

東京工業大学大学院 専生員 菊地健治
A. I. T. 正員 椎貝博美

1. 序文

水中構造物の設計の際には、船舶などが衝突した時の現象を把握しておく必要がある。そのひとつの方法として、現象に支配的な相似則を確立し、その相似模型を使って現象を再現する方法が挙げられる。本研究では、最も簡単なケースとして、円柱橋脚に大型タンカーが衝突する現象において、どのような相似則が導かれるか検討し、模型実験により、その相似則の妥当性を調べ、合せて衝突後の現象を調べてみた。

2. 相似則

本研究では、粘性力の影響は慣性力に対して無視できるとし、支配的物理量として、まずつぎの8つを考えた。水の密度 ρ 、橋脚材料の密度 σ 、ヤング係数 E 、及びポアソン比 μ 、代表的長さ l 、代表的速度 U 、重力加速度 g 、反発係数 e 。これから5つの π ナンバーが得られ、そこから実物と模型との相似律として、図1-(a)のような関係が得られる。ここで、 π_3 の $E = l^2$ という関係を合わせるのは、実験装置上不可能である。そこで、 E を曲げ剛性を示す要素としてとらえ、橋脚では衝撃力による振動が大きく支配することと考え、

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F \text{-----(1)}$$

という粘性減衰 c を持つ系の外力 F による応答振動を表わす式を導入することにする。(1)式の各項を無次元化した式、

$$\frac{m l}{F T^2} \frac{d^2 x^*}{dt^{*2}} + \frac{c l}{F T} \frac{dx^*}{dt^*} + \frac{k l}{F} x^* = 1 \text{---(2)}$$

(a) $\pi_1 = \frac{\rho}{\sigma}$	$\sigma_r = 1$
$\pi_2 = \frac{E l^2}{U^2}$	$U_r = \sqrt{E l}$
$\pi_3 = \frac{g U^2}{E}$	$E_r = l^2$
$\pi_4 = e$	$e_r = 1$
$\pi_5 = \mu$	$\mu_r = 1$
(b) $\pi_6 = \frac{m l}{F T^2}$	$F_r = l^3$
$\pi_7 = \frac{c l}{F T}$	$C_r = l^{3/2}$
$\pi_8 = \frac{k l}{F}$	$K_r = l^2$

1. 実物と模型の物理量の比.

図1 π ナンバー-相似則 図示

における係数を π ナンバーとして図1-(b)のような相似律を導き出し、 π_6 の条件を π_8 の条件の代用として取扱うことにした。 E は l^2 、 m は橋脚質量、 k は系のバネ定数、 F は外力、 l, T は代表的長さ及び時間、 $x^* = x/l$ 、 $t^* = t/T$ とする。図1-(a)(b)で得られた相似律のうち、模型製作不可能な、あるいは影響の少ないと考えられる条件を削除して、結局、二重ワフで囲んだ相似条件で模型を作ることにした。

3. 模型形状

図1-(a)(b)における相似条件を満たすような模型形状として、最終的に図2のような型を考えた。下部に点線のようにカバーをつければ、幾何相似も満足しうる。この場合、 $K_r = l^2$ から寸法の条件式として、

$$\frac{E_p I_p}{E_m I_m} \left\{ 1 - \left(\frac{l_{2m}}{l_m} \right)^3 \right\} = l_r^5 \text{-----(3)}$$

が得られる。 E に添字 p, m はそれぞれ実物と模型の物理量を表わし、 I は断面二次モーメントを表わす。実際には、直径 $D_p = 40m$ 、高さ $l_p = 120m$ 程度のものを想定し、コンクリート製で $E_p = 1.37 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$ とおき、模型の下部細棒部は鋼棒を使用し、 $E_m = 2.20 \times 10^{10} \text{ dyn/cm}^2$ において、(3)式を満足するようは模型寸法として、図2の寸法を得た。

4. 実験と解析

実験は水路に固定した橋脚に、アラスチック製の船を衝突させ、橋脚の振動変位を、橋脚細棒部に貼った歪ゲージを通してヒツグラフで、船の速度を8mm映画で測定した。

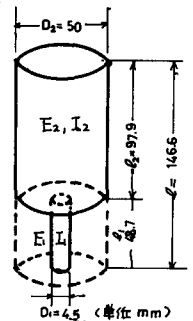


図2 模型寸法

衝突時間は、橋脚と船首とにつけられた電氣的接点の短絡時間として測定した。

図3で、衝突時を $t=0$ とし、衝突後第一番目の峰の時刻を t_1 とし、(1)式を区間 $[0, t_1]$ で積分すると、

$$\int_0^{t_1} m \ddot{x} dt + \int_0^{t_1} c \dot{x} dt + \int_0^{t_1} k x dt = \int_0^{t_1} F dt \quad \text{-----(4)}$$

を得る。左辺第一項は0となり、又右辺は衝突による船の運動量変化と考えれば、(4)式を整理して、

$$M(V - V') = MV = c x_{t_1} + k \int_0^{t_1} x dt \quad \text{-----(5)} \quad (\text{但し、正面衝突の時})$$

を得る。Mは付加質量を含んだ船の質量、V, V'は衝突前後の船の速度を示す。V'は記録から $V' \approx 0$ とおける。C, x_{t_1} , t_1 , Vを記録から読みとり、kは別に同橋脚において静歪みから求め、(5)式に代入して、Mを計算し、排水量 M_0 と比較して付加質量を計算すると、 $M' = 0.1 \sim 0.23 M_0$ が得られる。付加質量については、 $M' = 0.05 \sim 0.15 M_0$ という値が知られており、⁽¹⁾ 本実験で得られた値とオーダー的には一致する。

5. まとめ

今回の模型では、流体力学的な相似パラメータとしては、Froude数以外のものは、相似則で考慮していないが、M'がだいたい一致することから、今回の模型実験が、他のパラメータ、例えば、Weber数、Reynolds数などが、あまり重要でない範囲におさまっていると考えられる。

相似律を成立させる際、反発係数に関する相似条件は削除したが、実際、これを実物と模型で合するのは困難である。しかし、自動車の場合には、完全弾性衝突とした相似模型でもかなり現象を再現する場合があることが知られている。⁽²⁾ このことから考えると、totalの衝突力を問題とする場合や、衝突時の破壊があまり問題でないような場合には、反発係数に関する相似条件を削除しても、現象の再現性には大きな支障にはならないと思われる。結局、実際の現象をより容易に、より早く、より便利に再現するという模型実験の目的を考えれば、今回の模型実験もある程度、その目的を達することができたと思われる。

今回の実験によれば、斜めに衝突した時、船は図4に示すような軌跡を描き船後部側舷部で再衝突する場合が多い。これは興味ある現象で、船の破壊の生じる場所が衝突部とは限らないということが予測される。しかし、船首部が第一回目の衝突で大きく破壊した時にも、このようなことが生じるかどうかは、まだ不明である。最後にこの模型より換算された実物における諸寸法、模型での実測値の実物換算値を表1に挙げておく。

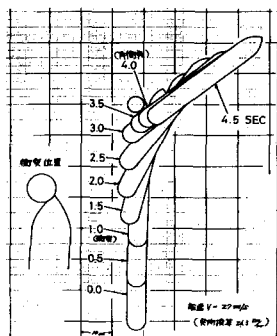


図4 船の軌跡

項目	相似律	模型	実物
橋脚直径	$D_p = \ell_r D_m$	5 cm	36.5 m
全高	$\ell_p = \ell_r \ell_m$	14.66 "	107.02 "
水中高	$\ell'_p = \ell_r \ell'_m$	11.46 "	83.66 "
重量	$W_p = \ell_r^3 W_m$	722.2 g	283,300 ton
単位重量	$g_{0p} = g_{0m}$	2.53 g/cm ³	2.53 g/cm ³
船排水量	$W_p = \ell_r^3 W_m$	401.2 g	156,000 ton
船長	$\ell_p = \ell_r \ell_m$	44.5 cm	324.9 m
船幅	$\ell_p = \ell_r \ell_m$	6.0 cm	43.8 m
船高	$\ell_p = \ell_r \ell_m$	3.8 cm	27.7 m
船速	$U_r = \sqrt{\ell_r}$	22 cm/sec	21.5 km/hr

参考文献

- (1) 元良誠三：船体運動学，共立出版，1967。
- (2) D.J. ユーリング、江守一郎：模型実験の理論と応用，技報堂，1973。

[$\ell_r = 730$]

表1 実物換算値