

**土木学会 原子力土木委員会 津波評価小委員会**  
**第3回 津波漂流物衝突評価WG 議事録**

1. 日時：2023年6月19日（月） 9:00～10:30
2. 場所：Webex（電中研主催）
3. 出席者：
  - <主査> 富田孝史（名古屋大学）
  - <幹事長> 木原直人（電力中央研究所）
  - <委員> 小川健太郎（東京電力 HD）、金原勲（東京大学）、嶋原良典（防衛大学校）、島村和夫（IHI）、別府万寿博（防衛大学校）、山田安平（海上・港湾・航空技術研究所）、和仁雅明（中部電力）
  - <常時参加者> 大村英昭（東北電力）、蒲池孝夫（関西電力）、佐藤栄二郎（九州電力）、鈴木俊輔（四国電力）、田中直仁（日本原電）、藤井直樹（東電設計）、二木敬右（北陸電力）、吉次真一（中国電力）
  - <幹事> 山川大貴（東電設計）、岩本哲也（東電設計）、井上真優（東電設計）、大谷章仁（IHI）、豊田真（IHI）、甲斐田秀樹（電力中央研究所）、南波宏介（電力中央研究所）、宮川義範（電力中央研究所）、新木毅（中部電力）、米津和哉（関西電力）、福本惣太（関西電力）、小池雄大（関西電力）、栗山透（関西電力）（記）
  - <オブザーバー> 市川卓也（東電設計）、森勇人（中部電力）

4. 配付資料：

- ① 資料3-1 津波漂流物衝突評価WG\_第3回\_議事次第
- ② 資料3-2 津波漂流物衝突評価WG\_第3回\_参加者一覧
- ③ 資料3-3 前回（第1回）津波漂流物衝突評価WG 議事録
- ④ 資料3-4-1 小型船舶の衝突力に関する研究
- ⑤ 資料3-4-2 小型船舶の衝突に対する施設評価に関する研究

5. 結果：

木原幹事長より配付資料の確認が行われ、続いて富田 WG 主査より挨拶が行われた。その後、議事次第に沿って、以下の議論が行われた。

(1) 小型船舶の衝突力に関する研究

豊田幹事より資料 3-4-1 に基づき小型船舶の衝突力に関する研究について説明が行われ、以下の議論が行われた。

- Q 17 ページのエンジンのモデル化の際のヤング率設定において、減率については ISO 等で決まっているのか。材料物性については、材料そのものの値を極力使用すべきであり、かつ、施設を安全側に評価するという観点からは、減率 0 のヤング率の値を使うべきであると考えます。P.17 左図の計算例の荷重変位曲線では、エンジンの位置が変位 525mm 付近の衝突終盤（荷重変位曲線が急激に減少しゼロに向かっている）となっているため、1/3 の減率が荷重変位曲線どの程度寄与しているのかが分からず、1/3 が合理的な値かについては判断し兼ねる。一方で、

p.17 右図の計算例では、荷重変位曲線の変位中央付近にエンジンが位置していることから、衝突現象の中盤でエンジンが接触しており、エンジンの影響を大きく含んでいると考えられる。当該図より、実験結果よりも解析結果の最大荷重の方が大きくなっており、エンジンのヤング率が最大荷重に与える影響は大きいと考えられる。したがって、エンジンが施設に衝突する可能性があるならば、エンジンの材料そのもののヤング率を設定するのが安全側の評価になると考える。土木学会のWGとして議論しているので、学術的な観点から、実験と解析の差がどのようなメカニズムで何故生じているのかを検討されてはどうか。例えば、p.17 右図の解析では、何故、実験結果より、解析結果の荷重が大きいのか。例えば、実験では、衝突によりエンジンと車体の結合部が破壊され、エンジンが車体から離れた影響で荷重が減少したが、解析ではエンジンと車体を剛体結合（破壊しない仮定）しているので、実験と解析で差異が出たのかもしれない。材料弾性係数の減率については、何故、1/4 でも、1/5 でなく、1/3 が合理的なのか。どのようなメカニズムでエンジンの衝突荷重が大きくなるのかを突き詰めていくのが学会のWGとしては適切なのではないか。工数観点も踏まえ、例えば、ヤング率の減率なし（減率 = 1）の解析を + 1 ケース実施し、減率 = 1/3 の解析結果との差を確認してはどうか。これであれば、1 ケース増えるだけである。両社を比較して、荷重曲線に差がないという結果であれば、エンジン剛性が荷重に与える「影響はない」又は「影響は小さい」ということになり、現時点の減率の設定でもよくと判断できると考える

- A エンジンは構造上空隙があり、また左図の自動車の衝突と同様に、船舶の衝突では先に側板等の外側の部材から破壊し、速度を減しながら衝突が進行しエンジンに到達すると考えられることから、エンジンが激しく破壊するようなことは想定していない。このことから、エンジンについては簡易にモデル化し、左図の自動車の計算例と同様のヤング率の減率 1/3 を乗じる、という考え方である。仮に右図のように減率 0 とすると過大な評価になると考えている。
- A エンジンの減率を 1/3 にした場合と減率を考慮しない場合の 2 ケースを実施してみて、その影響がほとんどないことを確認してはどうか。両ケースの結果の差が十分小さければ、エンジンの剛性が与える影響は小さく、主に質量影響のみ考慮すれば問題ないと考える。
- A 衝突の過程で、エンジンが大きく破壊するようであれば、エンジンの影響を精緻に取り扱う必要が生じると考えており、ご提案いただいたような影響検討も考慮に入れて研究を進めていく。
- Q エンジンをソリッド要素で中実としてモデル化するにあたっては、ヤング率よりも剛性に着目すべきだと思う。この観点でヤング率の減率 1/3 の根拠を理論的になんらか補強してみてもどうか。
- A ご意見を踏まえてどのような検討ができるか考えたい。
- Q 芯材については、剛性が小さく衝突に与える影響がほとんどないことからモデル化しないとのことだが、肋骨の座屈モードに対しては影響する可能性がある。芯材を無視することで座屈荷重が小さくなり衝突荷重を過少評価することになっていないか、計算結果をよく検証されたい。
- A 実際に計算をした際の破壊モードから肋骨の局部座屈が衝突にどの程度影響しているかを確認し、必要に応じて肋骨の座屈に関する検討を行いたいと考えている。
- Q 17 ページでエンジン位置に破壊が到達後に荷重が増加していないことから、エンジンの位置とソリッド要素の剛性比が重要になってくると思う。エンジンに到達するまでの減速や、エンジン周囲の破壊状況等の観点から解析結果を分析されたい。
- A エンジンが剛性に拘束されている訳ではないので、エンジン周囲の壊れ方やエンジンの固定方法の影響を受けると考えられる。今後、解析結果をよく分析したい。
- Q 船舶モデルについて船首方向の衝突に関連する部材については変更がないため、今回のモデル改良が船首衝突の解析に与える影響は小さいということでしょうか。今回改良したモデルで船首衝突解析を実施した場合における前フェーズのモデルの違いによる影響について注目している。

- A 船側・船尾衝突の際に前フェーズで考慮しきれなかった部分を補うのがモデル改良の趣旨なので、基本的には船首衝突への影響はほとんどないと考えているが、モデルの違いが船首衝突に与える影響については、今後実施する船舶モデルの簡素化の検討の中で確認していきたい。
- Q 船舶の質量を集中質量として簡単にモデル化するような方針はあるのか。
- A 前フェーズでは船舶の質量を集中質量でモデル化したが、船側衝突では質量の模擬方法が衝突に影響することが確認されたことから、今回は集中質量ではなく分布質量を設定することとしている。
- Q 6 ページで船舶メーカにヒアリングをもとに全体に質量を分布させているが、大きさの異なる船でも同様な質量分布の傾向となるのか。
- A 今回の分布は 19GT としてどうかということをヒアリングした。そのヒアリング結果に従いモデル化しているので、他の大きさの船舶については確認できていない。
- C 質量のバランスはよいと思うが、水に浮かべた場合に船体が傾くので調整が必要になると思う。
- A 現在、浮心と重心の位置を確認し、船体に傾きが生じないようにエンジンの位置を調整しているところである。

## (2) 小型船舶の衝突に対する施設評価に関する研究

岩本幹事より資料 3-4-2 に基づき小型船舶の衝突に対する施設評価に関する研究について説明が行われ、以下の議論が行われた。

- Q 平面 2 次元モデルの幅方向について、左右対称のモデルなら、対象境界条件を付与してモデル化範囲を 1/2 にしてもいいのではないかと。300m をモデル化するというのは少々非効率적と思われる。また、境界条件が設定できない場合は、境界部にインピーダンスの小さなダミーの要素を設けて、反射しないとか減衰するといった設定ができるのではないかと。解析領域を節約して、その分船舶周りの粒子サイズを小さくした方がよいと思う。
- A SPH 法では境界条件の取り扱いが難しく、今回は固定境界を設定して実施した。
- A 1-3 の検討では、簡易モデルではなく船舶形状を模擬する。その場合、船側方向の衝突だと左右対称ではないため、1-1 の検討から全体をモデル化して検討を実施した。
- C ご指摘のとおり、1/2 対称条件での解析が技術的に可能であれば、効率化して解析するのが適切と考える。一方で、流体領域の 1/2 対称境界条件については、空間固定の格子法（オイラー方式）では対称境界条件の設定はできるが、粒子法はラグランジュ方式の計算法であるため、対称条件の設定が難しい可能性があるのではないかと。粒子法特有の境界層のモデル化の影響も考えられる。これまで当方が粒子法で計算した際には、フルモデルを用いて解析を実施した。
- Q 7 ページの座標系イメージについて、短時間の衝突だと剛体的なので「力 = 運動量変化率」となると考えられる。一方で衝突時間が長くなると、運動エネルギーを持った流体から船舶が力を受けると、流体に運動エネルギーを与えながらその反力として船舶が力を受けるとでは力と運動量変化率は同等にならないように思うが、今回の設定方法の妥当性についてはどう考えているのか。
- Q 同様の疑問を持っており、力学的に同様なのかについては直ちに判断し兼ねる。まず、確認したい点として、衝突時に船体はピッチングやヨーイングの影響を受けるが、解析では船体が回転しないように固定するのか。
- A 船舶の姿勢が傾かないように制御することを考えている。
- Q 了解した。もう 1 点確認したい点として、防潮堤が船舶に衝突した後、船体回りの流体は津波のように領域全体で移動する状態を想定しているのか、それとも、船舶の周囲のごく近傍だけ（この影響が力加質量である）が移動することを考慮しているのか。想定する流体運動の範囲によって両図が力学的に同様といえるかが変わってくると思う。
- A 船体回りのごく近傍の流体のみが衝突方向に移動すると考える。

- Q 左図の、実現象で、津波と船舶が初速度を持って、防潮堤に衝突する場合には、①船体、②船体の近傍の流体、③領域全体の流体の全てが初速度を持って、防潮堤に衝突する。一方で、右図の場合には、防潮堤が、船体に衝突した後、②の船体近傍の海水のみが衝突方向に移動し、船体から遠く離れた海水、つまり、③の広い領域の海水は船体と同様には、衝突方向に移動しないのではないかと。そう考えると、左図と右図で、必ずしも、力学的に等価であるとは言えないのではないかと。最初のご指摘同様に、やや疑問が残る。
- A 7ページについて左図では「流体は壁を透過して移動し、船舶だけはバネの反発を受ける」という状態であり、船舶がバネの反発を受ける際には船舶近傍の流体のみが乱れると考えられる。左図は静止座標系、右図は流れと同じ速度で移動する座標系であり、同じ現象に対して座標系の取り方が異なるだけである。従って左図に対する右図の違いは流体の速度分を差し引いて評価することになるのみであって、力学的には同じ扱いになる。
- C 今回の議論を踏まえ、座標系の取り方については改めて整理されたい。
- Q 軸剛性の設定について、実験や衝突力解析を見ると非線形性が強い問題となっているが、これを線形ばねで取り扱うのはどのような考え方に基づくのか。先ほどの座標系の取り方についても線形であれば問題ないと思うが非線形でも同様に扱うのか。
- A 軸剛性については Haehnel&Daly 式に基づいて線形ばねを仮定して計算することとしており、軸剛性の値を  $10^6 \sim 10^8 \text{N/m}$  のレンジで振って付加質量係数に与える影響を確認する方針としている。前フェーズでは破壊の進行に伴って部材の硬さが異なる船舶の衝突力を施設側に入力する際に Haehnel&Daly 式から導出した線形の軸剛性 ( $1.3 \times 10^6 \text{N/m}$ ) を設定しており、今フェーズも同様の考え方に基づいて検討を進めたいと考えている。
- C 例えば柱のような物体が衝突し全体的に変形するような状況であれば軸剛性で設定することでよいと思うが、船舶の場合には部分的に破壊する。また柱の動的応答の検討では全質量の 1/3 程度を有効質量として考慮する等がなされている。以上を踏まえ、船舶の衝突における質量 M と軸剛性 K の物理的な意味を明確にされたい。
- C 今回対象とする船舶の衝突問題における自由水面の影響についてどう解釈すればよいか補足してほしい。

### (3) その他

- ・ 次回の開催予定については 2023 年上期の研究内容が取りまとめ次第、改めて案内する。

以上