

垂下した魚礁ブロックの水中における振動について

誌名	日本水産學會誌
ISSN	00215392
著者	小島, 隆人 佐藤, 修 梨本, 勝昭 山本, 勝太郎
巻/号	54巻8号
掲載ページ	p. 1351-1357
発行年月	1988年8月

垂下した魚礁ブロックの水中における振動について^{*1}

小島隆人, 佐藤 修, 梨本勝昭, 山本勝太郎

(1988年2月8日受付)

Oscillations of Fish Reef Blocks Hung in the Water

Takahito Kojima,^{*2} Osamu Sato,^{*3} Katsuaki Nashimoto,^{*3}
and Katsutaro Yamamoto^{*3}

A fish reef block model (a sphere and a cube were also used as the simple artificial reef models) was swung by a wire string from a fixed point with an initial angle in still water. Free-damped oscillation curves which were measured for different lengths of the string, were compared with the curves obtained by solving a differential equation of motion. In the solution a graphical method of trajectory on a phase plane was used.

The experimental curves fitted well in the calculated ones for the first 1/4 period in every oscillation. Therefore, we applied this method to the actual fish reef block hung by a wire rope from a derrick barge and estimated the length of the wire rope resonant with the rolling period of barge while installing the fish reef block in sea water. The results suggest that the resonance hardly occurs when the fish reef block is in the water, but it may easily occur in the air.

人工魚礁の設置は魚礁ブロックを船積みして所定の位置まで運搬し、無拘束投入、拘束投入、吊り降ろしなどによって沈設しているが、¹⁾人工魚礁ブロックの大型化に伴って沈設精度の向上やブロックの破壊防止の点から吊り降ろしによる方法が多く用いられてきている。しかし、波浪中で作業船が動揺している時のクレーンによる吊り降ろし作業では船の動揺に伴って吊り下げたブロックが振動して危険な状態が生ずる。そこで本研究では吊り降ろしによる魚礁ブロック設置時の作業船の安全性に注目して、ワイヤーロープで吊るした魚礁ブロックを振り子と考え、この振り子の水中での固有周期を計算により求めることによって予想される最も危険な現象である共振現象の起こりうる強制振動の周期の範囲を求め、共振現象を避けるための基礎資料を得ることを目的とした。

減衰振り子の運動解析

作業船のクレーンからワイヤーロープで吊るされた魚礁ブロックを支点から距離 l の先端に質量 m の物体を取り付けた単振り子と考え、その概念図を Fig. 1 に示す。実際に水中で運動する物体には速度の2乗に比例す

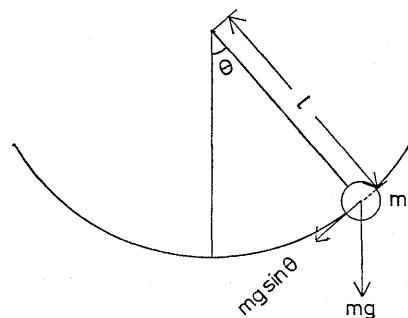


Fig. 1. Definition sketch for pendulum.

る抗力および付加質量が作用する。従って物体の形状によって決まる抗力係数、質量係数を考慮に入れた水中での振り子の運動方程式は (1) 式で表される。振り子の運動方程式は (1) 式で表されるがこの式には非線型項が含まれているため、本研究では運動方程式をまず、トラジエクトリーの式に変形した後、図式解法により、時間経過に対する振幅の変位を求めることにした。ただし、物体と支点をつなぐロープの水中での抗力は物体の抗力に比べて十分小さいものとして無視することにした。

$$(m+m')l\ddot{\theta}+cV|\dot{\theta}|\dot{\theta}+(m-\rho_0V)g\sin\theta=0 \quad (1)$$

^{*1} 垂下中の人工魚礁ブロックの運動に関する基礎的研究 I (Fundamental Studies on Motions of Hanging Reef Block—I).

^{*2} 日本大学農獣医学部 (College of Agriculture and Veterinary Medicine, Nihon University, Setagaya, Tokyo 154, Japan).

^{*3} 北海道大学水産学部 (Faculty of Fisheries, Hokkaido University, Hakodate 041, Japan).

ここに, m は物体の質量, m' は付加質量, θ は物体をつなぐ糸の鉛直線からの角度, l は糸の長さ, ρ_0 は流体の密度, V は物体の体積, g は重力加速度である。左辺第一項の $l\ddot{\theta}$ は接線方向の加速度を表わし, 第二項の $l^2|\dot{\theta}|^2$ は接線方向の速度の2乗を表わす。ここで質量係数を C_m とすると付加質量 m' は,

$$m' = \rho_0 V (C_m - 1) \quad (2)$$

となる。また, 抗力係数を C_D , 物体の射影面積を S とすると c は

$$c = \frac{1}{2} C_D \rho_0 S \quad (3)$$

となる。ここで

$$m_w = m - \rho_0 V, \quad M = \frac{m_w}{m + m'}$$

とおくと (1) 式は

$$\ddot{\theta} + \frac{M}{m_w} c l |\dot{\theta}| \dot{\theta} + \frac{g}{l} M \sin \theta = 0 \quad (4)$$

と整理される。さらに

$$\tau = \omega t, \quad \frac{M}{m_w} c l = \varepsilon, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}}$$

とおき, $y = \dot{\theta} / \omega_0$ とするとトラジェクトリの式は

$$\frac{dy}{d\theta} = \frac{-M \sin \theta \mp \varepsilon y^2}{y} \quad (\text{複号 } y \geq 0) \quad (5)$$

と表わせる。²⁾ ここで初期条件 $t=0, \theta=\theta_0 (>0), y=0$ のもとの運動を考えると最初の間は $y < 0$ であるから (5) 式は

$$\frac{dy}{d\theta} - \varepsilon y = -\frac{M}{y} \sin \theta \quad (6)$$

となる。これは線型微分方程式であるのでその解法に従って式を変形していくと結局,

$$(\dot{\theta})^2 = C \omega_0^2 e^{\mp 2\varepsilon \theta} + \frac{2M \omega_0^2}{4\varepsilon^2 + 1} (\cos \theta \mp 2\varepsilon \sin \theta) \quad (7)$$

(複号 $y \geq 0$)

と表わせる。ここで初期条件 $t=0, \theta=\theta_0$ のとき $(\dot{\theta})^2=0$ を与えて係数 C_1, C_2 を求めると,

$\theta > 0$ のとき

$$C_1 = -e^{-2\varepsilon \theta_0} \frac{2M}{4\varepsilon^2 + 1} (\cos \theta_0 - 2\varepsilon \sin \theta_0) \quad (8)$$

$\theta < 0$ のとき

$$C_2 = -e^{-2\varepsilon \theta_0} \frac{2M}{4\varepsilon^2 + 1} (\cos \theta_0 + 2\varepsilon \sin \theta_0) \quad (9)$$

を得る。

図式解法による解の求め方

以上の方法により, $\theta - \dot{\theta}$ の関係が (7), (8), (9) 式より求まる。すなわち, θ の値を変化させることにより, $\theta - \dot{\theta}$ の位相平面を描くことができる。この位相平面のトラジェクトリ上を動く状況点の時間経過を求める方法を Fig. 2 に示した。³⁾ すなわち時間の1ステップ

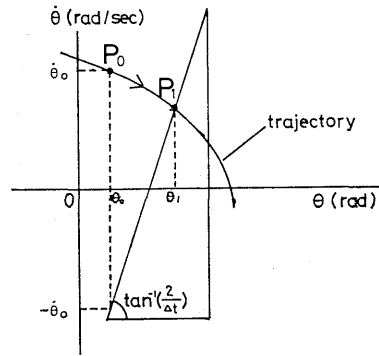


Fig. 2. The point moving on the trajectory with time (Δt) elapsed.

Δt における平均速度を $\dot{\theta}_{AV}$, 角度変化を $\Delta\theta$ とすれば,

$$\Delta\theta = \dot{\theta}_{AV} \Delta t \quad (10)$$

となる。また θ_0 をステップのはじめの θ の値, $\Delta\theta$ を1ステップの間の θ の増分とすれば近似的に

$$\dot{\theta}_{AV} = \dot{\theta}_0 + \frac{\Delta\dot{\theta}}{2} \quad (11)$$

と表わすことができる。(10), (11) 式を用いて $\dot{\theta}_{AV}$ を消去すると,

$$\Delta\dot{\theta} = \frac{2}{\Delta t} \Delta\theta - 2\dot{\theta}_0 \quad (12)$$

となる。つまり傾きが $2/\Delta t$ の定規を作れば位相平面上での Δt ごとの状況点 P_0, P_1, \dots を決定することができる。またその x 座標からステップが Δt の時間経過に対する θ の値 $\theta_0, \theta_1, \dots$ を知ることができる。Fig. 2 ではこの操作をして, P_0 が Δt 秒後に P_1 に動くことを表わしている。

実験材料および方法

実験には主に角型の魚礁ブロック模型を用いた。また, 魚礁ブロックをごく単純化した基本模型として立方体, 球も用いた。これらの模型の諸元および見取り図を Table 1 および Fig. 3 に示す。なお, 各模型とも表面に塗装をすることにより表面粗度を一定に保つようにした。また, 立方体および角型魚礁ブロック模型については水中で模型が自由に回転できるようによりもどしをつけた。球の質量係数, 抗力係数は古くから解明されており, 質量係数は1.5, 抗力係数は0.5になることが知られている。⁴⁾ ここではこれらの値を用いた。また, 魚礁模型の質量係数については上北ら⁵⁾ の資料を, 立方体の質量係数については元良⁶⁾ の値を用いた。立方体および角型魚礁ブロック模型の C_D はあらかじめ定常流中で抗力 F を測定し, $C_D = 2F/\rho_0 S V^2$ より C_D を求めた。立方体と角型魚礁ブロック模型ではその向きによって C_D が変わるので Fig. 4 に示すような A, B 方向を定

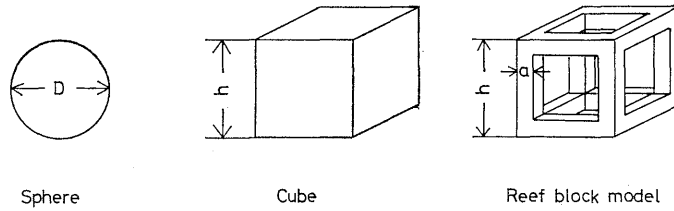


Fig. 3. Schematic illustration of sphere, cube and reef block model used in this study.

Table 1. Details of models

Spheres					
No.	Diameter D (cm)	Weight m (g)	Volume V (cm ³)	Density ρ (g/cm ³)	
S-1	3.8	50.5	28.7	1.80	
S-2	3.8	62.5	28.7	2.21	
S-3	3.8	91.8	28.7	3.22	
Cubes					
No.	Height h (cm)	Weight m (g)	Volume V (cm ³)	Density ρ (g/cm ³)	
D-1	8.0	769.2	512.0	1.50	
D-2	6.0	328.3	170.7	1.52	
D-3	3.9	87.8	42.1	1.48	
Reef block models					
No.	Height h (cm)	Width of frame a (cm)	Weight m (g)	Volume V (cm ³)	Density ρ (g/cm ³)
B-1	8.0	1.0	118.9	80.0	1.48
B-2	8.0	1.5	231.5	69.7	1.43
B-3	8.0	2.0	357.9	102.4	1.40

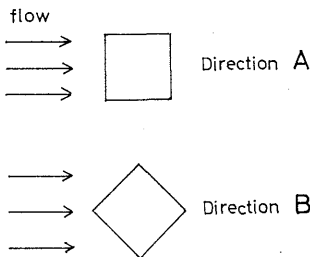


Fig. 4. Definition of flow direction for cube and reef block models.

Table 2. The values of C_D and C_m used in this study

	C_D	C_m
Spheres	0.5 ⁽⁴⁾	1.5 ⁽⁴⁾
Cubes	1.2	1.7 ⁽⁵⁾
Reef block models	1.0	1.5 ⁽⁵⁾

義してそれぞれについて C_D を求め、両者の平均を各模型の C_D の値とした。計算に使用した質量係数 C_m 、抗

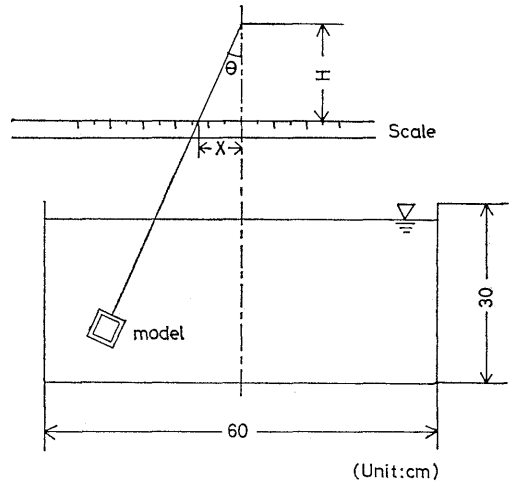


Fig. 5. Apparatus for measuring amplitude of free-damped oscillation in the water.

力係数 C_D の値を Table 2 に示す。

減衰振動実験は Fig. 5 に示すように縦、横、高さが 30×60×30 cm のガラス製水槽に水を満たし、模型を糸で吊るして減衰自由振動をさせ、振幅変位の時間変動を調べた。振動の支点から模型の重心までの長さは 50, 60, 70 cm の3段階とし、自由振動の初期角度は 5°, 10°, 20°, 30° の4段階とした。振動の様子は1コマの撮影速度が 1/1000 sec のビデオカメラを用いて録画し、これを 1/30 sec のコマ送りで再生した静止画像を見ながら 1/10 sec ごとの振幅の変位を求めた。振幅変位の測定箇所は Fig. 5 に示す H と X で、 $\theta = \tan^{-1}(X/H)$ から θ を求めた。なお、実験中の水温は約 10°C で、その変化は 5°C 以内であり、水温変化の影響は無視できるものとした。

結 果

球、立方体および角型魚礁ブロック模型の減衰振動実験より得られた振幅(角度)変位の時間変動の結果例を Fig. 6~8 に示す。なお、図中の実線は本研究で用いた図式解法により求めた計算値である。振動周期は糸が長くなるにつれて長くなり、初期角度が大きくなるにつれても長くなる。これは空気中で振動させた振り子で振幅

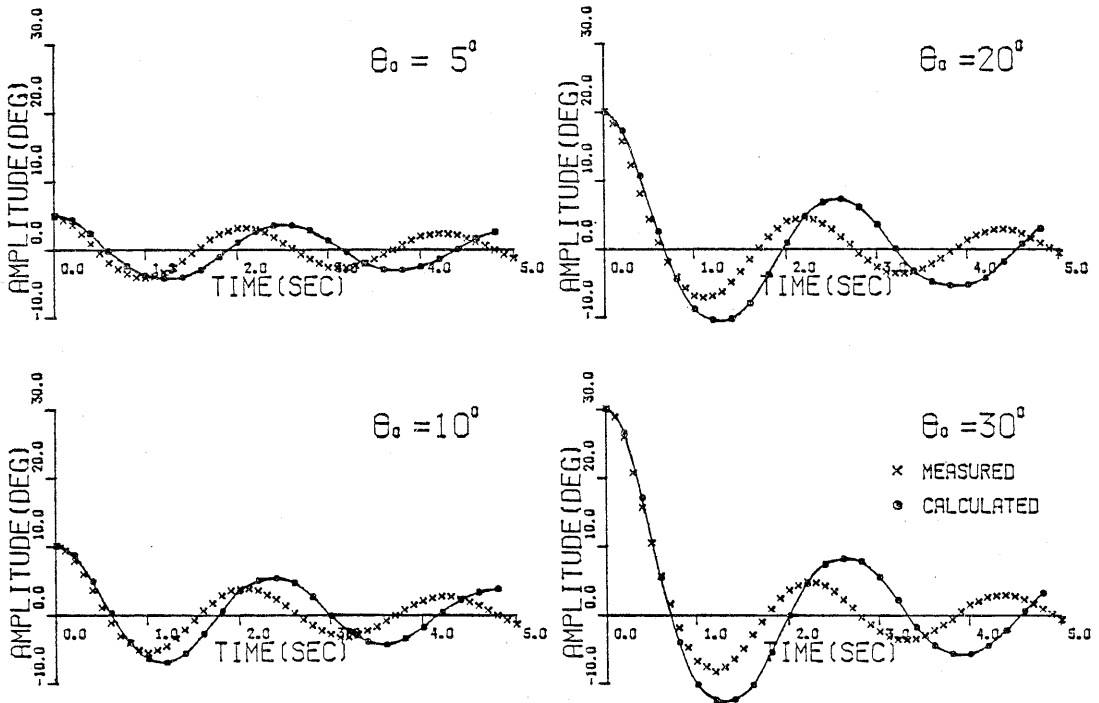


Fig. 6. Free-damped oscillation of sphere (model: S-3, $l=70$ cm) for each of initial angles.

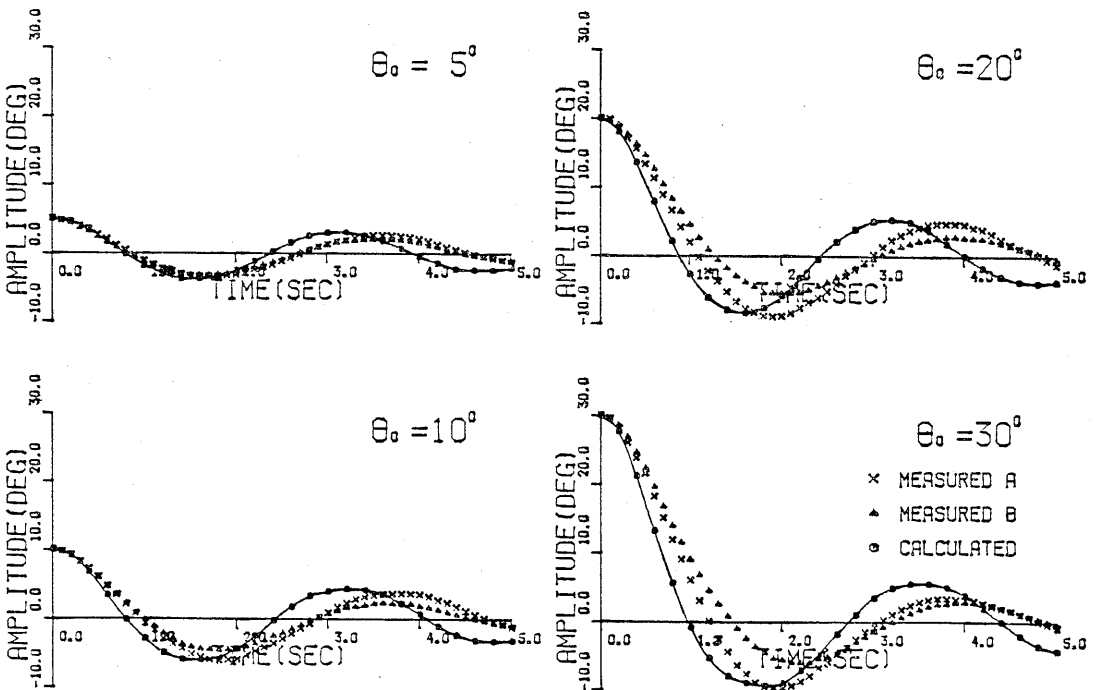


Fig. 7. Free-damped oscillation of cube (model: D-1, $l=70$ cm) for each of initial angles.

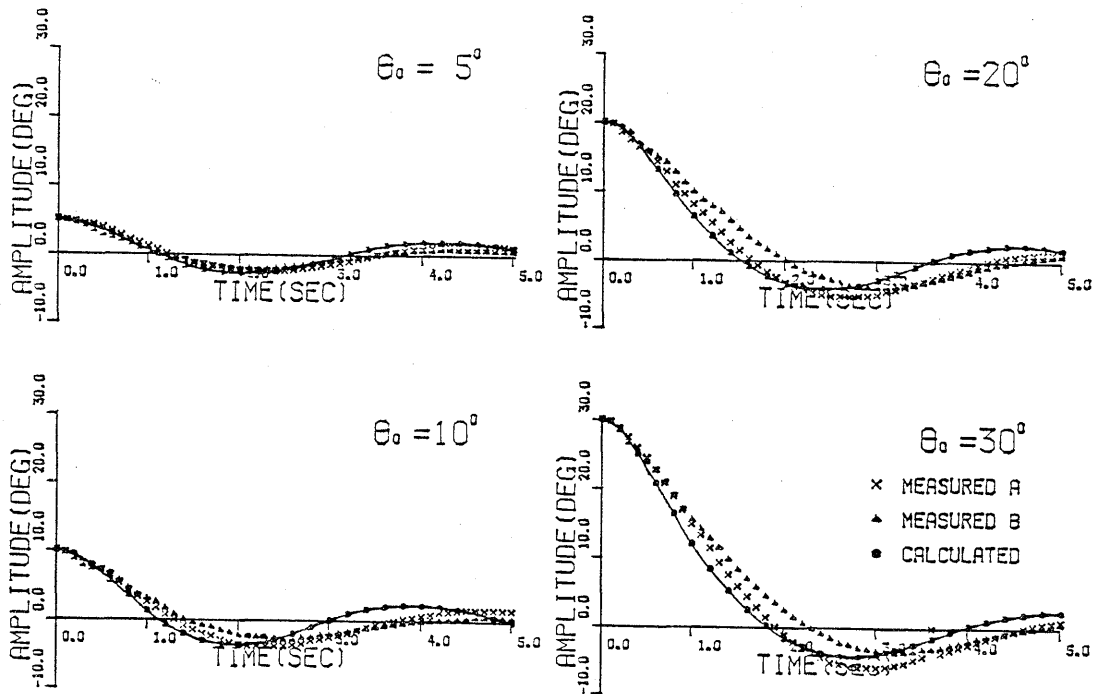


Fig. 8. Free-damped oscillation of fish reef block model (model: B-1, $l=70$ cm) for each of initial angles.

θ が十分大きいとしたときにも言えることである。しかし、水中での振り子振動の大きな特徴は、振動周期が物体の水中重量と抗力係数 C_D によって大きく変化することである。水中での振り子振動には模型に作用する抗力および付加質量が強い影響をもたらしているものと考えられる。各模型別の計算値と実験値の適合性を見てみると、球の場合、振動開始から最初の 1/4 周期までは比較的良く一致しているが、その後は計算値の周期の方が長くなる傾向が見られた。立方体、角型魚礁ブロック模型でも最初の 1/4 周期までは良く一致しているが、その後は計算値の周期が短くなる傾向を示した。実際の振動中には抗力係数 C_D 、質量係数 C_m は時間とともに急激に変化する⁷⁾ため、計算に用いる C_D 、 C_m も各時刻の値を用いなければ正確に振動を表すことはできない。本研究では C_D は定常流中で測定した値を用い、 C_m についても一定であるとしたため、比較的速度が速い振動の最初の 1/4 周期では計算値と実験値が良く一致する。しかし、時間が経つにつれて模型の速度は遅くなり、 C_D もそれにつれて大きくなるから、一定値とした C_D が真の値からずれるにしたがって計算値と実験値の差は大きくなるものと考えられる。このことを考慮すると、本研究でたてた運動方程式を使って魚礁ブロック投入現場での振動周期を求めると、最初の 1/4 周期までは比較的精度良く求めることができても、それ以降はかなりの誤差を

含んだものとなることが予想される。そこで、さまざまな条件での固有周期を一周期にわたって算定すると誤差が含まれるので、最初の 1/4 周期について計算で求め、共振を起こす可能性のある周期の範囲を求めた。

考 察

現在、魚礁ブロックは種々の形のもが使用されているが⁸⁾ここで振動周期の予測の対象とした魚礁は並型魚礁ブロックおよび大型魚礁ブロックと呼ばれている角型魚礁ブロックである。それぞれの大きさは⁸⁾並型ブロックが $1.0 \times 1.0 \times 1.0$ m、部材幅 20 cm、大型ブロックが $4.0 \times 4.0 \times 4.0$ m、部材幅 50 cm とし、空中重量はコンクリートの比重を 2.4 としてそれぞれ 845 kg、 240×10^2 kg とした。また、抗力係数 C_D と質量係数 C_m は今回の実験の角型魚礁ブロック模型で用いた $C_D=1.0$ 、 $C_m=1.5$ ⁹⁾とした。計算はクレーンの先端の滑車からブロック重心位置までのワイヤーの長さを L とし、 L を 10, 20, 30, 50, 70, 100 m と変化させ、さらに、振動中の振幅を 10° と仮定して、初期角度が 10° で振動を開始した時の振動の最初の 1/4 周期に要する時間を前述の図式解法により求めた。この結果を Fig. 9 に示す。また、ブロックを空中で振動させたときの 1/4 周期に要する時間も同じ図上に示した。なお、この周期を求めるに当たり空中での抵抗は無視した。空中では、周期は支

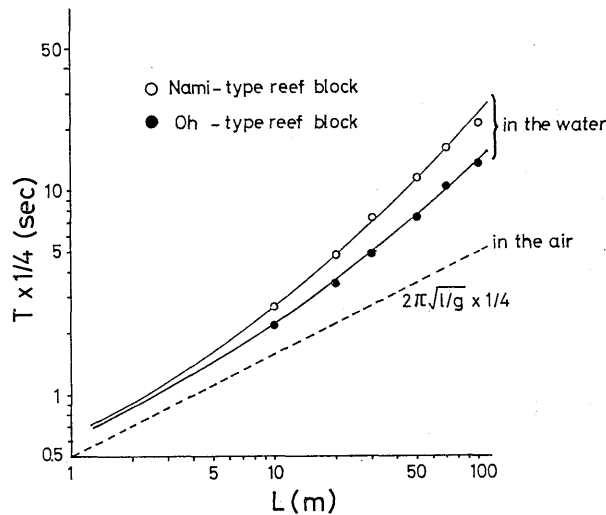


Fig. 9. Relation between the length of wire rope hanging fish reef block (L) and $1/4$ period of oscillation ($1/4T$) when free-damped oscillation of fish reef block (Nami-type and Oh-type) started at 10 degrees in the water (solid line) compared with in the air (broken line).

点と物体間の距離の0.5乗に比例する。しかし、水中での振動は振動する物体の抗力係数 C_D 、質量係数 C_m によって周期や振幅が変化するばかりでなく、Fig. 9からも明らかなように、並型、大型魚礁ブロックとも、両対数グラフで下に凸の曲線となっている。つまり、水中での振動は支点と物体間の距離が振動周期に与える影響は空中以上に大きく、支点と物体間の距離が長くなるにしたがって振動周期は急激に長くなるといえる。このことについては佐藤⁷⁾が波浪中では、魚礁ブロックを水面下深く沈めるほど、水平方向の運動から垂直上下運動になり、水面下深くなると固有周期が長くなり、水平方向にはほとんど振動しないとしたこととはほぼ一致する。また、静水中に直径3.8cmの球を吊るし、支点を水平方向に往復振動して球に強制振動を与えた場合、強制振動の周期 T_F 、振り子の固有周期を T とすると、球の密度、糸の長さ、強制振動の振幅を変化させても概ね周期比 T_F/T が0.7~2.0の間にあるときに、振り子の水平方向の振幅が、強制振動の振幅を大きく上回ることがわかっている*。さらに筆者らが投入作業の観察を行なった道南海事(株)の作業船第2海揚丸(全長28.5m, 幅12.0m, 総トン数199ton)では横揺れ固有周期が約4秒であった。つまり1/4周期で考えると第2海揚丸では約1秒であり、振幅が大きくなる可能性のある強制振動の1/4周期は0.7~2.0秒となる。Fig. 9を使ってこの周期の幅から振幅の大きくなる振動の支点と魚礁ブロックの重心間の距離 L の範囲を求めると、並型魚礁ブロックで1.2~6.8m, 大型魚礁ブロックで1.3~8.6mとな

る。しかし、第2海揚丸では作業時のジブ先端から海面までの高さが約15mあるのでこの L の範囲ではブロックが水中に没することはまずあり得ない。同様に空中で支点が水平方向に振動する振り子の場合、周期比 T_F/T がおよそ0.7~3.0の間で振幅が大きくなることがわかっている。³⁾ つまり第2海揚丸ではワイヤー長さが1.9~36mの間で振幅が大きくなりやすいということになる。したがって、空中吊りの間は共振を起こしたり、吊り下げたブロックの振幅が大きくなる可能性が高いといえる。以上のことから、今回観察を行なった第2海揚丸でこれらの魚礁ブロックを投入する場合、水中に吊り降ろしている時には比較的浅い層では振幅がやや大きくなる現象が生ずることもあるが共振現象は起こらない。むしろ、共振現象を起こす可能性が高いのは空中に吊り上げている時である。このことから、空中で吊っている時間、および魚礁ブロックが没水してワイヤーが十分な長さに達するまでに要する時間を短縮することが、荒天下での魚礁設置作業を可能にするためのひとつの方策といえよう。今後は、作業船の波浪中での動揺を考慮に入れた強制振動のもとでの魚礁ブロックの振動について解明し作業船の安全性について検討する所存である。終わりに、作業船での魚礁ブロック投入現場の観察および資料の入手にあたって道南海事(株)第2海揚丸の乗組員の方々の多大な御協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

* 垂下中の人口魚礁ブロックの運動に関する基礎的研究, 卒業論文, 1984.

文 献

- 1) 平川誠一, 佐藤 修, 前田久明, 岡野靖彦: 海洋の生物過程 (丸茂隆三編), 初版, 恒星社厚生閣, 東京, 1984, p. 435.
- 2) 榎木義一: 非線形振動論, 初版, 共立出版, 東京, 1958, pp. 41-42.
- 3) 谷口 修: 振動工学ハンドブック, 第2版, 養賢堂, 東京, 1981, pp. 383-386.
- 4) 中村 充: 水産土木学, 初版, 工業時事通信社, 東京, 1979, pp. 151.
- 5) 上北征男, 明田定満, 田島 泰: 第32回海岸工学講演会論文集, 土木学会, 東京, 1985, pp. 643-646.
- 6) 元良誠三: 船体と海洋構造物の運動学, 初版, 成山堂, 東京, 1982, p. 143.
- 7) 松原雄平, 野田英明: 第31回海岸工学講演会論文集, 土木学会, 東京, 1984, pp. 491-495.
- 8) 水産土木研究部会: 水産土木, 臨時号, 19-23 (1977).
- 9) 佐藤 修: 人工魚礁-水産学シリーズ No. 55 (日本水産学会編), 恒星社厚生閣, 東京, 1984, pp. 58-59.