

# 船舶と橋梁の杭式緩衝工との衝突解析

清宮 理<sup>1</sup>・宮城敏明<sup>2</sup>・石川雅美<sup>3</sup>・門倉博之<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 運輸省港湾技術研究所 構造部 (〒239 横須賀市長瀬3丁目1番1号)

<sup>2</sup>正会員 東急建設株式会社 技術研究所 (〒229 相模原市田名字曾根下3062-1)

<sup>3</sup>正会員 東急建設株式会社 土木設計部 (〒150 渋谷区渋谷1-11-8渋谷清水第一ビル)

<sup>4</sup>正会員 東急建設株式会社 情報システム部 (〒216 川崎市宮前区宮崎2-13-9)

船舶の橋梁への衝突による両者の被害を最小限にするため橋梁下部工に緩衝工が設置される。緩衝工の設計では衝突時の船舶と緩衝工の挙動や損傷度合を推定する必要がある。本報告では二質点系モデルおよび動的有限要素法により衝突解析を行い、船舶と杭式緩衝工の挙動と被害を推定する。また、両解析手法の違いによる衝突解析結果の比較を行う。本研究の解析結果から、船首変位や杭頭変位については、両者の解析結果間で比較的一致することが確かめられた。ただし、質点系モデル解析は、衝突時の全体的な挙動を評価する上で有効であるが、被害状況については十分追跡できない。一方、有限要素解析は、衝突時の船舶の損傷過程の追跡、緩衝工の発生断面力の評価および衝突位置による挙動の差を把握する場合に有効であることが確認できた。

**Key Words :** *pile type fender, bridge, ship collision, finite element method, crash analysis, mass-spring model*

## 1. はじめに

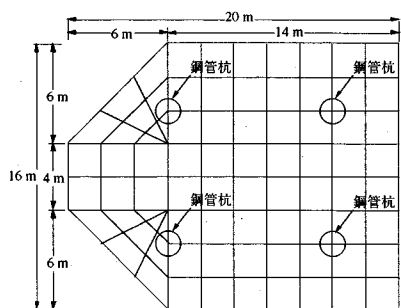
「海難審判の状況」<sup>1)</sup> および「船舶の衝突力調査報告書」によれば、昭和36年から昭和55年までの国内の港湾・海岸構造物への衝突事例は474件となっている。船舶の構造物への衝突角度は90度が全体の474件数中1/4を占めるものの、残り3/4の衝突角度は0度から90度までと多様である。船首からの衝突は、衝突速度も早く大きな被害を船舶と港湾構造物に与える。また、港湾区域での船舶の衝突速度は10ノット未満(約5.0m/sec)で衝突した場合が大半であり、その場合、一般に船舶の方が港湾構造物より被害を受けやすい。また、衝突事故を起こした船舶は、中型(500G.Tクラス)および小型船舶が多い。橋梁への衝突例も幾つか報告されている<sup>2)</sup>。衝突事故の原因として操船間違いや気象の悪化などが挙げられている。

近年、本州四国連絡橋、東京湾横断道路、関西国際空港連絡橋などにみられるように、船舶が輻輳して航行する海域に大型の橋梁が建設されることが多くなった。社会的に重要度の高い橋梁では、船舶と橋梁との衝突による被害を小さくするため緩衝工が設けられる。一般的に緩衝工の設計<sup>3)</sup>では多くの条件を想定しなければならない。すなわち、船舶の大きさ、船舶の航行速度、衝突方向位置などによって、緩衝工が受ける荷重が異なるた

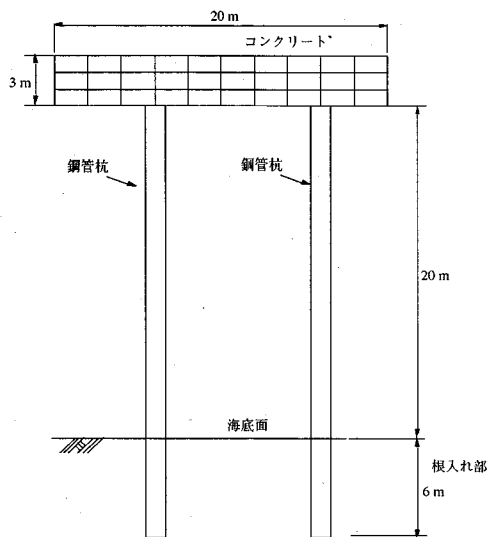
め、それぞれの状況に応じて緩衝工が十分に機能し安全性を有するよう設計しなければならない。また、衝突による船舶の損傷も最小限に留め沈没を免れることが必要である。

緩衝工が受ける外力は、船舶の衝突による動的な荷重である。しかしながら、今まで緩衝工の構造設計<sup>4),5)</sup>では、船舶と緩衝工のエネルギー保存および衝突により生じる動的荷重を静的荷重に置き換えて力の釣り合いを基に行ってきた。従来の静的な設計法では、実際に起こりうる多様な衝突状況を考慮することが困難である。すなわち、船舶や緩衝工の衝突の時間経過の中で衝突箇所や衝突形態などの要因による破壊の詳細な状態が把握できない。そこで、衝突による船舶と緩衝工の挙動や損傷度合の把握を目的として、構成材料の材料非線形性を考慮した動的解析による衝突解析を行う。

本報告では、現在提案されている緩衝工の中から杭式緩衝工を取り上げ、二質点系モデルによる解析(以下、質点モデル解析)および動的有限要素法による解析(以下、有限要素解析)を行う。質点モデル解析は、簡易な計算方法で計算時間も短く、また、入力条件に設定もさほど労力を必要としない。設計に使用するのに便利である。一方、有限要素解析は、質点モデルと比較して入力モデルの作成に大きな労力を必要とするとともに演算時間も長い。しかしながら、船舶や緩衝工の構造を忠実に



平面図



断面図

図-1 緩衝工の構造

モデル化でき、破壊の進展状況も追跡できる利点がある。今回、船舶の衝突位置および航行速度をパラメータにして計算を実施し、それぞれの解析手法の違いによる船舶と緩衝工との衝突現象の比較検討を行うとともに両解析手法の有効性について考察を行った。

## 2. 解析モデル

### (1) 解析対象

今回の解析対象は、緩衝工として杭式構造物、衝突船舶は500G.Tの貨物船である。緩衝工の構造を図-1に示す。この形式の緩衝工は、東京湾横断道路の橋梁に採用されている。緩衝工の上部はコンクリートブロックで船舶の衝突面側にはテーパが付けられている。下部は鋼管杭で構成され海底地盤に固定されている。この杭式緩衝工は、海洋橋梁の橋脚部の前面に独立して設置される。船舶の構造概要を図-2に示す。この貨物船は日本での標準船であり隻数も多いので今

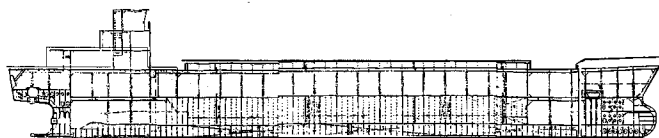


図-2 船舶の構造概要

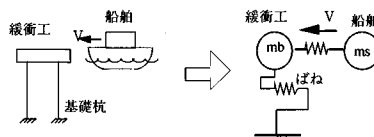


図-3 質点モデル

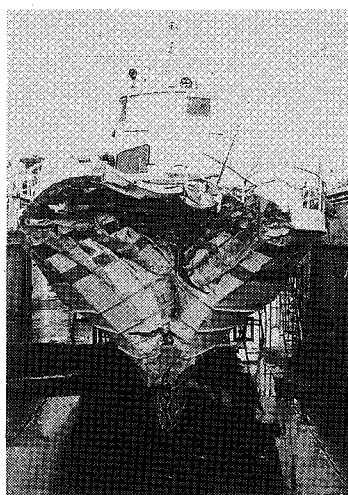


写真-1 船首の被害

回取り上げる。船舶と緩衝工との衝突形態は船首衝突、船尾衝突、船腹漂着など様々であるが、ここでは衝突事例とした数が多く、また船舶の被害も大きい船首衝突を取り上げる。船首の破壊状況の一例を写真-1に示す。船首衝突により船首部分が圧壊している。しかしながら、船首以外の部分の被害は見られず、被害は船首に限定されている。船首衝突で良く見られる破壊形態である。

### (2) 質点モデル解析

#### a) 計算方法

質点モデルによる解析<sup>6),7)</sup>では、図-3に示すように船舶および緩衝工をそれぞれ一質点に置き換え、接触力および杭の抵抗力をばねに置き換える。この場合、両者の力の釣合から式(1)が得られる。杭および接触力の荷重変位関係を非線形(今回バイリニアの関係)として取り扱う。

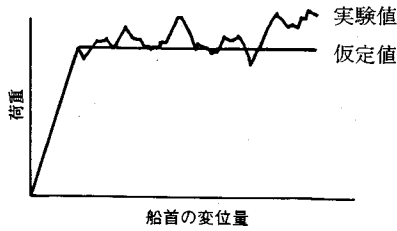


図-4 荷重と船首の変位量

$$\left. \begin{aligned} m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s &= -F(x_s - x_b) \\ m_b \ddot{x}_b + c_b \dot{x}_b &= F(x_s - x_b) - F_b(x_b) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで、添字bは緩衝工、sは船舶を示す。mは有効質量、 $\ddot{x}$ は加速度、 $\dot{x}$ は速度、xは変位、cは減衰係数を表し、 $F(x_s - x_b)$ は船舶と緩衝工の接触力、 $F_b(x_b)$ は緩衝工の杭の抵抗力を表す。

上式を $\ddot{x}_b = \ddot{x}_s = x_b = 0.0$ 、 $x_s = \ddot{x}_s = 0.0$ 、 $\dot{x}_s = v$ の初期条件でニューマークβ法で数値積分を行う。ここでvは、船舶の航行速度である。また、今回検討する範囲(衝突速度と衝突時間)では減衰定数の影響はほとんど無視できるので減衰定数は0.0とする。積分時間間隔は1msecとし、計算時間は衝突後、船舶と緩衝工が再度離れるまでとし、船舶および緩衝工における各々の質点変位を求め、両者の相対変位にばね定数を乗じて接触力を算出する。

### b) 船首の強度と変形

船首の荷重変位関係では、船首の破壊強度と許容変形量の設定が必要である。船首衝突では船首が傾斜しているため、衝突初期では接触面が小さく、衝突が進行するにつれ船首の圧壊が進行していく。圧壊の進行につれ、接触荷重は船首の変形量にほぼ直線的に比例する。船首の傾斜部がほぼ破壊されると変形量が進んでも、この接触荷重はほぼ一定となる。この状況を図-4に示す。ほぼ一定値に達したときの圧壊荷重は船首部側板の座屈荷重とほぼ等しいとされている。座屈強度 $\sigma_c$ と船首強度 $P_c$ は式(2)および式(3)により計算できる<sup>4)</sup>。

$$\sigma_c = k \cdot \pi^2 \cdot E / 12(1 - \nu^2) \cdot (t/b)^2 \leq \sigma_y \quad (2)$$

ここに、弾性係数 $E = 2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ 、ポアソン比 $\nu = 0.3$ 、降伏応力 $\sigma_y = 235.3 \text{MPa}$ と設定する。また、kは座屈係数、tは船側外板厚、aは横肋骨心距、bは縦肋骨心距を表す。

$$P_c = 2 \cdot D \cdot t \cdot \cos \theta \cdot \sigma_c \quad (3)$$

ここに、Dは船の深さ、 $\theta$ は船首角度を表す。

船首部の標準型と標準寸法値は、運輸省鋼船構造規定などにより算出する<sup>8)~10)</sup>が、それぞれを図-5と表-1に示す。

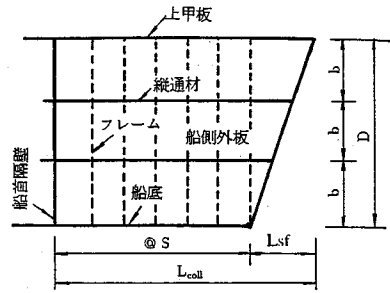


図-5 船首部の標準型

表-1 船首部の標準寸法値

構造寸法	記号	標準寸法	単位
船の全長	L	-	m
横肋骨心距	a	550 + 2L	mm
縦肋骨心距	b	450 + 2L	mm
座屈係数	k	$(b/a + a/b)^2$	-
船側外板厚	t	$0.82 \sqrt{L} + 2.5$	mm
船の深さ	D	0.08L	m
船首部先端角度	2θ	35~70	度
船首隔壁位置	L <sub>coll</sub>	0.1L	m
船首部傾斜の長さ	L <sub>sf</sub>	0.25D	m

表-2 船首部諸元

G.T	L(m)	D(m)	a(mm)	b(mm)	k	t(mm)	2θ(度)	δ <sub>sf</sub> (m)	δ <sub>sa</sub> (m)
500	58.69	4.71	570	670	4.11	9.0	35	1.18	3.91

圧壊荷重と圧壊量の関係は式(4)のように表すことができる<sup>4)</sup>。船首部の許容変位量は船首隔壁位置までの2/3とする。これ以上圧壊が進むと船舶が沈没する恐れがある。

$$\begin{aligned} F_s &= \delta_s / \delta_{sf} \cdot P_c \quad (0 \leq \delta_s \leq \delta_{sf}) \\ F_s &= P_c \quad (\delta_{sf} \leq \delta_s \leq \delta_{sa}) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $F_s$ は船首に作用する荷重、 $\delta_s$ は荷重 $F_s$ における船首部の変位量、 $\delta_{sf}$ は船首部傾斜部の長さ( $\delta_{sf} = L_{sf} = 0.25D$ )、 $\delta_{sa}$ は船首部の許容変位量( $\delta_{sa} = 2/3 L_{coll} = 2/3 \cdot 0.1L$ )とする。

以上の計算から算定された諸数値を表-2に示す。求められた船首の荷重変位曲線は図-6に示すようになる。

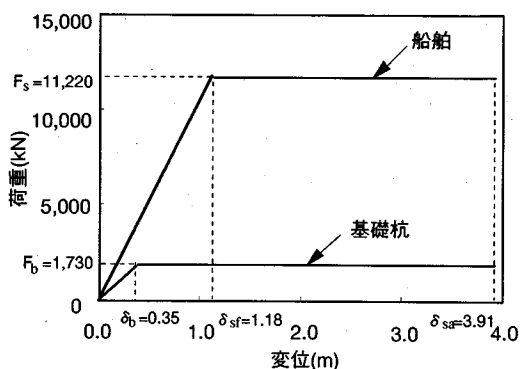


図-6 荷重変位曲線

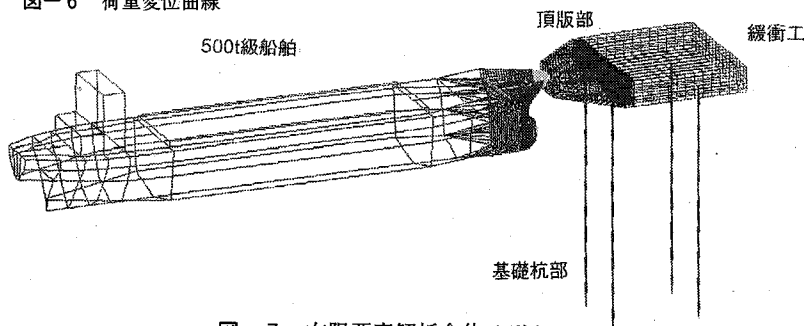


図-7 有限要素解析全体モデル

表-3 質点モデル解析入力データ

入力項目	ケース名	ケース1	ケース2
船の航行速度 (ノット)		10	20
船の質量 (t)		18.3	
船の減衰定数		0.0	
緩衝工の質量 (t)		217.3	
緩衝工の減衰定数		0.0	
船舶の圧壊荷重 $F_s$ (kN)		11,220	
杭の降伏荷重 $F_b$ (kN)		1,730	

### c) 緩衝工

緩衝工は水深20mの海域に設置されていると仮定する。緩衝工に船舶が衝突した場合、基礎杭部分が降伏し、上部工は破壊しないものと仮定する。すなわち、上部工は剛体とする。緩衝工の上部工のコンクリートブロックの寸法は、長さ20m、幅16m、高さ3mで、その場合の緩衝工の質量は217.3tである。緩衝工の基礎杭は、外径 $\phi=1,600\text{mm}$ 、鋼板厚さ $t=19\text{mm}$ 、杭長 $L_b=26.0\text{m}$ の鋼管杭4本と設定する。鋼管杭はN値10の粘性土地盤に打設されており、海底面から6mの位置から下を根入れ長とする。鋼管杭の弾性係数は $E_p=2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ 、断面2次モーメント $I_p=2.94 \times 10^2 \text{m}^4$ 、断面係数 $Z_p=36,800 \text{cm}^3$ と設定する。また、鋼材の降伏応力 $\sigma_0$ を235.3MPaと設定する。ここで、基礎杭を先端固定、根入れ部をバネ支承の静的フレーム構造として上記の条件を設定すると、荷重が1,730kNの時、基礎杭の降伏変位 $\sigma_0$ は0.35mとなる。なお、降伏後はバイリニアで表される完全弾塑性と仮定する。その場合の荷重変位曲線は図-6のように表すことができる。

以上、質点モデル解析に用いる入力条件の一覧を表-3に示す。今回、船舶が船首から航行速度10ノットおよび20ノットで緩衝工に衝突する場合の2ケースを検討する。10ノットは橋梁設置地点の域内でのほぼ最大の速度である。速度20ノットは通常の沿岸航行ではあり得ないが、緩衝工や船舶の最終的な破壊の形態を確認する目的で設定する。

### (3)有限要素解析

#### a) 使用プログラムの概要

衝突による船舶の破損状態および緩衝工の基礎杭に生じる変形や断面力の詳細な値の算出を目的に、材料非線形性を考慮した動的有限要素法解析を行う。解析ソフトは、三次元有限要素法プログラムPAM-CRASHを使用する。このプログラムは、接触状況が時間毎に異なる接触問題を取り扱える衝撃問題専用のプログラムである。時間積分は中央差分法による陽解法で行い、時間増分はクーランの安定条件により制御されている。用意されている要素の種類は、固体要素、板要素、梁要素、ばね要素、剛体要素などでそれぞれ材料非線形性を取り扱える。近年の大型コンピュータの発達で数十万自由度の計算モデルでも現実的な計算時間で解析可能であり、自動車や列車の衝突問題、飛行体の衝突問題などに利用されている。

#### b) 計算条件

図-7に全体の有限要素解析モデルを示す<sup>11), 12)</sup>。船体のモデルは船首部分(舳先から9mの範囲)とその他の部分(50mの範囲)とに分ける。その他の部分は固体要素とする。船首部分に被害が集中し、船首以外は破壊に直接影響を与えないと考えたためである。船首部分は薄肉シェル要素とビーム要素でモデル化する。船首の要素分割の状況を図-8に示す。鋼材の弾性係数は、 $2.06 \times 10^5 \text{MPa}$ 、ポアソン比0.3、降伏応力を235.3MPa、密度を $7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ と設定する。

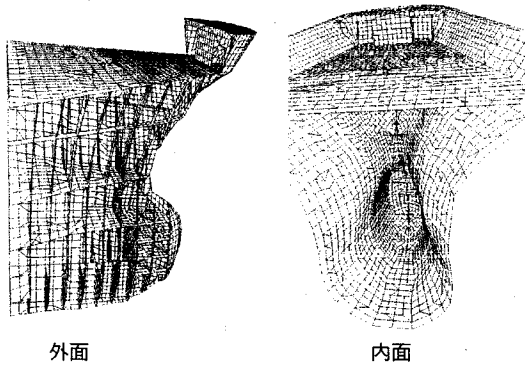


図-8 有限要素解析船首モデル

表-4 有限要素計算ケース

ケース名	航行速度 (ノット)	衝突位置
3	10	上部
4	10	下部
5	20	上部
6	20	下部

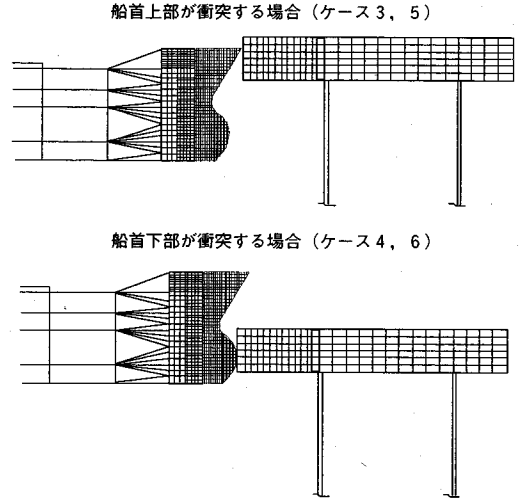


図-9 衝突位置 (船首上部、下部)

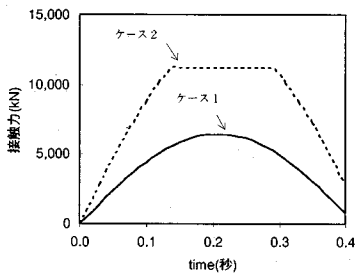


図-10 接触力

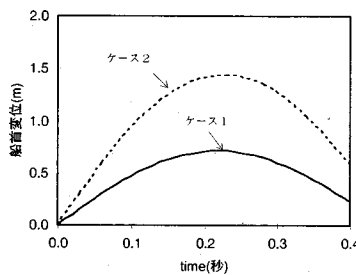


図-11 船首変位

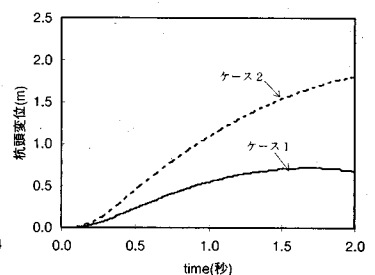


図-12 杭頭変位

緩衝工の上部工は固体要素でモデル化を行う。コンクリートの弾性係数は、 $1.47 \times 10^4 \text{MPa}$ 、ポアソン比0.2、密度を  $2.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$  と設定する。また、基礎杭は Von Mises の降伏則に従う弾塑性性ビーム要素とし、鋼材は船首と同様の材料定数と設定する。

要素数は、船舶が12,000個、緩衝工が4,000個である。周囲の水の部分はモデル化していない。有限要素法での接触力は、船首と緩衝工が接触した節点での節点力を累加して求める。有限要素解析は、船舶の航行速度を10ノットと20ノット、衝突位置を船首上部と船首下部と設定する。衝突位置を図-9に示すが、船首上部の衝突は船舶がほぼ満載の状況、下部の衝突は空載の状況に対応する。船首下部の衝突に関しては従来の設計や質点系モデルで考慮されていない。今回の計算では、船首の形状による解析結果の違いを確認することを目的として、船の質量は一定とする。有限要素法の計算ケースを表-4に示す。なお、今回の数値積分計算の時間間隔は  $4 \times 10^{-6} \text{sec}$  で、その場合の解析時間は1.0secである。また、計算ステップは25万回となる。

### 3. 解析結果

#### (1) 質点モデル解析結果

図-10に速度10ノットおよび20ノットにおける船舶と緩衝工との接触力を示す。速度が10ノットの場合、最大接触力は衝突後増加して0.2秒後に6,440kNとなった。0.4秒後に船舶が緩衝工から離れた。ただし、船首傾斜部全体の圧壊には至らなかった。速度が20ノットの場合、0.15秒後から0.29秒後までの範囲で最大接触力が11,220kNと一定値となり、船首傾斜部はほぼ圧壊したこととなった。図-11に速度10ノットおよび20ノットにおける船首変位を示す。速度が10ノットおよび20ノットの場合、それぞれの船首の最大変位量は0.71mおよび1.44mとなった。特に速度20ノットの場合、船首の変位量は  $\delta_{0.2}$  より大きくなったが、船首の許容変位量(3.91m)以内であった。図-12に速度10ノットおよび20ノットにおける緩衝工の杭頭変位を示す。速度10ノットの場合は1.6秒後に変位量が0.71mと最大になった。速度20ノットの場合は基礎杭の変位量は時間とともに増加した。いずれの場合も  $\delta_{0.2}$  を越え、杭が降伏した計算結果となった。



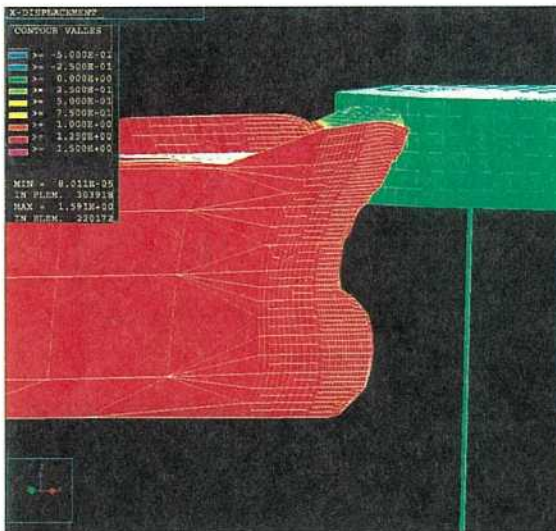


図-13 変位量が最大となる時の接触状況（ケース3）

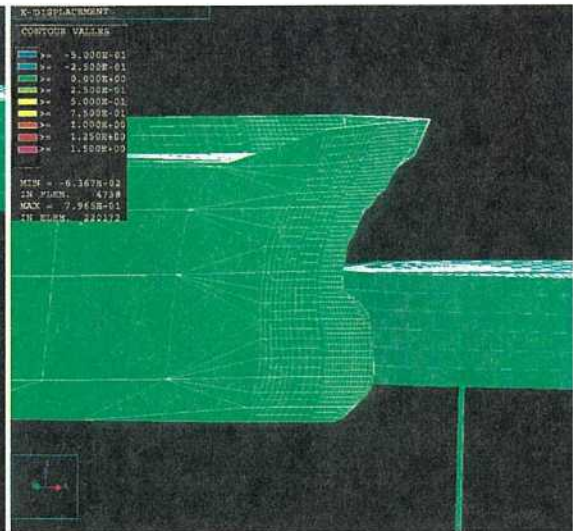


図-14 変位量が最大となる時の接触状況（ケース4）

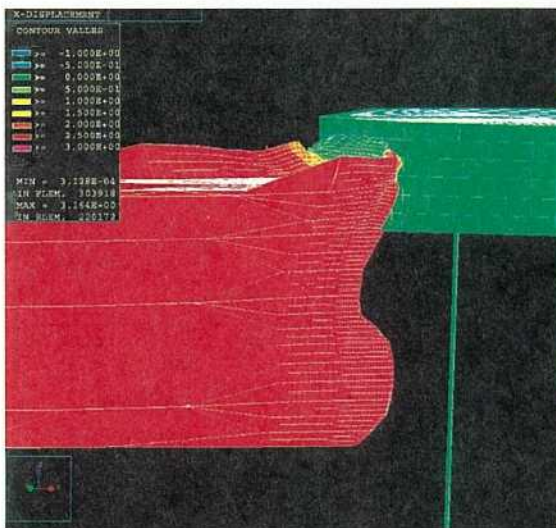


図-15 変位量が最大となる時の接触状況（ケース5）

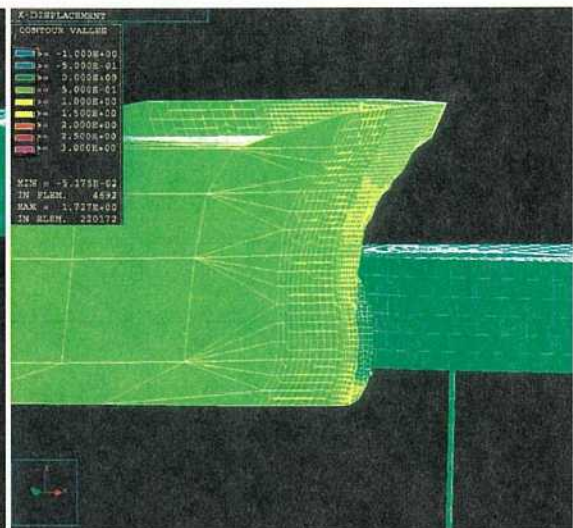


図-16 変位量が最大となる時の接触状況（ケース6）

## (2)有限要素解析結果

図-13～図-16に有限要素解析による船舶と緩衝工の接触状況を示す。接触力、船首変位量などは次項で述べる。これらの図より、いずれの計算ケースでも船首部分が緩衝工の上部工に食い込んだ。また、船舶の衝突位置や衝突速度により船首の損傷度合いがかなり異なった。速度10ノットで船首の上部が緩衝工に衝突する場合、図-13に示すように衝突後0.4秒後に船首の変位量が1.11mと最大になり船首部分が圧壊した。速度が20ノットの場合は、図-15に示すように衝突後0.6秒後に船首の変位量が2.53mと最大になった。速度10ノットと比較して、速度20ノットで衝突した場合、船首の変位量は約2倍と損傷度合いが大きくなり、緩衝工の上部工に大きく食い込んでいるが、船首傾斜部全体の圧壊には至っていない。船首の下部が衝突するケースにおいても同様な損傷

の傾向であった。しかしながら、船首上部が緩衝工に衝突する場合の方が、船首下部が衝突するよりも船首の損傷度合いが大きくなった。この原因は、船首下部が船首上部に比べ形状が扁平で骨組が密に配置されていて剛性が大きいからである。速度10ノットの場合における衝突1秒後の基礎杭に生じる曲げモーメントを図-17（ケース3）および図-18（ケース4）に示す。両ケースにおいて、基礎杭の最大曲げモーメントは今回の計算時間内では衝突1秒後に算出され、その値はそれぞれ $5.581 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $7.459 \times 10^6 \text{ N}\cdot\text{m}$ であった。ケース3の場合が小さい値となった。その理由は、ケース3の場合に船首の変形によるエネルギー吸収が大きいことによる。いずれの場合も降伏には至っていない計算結果となった。また、ケース5の場合は降伏応力 $\sigma_b$ にほぼ近い値であった。ケース6場合は衝突0.8秒後に降伏に至った。



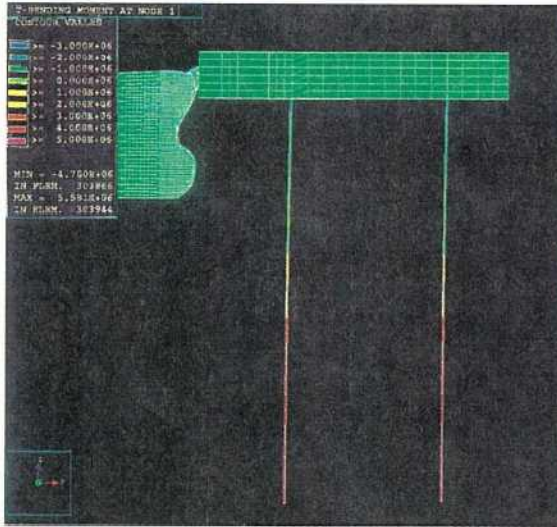


図-17 基礎杭の曲げモーメント(ケース3)

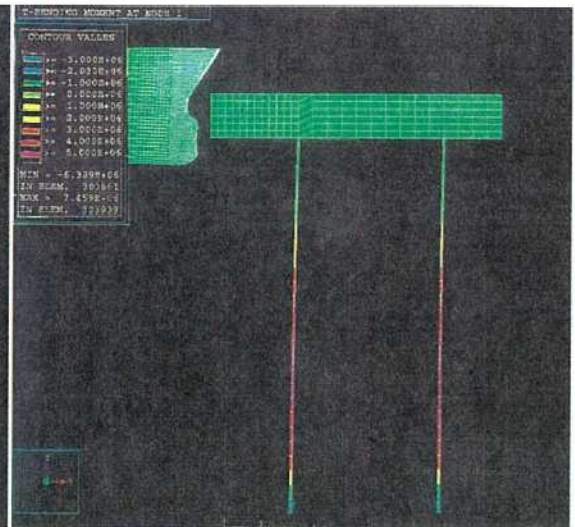


図-18 基礎杭の曲げモーメント(ケース4)

表-5 解析結果比較

ケース名	解析手法	航行速度 (ノット)	衝突位置	最大接触力 (kN)	最大船首変位 (m)	1.0秒後の 杭頭変位(m)
1	質点モデル解析	10	—	6,440	0.71	0.54
2	質点モデル解析	20	—	11,220	1.44	1.08
3	有限要素解析	10	上部	35,000	1.11	0.24
4	有限要素解析	10	下部	57,380	0.66	0.25
5	有限要素解析	20	上部	43,610	2.53	0.45
6	有限要素解析	20	下部	87,430	1.19	0.48

### (3)解析結果の比較

質点モデル解析および有限要素解析における各ケースの解析結果の一覧を表-5に示す。まず速度10ノットの場合の計算結果の比較を行う。図-19に示すように質点モデル解析での船首と緩衝工との最大接触力は6,440kNであった。有限要素解析では船首の上部での衝突と下部での衝突の最大接触力は、それぞれ35,000kN、57,380kNとなり質点モデル解析の約5倍および約9倍となった。この大きな相違の原因は、有限要素解析では船首の破壊の後、船体全体の力が緩衝工に作用するためであり、一方、質点系モデル解析では船首の破壊以上の荷重が作用しないとして解析を行っているためである。また、最大の接触となる時間は、質点モデル解析と船首上部で衝突する有限要素解析で0.2~0.4秒であるが船首下部で衝突する場合は0.16秒と早く、また0.26秒後には接触力は0kNとなった。これは船首下部の剛性が船首上部より高いためである。

図-20に示すように船首変位は、質点モデル解析と有限要素解析の船首下部衝突の場合がほぼ同値であった。また、ケース4は質点系モデルと同様、変位が元の位置に戻る傾向があった。しかしながら、ケース3の場合、

その後は一定値に収束していた。ただし、船首変位はその計算例においても、 $\delta_{st}$ 以下となり、緩衝工が十分機能したと考えられる。図-21に示すように衝突0.4秒後の杭頭変位は、ケース1およびケース4においてほぼ同じ値であった。しかしながら、ケース4での杭頭変位は0.6秒後一定値に収束したが、質点系モデル解析では時間の経過とともに増加した。その理由として、両解析における降伏条件の違いによるものと思われる。

次に、速度20ノットの場合の計算比較を行う。図-22に示すように質点系モデル解析における最大接触力は11,220kNであり、有限要素解析における値は約4倍および約8倍となった。図-23に示すように船首変位は速度10ノットの場合に比べ、変位量は約2倍と大きくなり、いずれのケースの場合も船首部の変位は $\delta_{st}$ 以上となった。しかし、両解析においても $\delta_{st}$ を越えておらず、船首が完全に圧壊しないという結果となった。図-24に示すように杭頭変位は、速度10ノットの場合に比べ、変位量は約2倍と大きくなっているものの、変位の傾向は同じでいずれの計算例でも杭が降伏し、衝突後船舶と緩衝工が離れても緩衝工が元の位置に戻らなかったことを示している。

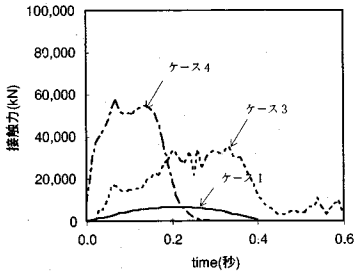


図-19 接触力(速度10ノット)

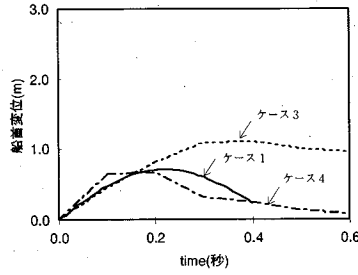


図-20 船首変位(速度10ノット)

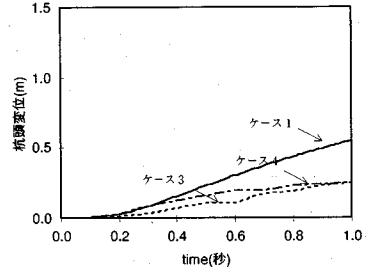


図-21 杭頭変位(速度10ノット)

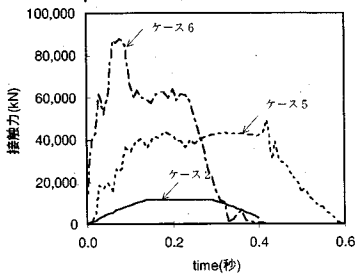


図-22 接触力(速度20ノット)

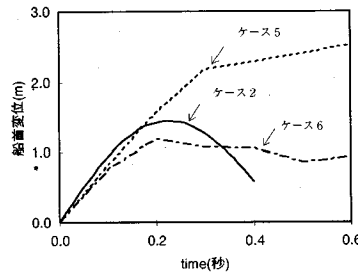


図-23 船首変位(速度20ノット)

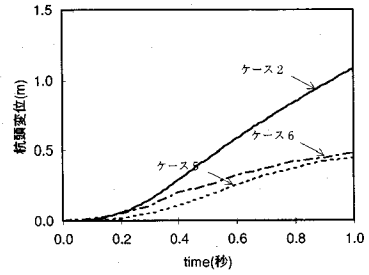


図-24 杭頭変位(速度20ノット)

#### 4. 結論

500G.Tの船舶と杭式緩衝工の衝突問題を二質点系モデルと動的有限要素法により解析を行った。これらの解析の結果より、以下のことがわかった。

- 1) 質点モデル解析と有限要素解析とも速度10ノットおよび20ノットで船舶が衝突した場合、船首部はほぼ破壊しているが、船首の許容変位量には達していなかった。今回の解析条件では、緩衝工との衝突により船舶の致命的な損傷には至らないと計算された。また、有限要素解析では、衝突位置が船首上部の場合は船首変位は元に戻らず、衝突位置が船首下部の場合は元の位置に戻る結果となった。このように、有限要素解析では、衝突位置の違いによる船首変位の時刻歴応答の違いが表現できる。
- 2) 速度10ノットと速度20ノットのいずれの場合も、緩衝工の杭頭変位の時刻歴応答は、質点モデル解析結果と有限要素解析結果は同じ傾向であった。また、速度20ノットの場合、杭頭変位は解析時間内に収束しておらず、基礎杭は降伏していた。ただし、いずれの場合も船舶に重大な損害を与えない観点から緩衝工の有効性が確認できた。
- 3) 有限要素解析による船舶と緩衝工の接触力は、質点モデル解析の4～9倍となった。この原因は、質点モデル解析では船首の破壊後に船舶本体の緩衝工への接触荷重を考慮していないためである。このように両解析法では、接触力の計算結果が必ずしも良い一致を示さなかった。しかしながら、有限要素解析では、衝突位置の違いによる接触力の時刻歴応答の違いが表現できた。

4) 質点モデル解析では、船舶と緩衝工を二質点に置き換えた簡易なモデル化を行うことにより、入力条件の設定が容易で計算時間も非常に短くてすみ、衝突時の全体的な挙動を評価する上で有効であることと言える。一方、有限要素解析では、船舶と緩衝工を正確にモデル化することにより、モデルの作成や計算に多くの時間が必要であるが、衝突時の船首の損傷度合や基礎杭の応力状態の評価および衝突位置の違いによる挙動の相違などを把握することができ、衝突現象の再現に有効であると考えられる。

#### 5. おわりに

今回得られた結論は、限られた計算条件下で導かれている。今後更に解析を進めて計算法の適用性について検討を進めたい。また、今回の有限要素法の解析手法の妥当性については、既に船舶と防波堤の事故の例の解析<sup>12)</sup>や自動車での衝突実験との比較検討から妥当性が証明されていると考えられるが、今後緩衝工を対象とした模型実験などを通じて本解析法の適用性について検討を進めたい。また、今回考慮していなかった船舶周囲の水の造波抵抗の影響や各種の衝突形態(漂着、船尾衝突など)について検討をしていきたい。

謝辞：本研究にあたり、安藤浩平氏ならびに新開浩氏(日本イーエスアイ)には多大なご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。



## 参考文献

- 1) 海難審判庁：海難審判の状況（1961年～1980年）
- 2) 建設省土木研究所：防衛工の緩衝工に関する調査研究報告書，土木研究所資料，第2885号，p.85，1990.3.
- 3) 本州四国連絡橋公団：多室型緩衝工の設計要領（案），p.59，1980.3.
- 4) 長沢 準他：通行船舶の橋脚衝突時の圧縮強度について，日本造船学会論文集，第142号 pp323-332，1977.11.
- 5) 清宮 理：土木学会，構造工学シリーズ6 構造物の衝撃挙動と設計法，第VIII船舶の衝突に関する海洋構造物の設計法，pp.293-312，1994.1.
- 6) 清宮 理：港湾構造物への船舶の衝突，第1回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム，pp.15-18，1991.3.
- 7) Mavrikos,M.,Joao and Oliveria de G.:Design against collision for offshore structure,Report No.MTSG 83-7 pp.164,1983.4.
- 8) 運輸省：鋼船構造規定，1968.8.
- 9) 寺内 潔，吉田行秀，奥山育英：船舶の主要寸法に関する研究，港湾技術研究所報告，第17巻4号，pp.265-328，1978.12.
- 10) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準：同解説，pp.14-16，1988.6.
- 11) 門倉博之，清宮 理，宮城敏明，石川雅美：有限要素法による港湾構造物の衝突解析，土木学会第50回年次学術講演会第6部門，pp.58-59，1995.9.
- 12) 清宮 理，安藤浩平，遠藤正司，アンドレブデイン：3次元有限要素法による船舶の鉄筋のコンクリート製ケーソンへの衝突解析，第2回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム，pp.45-48，1993.6.

(1995. 6.13 受付)

## EVALUATION OF COLLISION ANALYSIS OF SHIP TO PILE TYPE FENDER

Osamu KIYOMIYA, Toshiaki MIYAGI, Masami ISHIKAWA  
and Hiroyuki KADOKURA

Fender is installed at the front of bridge pier to minimize damage by ship collision. In the design of the fender, evaluation of damages of both a ship and the fender is important. Dynamic response analyses by mass-spring model and finite element method considering non-linear properties of materials are carried out to estimate the both damage by ship collision. Computer program of PAM CRASH is adopted for this collision analysis. Calculation results about fender movement, damage of ship and so on between two models show fairly good agreement. However, impact load between them does not show good agreement. In the mass-spring model, details of damage of the ship and the fender can not be pursued. In the finite element method, this method is very effective for analysis of ship collision process.