

海洋構造物（魚礁）の設計に関する基礎的研究

河 野 二 夫*

1. 緒 言

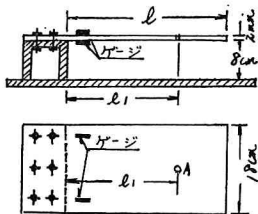
本論文は人工魚礁を海底に設置するとき、海面からの自由落下による着底衝撃力を検討し、魚礁の有効断面の決定に必要な設計外力に関し水工学的立場から考察を試みたものである。この種類の研究としては中村ら¹⁾による球殻模型を用いた研究があるが、本研究では既設魚礁の模型を用いた。また、着底時の付加質量の増加（鏡像効果）に関する問題に重点をおいた。

2. 実験装置と模型

(1) 実験装置と実験方法

実験は水中と空中の実験になる。水中実験装置は透明プラスチック製水槽（0.5 m×0.5 m×1.2 m）の底部に図—2.1 に示す受圧板を固定したものである。模型魚礁（以下魚礁）の水中落下による着底衝撃力は受圧板にはりつけた Strain-gage を用いて、その撓を直流増幅器によりビジグラフに記録させて求めた。魚礁の自由落下による着底位置は不定なので、受圧面の A 点の小孔を通して釣糸（wire）を鉛直に張り、魚礁は wire に沿って落下させた。wire を取り付けぬ場合の落下の運動状況もストロボ撮影して検討した。なお、魚礁の落下と着底の瞬間の時刻はビジグラフに記録できる様になっている。

空中実験装置は三脚を使用し、その底面中央に受圧面の A 点がかかる様にした。落下速度や衝撃力等の計測方法は水中実験と同様の装置によった。wire は使用しない。落下は頂点、部材の一辺、部材の四辺が着底する様にした。

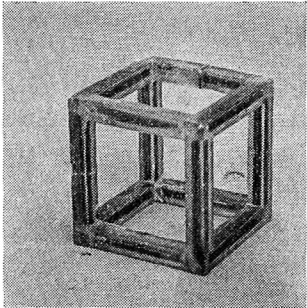


図—2.1 受圧板

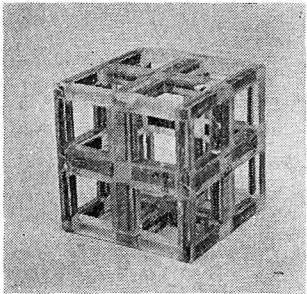
(2) 実験模型

魚礁模型は図—2.2 に示す様な A, B 型を使用した。

空中実験には球殻模型を使用した。模型の諸元を表—2 に示してある。



図—2.2.1 魚礁模型 (A 型)



図—2.2.2 魚礁模型 (B 型)

表—2.1 魚礁模型諸元

模 型	縮 尺	部材長	部材幅	体 積	質 量	単位重さ	使 用 材 料
	S	l	d	V	m ₁	w	
		cm	cm	cm ³	g	g/cm ³	
B-1	1/25	16.0	1.4	887	2 180	2.46	ポリエス テル+鉛
B-2	1/25	16.0	1.1	580	1 325	2.28	〃
A-1	1/10	15.0	2.0	592	1 365	2.30	〃
A-2	1/10	15.0	3.0	1 188	1 840	1.55	〃+砂
A-4	1/20	7.5	1.5	148	315	2.13	〃+鉛

3. 理論的考察

(1) 魚礁の落下速度

魚礁を水面近傍 ($y=0$) で自由落下した時の運動方程式は式 (1) で示される。 y は鉛直下向きの座標系である。

* 正会員 工博 琉球大学教授 理工学部土木工学科

表—2.2 球殻模型諸元

球 殻	直 径	質 量	体 積	単位重さ	使 用 材 料
	d	m_1	V	W	
	cm	g	cm ³	g/cm ³	
a	3.74	44	28	1.59	ポリエステル+砂
b	5.87	126	106	1.19	"
c	5.86	125	105	1.18	"
d	4.67	412	53	7.73	鋼
e	8.08	520	276	1.88	モルタル
f	5.87	193	106	1.82	"

$$M\dot{U} + \frac{1}{2}C_D \cdot \rho \cdot A \cdot U^2 = (m_1 - \rho V)g \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 u : 落下速度、 C_D : 抗力係数、 ρ : 水の密度、 A , V : 魚礁の投影面積、実容積、 g : 重力の加速度である。 M は魚礁の質量 (m_1) と付加質量 (m_4) と鏡像効果による付加質量の増分 (m_6) の総和である。一般に m_4 は一定値と見做される (後述) が m_6 は y と V の関数である。例えば球形物体 (半径 a) の場合は m_4 , m_6 は理論的に式 (2) になる²⁾

$$\frac{m_4}{\rho V} = \frac{1}{2}, \quad \frac{m_6}{\rho V} = \frac{3}{16} \left(\frac{a}{h-y} \right)^3 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 h : 着底までの落下高であり $h-y \geq a$ である。式 (2) により m_6 は着底近傍のみでの効果が大きいため、落下速度を問題とする場合は式 (1) で $M = m_1 + m_4$ としてよいと思われる。 C_D も境界壁 (海底) の影響を受けるが³⁾ 上記と同様の理由で無視する。以上の仮定で式 (1) の解は式 (3) になる。

$$\left. \begin{aligned} U &= U_0 \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{\rho A C_D y}{M}\right)}, \\ U_0 &= U|_{y \rightarrow \infty} = \sqrt{\frac{2g(m_1 - \rho V)}{\rho A C_D}}, \\ U_0 &= U|_{y=h} = U_0 \cdot \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{\rho A C_D h}{M_1}\right)}, \\ \bar{U} &= \frac{1}{h} \int_0^h U \cdot dy = U_0 \left\{ 1 + \log_e 0.54 \times \frac{M}{\rho A h C_D} \right\} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 U_0 , U , $\bar{U}$: 最終速度、着底速度、平均速度である。ただし $M_1 = m_1 + m_4 + m_6$ である。物体を空中で落下させる場合は、空気抵抗を無視すると次式が得られる。

$$U = \sqrt{2gy}, \quad U_0 = \sqrt{2gh}, \quad \bar{U} = \sqrt{2gh}/2 \quad \dots\dots\dots(4)$$

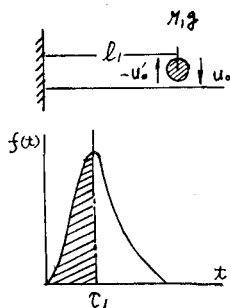
(2) 着底衝撃力

魚礁の着底衝撃力 $\{f(t)\}$ は表—3.1 を参考にすると、式 (5) の力積で与えられる。

$$\int_0^{\tau_1} f(t) dt = M_2 u_0' - M_1 u_0 = M_3 v_0' \quad \dots\dots\dots(5)$$

表—3.1 衝突前後の速度、質量

		魚 礁	受 圧 板
衝突前	速 度	u_0	$v_0=0$
	質 量	M_1	M_3'
衝突後	速 度	u_0'	v_0'
	質 量	M_2	M_3



図—3.1 衝撃力

τ_1 は図—3.1 に示す衝撃作用時間である。運動量保存則により、

$$u_0' = \frac{(M_1 - M_3 \cdot e)}{M_2 + M_3} u_0, \quad v_0' = \frac{(M_1 + M_2 \cdot e)}{M_2 + M_3} u_0 \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここで、 e : 反撥係数 $\{(v_0' - u_0')/u_0\}$ である。式 (6) を式 (5) に代入すると、

$$\int_0^{\tau_1} f(t) dt = \pm \frac{M_3(M_1 + M_2 e)}{M_2 + M_3} u_0 \quad \dots\dots\dots(7)$$

$\pm$ は魚礁 (−) と受圧板 (+) に対応する。近似的には、図—3.1 により、 $f(t) = P_{\max} \cdot \sin(\pi \cdot t / 2 \cdot \tau_1)$ とすると

$$P_{\max} = \frac{\pi}{2} \left[\frac{M_3(M_1 + M_2 e)}{M_2 + M_3} \right] \cdot u_0 \times \frac{1}{\tau_1} \quad \dots\dots\dots(8)$$

以上は不完全弾性衝突を仮定した場合であるが、完全非弾性衝突を仮定すると、上式で $e=0$ である。

(3) 衝突前後の質量 (表—3.1)

(a) M_1 , M_2 について

$M_1 = m_1 + m_4 + m_6$ であるが、 M_2 は鏡像効果は考える必要はないと考える。今後検討を要するが、 $M_2 = m_1 + m_4$ とする。

(b) M_3' , M_3 について

実験的に衝撃力を評価する場合、受圧板の変位を測定する必要がある。この変位は受圧板の質量 (m_5)、ヤング係数 (E)、慣性モーメント (I) 等に関係し、かつ衝撃力の作用点 (図—2.1 の h_1 の位置) での受圧板の相当質量 ($\alpha_1 \cdot m_5$) の評価の仕方にもよる。図—3.2 で受圧板の弾性曲線と変位は次式になる。

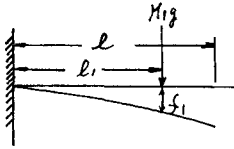


図-3.2 受圧板の撓み

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} &= \frac{M_1 g}{EI}(l-x) \\ y &= \frac{f_1}{2l^3}(3l_1 x^2 - x^3) \quad \text{for } (0 < x < l_1) \\ y &= \frac{f_1}{2l^3}(3x - l_1) \quad \text{for } (l_1 < x < l) \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

受圧板の運動エネルギーは式(9)を用いると式(10)になる。

$$\left. \begin{aligned} E_k &= \int_0^l \frac{m_5}{2l} (\dot{y})^2 dx = \frac{1}{2} \alpha_1 m_5 (\dot{f}_1)^2 \\ \alpha_1 &= \alpha^2 (3/4 - 3/4 \alpha + 1/4 \alpha^2 - 1/70 \alpha^3), \\ \alpha &= l_1/l \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (10)$$

結局、 $\alpha_1 m_5$ は m_5 の l_1 点に於ける質点系質量と見做される。式(10)で $\alpha=1$ の時は $\alpha_1=33/140$ となる⁴⁾。次に魚礁の初速度(u_0')に対する受圧板の質量(m_5)への影響は、自重による仕事を A とすると、

$$dA = g y \left(\frac{m_5}{l} \right) dx \dots\dots\dots (11)$$

式(11)に式(9)を代入すると、

$$A = \alpha_2 m_5 g \cdot f_1, \quad \alpha_2 = 3/8 \cdot \alpha + 1/4 \alpha (3 - \alpha^2 - 2\alpha) \dots\dots\dots (12)$$

式(12)で $\alpha=1$ の場合は $\alpha_2=3/8$ となる⁵⁾。以上の計算によると、空中衝撃では $M_5' = \alpha_1 m_5$, $M_5 = \alpha_2 M_5'$ となる。水中衝撃では受圧板の付加質量(m_3)を考えると $M_5 = m_3 + \alpha_2 m_5$ となる。

(4) 着底衝撃力の無次元化 ($\bar{p}$)

前節の関係を式(8)に代入し、無次元化すると、

$$\left. \begin{aligned} \text{水中衝撃力:} \\ \bar{P} &= \frac{\tau_1 \cdot P_{\max}}{U_0 \{m_5 + (m_1 + m_4)(1+e)\}} \\ &= \frac{\pi}{2} \frac{m_3 + \alpha_2 m_5}{m_1 + m_3 + m_4 + \alpha_2 m_5} \\ \text{空中衝撃力:} \\ \bar{P} &= \frac{\tau_1 \cdot P_{\max}}{U_0 \cdot m_1 (1+e)} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\alpha_2 m_5}{m_1 + \alpha_2 m_5} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots (13)$$

海底(受圧板)を無限の質量($\alpha_2 m_5 \rightarrow \infty$) とすると式(13)は次式に変換される。

$$\left. \begin{aligned} \text{水中衝撃力:} \\ \bar{P} &= \frac{\tau_1 \cdot P_{\max}}{U_0 \{m_5 + (m_1 + m_4)(1+e)\}} = \frac{\pi}{2} \\ \text{空中衝撃力:} \\ \bar{P} &= \frac{\tau_1 \cdot P_{\max}}{U_0 \cdot m_1 (1+e)} = \frac{\pi}{2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (14)$$

(5) 衝撃係数・衝撃作用時間 (τ_1)

衝撃力は式(13)、(14)で与えられる。以上の計算は運動方程式を1回積分した形の方程式(運動量と力積)で考察したことになる。本節では衝撃係数や衝撃作用時間等を知るために、直接運動方程式を解くことにする。即ち、海底条件{実験的には受圧板の質量やばね定数(k_1)}に対し、 $P_{\max}$ と τ_1 を作用させた時の変位応答(y)を運動方程式を直接積分して求めるものである。以下は完全非弾性衝撃として仮定する。

(a) 受圧板の振動

受圧板の運動エネルギーは式(10)で与えられ、Potential エネルギーと dissipation function は各々 $U=1/2 \cdot k_1 \cdot y^2$, $F=1/2 \cdot C \cdot \dot{y}^2$ である。ここで、 y は図-2.1で l_1 点の変位(f_1)である。また C は受圧板の減衰係数である。

Lagrange の方程式は式(15)になる⁶⁾

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_k'} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_k'} + \frac{\partial u}{\partial \dot{q}_k'} + \frac{\partial F}{\partial \dot{q}_k'} &= P_k' \\ P_k' &= (m_1 - \rho V) g \cdot q(t) - \frac{1}{2} \rho A' C_D' (\dot{y})^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots (15)$$

ここで k_1' : 自由度, q_k' : 一般座標, P_k' : 一般力, C_D' : 受圧板と魚礁に対する抗力係数, A' : 受圧板の投影面積, $q(t)$: unit-step-function である。以上の外に受圧板の付加質量(m_3)と魚礁の質量(m_1), および付加質量(m_3)も考えると、式(15)は式(16)に変換される。

$$\left. \begin{aligned} M \ddot{y} + C \dot{y} + k_1 y &= (m_1 - \rho V) g \cdot q(t) - \frac{1}{2} C_D' \rho A' (\dot{y})^2 \\ q(t) &= 0 \text{ for } t < 0, \quad q(t) = 1 \text{ for } t > 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (16)$$

ここで $M = m_1 + m_3 + m_4 + \alpha_1 m_5$ である。 $(m_3 + m_4)$ の値は受圧板と魚礁が組み合わされると、多少異なると思われるが、一応この様にして置く。

初期条件は

$$t=0 \text{ で } \dot{y} = u_0', \quad y=0 \dots\dots\dots (17)$$

式(16)の解を式(18)で仮定すると、 $y(t)$ の Laplace 変換 $Y(s)$ とその逆変換 $y_0(t)$ は次の様になる。

$$\left. \begin{aligned} y &= y_0 + \varepsilon y_1 + \varepsilon^2 y_2 + \dots\dots\dots (18) \\ Y(s) &= L[y(t)] = \{K/S + u_0'\} / (S - S_1) \cdot (S - S_2) \\ y_0(t) &= L^{-1}[Y(s)] = K/\omega_n^2 \\ &\quad + \sqrt{(u_0'/\omega_n)^2 + (K/\omega_n^2)^2} \cdot \sin(\theta - \phi) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

$$\theta = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \cdot t \pm \omega_n t, \quad \phi = \arctan(K/\omega_n \cdot u_0') \dots\dots\dots (20)$$

ここで、

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= C_D' \rho A' / 2 \cdot M; \quad K = (m_1 - \rho V) g / M; \\ \omega_n &= \sqrt{k_1 / M}; \quad \zeta = C / 2 \cdot \sqrt{k_1 \cdot M}; \\ S_1, S_2 &= \omega_n (-\zeta \pm j \sqrt{1 - \zeta^2}) \end{aligned} \right\} \dots\dots (21)$$

$j = \sqrt{-1}$ である。 $K/\omega_n^2 = y_s$ (静的変位) として二次

近似解までを示すと,

$$y(t) = y_s + \sqrt{y_s^2 + (u_0'/\omega_n)^2} \cdot \sin(\theta - \phi) - \frac{C_D' \rho A'}{4M} \left\{ y_s^2 + \left(\frac{u_0'}{\omega_n} \right)^2 \right\} - \frac{C_D' \rho A'}{12M} \left\{ y_s^2 + \left(\frac{u_0'}{\omega_n} \right)^2 \right\} \cos(2\omega_n t) \dots \dots \dots (22)$$

$$\frac{y_{\max}}{y_s} = 1 + \left[1 + \frac{k_1(m_1 + m_3 + m_4 + \alpha_1 m_5) \cdot (m_1 + m_4 + m_6)^2 u_0'^2}{(m_1 - \rho V)^2 \cdot g^2 \cdot (m_1 + m_3 + m_4 + \alpha_2 m_5)^2} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (23)$$

空中振動では

$$\frac{y_m}{y_s} = 1 + \left[1 + \frac{2k_1 h(m_1 + \alpha_1 m_5)}{(m_1 + \alpha_2 m_5)^2 g} \right]^{1/2} \dots \dots \dots (24)$$

(c) 衝撃作用時間 (τ_1)

式 (19) で $\dot{y}_0 = 0$ の条件を用いると

$$t = \tau_1 = 1/\omega_n \{ \pi/2 + \tan^{-1}(K/\omega_n \cdot u_0') \} \dots \dots \dots (25)$$

近似的には

$$\left. \begin{aligned} \text{水中振動: } \tau_1 &= \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m_1 + m_3 + m_4 + \alpha_1 m_5}{k_1}} \\ \text{空中振動: } \tau_1 &= \frac{\pi}{2} \sqrt{(m_1 + \alpha_1 m_5)/k_1} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (26)$$

4. 実験結果と考察

(1) 魚礁の付加質量 (m_4 , m_6)

図-4.1 に示す振子 (ばね定数 k) を微小振動 (水中) させる時の角振動数 (ω) は次式で与えられる.

$$\omega^2 \doteq k/(m_1 + m_4 + m_6) + (m_1 - \rho V)g/(m_1 + m_4 + m_6) \cdot l \dots \dots \dots (27)$$

空中振動では上式で, $m_4 = m_6 = \rho V = 0$ とすると角振動数は $\omega_a^2 = k/m_1 + g/l$ となる. 上式から k を消去すると,

$$\omega^2 = \left(\omega_a^2 - \frac{\rho V}{m_1} \cdot \frac{g}{l} \right) \left/ \left(1 + \frac{m_4}{m_1} + \frac{m_6}{m_1} \right) \right. \dots \dots \dots (28)$$

式 (28) で魚礁と壁面との間隔 (L) を増大すると m_6 は零に接近する. 式 (28) により実験結果を取纏めると図-4.2, 4.3 になる. 魚礁を球殻とすると式 (2) になる. 結局, 球殻に対する魚礁模型の付加質量係数の最大値は m_4 が 2 倍, $m_6 \doteq 0.3/(3/16) \doteq 1.6$ 倍になる. なお,

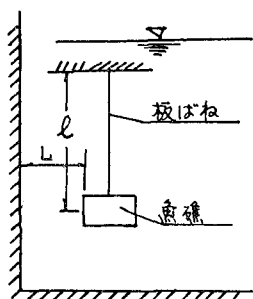


図-4.1 付加質量の測定

式 (22) で y_s , m_6 , m_3 , m_5 および 右辺第 3 項, 4 項を無視すると, $y(t)$ は中村らの計算値に一致する⁷⁾.

(b) 衝撃係数 ($y_{\max}/y_s$)

式 (22) で u_0' は式 (6) で $e=0$ として与え, 更に空中実験では式 (4) で $u_0 = \sqrt{2gh}$ とすると, 第 1 次近似解は次の様になる.

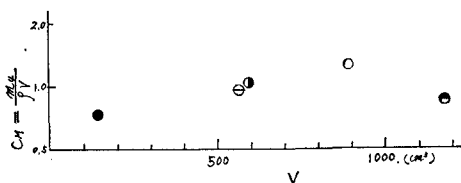


図-4.2 魚礁の付加質量係数

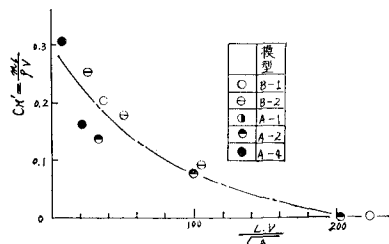


図-4.3 魚礁の鏡像効果

図-4.2 の記号は図-4.3 と同じである.

(2) 抗力係数 (C_D) と平均落下速度 ($\bar{u}$)

式 (3), (4) により, 次式が得られる.

水中落下:

$$\xi = \frac{\bar{u}}{\sqrt{gh}} \cdot \sqrt{\frac{X}{Y}} = \sqrt{\frac{1}{C_D}} \left\{ 1 + \frac{\log_e(0.54)}{C_D \cdot X} \right\} \dots (29)$$

$$\text{空中落下: } \bar{u}/\sqrt{gh} = 1/\sqrt{2} = 0.707 \dots \dots \dots (30)$$

式 (29) の関係を図-4.4 に示した. 式 (30) の関係

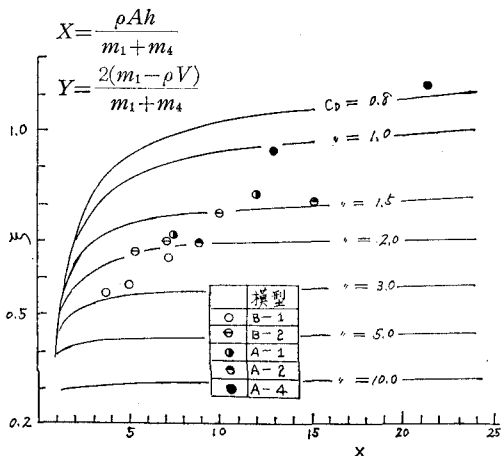
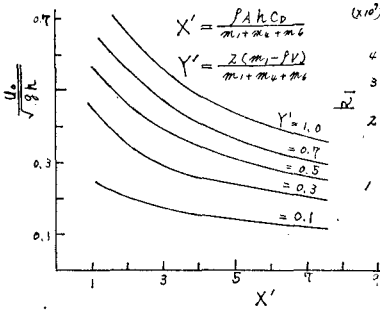
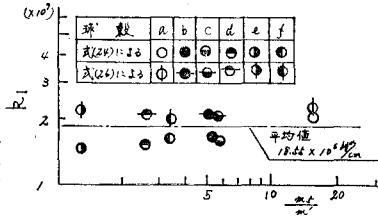


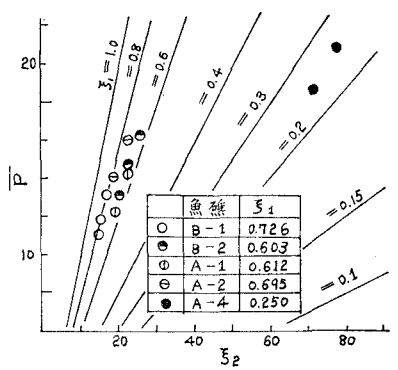
図-4.4 落下速度と抗力係数



図—4.5 着底速度 (u_0)



図—4.6 衝撃によるばね定数 (k_1)



図—4.8 魚礁の水中衝撃係数

は理論値と実験値がかなりよく一致する。

(3) 着底速度 (u_0)

式 (3) を変形すると、

$$\frac{u_0}{\sqrt{gh}} = \left[\frac{Y'}{X'} \{1 - \exp(-X')\} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (31)$$

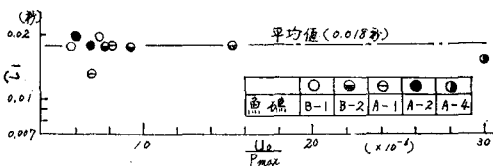
式 (31) の結果を図—4.5 に示した。(X' , Y') の値は B 型 (12, 0.72), A-1 型 (13.5, 0.71), A-2 型 (13.4, 0.41), A-4 型 (12.3, 0.69) である。

(4) 衝撃力によるばね定数 (k_1)

式 (24), (26) による空中実験結果を逆算して k_1 を求めた結果を図—4.6 に示した。ただし α_1 (0.862) と α_2 (0.735) は理論値, 式 (10), (12) による。静的外力によると $k_1 = 17.2 \times 10^6 \text{ dyn/cm}$ となり, 衝撃による場合と多少異なる。これは応力の伝播の仕方が異なることを示す様である。

(5) 衝撃作用時間 (τ_1)

τ_1 の実験結果を図—4.7 に示した。理論値は式 (26) で与えられるが, 両者はほぼ一致する。また空中衝撃作用時間は約 0.01 秒となり, 理論と実験値はかなり一致する。



図—4.7 衝撃作用時間(水中)

(6) 衝撃力

衝撃係数 ($\bar{P} = y_{\max}/y_s$) は近似的には式 (23), (24) より、

$$\left. \begin{aligned} \text{水中衝撃:} \\ \bar{P} &= \frac{P_{\max}}{(m_1 - \rho V)g} \doteq \xi_1 \xi_2; \\ \xi_1 &= \frac{m_1 + m_4 + m_6}{M}, \quad \xi_2 = \frac{\sqrt{Mk_1} \cdot u_0}{(m_1 - \rho V)g} \\ \text{空中衝撃:} \\ \bar{P} &= P_{\max}/m_1 \cdot g \doteq \sqrt{2k_1 h / (m_1 + \alpha_2 m_3) g} \end{aligned} \right\} \dots\dots (32)$$

ここで、 $M = m_1 + m_3 + m_4 + \alpha_2 \cdot m_5$ であり、 $\alpha_1 = \alpha_2$ とした。実験値は $P_{\max} = y_{\max} \cdot k$ として水中衝撃力の結果を図—4.8 に示した。

次に運動量と力積の関係は式 (13), (14) になり、衝撃力を求められるが、頁数の関係で省略した。

5. 結 論

以上の研究結果を要約すると、概略次の様になる。

- (1) C_D は 1~3 の範囲になり、魚礁の構造により異なる。
- (2) C_M と鏡像効果による C_M' は物体を球形とした場合の理論値に対し、各々約 2 倍と 1.6 倍になる。
- (3) 衝撃作用時間の理論と実測値はほぼ一致する。
- (4) 衝撃力に関する理論と実測値は空中実験ではかなりよく一致するが、水中実験では多少の差異がある。この理由は、魚礁の付加質量の評価に問題があると考えられる。

本研究は沖縄県の受託研究費によるものであるが相似律や部材有効断面の設計 (配筋) に関する結果は本文では省略した。本研究に対し、有意義な機会と援助を与えられた県当局や極限設計で御教示頂いた土木工学科浜田純夫助教授、卒論生の阿部 昇君に謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 中村 充・上北征男・飯野達夫: 海中落体の着床衝撃に関する研究, 第 22 回海講論文集, pp. 483~487, 1975.
- 2) 河野二夫: 波の進行に直角水平方向の球の振動, 土木学会論文報告集, No. 179, pp. 49~60, 1970.
- 3) 沢本正樹: 壁面に衝突する球の仮想質量, 土木学会論文報告集, No. 191, pp. 77~81, 1971.
- 4) テモシエンコ: 工業振動学, 商工会館.
- 5) 杉本礼三: 応用力学演習 (上), 森北出版.
- 6) 高橋利衛: 振動工学演習 (II), オーム社.
- 7) 前出 1)