

東急建設 情報システム部 正会員 門倉博之
 運輸省港湾技術研究所 正会員 清宮 理
 東急建設 技術研究所 正会員 宮城敏明
 東急建設 土木設計部 正会員 石川雅美

1. はじめに

近年、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、大型船舶が航行する区域内に大型の橋梁が建設されることが多くなった。このような構造物では、船舶と橋梁との衝突を避けるため緩衝工が設けられる。この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ため、その設計は複雑となる。すなわち、船舶の衝突速度や衝突方向によって、緩衝工が受ける荷重が変化するため、それぞれの状況に応じて緩衝工が十分な機能、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ることが必要である。

緩衝工の設計においては、動的荷重を静的荷重に置き換えるか、あるいは船舶および緩衝工をそれぞれ一質点系のモデルに置き換えて検討を行っている。しかしながら、質点系モデルによる場合は、多様な衝突形態が考慮できない。すなわち、船舶や緩衝工の破壊の詳細な状態が把握できない。そこで、衝突による船舶と港湾構造物の挙動や損傷度合の把握を目的として、動的有限要素法による衝突解析を行った。

今回、質点系のモデルによる解析(以下、質点系解析)を初期速度をパラメータに2ケース、動的有限要素法による解析(以下、動的解析)により船舶の衝突位置および初期速度をパラメータに4ケース実施した。本報告では、解析手法の違いによる船舶と緩衝工との衝突解析結果の評価を行う。

2. 質点系解析

船舶と港湾構造物の衝突による設計は、図1に示すような船舶および港湾構造物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たモデルで行う。その場合、両者の力の釣り合いから式(1)が得られる。今回解析に用いた入力条件を表1に示す。船舶は船首から初期速度10ノット(ケース1)、20ノット(ケース4)をもって緩衝工に衝突すると仮定した。図2に船舶および杭の荷重変位曲線を示す。

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s = -F(x_s - x_b) \quad (1)$$

$$m_b \ddot{x}_b + c_b \dot{x}_b = F(x_s - x_b) - F_b(x_b)$$

添字bは緩衝工、sは船舶を示す。

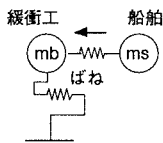


図1 質点系モデル

- m_b : 緩衝工の有効質量
- m_s : 船舶の有効質量
- \ddot{x} : 加速度
- \dot{x} : 速度
- x : 変位
- c : 減衰係数

$F(x_s - x_b)$: 船舶と緩衝工の接触力

$F_b(x_b)$: 緩衝工の杭の抵抗力

表1 入力条件

	ケース1	ケース4
船の初期速度(ノット)	10	20
船の質量(t)	18.3	
船の減衰率	0	
緩衝工の質量(t)	217.3	
緩衝工の減衰率	0	
船舶の圧壊荷重(tf)	1,181.6	
杭の降伏荷重(tf)	305.0	

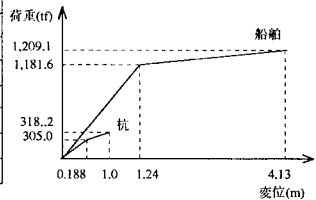


図2 荷重変位曲線

3. 有限要素解析

衝突による船舶の破損状態および緩衝工の杭の変形、断面力の算出を目的に、最も精解に近いと考えられる材料非線形および幾何非線形を考慮した動的有限要素法により行った。解析ソフトは、3次元有限要素法プログラムPAM-CRASHを使用した。本プログラムは、非線形衝突用プログラムで自動車、電車などの衝突解析に用いられている。図3に全体の有限要素解析モデルを示す。船体は500t級の船舶を用い、船体外部を薄肉シェル要素とビーム要素とした。緩衝工は杭式ドルフィンタイプとし、頂版部は、鉄筋コンクリート製のプレキャストを想定し、基礎杭部は鋼管杭(杭径 $\phi=1600$ mm、杭長 $l=26.0$ m)を4本設置した構造とした。この緩衝工は橋脚の前面に独立して設置される。また、頂版部は3次元ソリッド弾性体とし、基礎杭部はVon Misesの降伏則に従う弾塑性ビーム要素とした。要素数は船舶が12,000個、緩衝工が4,000個となった。

動的解析は、初期速度を10ノット、20ノット、衝突位置を船体上部、船体下部の場合をパラメータとして4ケース行った。

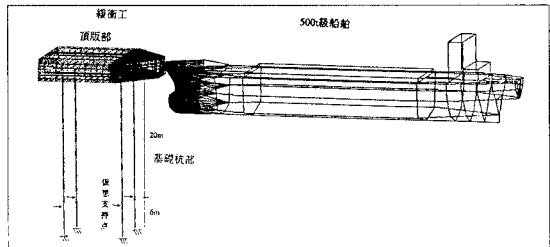


図3 有限要素解析モデル

4. 解析結果

図4に動的解析による船舶と緩衝工の接触状況を示す。船首部分の鋼板が座屈している。次に、各ケースにおける解析結果の一覧を表2に示す。初期速度10ノットの場合、質点系解析によるケース1の最大接触力は650tfである。動的解析によるケース2、ケース3の最大接触力はそれぞれ3,568tf、5,851tfとなりケース1の約6倍または約10倍となっている。船首変位は、ケース1とケース3の場合がほぼ同値である。杭頭変位量は、ケース1、ケース3、ケース2の順で大きくなっている。

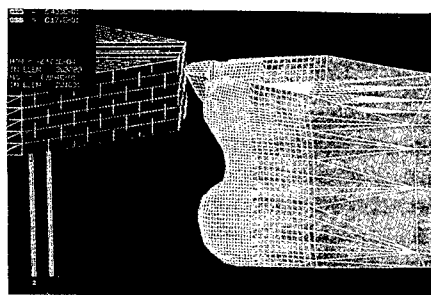


図4 動的解析による接触状況（ケース3）

図5に初期速度10ノットの場合の接触力の時間変化を示す。ケース1と2で最大接触力は異なっているが、0.42秒以後、接触力は0tfとなる。接触力は全般に動的解析結果の方が質点系解析結果より大きくなっている。その理由として、質点系解析結果が船舶全体としての接触力を示すのに対して、動的解析結果は船首の局所的な接触力を算出していることが考えられる。

図6に初期速度10ノットの場合の船首変位の時間変化を示す。ケース1およびケース3船首変位量は、0.2秒後に最大となり、その後は小さくなっている。それに比べ、ケース2の場合は0.5秒後においても船首は約1.0m変位したままである。

図7に初期速度10ノットの場合における杭頭変位の時間変化を示す。ケース2に比べ、ケース3の場合が質点系解析結果に一致している。その理由として、ケース2の船首の残留変位がケース3の場合より大きいためと考えられる。

初期速度20ノットの場合は、杭頭において塑性変形が見られた。その他は、初期速度10ノットの場合と同様な傾向であった。

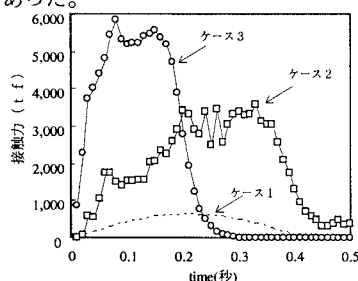


図5 接触力(初期速度10ノット)

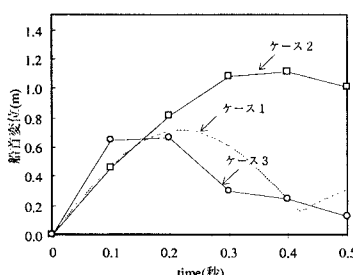


図6 船首変位(初期速度10ノット)

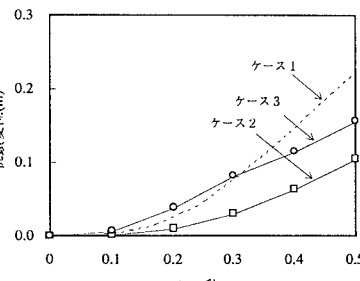


図7 杭頭変位(初期速度10ノット)

表2 解析結果まとめ

ケース	解析手法	初期速度 (ノット)	衝突位置	最大接触力 (tf)	最大船首変位 (m)	0.5秒後の 杭頭変位(m)
1	質点系解析	10	—	650	0.72	0.23
2	動的解析	10	上部	3,568	1.10	0.11
3	動的解析	10	下部	5,851	0.66	0.16
4	質点系解析	20	—	1,183	1.44	0.45
5	動的解析	20	上部	4,359	2.53	0.18
6	動的解析	20	下部	8,881	1.37	0.25

5. まとめ

質点系解析および動的解析により、以下のことがわかった。

- ①動的解析による接触力は、質点系解析の結果の6～10倍となった。
- ②動的解析による船首変位は、船首の衝突位置が下部の場合に質点系解析の結果とほぼ一致した。
- ③同様に、杭頭変位は船首の衝突位置が下部の場合に質点系解析の結果と近い値が得られた。
- ④初期速度10ノットで衝突した場合は、被害は船首に集中し、緩衝工の被害はほとんど見られなかった。その場合の緩衝工の有効性が確認された。

6. おわりに

今回の質点系解析および動的解析結果から、船首変位や杭頭変位について両者の解析結果間で良好な対応を得られ、それぞれの解析手法の妥当性が確かめられた。すなわち、質点系解析は、設計に必要なパラメータや衝突時の大まかな挙動を評価する上できわめて有効であり、また、動的解析は、衝突時の変形形状や部材の応力状態の評価および衝突位置の違いによる挙動の変化を把握する場合に有効である。

謝辞

本研究にあたり、安藤浩平氏、新関浩氏（日本イーエスアイ）には多大なご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1)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篇船舶の衝突に対する海洋構造物の設計法、平成6年1月
- 2)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、昭和54年3月