

浮体橋ポンツーンへの小型船舶衝突時の強度評価

A study on the strength of floating bridge pontoon in small ship collision

丸山忠明*, 川村幸男**, 水上義彦***, 土屋昌義***, 吉川孝男****, 佐野 淳****

Tadaaki Maruyama, Yukio Kawamura, Yoshihiko Mizukami, Masayoshi Tsuchiya, Takao Yoshikawa, Atsushi Sano

* 工修 大阪市道路公社 (〒530-0002 大阪市北区曽根崎新地1丁目4番12号)

** 工修 大阪市建設局 (〒530-0011 大阪市北区梅田1丁目2番2-500)

*** 工修 川崎重工業(株)鉄構・機器事業部 (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島8番地)

**** 工修 川崎重工業(株)明石技術研究所 (〒673-8666 兵庫県明石市川崎町1番1号)

**** 工博 川崎重工業(株)明石技術研究所 (〒673-8666 兵庫県明石市川崎町1番1号)

In the Port of Osaka, a floating bridge is under construction. The floating part has the length of 410m. In the planning and designing stage, there were not enough design standards provided or established technical skills for floating bridges. The reason is that this style of bridge is rare in Japan, and moreover, the form of this bridge in such a scale has never seen in the world. Therefore, all the peculiar problems concerning the floating bridge had to be predicted, analyzed and solved from the beginning of the planning stage. The problem of ship collisions for the floating bridge is one of the important evaluation items as distinct from ordinary bridges. In the paper, we specify the problems of ship collisions for the pontoons and discuss the strength of the bridge in possible ship collision by the finite element analyses.

Key Words: Movable floating bridge, Pontoon, Ship collision, Finite element analysis

キーワード: 可動橋, ポンツーン, 船舶衝突, 有限要素解析

1. 緒言

現在, 大阪港で建設中の浮体橋(夢洲~舞洲連絡橋)の架橋位置を図1に示す。本橋の架橋地点である夢洲~舞洲間の水路(北航路)は, その南側の主航路のサブ航路として位置づけられている。このため, 主航路が何らかの事故等で船舶の航行が不可能になった場合に備えて, 大型船舶が航行できる機能を確保しておく必要がある。通常のクリアランスの高い橋梁は, コスト面, 道路線形, 土地利用から課題が多く, 図2に示すように非常時のみ航路空間を確保できる可動橋として計画した。また, 本橋の架橋地点となる夢洲は埋め立て地であるため, 大きな圧密沈下に伴う地盤変動が予想される。この地盤変動に対する追随性と駆動設備に要するコスト低減を考慮して, タグボートで旋回させる浮体橋を選定した。浮体橋とすることで, 大型造船ドック内での浮体橋組み立てと下部工工事を並行して行えるため, 大幅な工期短縮も図れることとなった¹⁾²⁾。

本橋は, 国内で初めての本格的な浮体橋であるばかりでなく, この規模では世界でも類を見ない旋回式可動橋の側面も有している。そのため設計に際して多くの技術

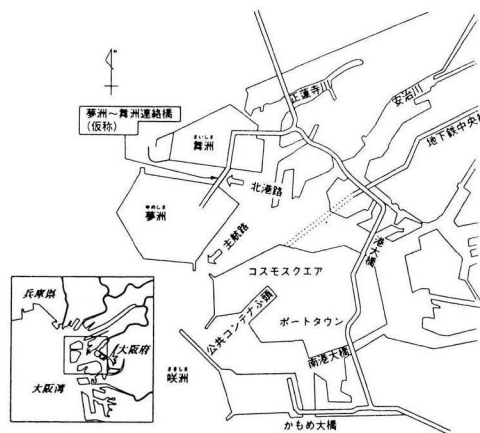


図1 夢洲~舞洲連絡橋の位置

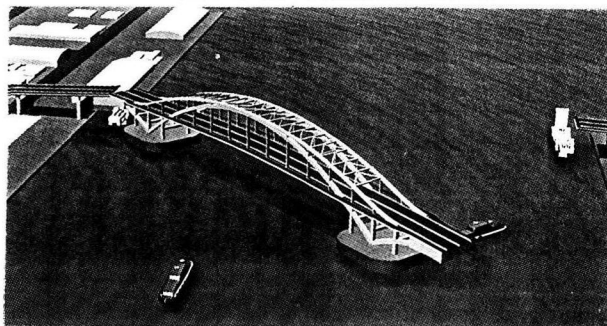


図2 夢洲~舞洲連絡橋の完成予想図

検討が不可欠であった。橋全体の安全性にかかわる技術課題の中で、一般の固定橋にはない浮体橋固有の技術課題として、水路内に存在するポンツーンへの船舶衝突時の安全性評価がある。

本研究では、小型船舶が浮体橋ポンツーンに衝突した場合の貫入量を簡易的に評価する手法を示すとともに、有限要素解析をもとに、船舶衝突時のポンツーンの損傷を評価した。さらに係留用フェンダー³⁾の強度についても検討したので報告する。

2. 浮体橋の概要および耐船舶衝突時の設計思想

2.1 浮体橋の概要

本橋の主な設計条件と構造諸元を表1に、浮体橋の全体一般配置を図3に示す。本橋梁は、ダブルアーチ形状の浮体橋（橋長 410m=65m+280m+65m）であり、その両側の緩衝桁（橋長 70m）および陸上部取付橋で構成されている。

浮体橋は、死荷重および活荷重等の鉛直方向荷重に対しては、280m の間隔で配置された2つの鋼製ポンツーン（58m×58m×8m）による浮力で支持されている。風、波浪、地震といった横方向荷重に対して、浮体橋を一定位置に保持するために、外部構造による水平方向の支持が必要となる。本浮体橋ではフェンダー係留方式を採用し、反力壁を用いて、浮体橋の舞洲側端部を橋軸および橋軸垂直方向に、夢洲側の端部を橋軸垂直方向に水平支持している。係留構造の概要を図4に示す。

緩衝桁は、浮体橋の潮位変動（本橋では計画高潮位+4.8m～低極潮位-0.52m）によるエレベーション変化や風波による動揺、活荷重（自動車や歩行者）による喫水変化等によって生じる浮体橋と陸上部取付橋間のエレベーション差の変動に追従させるため設けられている。

表1 設計条件および構造諸元

橋種	旋回式浮体橋		
道路規格	第4種1級		
活荷重	B活荷重	風荷重	$V_{10}=42\text{m/s}$
		波浪	$H_{1/3}=1.4\text{m}$ 、 $T_{1/3}=5.7\sim 7.7\text{s}$
橋長	410m (65.0m+280.0m+65.0m)		
有効幅員	31.2m (6車線+両側歩道)		
航路幅 桁下高	閉橋時	135.0m	開橋時 (航路解放)
		DL+26.0m	200.0m —
勾配	横断/2%直線 縦断/5%両勾配 (V.C.L140m) 平均水面 (MSL) 時の活荷重無載荷状態		
舗装厚	車道/80mm 歩道/40mm		
設計水平坡度	レベル1	橋軸方向/Kh=0.05 橋軸直角方向/Kh=0.13	
	レベル2	橋軸方向/Kh=0.11 橋軸直角方向/Kh=0.36	
概算重量	ポンツーン	6,800t	
	浮体橋	19,400t	
	係留構造	7,800t	
		合計: 34,000t	

2.2 耐船舶衝突時の設計思想

海外において船舶の衝突による落橋事故の報告がなされている。わが国でも、橋脚を船舶衝突から守る防衝工に関してはエネルギー法による設計が行われており、船舶衝突に関しての考え方⁴⁹⁾などは示されているものの、本件にも適用できるような明確な設計法は示されていないのが現状である。ポンツーンは、浮体橋の重要構造要素であり、その安全性の照査は防衝工の設計より厳密に行う必要がある。またポンツーン部材の構成も不慮の船舶

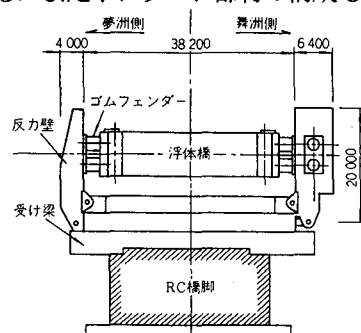


圖 4 係留構造概略圖

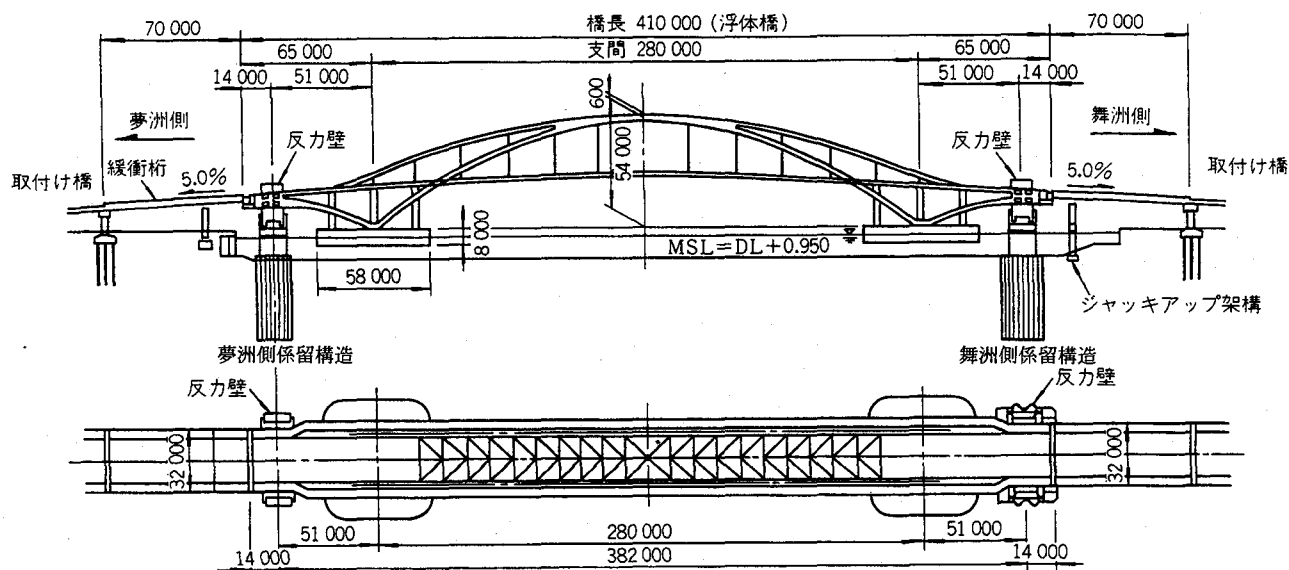


図3 全体一般図

の衝突に耐えるような工夫が必要である。本ポンツーンの隔壁の配置と構造詳細を図5、6にそれぞれ示す。

ポンツーンの主構造は、上部工反力を6本の柱から円滑にポンツーン全体に分散させるため、上部工部材幅に合わせて横隔壁を配置した。また、ポンツーンの外周壁から3m内側の位置に全周にわたって水密の内周壁を設けてダブルハル(2重隔壁)構造とした。さらに、この2重隔壁区画は、外周に対し垂直に配置された隔壁により、航路面では12.5m以下に仕切られた水密区画とした。

この水密区画配置により、船舶衝突に際して、もし、外周壁に破孔が生じて、1~2区画の浸水で収まることを想定している。様々な被害も考慮して浸水状況を仮定し、安全性と使用性の照査を行っている。

一例として、横隔壁上に衝突、外周壁が破断し、2区画が浸水した場合を想定した格子解析を実施した。その結果、上部工を含めた各部材の応力は許容応力内であり、浮体橋の傾斜は最大で橋軸回り0.40度、橋軸直角回り0.02度となり、交通の供用に支障のないと考えられる範

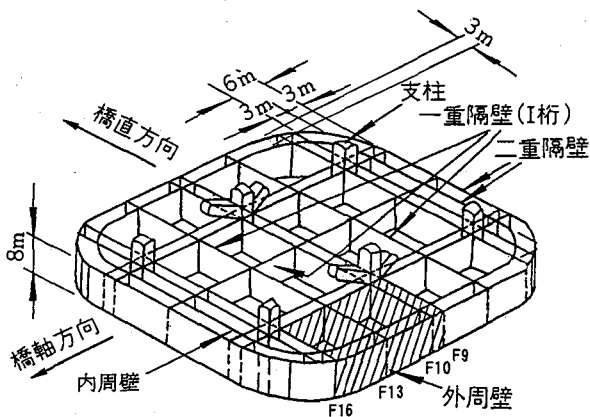


図5 ポンツーンの隔壁の配置

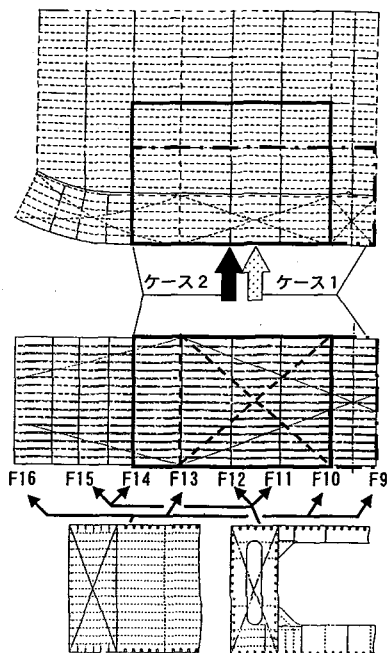


図6 ポンツーン外周部の構造詳細

囲内であることを確認している。さらに、上部工支柱の配置においてもポンツーン外周壁から6mの範囲を建築限界とすることで船舶の船首甲板部の衝突に配慮した。

また、漂流船等による軽微な船舶衝突に対しては、衝突エネルギーを吸収する防衝工(丸型防舷材: コーナ一部Φ700×350×2.0m, 直線部Φ500×250×2.0m)をポンツーン外周に設置することにより橋体側・船舶側共に損傷を受けないように配慮した。この橋に隣接する岸壁で使用する船舶の中で最大級である3,000GTの船舶が漂流(2.0kts)により浮体橋に衝突する場合も想定し、ポンツーン自体に損傷のないことを確認している。

3. 船舶の衝突条件の設定

北航路を通過する船舶の実態調査を行った結果をもとに、衝突する船舶として500GT(排水量1,290t)の船舶を想定し、港内であることからこの船舶が速度10kts(=5.144 m/sec)で衝突するものとした。

船舶のポンツーンへの衝突位置として、船舶の進行方向を勘案し、以下の2箇所を想定した。

- ①ケース1: 横隔壁間の中央(F9~F14間をモデル化)
ポンツーンの外周壁において、変形が最も大きくなると考えられる横隔壁の中央で、頂板と底板間の中央への衝突を想定。
 - ②ケース2: 横隔壁上(F10~F14間をモデル化, F11, F12, F13の横隔壁も水密隔壁としてモデル化)
内周壁への影響を検討するため、ポンツーン外周部で最も剛な位置である横隔壁上への衝突を想定。
- なお、両衝突位置とも、船舶の衝突方向は、ポンツーンへの船舶の貫入量が最も大きくなるように、ポンツーンの外周壁に対して垂直とする。

ポンツーンの質量は、衝突を想定している船舶に比べて十分大きい(排水量約15,000t)ので、ポンツーンは衝突後も剛体運動は生じないとする。

4. 簡易評価

有限要素解析を実施にあたり、ケース1について、船舶の貫入量の概算を把握し、モデル化の範囲を把握するために以下に示す簡易評価を実施した。

浮体橋のポンツーンに船舶が衝突した場合の側板の変形モードは、図7に示す一点集中荷重を受ける四辺単純支持板の変形モードと仮定できる。破線はヒンジラインを示す。貫入量 δ のとき、荷重点における膜力による反力 P は、下式となる⁹⁾。

$$P = 2(P_a + P_b) \quad (1)$$

ただし、

$$P_a = f_x \frac{a}{b} \delta, \quad P_b = f_y \frac{b}{a} \delta$$

$$f_x = \sigma_y t_x, \quad f_y = \sigma_y t_y$$

P_a, P_b : 端部 a, b に加わる荷重

σ_y : 材料の降伏応力

t_x, t_y : x, y 軸に垂直な断面の引張に対する等価板厚

外周壁は、図6中の破線の位置で囲まれた領域、即ち、1水密隔壁間(F10～F13)および頂板、底板間で変形する。今回想定したポンツーンの変形モードでは、浮体上下方向の膜力を支える板部材（頂板より上側、底板より下側）がないことから、船体上下方向の膜力は考えず、横隔壁間に働く膜力のみを考える。

したがって、貫入量 δ のときの反力 P は(1)式より、

$$\begin{aligned} P &= 2(P_a + P_b) \\ &= 2P_a \\ &= 2f_x \frac{a}{b} \delta = 2\sigma_y t_{eq} \frac{a}{b} \delta \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、材料の降伏応力 $\sigma_y = 2.35 \times 10^8 \text{ (N/m}^2\text{)}$
リブを含む場合の等価板厚 t_{eq} は、
で計算する。

$$t_{eq} = \left\{ t + \frac{(h_w t_w + b_f t_f) n}{B} \right\} \quad (3)$$

ただし、 t : 考慮部位の板の板厚
 h_w, t_w : リブのウェブの高さ、板厚
 b_f, t_f : リブのフランジの高さ、板厚
 n : 考慮部位のリブの本数
 B : 考慮部位の板の幅

よって、貫入量 δ のときの外周壁の吸収エネルギー E は、
(2),(3)式より、

$$E = \frac{1}{2} P \delta = \sigma_y t_{eq} \frac{a}{b} \delta^2 \quad (4)$$

となる。

衝突船の重量を1,290 tf、衝突速度を10kts
 $= 5.144 \text{ m/sec}$ とし、衝突船の運動エネルギー E_{ship} が、ポンツーン外周壁の吸収エネルギー E と等しいとすると、外周壁の最大貫入量 δ は(4)式より2.3mとなる。なお、本簡易計算では、F11およびF12の隔壁が吸収するエネルギーは考慮していないので、外周壁の貫入量を大きく見積もっていると考えられる。また、このとき、貫入により、水密隔壁に発生する反力は座屈荷重以下となることを確認した。

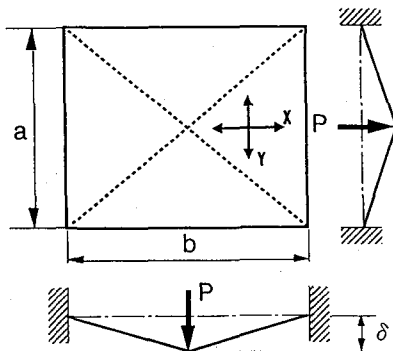


図7 一点集中荷重を受ける四辺単純支持板の変形モード

5. 有限要素解析

有限要素解析には、ダブルハルタンカ等の船舶の衝突解析で実績のある手法と同様の手法を用いている⁷⁸⁾⁹⁾。解析には、動解析ソフトLS-DYNA3Dを用いた¹⁰⁾。

ケース1の場合、簡易評価によると、1,290 tfの小型船舶が衝突速度10ktsでポンツーンの横隔壁間に衝突した時の外周壁の面外最大変形量は2.3m程度である。また、幅方向には衝突点から最大で4.75m離れた水密隔壁まで変形が生じると予測される。そこで、モデル化の範囲は、この領域のほぼ倍の図6の一点破線の範囲とする。ケース2の場合は、ケース1の変形領域を勘案し、図6の実線の範囲とした。両ケースとも、ポンツーンはモデル端で全拘束とした。

ポンツーンの材料はSS400である。計算に用いる材料の応力-ひずみ線図を図8に示す。降伏応力は規格値を用いて $\sigma_y = 2.35 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ とし、破断ひずみは20パーセントとした⁶⁷⁾。なお、破断ひずみに達した要素は、それまでに生じた応力を解放するとともに、それ以降は要素自体を消去して計算を行っている。

衝突する小型船舶は、ポンツーン外周壁に衝突する可能性のある部位のみをモデル化するものとして、船首部のみをモデル化する。本検討は、ポンツーンの安全性の検証を目的としてしたものであり、ポンツーンにとって安全側（損傷を大きめに見積もる側）の評価とするため、衝突時に船首が吸収するエネルギーを無視し、船首を剛体としてモデル化する。解析では船首部のみモデル化して

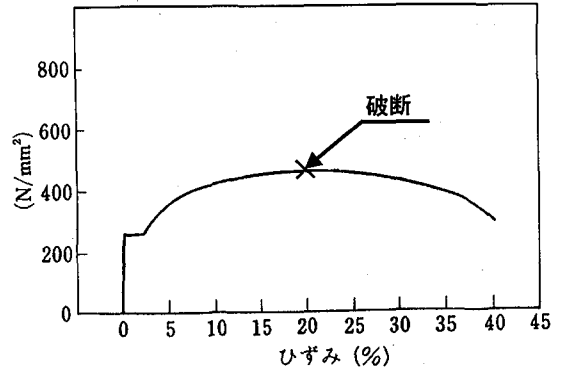


図8 SS400材の応力ひずみ線図

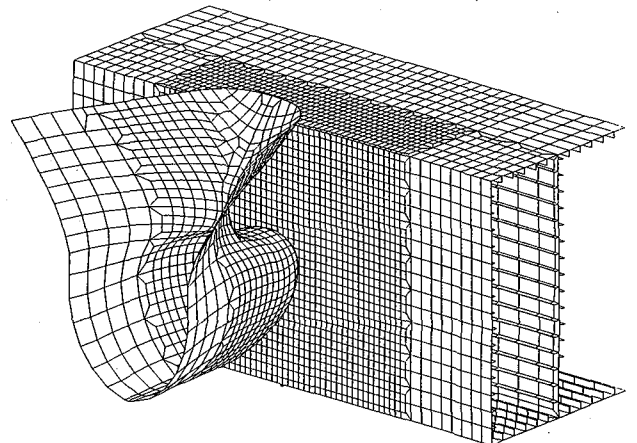


図9 有限要素解析モデル（ケース1）

いるため、船舶の重量 1,290 tf を全て船首部モデルに与えて計算する。

船首は、衝突後、上下・左右には運動しないものとし、船首 FEM 解析モデルの変位衝突方向以外の自由度は全て拘束した。図 9 にケース 1 のポンツーンおよび衝突船舶の船首を含めた FEM 解析モデルを示す。

6. 有限要素解析結果

6. 1 ケース 1 (横隔壁間の中央)

図 10 に衝突船舶の運動エネルギーおよびポンツーンの内部エネルギー (塑性変形、弾性変形により消費されるエネルギー) の時刻歴を示す。本図より、全体のエネルギーは保存されており、計算は正常に終了していることが分かる。また、時間約 0.6 秒で衝突船舶の運動エネルギーは、ほぼ 0 となっており、本時刻において衝突による最大変形量が発生する。

図 11(a)に反力の時刻歴を示す。図 11(b)にポンツーンへの船首の貫入量の時刻歴を示す。図 11(a)より、反力は 0.4 秒までほぼ線形に上昇することが分かる。0.4 秒前後で反力が急激に減少するのは、外周壁の破断が一気に進むためである。図 11(b)より、外周壁の最大変形量は 1.72m である。

図 12(a)にポンツーン全体の变形および相当塑性ひずみ分布を示す。図 12(b)に内周壁および横隔壁の变形および相当塑性ひずみ分布を示す。図 12(c)に衝突位置断面の变形を示す。図 12(a)より、外周壁には衝突船舶の船首近傍に最大のひずみが発生しており、衝突船舶の船首近傍の外周壁の要素は破断ひずみに達し破断している (要素がなくなっている)。したがって、衝突船舶の船首近傍で外周壁が破断する可能性があると考えられる。図 12(b)より内周壁には大きなひずみは発生しないことが分かる。

FEM 解析結果は、外周壁の最大変形量の簡易評価結果 (約 2.3m) より、約 3 割低めの値となっている。簡易評価結果が、変形量を大きく見積もっているのは、ひずみ硬化の影響を考慮していないため、外周壁上下方向の膜力を無視しているため、および横隔壁(F.11 および F.12)の反力を考慮していないためであると考えられる。

図 13 に衝突船舶の運動エネルギーとポンツーンの損傷の関係を示す。図 10 と図 11(b)より、船首貫入量とポンツーンの吸収エネルギーの関係を求め、ポンツーンの吸収エネルギーと衝突船舶の消費運動エネルギーが等しいことにより、ポンツーン外周隔壁を破断させる船舶の衝突条件 (重量と速度) を求めている。衝突船舶の衝突速度が 5kts 以下で衝突した場合は、4,000 tf の船舶でも、外周壁は破断しないと考えられる。衝突速度が 10kts では、1,290 tf (500GT に相当) の船舶が衝突した場合、外周板の破断する可能性がある。

6.2 ケース 2 (横隔壁上)

FEM 解析結果より、以下のことが分かる。

図 14(a)に反力の時刻歴を示す。反力は約 0.02 秒まで

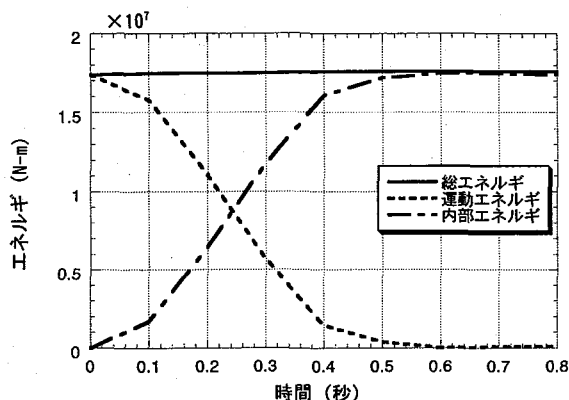
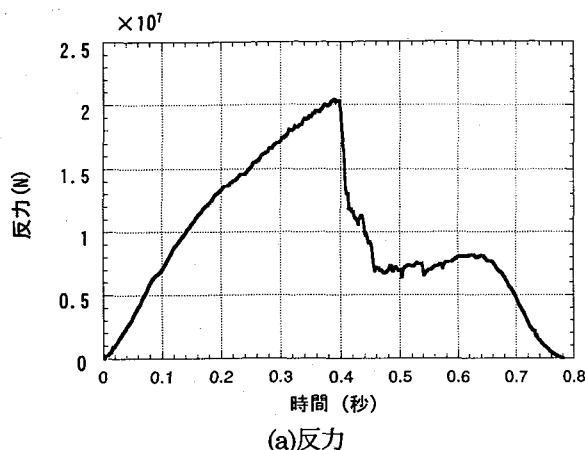
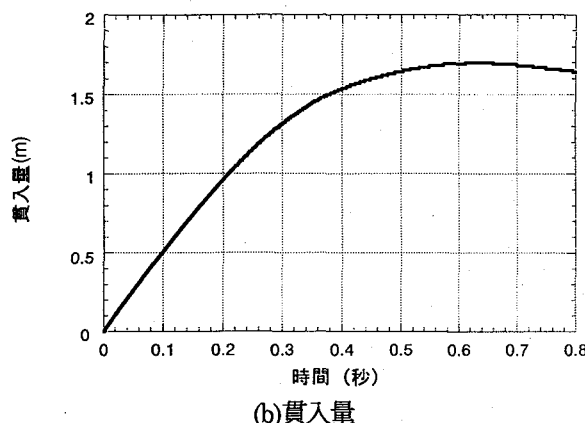


図 10 衝突船舶の運動エネルギーおよびポンツーンの内部エネルギー (ケース 1)



(a) 反力



(b) 貫入量

図 11 反力および貫入量の時刻歴 (ケース 1)

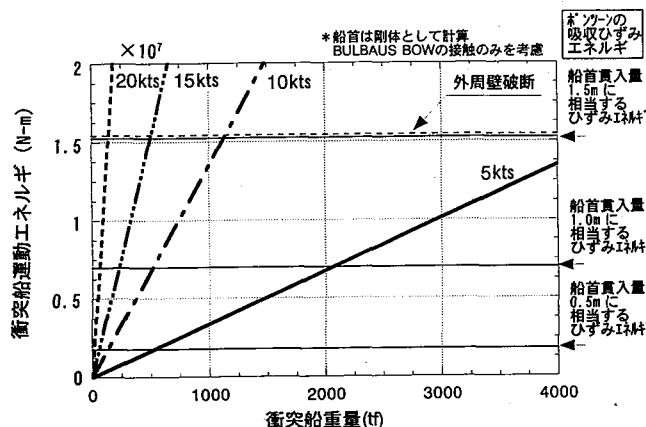


図 13 衝突船舶の運動エネルギーとポンツーンの損傷の関係 (ケース 1)

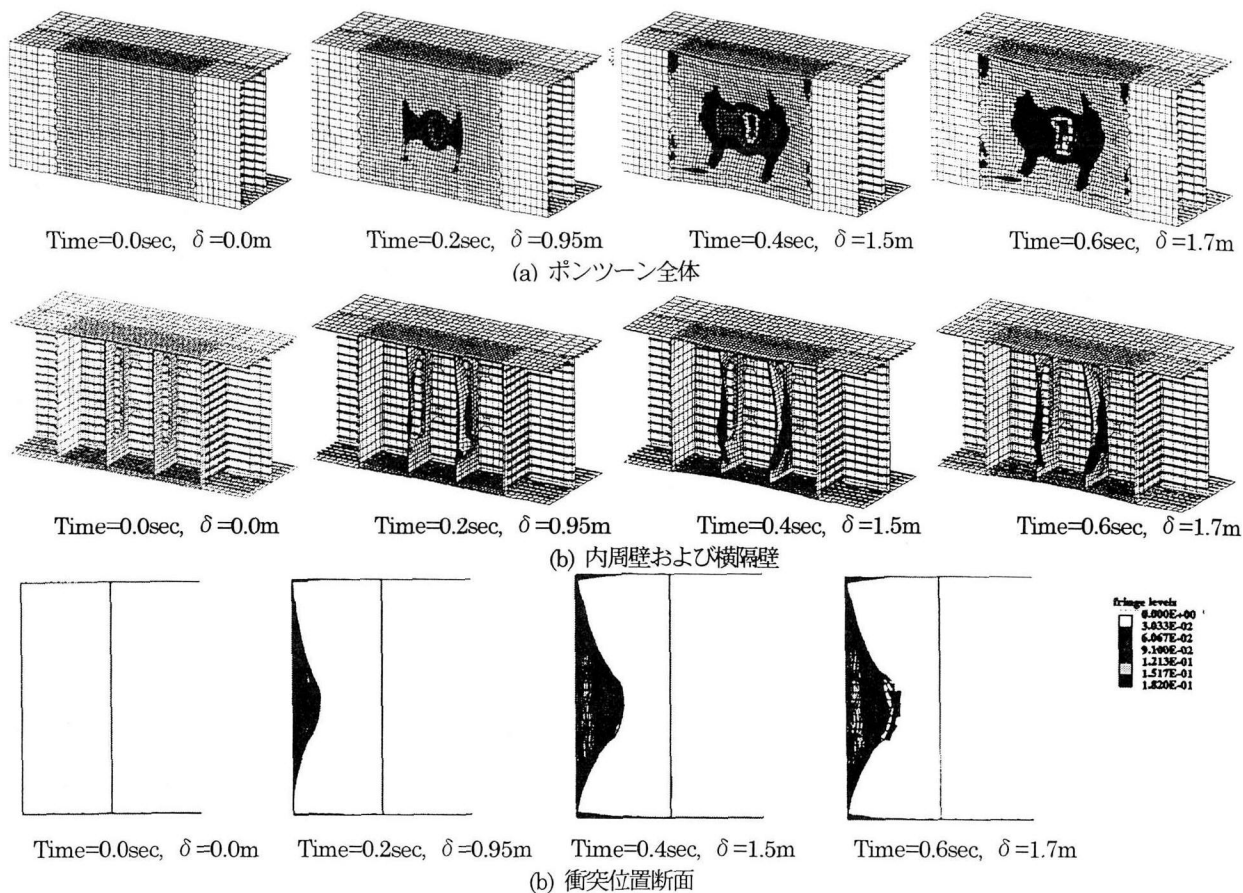


図 12 変形および相当塑性ひずみ分布 (ケース 1)

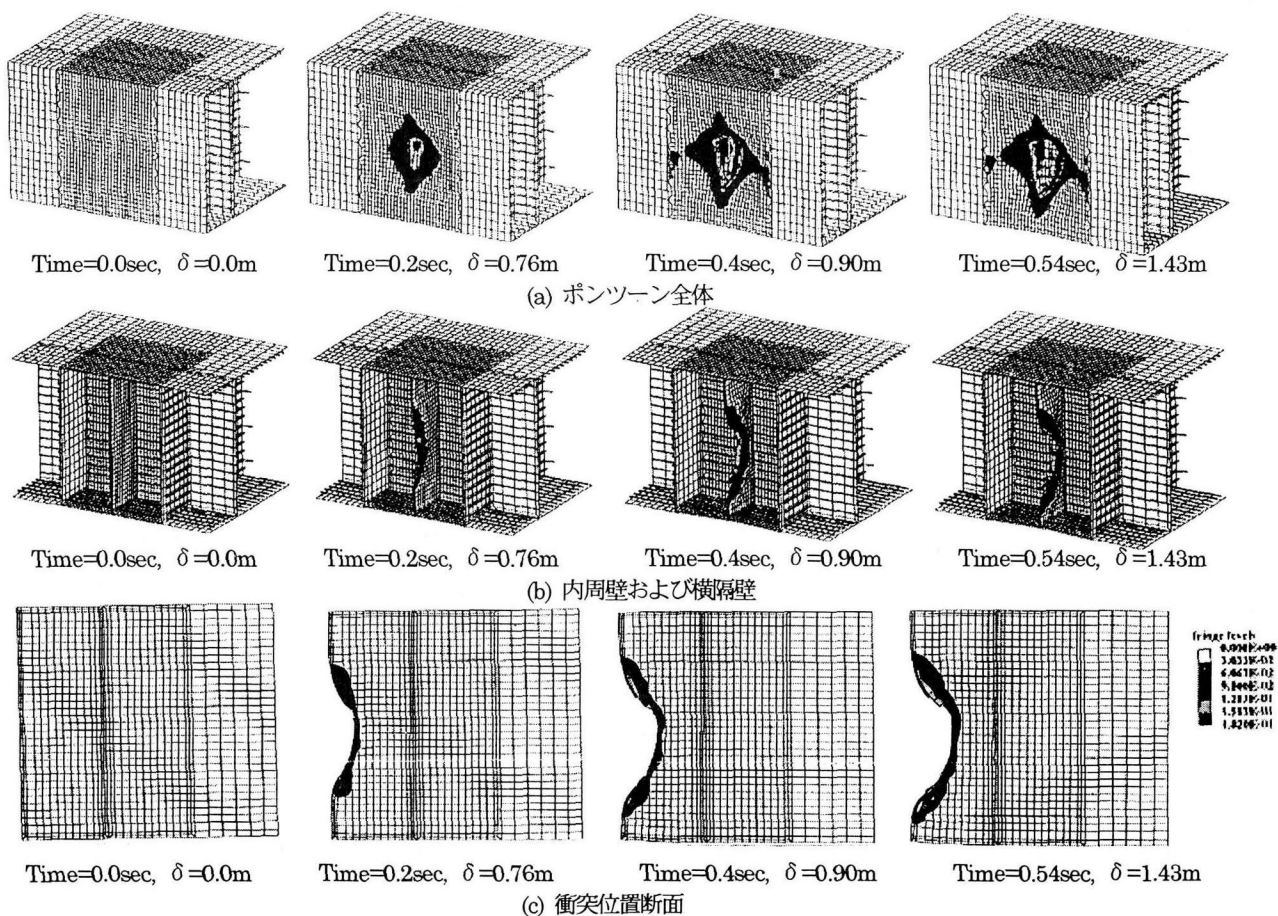
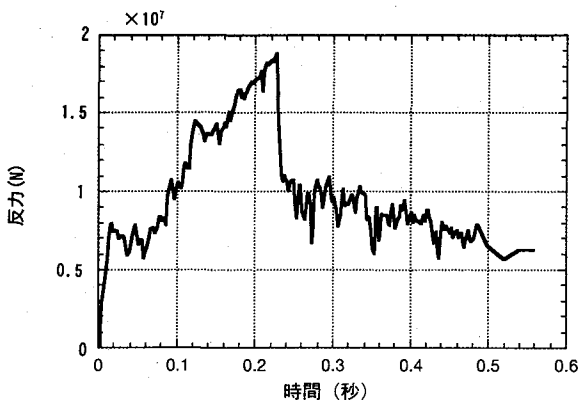


図 15 変形および相当塑性ひずみ分布 (ケース 2)

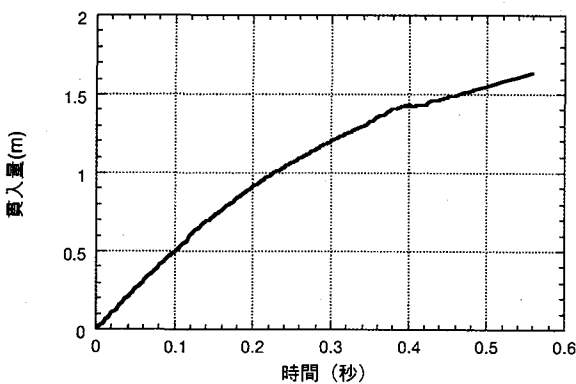
ほぼ線形に上昇し、そのときの反力値は $7.84 \times 10^6 \text{ N}$ である。座屈変形の生じている部分は横隔壁の高さ中央の $1/3$ の領域であり、この部分を2辺支持、2辺自由の板として求めた座屈荷重 $7.45 \times 10^6 \text{ N}$ と上記反力値はほぼ一致している。

さらに、隔壁の座屈後、0.22 秒前後で反力が急激に減少する。これは、外周壁が破断し始め、0.22 秒前後で破断が一気に進むためである。また、外周壁の面外最大変形量は 1.70 m である。

図 15(a)より、外周壁には衝突船の船首近傍に最大のひずみが発生していることが分かる。また、衝突船の船首近傍の外周壁の要素は破断ひずみに達し、破断している。図 15(b)より、横隔壁の変形領域は、内周壁まで達せず、内周壁には大きなひずみは発生しないことが分かる。



(a)反力



(b)貫入量

図 14 反力および貫入量の時刻歴 (ケース 2)

7. 係留用フェンダーの強度検討

小型船舶がポンツーンに衝突したときに、ポンツーンに発生する荷重により、係留用フェンダーに発生する荷重ならびに変形量を検討する。

衝突船の衝突位置および可動橋の構造を勘案し、衝突時の橋脚に発生する反力は図 3 に示した反力壁位置に配置された係留用フェンダー(片側 4 個)が受け持つとする。係留用フェンダーの仕様は、設計標準ひずみ 52.5%、反力 $3.93 \times 10^6 \text{ N}$ である。図 16 に計算モデルを示す。ポン

ツーンを質点にモデル化し、ポンツーンの質点は、船舶の衝突位置、可動橋の構造を勘案し、係留フェンダーの非線型バネにより、直接、支持されているものとしてモデル化する。この時の質点の運動方程式は、ただし、

$$M\ddot{x} = -R(x) + P(t) \quad (5)$$

M: 付加質量を含むポンツーンの質量
(ポンツーン本体質量の 40%¹¹⁾ を付加質量として考慮)
R: 係留フェンダーの非線型ばねに発生する反力
P: 衝突船の反力

(5)式の P に FEM 解析結果より得られた船衝突時の反力の時刻歴を与え、(5)式を数値積分することにより、フェンダーに発生する反力、変形量を求める。

図 17(a)にフェンダーに発生する反力の時刻歴、図 17(b)にフェンダーの変形量の時刻歴を示す。図 17(a)よりフェンダー 4 個に発生する反力は、 $2.4 \times 10^6 \text{ N}$ ($=9.6 \times 10^6 \text{ N}/4$ 個)であった。このときに発生する圧縮ひずみは、0.08 であり、設計標準ひずみ 0.525 以下である。なお、この時に発生する最大加速度は、 0.88 m/sec^2 であった。これらの結果から、小型船舶が衝突しても、フェンダーの安全性には問題ないと考えられる。

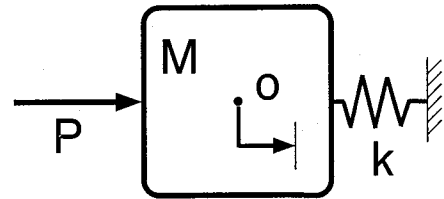
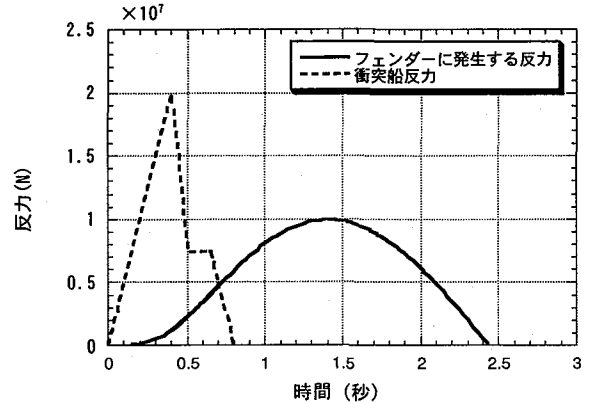
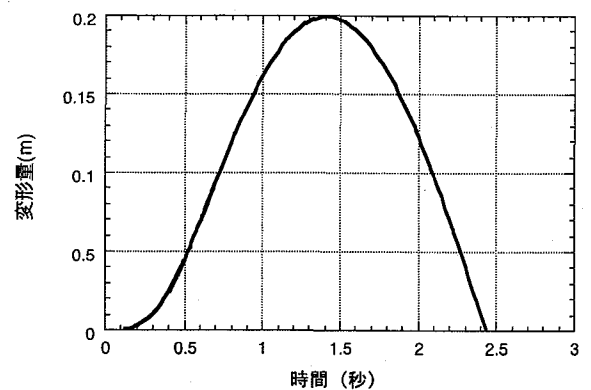


図 16 係留フェンダーの強度解析モデル



(a)反力



(b)変形量

図 17 係留用フェンダーに発生する反力および変形量

8. 結言

本研究では、まず、浮体橋ポンツーンの船舶衝突時に対する設計思想を述べた。次に、浮体橋ポンツーンへの500GTの小型船舶が、速度10ktsで衝突した場合の強度を簡易評価、有限要素解析を用いて検討した。さらに、係留フェンダーの強度を検討した。

その結果、以下のことが分かった。

- (1) 簡易評価を用いて、横隔壁間の貫入量を算定したところ FEM 解析結果と比較し、変形量は約 3 割大きく見積もる結果であった。本簡易評価手法を用いれば、浮体橋ポンツーンと同様の構造様式について労力のかかる詳細有限要素法解析を行うことなしに船舶衝突による変形量を安全側に推定できる。
- (2) 外周壁の面外最大変形量は、横隔壁間、横隔壁上とも、約 1.7m であり、外周壁と内周壁の間隔が 3m であることを考えると、内周壁には損傷が生じないと推定される。
- (3) 横隔壁間の衝突において、外周壁の衝突位置近傍の要素は、破断ひずみに達していることから、破断する可能性があると考えられる。
- (4) 横隔壁上への衝突において、横隔壁の変形は、内周壁間にすでに収まっており、内周壁には大きなひずみは発生しないことから、内周壁を含む内部構造には破断、変形等の影響は及ばないことが分かる。

浮体構造物は、環境への負荷が小さいことや耐震性に優れていることなどのメリットが注目されており、周囲を海洋に囲まれたわが国での適用性も高いと考えられることから、近年、その活用拡大を図る種々の活動が活発化している。このような状況のもと、新形式橋梁としての浮体橋にも大きな期待が寄せられており、夢洲～舞洲連絡橋の建設と本稿内容も含めた検討結果が、浮体橋のより一層の技術向上と適用拡大に寄与することを期待している。また、わが国では、海洋開発の有力な工法として様々な浮体構造の構想もあり、薄肉浮体構造物に対する船舶衝突の安全性評価において本論文が参考になれば幸いである。

最後に、本橋の設計に当たって、御助言・御指導いただいた大阪市可動橋検討委員会（委員長、渡邊英一京都大学教授）・動揺専門委員会（委員長、小田一紀大阪市立大学教授）の方々と運輸省技術担当の方々に深遠なる謝意を表わす次第であります。

参考文献

- 1) 丸山忠明, 岸本俊雄, 川村幸男, 田中洋, 津田智康, 安田義則: 夢洲～舞洲連絡橋(仮称)の設計(上), 橋梁と基礎, pp.15-24, 1998.2
- 2) 丸山忠明, 武田純男, 川村幸男, 中地映司, 津田智康, 岡俊蔵, 土屋昌義: 夢洲～舞洲連絡橋(仮称)の設計(下), 橋梁と基礎, pp.27-36, 1998.3
- 3) 上田茂, 白石悟, 丸山忠明, 上蘭晃, 高崎守, 山瀬晴義: 浮体橋に使用する係留用ゴムフェンダーの特性, 日本造船学会, 第14回海洋工学シンポジウム, 1998.10
- 4) 本州四国連絡橋公団: 多室型緩衝工の設計要領, 1980.3
- 5) 土木学会: 構造物の衝撃挙動と設計法, 1993
- 6) Ito, H., Kondo, K., Yoshimura, N., Kawashima, M., Yamamoto, S.: A Simplified method to analysis the strength of double hulled structures in collision(3 rd report), 日本造船学会論文集, pp.266-274, 1986
- 7) Sano, A., Muragishi, O., Yshikawa, T., Shimizu, H., Unno, M., Taniguchi, T.: A study on the strength of double hull VLCC in collision, MARIENV'95 Proceeding, pp.58-65, 1995
- 8) Kuroiwa, T., and Kawamoto, Y.: Numerical simulation of collision and grounding of ships, MARIENV'95 Proceeding, pp.66-70, 1995
- 9) 上田幸雄, 村川英一, 谷川雅之: 予ひずみ材の延性き裂伝播評価法, 日本造船学会論文集, pp.399-406, 1996
- 10) Livermore Software Technology Corporation: LS-DYNA3D user's manual, 1995
- 11) 元良誠三, 藤野正隆, 杉浦正憲, 杉田松次: 衝突時の付加質量について, 日本造船学会論文集, pp.141-152, 1969

(1999年9月17日受付)