

## (9) 3次元有限要素法解析による船舶の鉄筋コンクリート製ケーソンへの衝突解析

運輸省港湾技術研究所 ○清宮 理

ESI ASIA 安藤浩平、遠藤正司、アンドレプティジャン

1. まえがき 船舶が航行する海域に設置される防波堤や岸壁などの港湾構造物に、船舶が衝突する事例<sup>1)</sup>が毎年少なからずある。衝突により港湾施設と船舶両者に被害が生じる事例<sup>2)</sup>が多い。船舶の破損は海難事故に結びつくので安全対策を施す必要がある。この安全対策のため船舶の衝突によりどの程度の被害が両者に生じるのか事前に予測する必要がある。簡単な質点系モデル<sup>3)</sup>によりおおよその予測ができるものの、被害程度についての詳細な検討は困難である。そこで船舶、重力式ケーソン（防波堤）、水の3者を有限要素モデル化<sup>4)</sup>を行い数値計算により被害程度を推定する。この計算モデルで実際の事故例を再現しどの程度両者が一致するか調べ計算モデルの妥当性を検証する。

2. 計算手法の概要 船舶、鉄筋コンクリート構造物および圧縮性流体の3者の動的な相互作用を取り扱える3次元有限要素法プログラムPAM-CRASHを今回使用する。このプログラムは、非線形衝撃専用プログラムであり自動車、ヘリコプターなどの衝突解析に用いられている。固体要素、板（シェル）要素、梁要素、パネ要素、ハイドロダイナミック要素等が用意されている。コンクリートと鋼材は材料非線形性を考慮しVon Misesの降伏則に従うものとする。流体<sup>5)</sup>の流れは微小運動である、また圧力は流体の体積弾性率と体積歪みに比例すると仮定し、Lagrange法で記述するWilson<sup>6)</sup>の方法を採用する。すなわち流体の慣性効果のみを考慮する。時間積分は中央差分を用い、時間増分はクーランの安定条件から設定する。

3. 事故の状況 今回取り上げた事故は、総トン数498.4tfの鋼製の貨物船（積載貨物の重量869tf）が防波堤ケーソンに衝突したケースである。衝突の状況を図-1に示す。貨物船は約10ノットの航行速度で防波堤にほぼ船首から直角に衝突している。防波堤ケーソン1函の長さは15m、底面幅7.5m、高さ6.5mである。喫水は3.4mでマウンドの被覆石に船底は触れてない。図-2に防波堤上部工の破壊状況を示す。船首に接触した鉄筋コンクリートの高さ2.5mの擁壁部分（パラペット）がU字型に押し抜かれ断面が欠損している。擁壁の厚さは0.4mで5mごとに三角形のバットレスが取り付けられてある。また船首下端でケーソン外壁に衝突しており幅0.8m、高さ1.0m、深さ0.15mの陥没が外壁に生じている。防波堤ケーソンは、23cmほど全体が港内側に移動している。貨物船は、図-3に示すように船首部分がかかなり圧壊している。

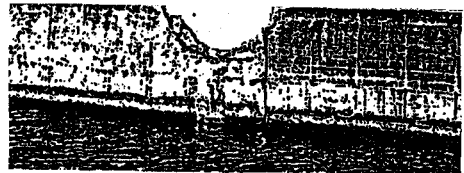


図-2 (a) 防波堤ケーソンの破壊状況（背面より） 図-2 (b) 防波堤ケーソンの破壊状況（前面より）

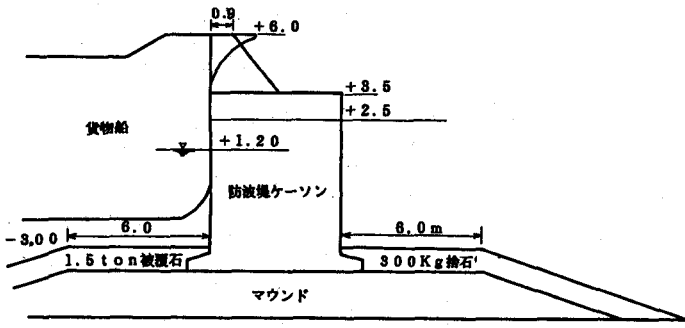


図-1 衝突の状況



図-3 船首の破壊形状

4. 計算モデル 図-4に計算モデルの概要を示す。今回対象とする貨物船は鋼製である。図-5に示すように船舶は破壊が生じた船首部分を長さ9mの範囲をモデル化する。船首以外の箇所は、今回被害を受けていないことから剛体要素とする。貨物船の船首は、鋼板と梁で構成されておりそれぞれを薄肉シェル要素と梁要素で置換する。鋼材の弾性係数を $2.1 \times 10^{11} \text{Pa}$ 、ポアソン比を0.3、降伏応力度を $2.0 \times 10^8 \text{Pa}$ 、密度を $7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ に設定する。船首のモデル化を図-6に示す。貨物船の総要素数は12000個である。防波堤ケーソンは本体を剛体要素、衝突箇所の擁壁と外壁の2箇所を前壁を板要素に置換する。防波堤ケーソンのモデル化を図-7に示す。擁壁部分を400個、外壁を100個の板要素に分割する。このコンクリート要素の弾性係数を $1.96 \times 10^{10} \text{Pa}$ 、ポアソン比を0.17、降伏応力度を $1.96 \times 10^7 \text{Pa}$ 、密度を $1.47 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ に設定する。海底地盤と防波堤ケーソン底面とはバネ要素で結合する。バネ要素ではクーロンの降伏則で摩擦で考慮する。今回摩擦係数として0.6-0.5を用いる。防波堤ケーソンの総要素数は2500個である。周辺の海水はハイドロダイナミック要素を使用し防波堤ケーソン後方30mを図-8のようにモデル化する。また個のモデルの後方にバネ要素を取り付け後方への力の伝達の境界条件を満足させる。体積弾性率は $2.23 \times 10^7 \text{Pa}$ とする。貨物船が防波堤ケーソンに接触する節点にバネ要素を新たに取付力の伝達を図る。

貨物船は速度5m/sで防波堤ケーソンに衝突するとし、時間増分は $4 \times 10^{-8} \text{s}$ で衝突後の計算時間は0.5sである。従って総計算ステップは12500である。計算ケースは、表-1に示す6ケースである。ケース6が最終の計算結果で他のケースは予備検討である。

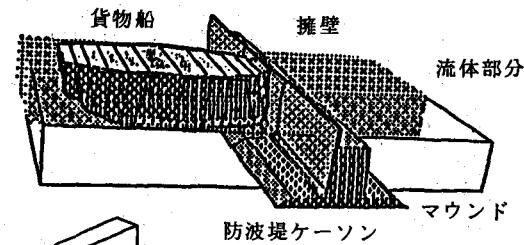


図-4 計算モデル

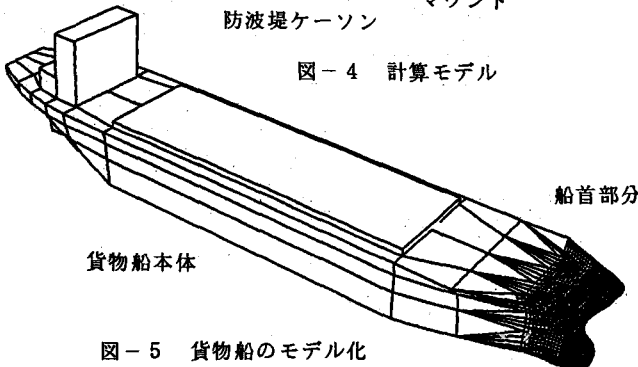


図-5 貨物船のモデル化

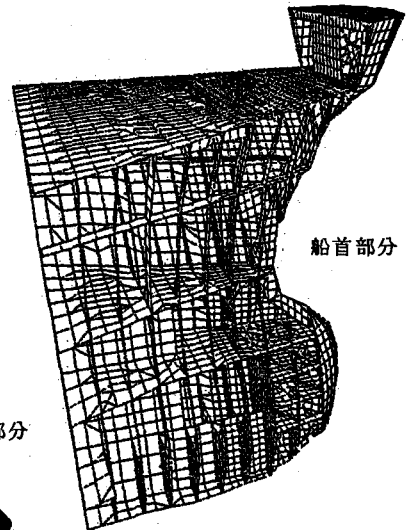


図-6 船首部分の要素化

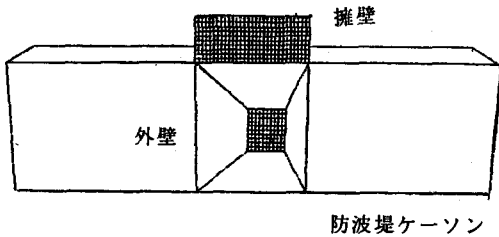


図-7 防波堤ケーソンのモデル化

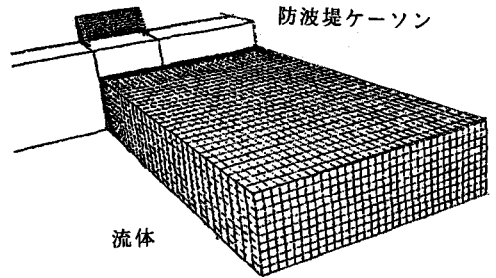


図-8 流体のモデル化

### 5. 計算結果

計算結果の一覧を表-2に示す。計算より得られた接触荷重の時間的な変化を図-9に示す。接触荷重は0.2sから急激に大きくなり0.2sよりほぼ一定値となった。最大接触荷重は11400tfで0.4sのとき生じ、その後接触荷重は急激に減じた。船首と防波堤ケーソンのバトレス部分の衝突は0.1s付近で生じ1000-2800tfの接触荷重である。最大接触荷重は貨物船と防波堤ケーソンへの接触により生じたと考えられ、両者の破壊には直接的には寄与していない。船首の静的な強度は、500tf程度と予測<sup>(2)</sup>されるので動的な解析の方がかなり大きな接触荷重を与えたことになる。船首が防波堤ケーソンの擁壁部分に衝突した状況を図-10に示す。船首が擁壁に食い込んでいる状況が良く再現できている。各ケースとも接触荷重の傾向はほぼ同じであるが船首の破壊形態は防波堤ケーソンを剛に設定した場合の方が実際より大きかった。また防波堤ケーソンの移動量は摩擦係数を0.6に設定したとき0.3mで0.6に設定したとき0.2mとなり摩擦係数によりかなり異なる。摩擦係数には動的な影響を考慮し一般的には値を低減する必要があるが、ここでは深く検討できなかった。また流体の影響を考慮しないときには、防波堤ケーソンの移動量は0.44-0.79mとケース6の倍以上となった。貨物船、防波堤ケーソンの滑動、ケーソン壁の破壊および流体でのエネルギー吸収は、各要素での応力と変位量との積分から求められる。エネルギー吸収は順に4.60, 1.15, 0.40, 0.25MJであり、貨物船の船首の破壊により衝突エネルギーの大半(72%)が消費された。

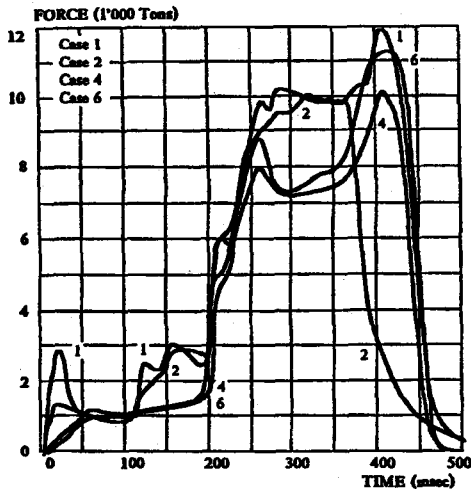


図-9 接触荷重の時系列

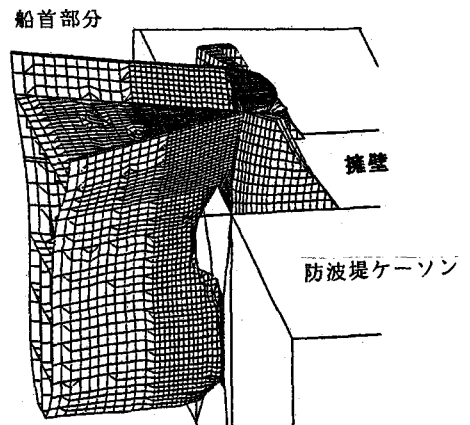


図-10 計算での接触状況

表-1 計算ケース

		流 体	海底地盤
ケース1	船舶の剛壁への衝突	なし	なし
2	船舶の剛体ブロックへの衝突	なし	あり、非線形ばね
3	衝突力を剛体ブロックに <input/>	なし	あり、非線形ばね
4	船舶のコンクリート板への衝突	なし	あり、非線形ばね
5	船舶のコンクリートケーソンへの衝突	なし	なし
6	船舶のコンクリートケーソンへの継手	あり	あり、非線形ばね

表-2 計算結果のまとめ

	最大接触力 (tf)	発生時間 (S)	ケーソン移動量 (m)
ケース1	12100	0.4	—
2	10400	0.3	0.516
3	—	—	0.790
4	10400	0.4	0.477
5	9100	0.25	—
6	11400	0.4	0.244

6. 結論 今回の計算より得られた主要な結論は、以下のとおりである。

(1)今回用いた計算プログラムは、実際の防波堤ケーソンと貨物船の衝突状況をかなり良く再現できた。貨物船の船首の破壊形状は、コンクリート壁のモデル化に、防波堤ケーソンの移動量はマウンドと防波堤ケーソンの摩擦係数に主に依存した。

(2)流体の影響を考慮しない計算モデルでは、防波堤ケーソンの移動量は2倍以上となり流体の存在の影響が大きかった。

(3)防波堤ケーソン壁を剛体として取り扱くと船首の破壊形状が実際より大きく評価された。しかし今回のコンクリートのモデル化では逆に船首の破壊が実際より小さく評価された。コンクリートの降伏則の影響によると考えられ今後の課題となった。

(4)接触荷重は、衝突後しばらくして急激に増加し0.4sで最大となりその後急激に減少した。船首とケーソン壁との破壊は、比較的早い0.1sごろに生じた。衝突によるエネルギーは、船首の破壊で72%を消費した。

7. あとがき 今回の計算でかなり精度良く船舶の海洋構造物への衝突現象を再現できたが、船首の破壊の範囲、防波堤ケーソンの移動量など実際と少し異なった。今後流体のモデル化の範囲、コンクリートの降伏則、摩擦係数の設定などについて再検討したい。

8. 参考文献 (1) 海難審判庁：海難審判の現況（毎年発刊）

(2) 清宮 理：港湾構造物への船舶の衝突、落石等による衝撃問題に関するシンポジウム、土木学会、1991年3月、pp.15-18

(3) 清宮 理、酒井久和：船舶の衝突による防波堤ケーソンの安全性の検討、土木学会第44回年次講演会（I部門）、平成元年10月、pp.576-577

(4) S. AITA, E. HAUG and D. ULRICH: Supercomputer Simulation in Applied Mechanics and Perspectives in Composite Damage, Internal Fluid Dynamics and Crashworthiness, ATA 2nd International Symposium, Torino, Italy, April 26-27, 1988

(5) 大坪英臣：流体-構造関連問題（1）、数理科学No.282, Dec., 1986, pp.36-42

(6) E. I. Wilson and M. Khalvati: Finite Elements for Dynamic Analysis of Fluid-solid Systems' Int. J. Num, Math. Eng., Vol. 19, 1983, pp. 1657-1668