株式会社テラバイト (〒113-0034 東京都文京区湯島 3-10-7 NOV ビル 3F)

Key Words:(Driftwood, Impact force, Reinforced concrete, Seawall, Tsunami)
キーワード: 流木, 衝突力, 鉄筋コンクリート, 防潮堤, 津波

1. 緒言

2011年に発生した東北地方太平洋沖地震では、津波による甚大な被害が引き起こされた。被害の中には、津波そのものによるものだけでなく、津波によって流された漂流物が建物に衝突して損壊を与えるケースもあった。現地調査報告¹⁾によると、漂流物の多くは船やコンテナ、巨大な木であった。船とコンテナは災害時の固定や避難を適切に行えば、被害を防ぐことは可能である。その一方で、流木の多くは防潮林や自生している自然木が津波で倒されたものであるため事前の対策は困難であり、重要施設へ衝突した際の安全性評価が必要である。近年は原子力発電所の津波対策として防潮堤が建設され、漂流物に対する耐衝突性評価も実施されており、流木に対する評価も求められている。

津波対策のために建築される構造物の設計に必要な流木の衝突荷重の算定には、しばしば松富の式²⁾, FEMAの式³⁾, 有川の式⁴⁾等が用いられる。これらの式は実験や運動方程式から求められているが、漂流物の質量や速度による適用制限があるため、巨大な流木や速い衝突に対応できないことがある。本研究では、有限要素解析により、大質量の流木および高速度の衝突解析を実施し、得られた解析結果から衝突荷重の推定式を提案する。また、防潮堤を模した鉄筋コンクリート壁への流木の衝突解析を実施する。

2. 解析モデル

本解析では、流木および防潮堤をモデル化し、商用コード LS-DYNA により衝突解析を実施する。流木は丸太を想定し衝突時の流体による抵抗等の相互作用は考慮し

ないものとする。丸太はソリッド要素でモデル化する。長さは10 mとし、直径は600 mmをベースケースとして3.2節で丸太の直径の大きさによる衝突荷重への影響を検討する。材料モデルはLS-DYNAの木材モデル⁵⁾を使用し、ここではマツを想定する。この材料モデルは繊維方向(長手方向)とそれに直交する径方向との剛性が異なる異方性弾塑性モデルである。密度は 7.48×10^{-10} ton/mm³, ポアソン比を0.157, 繊維方向のヤング率を 1.14×10^4 MPa, 繊維方向に直交する径方向のヤング率を 2.47×10^2 MPaとする。図1にソリッド要素を用いた一要素解析の結果を示す。引張, 圧縮およびせん断強度は各々85 MPa, 21 MPa および8.4 MPaである。

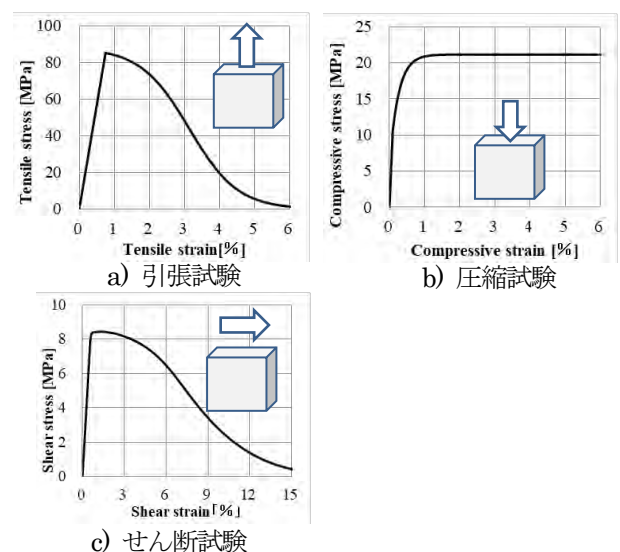


図1 流木の材料モデルの一要素解析の結果

防潮堤モデルはコンクリートをソリッド要素で、鉄筋

をビーム要素でモデル化する。コンクリートのかぶり厚さは 30 mm, 鉄筋の直径は 31.6 mm, 鉄筋比は 0.8 %とする。コンクリートの構成則は, LS-DYNA に実装されている Ottosen⁹⁾の破壊基準を用いた Winfrith モデルを採用し, 圧縮強度を 23.5 MPa, ポアソン比を 0.2, ヤング率を 2.25×10^4 MPa とする。このモデルは圧力依存性とひずみ速度依存性を有し, 圧縮側では圧縮強度に到達後圧壊に至るまで応力は圧縮強度の値で一定となる。引張強度に到達後はクラック解放エネルギーで規定される引張軟化特性を示す。クラック開口ひずみに達すると引張応力がゼロとなる。鉄筋の構成則は弾塑性材料とし, 降伏応力を 448 MPa, ポアソン比を 0.3, ヤング率を 2.06×10^5 MPa とする。図 2 に防潮堤モデルを示す。

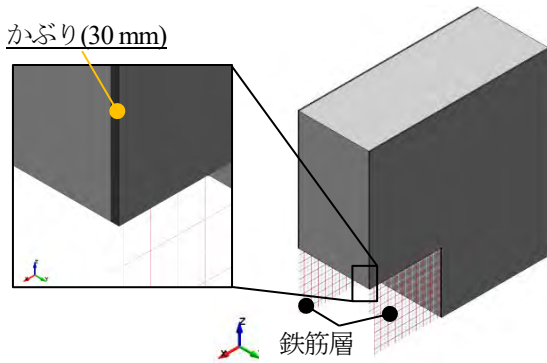


図 2 防潮堤モデル

3. 一本の流木の衝突

3.1 モデルの妥当性

丸太の衝突挙動の妥当性を検証するため, Aghl らの実験⁷⁾結果と FEM 解析結果の比較を行う。Aghl らの実験では, 長さ 6 m, 大直径 267 mm, 小直径 216 mm のテーパの丸太を振り子器具に固定し, 長手方向に垂直な面の切り口をロードセルに衝突させて衝突荷重を計測する。検証に用いる実験ケースは衝突部に塑性が発生する WT4 で, 衝突速度は 1.3 m/sec である。本解析では, 丸太の衝突対象を剛体とし, 接触反力の時刻歴および最大値の挙動が実験を再現できるかどうかを検討する。

図 3 は実験より得られた衝突荷重時刻歴に, 小直径側を衝突させた解析結果を重ねた図である。衝突発生直後における衝突荷重増加率は実験と解析で, ほぼ等しいことがわかる。その後, 実験結果では 4.0 msec の点 A で, 解析結果では 3.6 msec の点 A' で衝突荷重の増加率が低減する。これは衝突後, 丸太が局所的に損傷したことによるものと考えられ, 損傷発生位置が近いことがわかる。最大衝突荷重値は実験で 140 kN, 解析で 143 kN とおおむね一致しており, 発生時刻もほぼ一致している。このことから, LS-DYNA の木材材料モデルを用いた解析結果が, 実験結果をおおむね再現できることが確認できた。

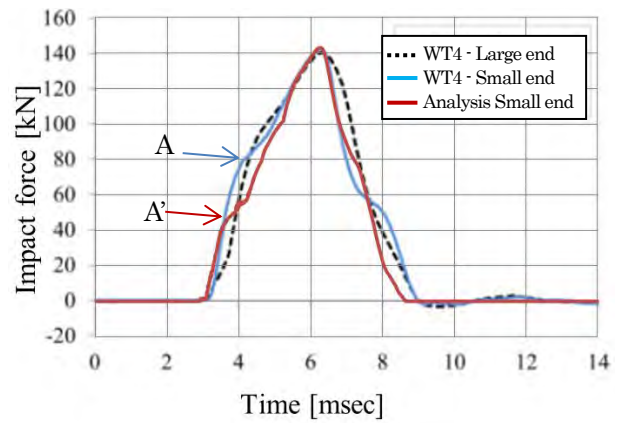


図 3 丸太の衝突荷重時刻歴の実験と解析の比較

3.2 流体の衝突速度と径の違いによる検討

本節では流木の最大衝突荷重(F_{max}), 衝突速度(V)および径の大きさ(D)の関係を解析結果から調べ, 流木衝突時の F_{max} の算定式を提案する。津波漂流物の速度は, 高速の領域まで適応できるように 1 m/sec から 15 m/sec まで 1 m/sec ごとに, 直径は 100 mm から 600 mm まで 100 mm ごとに変化させ, 合計 90 ケースの衝突解析を実施した。

流木の衝突速度が大きくなるにつれて, 流木の損傷度合いも大きくなるので, F_{max} の上昇は緩やかになる傾向がある。このことを考慮し, 提案式は式(1)に示す対数関数を 2 次関数で補正し, 流木の直径の 2 乗を正規化定数に組み込む。式(1)中の a, b_1, b_2, b_3 は解析結果より決定し, ここでは $a=2.11 \times 10^3, b_1=-5.52 \times 10^{-5}, b_2=1.51 \times 10^3, b_3=6.45 \times 10^{-4}$ となる。

$$F_{max} = D^2(a \ln V + b_1 V^2 + b_2 V + b_3) \quad (1)$$

ただし適用した木材の材料はマツとし, 流木長さは 10 m で衝突速度と流木の直径の適応範囲はそれぞれ $1 \leq V$ [m/sec] $\leq 15, 100 \leq D$ [mm] ≤ 600 である。

90 ケースの衝突解析より得られた衝突荷重の最大値と提案式を示す図を図 4 に, 丸太の直径が 200 mm のときの提案式と既往の式^{2), 3), 4)}の比較を図 5 に示す。図 5 より既往の式は, 荷重と速度の関係が線形に近い挙動であるが, 提案式では非線形性な挙動となっている。

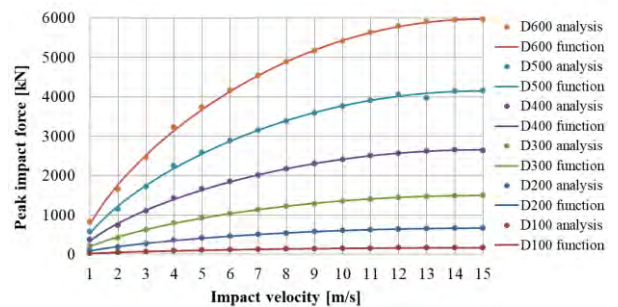


図 4 最大衝突荷重と流木の衝突速度および直径の関係

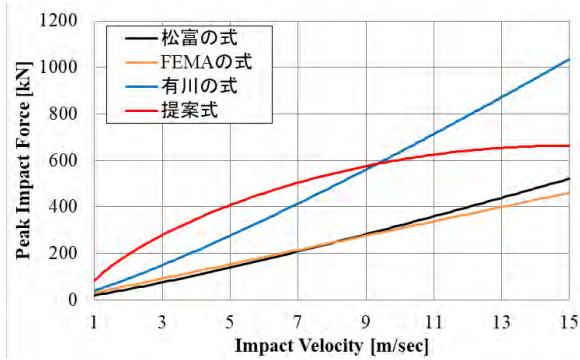


図 5 最大衝突荷重と流木の衝突速度の関係の既往の実験式との比較 (D=200 mm)

3.3 防潮堤の厚さの違いによる検討

防潮堤の厚さを変えたときの、流木衝突による防潮堤の損傷度合いの検討を行う。解析に用いる防潮堤の大きさは、高さ 5 m、幅 5 m とし、厚さは 150 mm、300 mm、600 mm、1000 mm および 2000 mm の合計 5 ケースを考える。衝突に用いる流木の直径は 600 mm、衝突速度は 15 m/sec とし、防潮堤に対して垂直に衝突させる。図 6 に防潮堤への流木衝突モデルを、表 2 に流木衝突による鉄筋コンクリート壁の破壊の様子を示す。防潮堤の境界条件は、衝突面と背面を除いた側面(図 6 の緑色の面)の節点の並進自由度を完全拘束する。

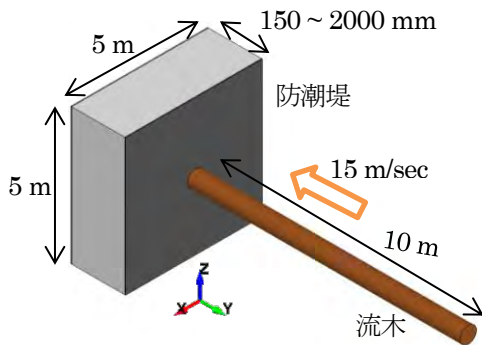


図 6 防潮堤への流木衝突モデル

厚さ 150 mm の場合、衝突面および背面の鉄筋が露出し、流木は貫通する。ここで、衝突部が空洞になっているのは、破壊基準に達した要素は削除を行っているためである。コンクリートクラックは衝突側では一面に発生し、背面では円形と放射状のクラックパターンが見られる。厚さ 300 mm の場合、衝突側の鉄筋が露出し、流木の貫入が発生する。背面側の鉄筋は破壊基準には達していないが、塑性領域に達している。厚さ 600 mm の場合、衝突側と背面側で同心円状のクラックが生じる。防潮堤断面には、背面側に行くにつれて広がるようにせん断破壊によるシアコーン破壊が発生する。厚さ 1000 mm の場合、防潮堤の断面にシアコーン破壊が発生しているが、厚さ

600 mm と比較すると破壊領域は大幅に減少している。厚さ 2000 mm の場合、衝突側のかぶりにわずかなクラックが発生するのみで、シアコーン破壊も発生しない。

4. 複数本の流木衝突と複数回の流木衝突の検討

複数本の流木を衝突させる解析では、防潮堤モデルは 3.3 節で用いた防潮堤の幅を 8 m に拡張し、厚さを 2 m とする。流木の衝突速度は 15 m/sec とする。ここでは複数の流木が同時に衝突するケースと、同じ衝突位置に流木が複数回衝突するケースを考える。複数回の衝突ケースでは、1本の流木が同じ場所に 10 msec 間隔で衝突すると仮定して解析を実施する。また、2 回目以降も 15 m/sec で衝突させる。表 1 に解析ケースの一覧、図 7 にケース M-7 の解析モデル図を示す。

表 1 複数衝突解析の解析ケース一覧

| ケース名 | 流木の本数 | 流木の衝突回数 |
|------|-------|---------|
| M-1 | 1 | 1 |
| M-3 | 3 | 1 |
| M-5 | 5 | 1 |
| M-7 | 7 | 1 |
| C-6 | 1 | 6 |

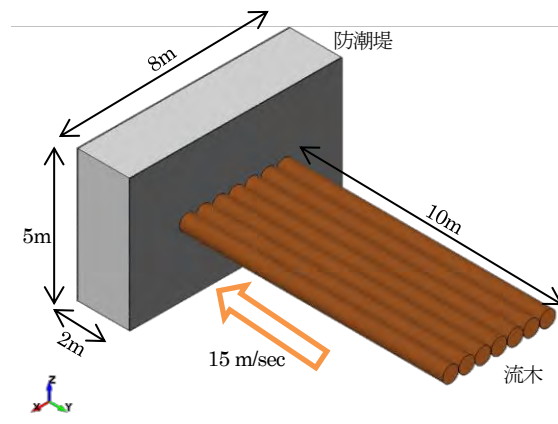


図 7 7本同時衝突(M-7)の解析モデル

図 8 に流木の同時衝突本数と最大荷重の関係図を、表 3 に複数の流木を防潮堤に衝突させたときの防潮堤の衝突面および背面の損傷と、1/4 カット領域の損傷の様子を示す。図 8 の関係図より、最大衝突荷重と流木の本数は線形関係にあることがわかる。M-1 では衝突面に流木断面と同じサイズの領域にクラックが発生するだけで、防潮堤全体の損傷には至っていない。M-3 では衝突面と反対面でもクラックが発生している。これは防潮堤に流木が衝突したことで、全体曲げ変形が生じ、裏面で引張が大きくなったためクラックが発生している。M-5 では表面と裏面にクラックが発生する領域が M-3 と比較して大

きくなっていることがわかる。またシアコーン破壊も発生している。M-7ではM-5より大きな領域で衝突面と裏面両方にクラックが発生し、シアコーン破壊の規模も大きくなっている。以上より、厚さ2 mの鉄筋コンクリート造の防潮堤に流木が衝突した時、最大衝突荷重は流木の数に比例し、1本の流木衝突で表面のクラックが発生し、3本になると裏面破壊が発生、5本以上でさらにシアコーン破壊が発生することがわかる。

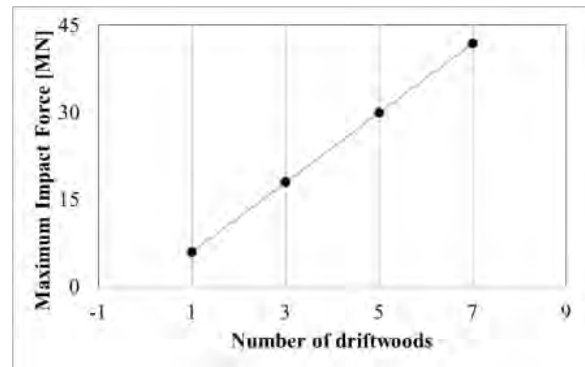


図 8 同時に衝突する流木の本数と最大衝突荷重の関係

表 2 流木衝突による鉄筋コンクリート壁の破壊の様子 (D=600 mm, V=15 m/sec)

| 厚さ | 衝突面 | 背面 | 1/2 断面図 クラック発生 |
|---------|-----|----|-------------------|
| 150 mm | | | |
| 300 mm | | | |
| 600 mm | | | |
| 1000 mm | | | |
| 2000 mm | | | |

表 3 複数本の流木衝突による鉄筋コンクリート壁の損傷の様子 ($D=600\text{ mm}$, $V=15\text{ m/sec}$)

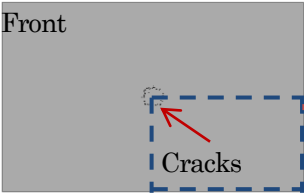
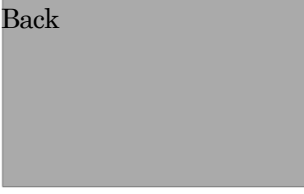
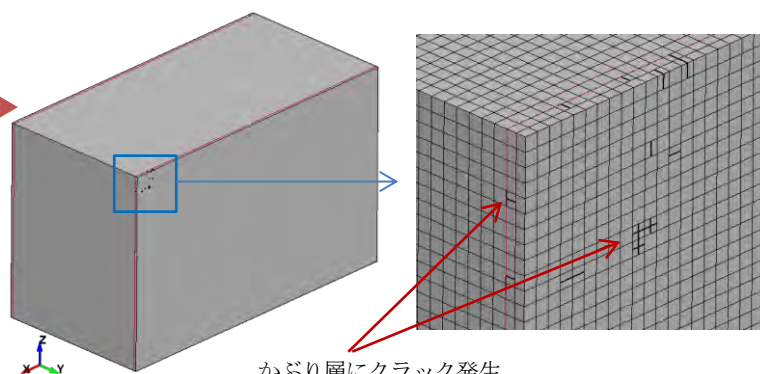
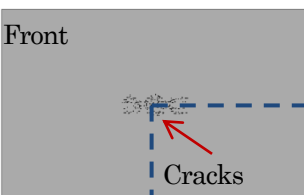

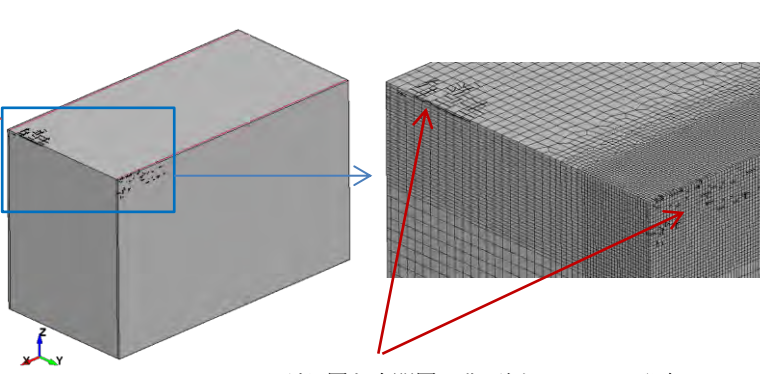
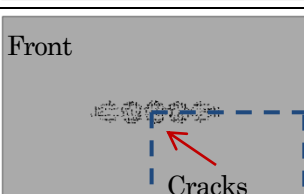
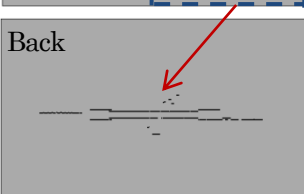
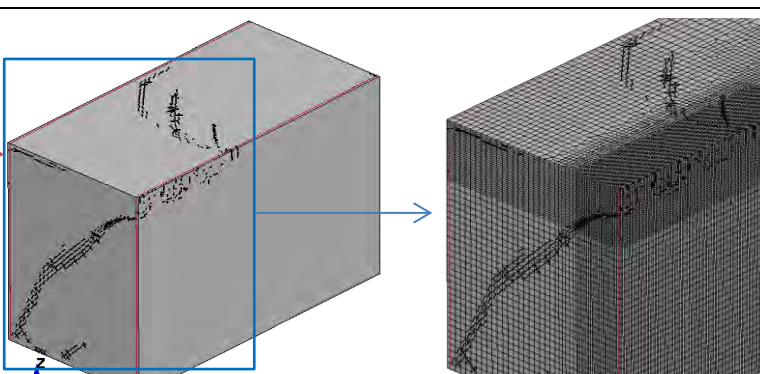
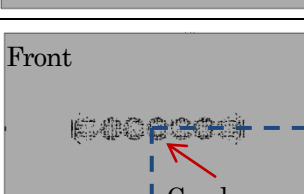

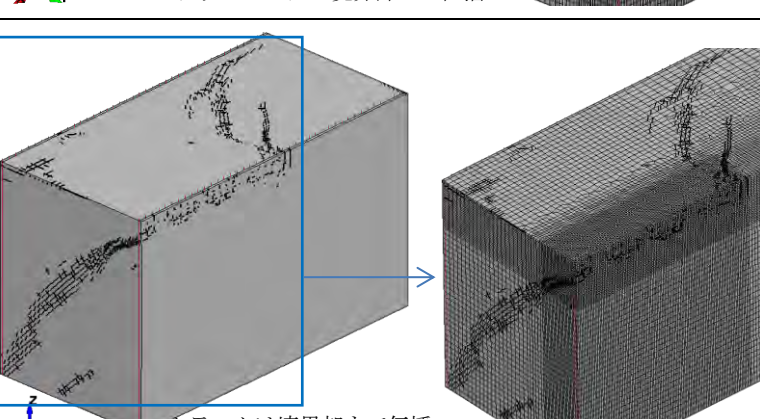
| 流木本数 | 衝突面と背面のクラック | 1/4 断面図 |
|------------|--|--|
| 1 (M-1) | <p>Front</p>  <p>Cracks</p> <p>Back</p>  |  <p>かぶり層にクラック発生</p> |
| 3 (M-3) | <p>Front</p>  <p>Cracks</p> <p>Back</p>  |  <p>かぶり層と中間層の背面側にクラック発生</p> |
| 5 (M-5) | <p>Front</p>  <p>Cracks</p> <p>Back</p>  |  <p>クラックはモデル境界部まで伝播</p> |
| 7 (M-7) | <p>Front</p>  <p>Cracks</p> <p>Back</p>  |  <p>クラックは境界部まで伝播</p> |

表 4 複数回の流木衝突による鉄筋コンクリート壁の損傷の様子 ($D=600\text{ mm}$, $V=15\text{ m/sec}$)

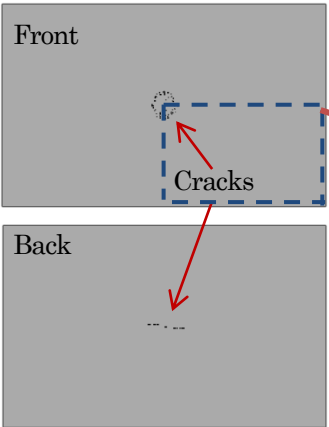
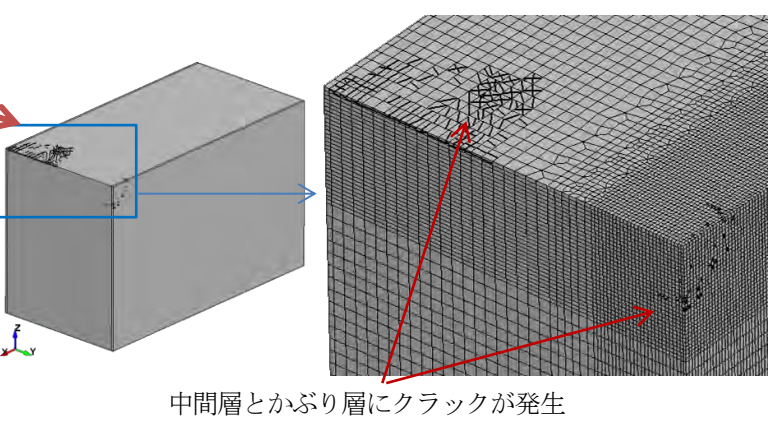
| 衝突回数 | 衝突面と背面のクラック | 1/4 断面図 |
|------------|---|--|
| 6 (C-6) |  |  <p>中間層とかぶり層にクラックが発生</p> |

表 4 に 1 本の流木が防潮堤に複数回衝突するときのコンクリートの損傷の様子を、図 9 に衝突荷重の時刻歴を示す。図 9 より、C-6 ケースでは複数回衝突しても最大衝突荷重に変化はなく、一定であることがわかる。これは表 4 の 1/4 断面図からわかるように、衝突面側は表面のみのクラック発生にとどまり、防潮堤内部にも大きな損傷が発生しないからと考えられる。しかし裏面側のクラックは、6 回連続衝突後では 3 本同時衝突の M-3 以上の損傷が発生しており、複数本の連続衝突により防潮堤の衝突面よりも背面側に損傷が徐々に蓄積されていることがわかる。

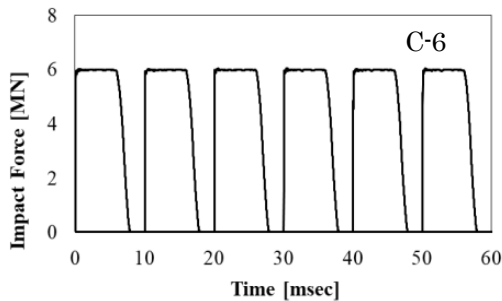


図 9 流木が複数回衝突するときの衝突荷重の時刻歴

5. 結言

津波漂流物として流木を想定し、丸太が鉄筋コンクリート造の防潮堤に衝突する際の耐衝突性能評価を実施した。

- (1) 一本の丸太の衝突荷重の特性を検討すると共に、最大衝突荷重を推定するため、丸太の直径と衝突速度に依存し、衝突時の損傷による非線形性を考慮した推定式を提案した。その結果、衝突速度 9 m/s 以下では既往の推定式の結果よりも衝突荷重が大きくなることが分かった。
- (2) 防潮堤の厚さを変えたときの防潮堤の損傷の違い

を調べ、本研究で用いたモデルでは 2 m 厚の鉄筋コンクリートであれば、 15 m/s で衝突する径 600 mm の流木による損傷は小さいことがわかった。

また、実際の災害を想定し、大型流木が防潮堤に複数本同時に衝突するケースと、1 本が連続して衝突するケースにおける防潮堤の損傷度合いについて検討した。

- (3) 複数本の同時衝突ケースでは、衝突本数と衝突荷重の関係が線形に近いことがわかり、7 本同時に衝突する場合、 2 m の防潮堤でもシアコーン破壊が発生することがわかった。
- (4) 複数回の衝突では、6 回連続衝突をさせた場合、表面の損傷は殆ど拡大しないものの、背面側の損傷は徐々に大きくなることがわかった。

参考文献

- 1) 坂本知己, “海岸林の再生に向けて” 森林科学 No. 66 October (2012) pp. 21-24
- 2) 松富英夫(1999): 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, No.621/II- 47, pp.111- 127.
- 3) FEMA (2012): Guidelines for design of structures for vertical evacuation from tsunamis 2nd Edition, FEMA P646, 174p
- 4) 有川太郎・鷺崎 誠 (2010) : 津波による漂流木のコンクリート壁面破壊に関する大規模実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1, pp.781-78
- 5) LS-DYNA (2013). Keyword user's manual, Livermore Software Technology Corporation CA.
- 6) Ottosen, N.S., "Failure and Elasticity of Concrete", RISO-M1801, July 1975.
- 7) Aghl, P.P., Naito, C.J., Riggs, H.R. (2014). "Full-scale experimental study of impact demands resulting from high mass, low velocity debris," Journal of Structural Engineering, ASCE, 140(5).