

船舶の橋梁への衝突事故分析および小型船舶の防衛工への衝突シミュレーション

Ship Collision Accidents and Simulation of Small Ship Collision to Fender System of Bridges

白石 悟*・内藤了二**

Satoru Shiraishi and Ryoji Naitho

First of all, ship collision accidents in Japan are collected and analyzed.

Experimental results by the hydraulic model test for ship's impact force to fender systems which protected piers of bridges from ship collision are discussed. The numerical simulation model to evaluate ship motions and fender deflections by ship collision are also presented and evaluated.

Keywords: Fender system, Ship impact force, Simulation, Load-deflection characteristics

1. はじめに

本研究は橋梁の防衛工について、船舶の漂流等による衝突時の現象を明らかにし、かつ、船舶とくに小型船の損傷を少なくする防衛工の構造の開発のために基礎的な水理模型実験を行い、かつ、数値シミュレーション手法を開発することを目的とした。まず、船舶の橋梁への衝突による事故を海難審判裁決録に基づいて調べ、事故の要因等を分析した。また、防衛工の変位復元力特性は一般的には非線形形であるので、これを考慮した水理模型実験を行い、船舶の防衛工への衝突現象を明らかにし、水理模型実験結果に基づいて船舶が防衛工に衝突する際の、荷重と変位、回転運動について考察した。また、数値シミュレーションを行い実験値と比較した¹⁾。

2. 船舶の橋梁への衝突事故

これまで、我が国における船舶の海岸・港湾構造物への衝突事故の実態についての報告例²⁾、海外における事故例の紹介³⁾はあるものの、我が国における船舶の橋梁への衝突による事故を詳細に分析した事例は無いので、過去約15カ年の海難審判裁決録に基づいて船舶の橋梁への衝突事故を調査した。なお、これは国際航路会議協会(PIANC)のワーキンググループ(PTC-I/WG19: Problems of collision due to the presence of bridges)の活動の一環としても実施している。

表-1は海難審判裁決録による1990年～1994年の5か年間の海難事故のうち構造物が関わっているものを示す。船舶の衝突事故のうち、最も多いものは防波堤への衝突(108件)であり、ついで係船岸への衝突(47件)である。これらに比べると船舶が橋梁の橋脚あるいは橋桁に衝突する事故は極めて少ない(13件)ことがわかる。

表-2は1974年以降の船舶の橋梁への衝突事故23件の主たる原因を示したものである。これによると船舶の橋桁への衝突事故の大半は、橋下のクリアランス不足によるもので、その原因は、船舶が航行する際の潮位の変動に対する注意の不足、作業船等におけるジブクレーンの高さの調査不足等である。一方、船舶の橋脚への衝突事故は極めて件数が少なく、その原因も種々多様である。濃霧、風の作用等の気象海象によるものもあるが、人為的な事故も少なくない。

表-3は船型別の区分である。なお、我が国では、この15年間では、1,000GRTを超える船舶が橋梁に衝突した事故は無い。我が国では船舶の橋梁への衝突事故は必ずしも多くはないが、これは、ヨーロッパ、北米

表-1 構造物の関係する海難事故('90～'94)

構造物種類	'90	'91	'92	'93	'94	計
橋脚	1	0	1	1	1	4
橋桁	0	1	2	3	3	9
防波堤	18	24	17	27	22	108
導流堤	0	0	0	2	0	2
防潮堤	0	0	0	1	0	1
離岸堤	0	0	0	1	0	1
灯浮標	0	3	0	1	1	5
標識灯	0	2	0	0	0	2
岸壁	5	14	11	10	7	47
棧橋	1	2	1	4	2	10
護岸	0	1	1	1	0	3
ドルフィン	1	1	1	0	0	3
係船浮標	0	2	0	1	1	4
その他	0	0	3	2	2	7

* 正会員 運輸省港湾技術研究所構造部 (239 横須賀市長瀬 3-1-1)

** 正会員 運輸省第二港湾建設局 (前港湾技術研究所構造部)

等の諸外国と比べて河川を航行する船舶の数が少ないことが大きな要因と思われる。今後は臨海部の開発が一層進むとともに、臨港道路等が整備されると当然航路をまたぐ橋梁も増えることから、船舶の衝突から橋梁、特に、橋脚を防護することは一層重要な課題となる。

3. 橋梁の橋脚の防衛工の設計上の課題

橋梁の防衛工は、船舶の衝突から橋脚を防護するために、航路を横断する橋梁の橋脚本体または周辺に設置されている。現行の防衛工の設計においては、橋梁の防護を第一の目的としている。その方法の一つは、本州四国連絡橋公団が採用しているもので^{4), 5)}、船舶が衝突緩衝工に衝突した場合には、衝突緩衝工が変形を受けるとともに、船舶の圧壊によって船首あるいは船側にも変位が生じるので、両者の変位により衝突エネルギーを吸収する方法である。この方法は、渡海橋など比較的大型の航行船舶に対する防衛システムの設計に用いられている。

これに対して、もう少し小型の船舶に対しては、橋脚の前面にドルフィンを設置し、船首または船側を橋脚に直接衝突させない方法がある。後者については、港湾の係留施設の防衛工を設計する際に用いられている運動力学的方法による接岸エネルギーの計算式⁶⁾（以下、技術基準の方法）によって衝突エネルギーを算定している事例が多い。この方法は、船舶の平面的な回転運動（ヨーイング）は考慮しているが、ローリングは考慮していない。

船舶、特に小型船に対しては、橋梁の防衛工として、衝突船舶の損傷をも防止する新しい防衛工が必要となる。ただし、これまで、橋梁の防衛工として望ましい変位復元力特性やエネルギー吸収性能についてはあまり明らかではなかったので、本研究では、種々の変位復元力特性とばね定数を有する防衛工模型を用いて船舶衝突時の防衛工の変位と反力あるいは衝突前後の船舶の挙動を実験的に明らかにする。

4. 水理模型実験

4. 1 水理模型実験の方法

(1) 実験概要

水理模型実験は運輸省港湾技術研究所の平面水槽（長さ25m×幅10m×深さ1m）において行い、模型船舶を静水中で漂流させ防衛工模型に衝突させた。図-1は水理模型実験の実験状況を示したものである。防衛工模型、船舶の重心、船首、船尾に合計5個の豆電球を取り付けており、これをマーカー点として天井からビデオカメラで撮影し、衝突速度および衝突前後の軌跡を計測した。計測データは、画像処理装置（(株)ピアス製、PIAS-Ⅲ）

を用いて画像解析を行って、船舶の重心点の軌跡、衝突速度を求めた。防衛工模型にはロードセルが組み込まれており、これにより模型に作用する圧縮荷重およびせん断荷重を計測する。また、防衛工模型の後方にインダクタンス式の変位計を設置して防衛工の変位を計測した。水理模型実験は、フルード相似則で実施している。模型船の重量は26.3kgfであるが、実船をそれぞれ、5,000DWTの一般貨物船、10GTの漁船と考えると、本実験の模型船尺は1/75および1/13相当である。なお、模型船舶はバッテリーおよびモーターを搭載しており無線操縦が可能であるが、無線操縦では、防衛工模型に安定した角度および速度で漂流衝突させることが困難であったため、人力によって模型船舶を防衛工模型に漂流衝突させた。

(2) 防衛工模型

橋脚の防衛工に用いられているゴム防舷材には、種々の変位復元力特性のものが存在するので、水理模型実験においては、線形型、反力漸増型、定反力型、高ヒステリシス型の4種の防衛工模型を製作した。模型において変位復元力特性を実際の防衛工と同じ素材のゴムで作ることは容易ではないので、変位復元力特性がフルード相

表-2 船舶の橋梁への衝突事故の原因

事故原因		件数
橋桁	橋下クリアランス不足	12
	機関トラブル	1
	見張り不十分	1
	不適切操船	1
	強風	1
橋脚	強風	1
	濃霧	1
	不適切な位置保持	1
	見張り不十分	1
	居眠り	1
	無免許(7'レヅ'4'-t)	1
	酒酔い(7'レヅ'4'-t)	1

(1974年以降の海難審判裁決録による)

表-3 事故船舶の船型

船型 (GRT)	橋桁	橋脚
0～49	0	3
50～99	3	0
100～299	5	1
300～499	3	3
500～999	3	0
その他	2	0

その他は被曳航の起重機船

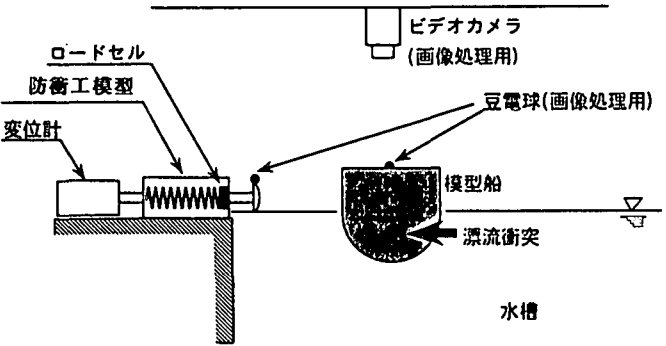


図-1 模型実験状況

似則を満足する条件の下で実物と相似になるようにコイルスプリングおよび重錘を用いて変位復元力特性をモデル化した。コイルスプリングは模型の種別（線形型、反力漸増型、定反力型）およびばね定数（ $K=0.2, 0.1, 0.05, 0.025 \text{ kgf/mm}$ ）ごとに製作しており、模型容器内にセットするコイルスプリングを交換できるようにしている。ただし、定反力型と高ヒステリシス型については、コイルスプリングを共用している。図-2 (1)～(4)は、各防衛工模型に対して行った静的な検定特性の一例である。

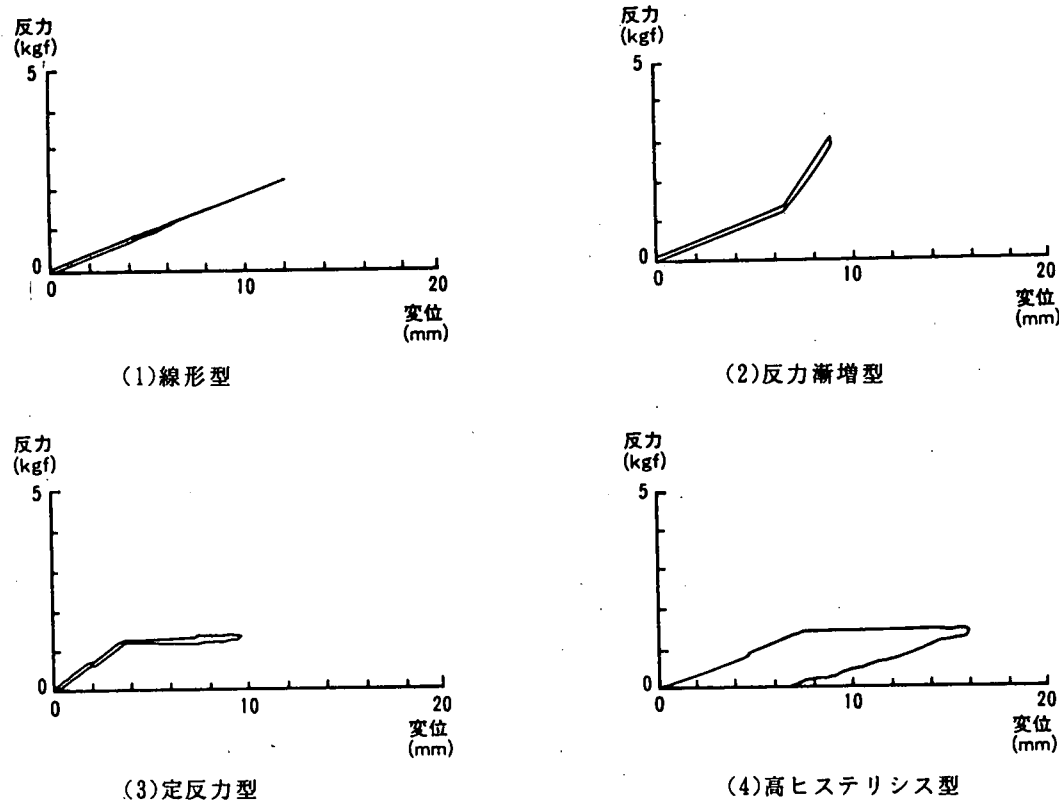


図-2 防衛工模型の変位復元力特性

4. 2 水理模型実験結果

図-3は線形型模型における衝突角度 90° のときの船舶の衝突前後の重心 Y_G （防衛工法線直角方向）の時系列を示す。図の縦軸は各時刻の Y_G の値、横軸は時間である。図には、ばね定数 $K=0.2, 0.1, 0.05, 0.025 \text{ kgf/mm}$ の実験結果を示している。図中に矢印で示した点が防衛工に衝突した時刻を示すが、衝突前の Y_G の変化は、ほぼ直線であることから、衝突速度はほぼ一定であると考えられる。衝突後の変位の特徴としては、どちらかと言うとばね定数 K が大きくなると防衛工から船舶が離れる距離が大きいく、衝突後の重心の軌跡にローリングの影響とみられる変動が見られることである。

図-4は線形型模型における衝突角度 90° のときの船舶の衝突時の速度と最大変位の関係をばね定数ごとに示したものである。図中に技術基準の方法による計算値を実線で示している。ただし、船舶の重心点を防衛工に衝突させており、かつ、ヨーイングも観察されていなかったことから偏心係数は1.0としている。衝突速度が大きくなるにつれて変位が大きくなる傾向は実験値においても計算値においても一致しているが、計算値の変位は実験値よりも大きい。

図-5 (1)～(4)は、衝突角度 90° における船舶の衝突速度に対する変位の実験値と計算値との比（ δ_e/δ_c ）を、防衛工の種別およびばね定数ごとに示したものである。ただし、計算値 δ_c は技術基準の方法によって求めたものである。線形型では、防衛工のばね定数が大きくなるにつれて、 δ_e/δ_c が次第に小さくなり、 $K=0.2 \text{ kgf/mm}$ では、0.4程度となっている。また、衝突速度が大きくなるにつれて δ_e/δ_c が小さくなる傾向が認められる。このように、技術基準の方法で求めた計算値の変位は実験値のそれよりもかなり大きくなっており、とく

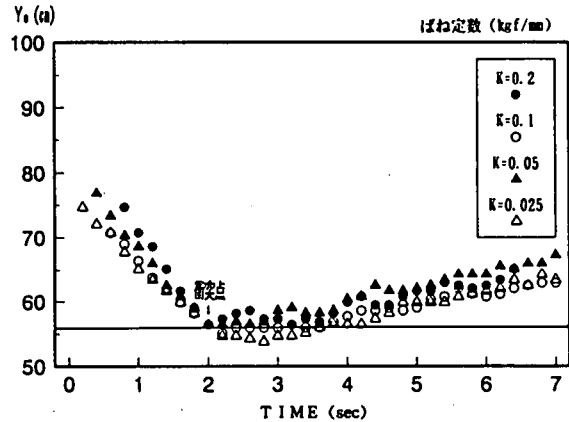


図-3 船舶の重心の変位の時系列波形

に、 $K=0.2\text{kgf/mm}$ の場合は、その傾向が顕著となっている。衝突角度 90° においては衝突時にヨーイング運動は生じておらず、ローリングが観察されたことから考えると、実験値と計算値との相違は主として、防衛工模型のばね定数が大きくなるにつれて船舶の衝突エネルギーの一部が、衝突の際に生じたローリングによって消費されることに起因するものと思われる。反力漸増型においては、 δ_e/δ_c は、同一のばね定数においては、速度が大きくなるときほど小さくなる傾向が認められる。定反力型では、ばね定数 $K=0.05\text{kgf/mm}$ における δ_e/δ_c は1に近く、一方、防衛工のばね定数が大きくなる $K=0.1\text{kgf/mm}$ および $K=0.2\text{kgf/mm}$ の δ_e/δ_c は0.4~0.6に低下する。また、ばね定数が小さな $K=0.025\text{kgf/mm}$ における δ_e/δ_c は0.4前後であり、ばね定数が小さいにも関わらず、 δ_e/δ_c が小さくなっており、他の変位復元力特性のときと傾向が異なる。高ヒステリシス型では、 $K=0.05, 0.025\text{kgf/mm}$ のときは、 δ_e/δ_c が0.6~1.0の範囲に分布しており、他の変位復元力特性のときと比べて、1に近くなっている。この変位復元力特性の防衛工で、かつ、ばね定数が小さなときには、衝突エネルギーを防衛工自体の変形によって吸収し、さらに、船舶の衝突後のローリング、ヨーイングなどの動揺が抑制されるため、衝突した船舶の安定性が確保される可能性が高いと考えられる。

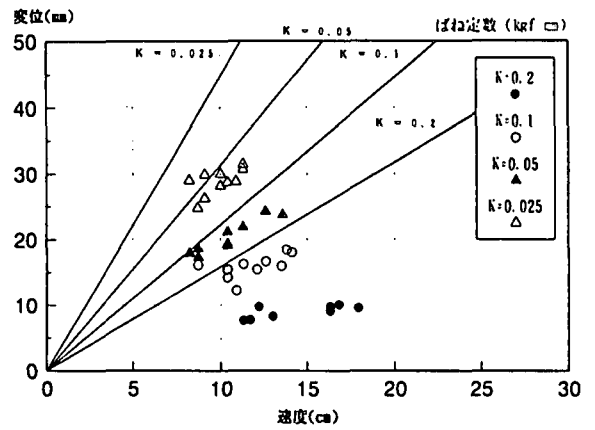
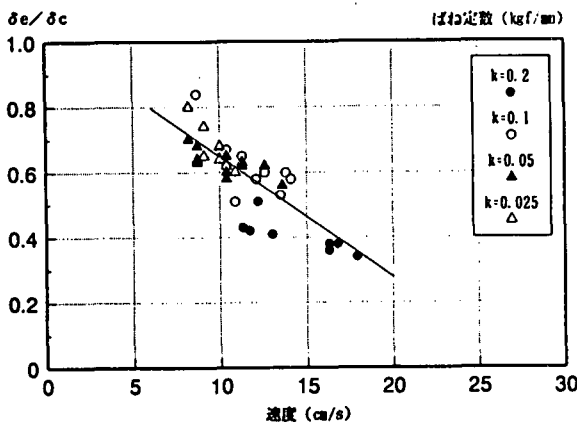
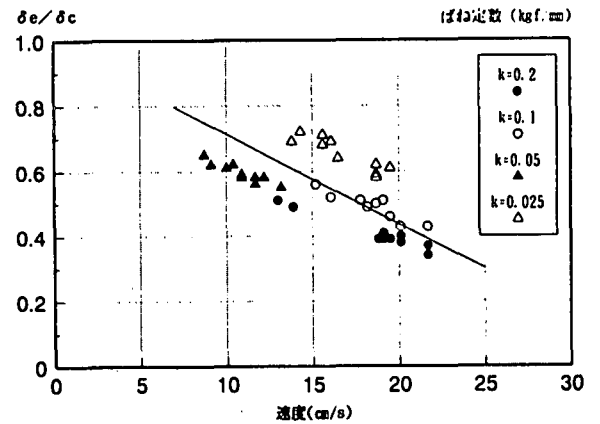


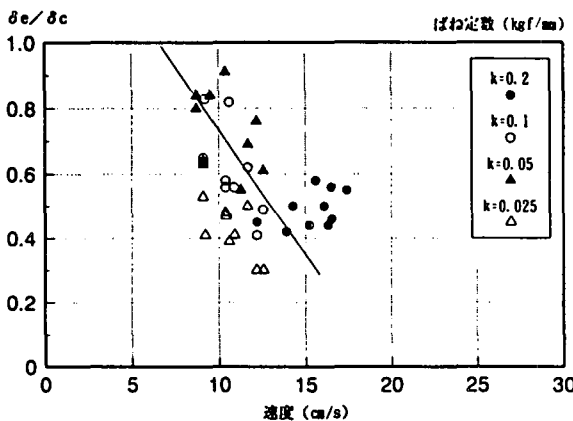
図-4 線形型模型における速度と最大変位の関係



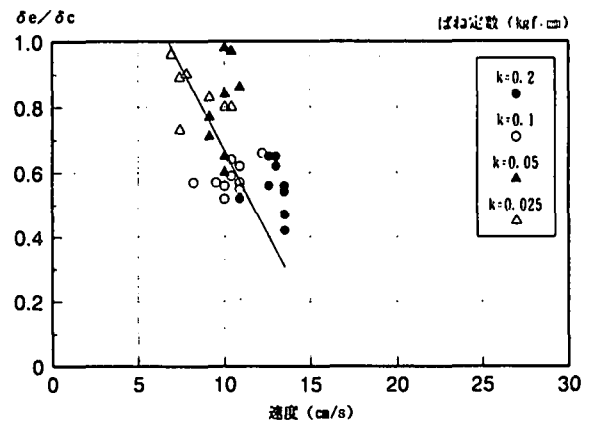
(1)線形型



(2)反力漸増型



(3)定反力型



(4)高ヒステリシス型

図-5 変位の実験値と技術基準の方法による計算値との比

なお、水理模型実験においては防衛工に作用するせん断力についても計測しており、衝突角度 45° の船側衝突においては、最大反力の20%程度である¹⁾。内容の詳細については、本論文においては、紙数の関係で割愛する。

5. 衝突時の挙動の数値シミュレーション

5. 1 数値シミュレーションの概要

本研究では、これまで係留船舶の波浪中の動揺解析に用いていたシミュレーション手法⁷⁾を改良することにより船舶の衝突時の現象を再現する。ただし、波浪中の動揺解析においては、波浪中荷重が外力として加わるのに対して、静水中の衝突シミュレーションでは、衝突船舶の初速度を与えて流体中の造波抵抗力に伴う付加質量および減衰係数を考慮して船体の動揺、防衛工の変位および反力を求めるものとする。船舶の運動成分のうち支配的でない成分を無視して運動方程式を単純化することも可能であるが、ここでは、一般性を失わないように船舶の6自由度の運動を解析するものとする。なお、船舶衝突シミュレーションは時間領域で行うので、防衛工の変位復元力特性の非線形性およびヒステリシスについても考慮できる。

船舶の運動方程式は以下のように書ける。

$$M\ddot{X} + N\dot{X} + C|\dot{X}| + BX + R(X) = F \quad (1)$$

ここに、 M : 仮想質量または慣性モーメントマトリックス、 N : 線形減衰マトリックス、 C : 非線形減衰マトリックス、 B : 静水圧的復元力マトリックス、 $R(X)$: 係留系の反力ベクトル、 F : 変動荷重(静水中では0となる)、 X : 変位ベクトル、 $\dot{X}$: 速度ベクトル、 $\ddot{X}$: 加速度ベクトルである。

なお、本論文では静水中の挙動を対象としており、変動荷重は0としている。船舶の初期座標は $X_{t=0} = (X_0, Y_0, Z_0, \phi_0, \theta_0, \psi_0)$ とし、このうち、初期状態において角度の偏心が無いときには、 $X_{t=0} = (X_0, Y_0, Z_0, 0, 0, 0)$ とする。また、船舶の初速度は、 $\dot{X}_{t=0} = (V_x, V_y, V_z, V_\phi, V_\theta, V_\psi)$ として、通常はZ方向および角度についての初期速度および初期加速度は無いものとして、 $\dot{X}_{t=0} = (V_x, V_y, 0, 0, 0, 0)$ とする。

5. 2 水理模型実験結果との対比

図-6は、ばね定数 $K=0.05 \text{ kgf/mm}$ でかつスウェーピングに対する付加質量を技術基準の式によるものを用い、かつ減衰定数として $\lambda=0.05$ をとったときの船舶の衝突時(初速度 10 cm/s)の時系列波形の計算値であり、図の上から順に船舶のスウェーピング、ローリング、ヨーイング、防衛工反力、防衛工位置の船側の変位を示している。ただし、スウェーピング、防衛工位置の船側の変位については、シミュレーション開始時の座標を原点としているので、図中で衝突と表示している点が、実際に船舶が防衛工に衝突した点を示す。スウェーピング(SWAY)は、まず、衝突後防衛工を圧縮する方向に移動し、ついで、防衛工に反発されて、次第に防衛工から離される。ローリング(ROLL)は、まず、衝突後のモーメントにより、防衛工側の船側が上昇する方向に回転し、その後減衰振動する。防衛工位置における船側の変位(DISP-1)の時系列波形をみると、スウェーピング(SWAY)の時系列の上にローリング(ROLL)に起因する振動成分がのっており、これは水理模型実験における時系列波形の性状とも一致する。

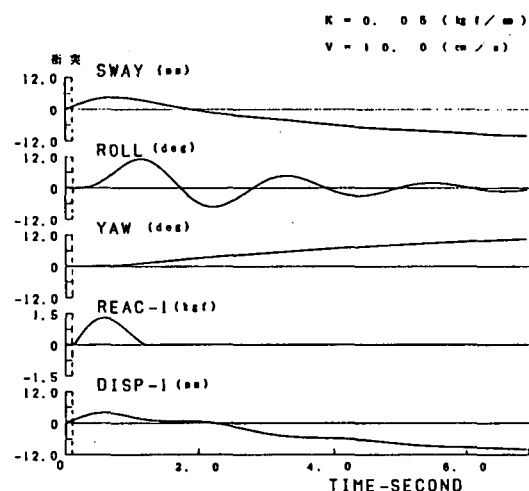


図-6 シミュレーション波形

図-7(1)~(4)は、防衛工の最大変位 δ_{max} について、実験値、技術基準の方法による計算値、数値シミュレーションによる計算値を示したものである。(1)は線形型、(2)は反力漸増型、(3)は定反力型、(4)は高ヒステリシス型について示したものである。図の横軸はばね定数を示す。なお、水理模型実験結果においては、衝突速度のばらつきがあったので、衝突速度 10 cm/s 前後のデータの平均値で表示している。技術基準の方法による計算値は、実験値との相違が大きい。これは、主として計算において考慮されていないローリングの影響と思われる。これに対して数値シミュレーション結果はローリング等の影響を考慮しているため、実験値とほぼ一致している。ただし、全体として数値シミュレーションによる計算値の方が実験値よりもやや大きい。特に、反力漸増型については、水理模型実験の際の防衛工模型の変位復元力特性が静的な検定で得られた特性とやや相違しており、シミュレーションにおいても衝突時の変位復元力特性を十分に再現できなかったことが計算値と実験値との相違の原因として考えられる。それ以外の変位復元力特性については数値シミュレーション値と実験値との相違は高々10~20%であることから、ここで示す計算手法は、技術基準の方法よりも水理模型実験結果をより良く再現しているので、船舶衝突時の防衛工の変位および荷重の評価手法として適切なものと思われる。

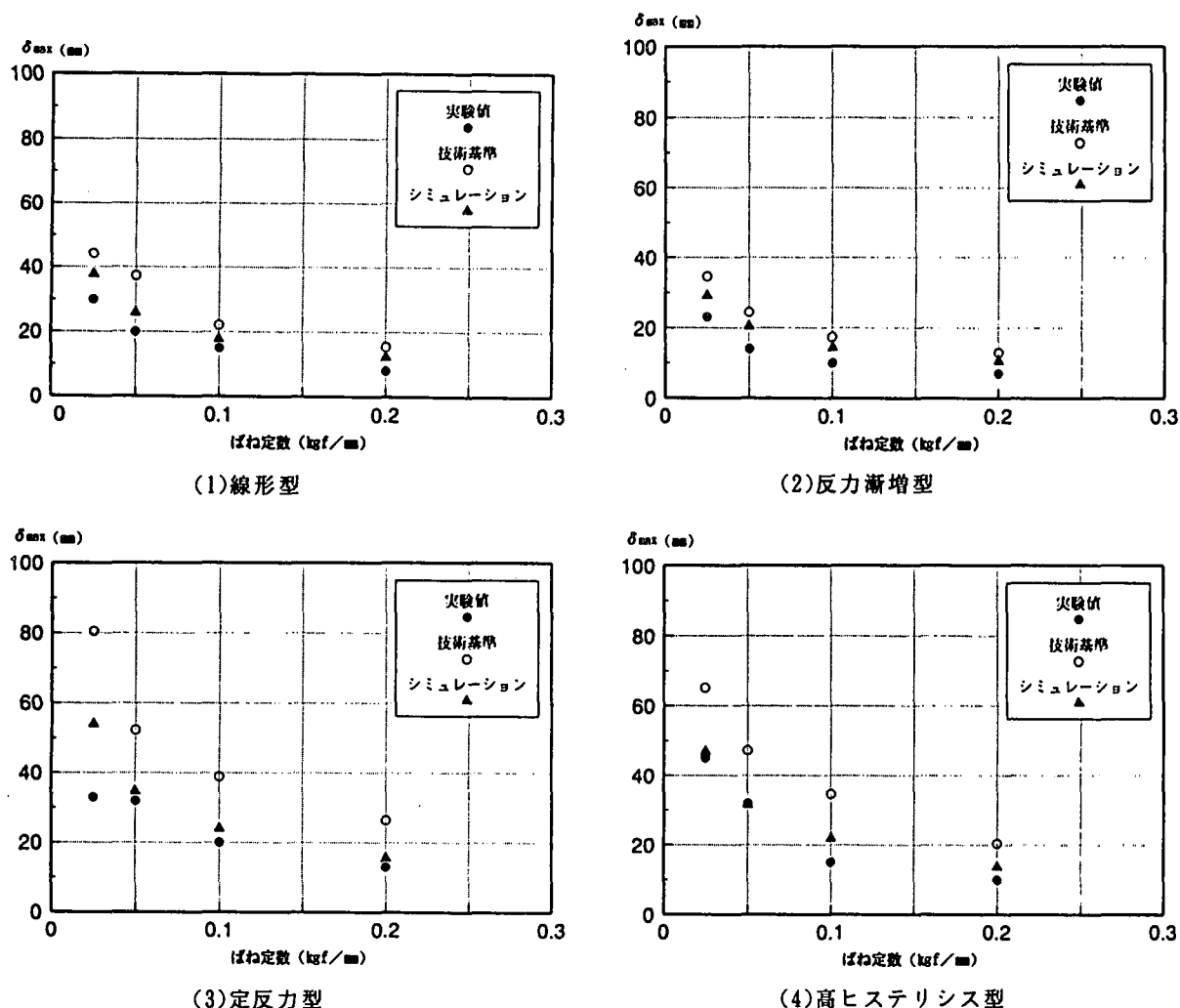


図-7 実験値と計算値の比較

6. 結論

以上示した結果について、簡単にとりまとめる。

- 1) 船舶の橋梁への衝突事故について件数、原因等について分析された。
- 2) 船舶の防衛工への衝突によって生ずる回転運動（特にローリング）によるエネルギー損失が、防衛工の変位に及ぼす影響は比較的大きい。
- 3) 衝突シミュレーションによる防衛工の変位の計算値は、おおむね水理模型実験結果と一致する。
- 4) 小型船舶の衝突時の安全性を確保するためには、吸収エネルギーが大きく、かつ、反力の小さい防衛工を選定するのが望ましい。

参考文献：

- 1) 内藤了二，白石 悟：小型船舶の橋梁防衛工への衝突に関する実験的検討，港湾技研資料，No. 808，1995. 6，74p.
- 2) 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Ⅶ篇 船舶の衝突に対する海洋構造物の設計法、1994. 1、pp. 293～312
- 3) 建設省土木研究所構造橋梁部道路研究室：防衛工の設計に関する調査研究報告書、土木研究所資料第2855号、1990. 3、85p.
- 4) 本州四国連絡橋公団：多室型緩衝工の設計要領（案）、1980. 3、59p.
- 5) 本州四国連絡橋公団：複合材型緩衝工の設計要領（案）、1981. 3、70p.
- 6) 運輸省港湾局監修：港湾の技術上の基準・同解説（改訂版）、社団法人日本港湾協会、1989. 4、上巻pp. 17～20
- 7) 上田 茂，白石 悟：係留船舶の動揺計算法とその評価、港湾技術研究所報告、第22巻第4号、1983. 12、pp. 181～218