

異型ブロックの重量算定に関する一考察

北海道開発局・農業水産部 水産課(正会員) 竹田英章

1. まえがき

わが国の港湾・漁港におけるコンクリート異型ブロックの使用例のほとんどは、たとえば図-1のように波力軽減あるいは越波防止を目的として直立壁前面に消波工として投入される異型ブロック(以下、消波ブロックと呼ぶ)、および図-2のような混成防波堤の割石基礎の散乱防止のために表層に被覆される異型ブロック(以下、被覆ブロックと呼ぶ)である¹⁾。

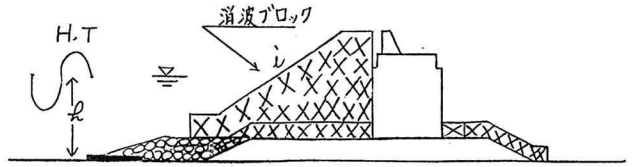


図-1 消波ブロックの使用例

実用設計の面では、消波ブロックの重量に関しては、ハドソン²⁾が傾斜堤の表層ブロックの重量算定に関しての研究より求めた式-1を準用している。被覆ブロックに関しては、

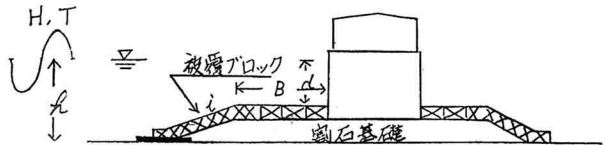


図-2 被覆ブロックの使用例

$$W_T = \frac{\gamma_r \cdot H^3}{K_0 (S_r - 1)^3 \cos^2 \alpha} \quad (式-1)$$

割石基礎を被覆する異型ブロックの安定性に関する実験的研究^{3),4)}より求めた重量を、運

輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所の実験的研究⁵⁾、コンクリート方塊に関する電力中央研究所の研究⁶⁾、被害率を多少許して式-1より求めた値、割石の安定重量^{7),8)}等と比較し経験を加味して定めているのが実情である。なせなら、被覆ブロックでは、消波ブロックの場合における、波高H、周期T、建設水深d、方向配との条件の他に、堤体直立部前面水深d、割石基礎幅B、が加わって水理現象が複雑である。および、模型実験における異型ブロックの安定限界を判定する手段は観察によるものであり、被覆ブロックの動揺判定は消波ブロックの場合よりもさらに微妙で、したがって実験者によりその判定基準が相違するため、必然的に所要重量が異なってくるためである。

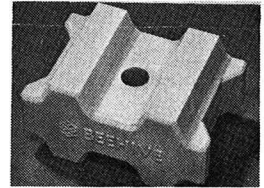


図-3 ビーハイブ

ここ数年来筆者は、異型ブロックの重量を波動運動と結び付ける方策を模索してきたところであるが、被覆ブロックの一種である図-3のビーハイブに関する系統的な模型実験が昨年(1977年)に実施⁹⁾され、その実験データを再解析した結果、被覆ブロックの重量は波の水粒子運動における楕円軌道の長軸長により表現できることがわかったので、ここにその経過を報告する次第である。もっとも、その学問的な意味については筆者の思慮を越えるところであり、この点に関して識界の御指導を切望するところである。

なお、ここで求めた式において、直立部前面水深dが非常に小さい場合には、消波ブロックを意味することになるが、残念ながら実態とはかけ離れた重量を与えてしまい、実用に供することはできない。それ故、消波工では波を研ぐことによりその効果を発揮するものであり、したがってその観点からの検討を行なう必要があるためである。

2. 波力と安定限界重量に関する仮定

図-4に示す方塊の空中重量Wは、空中単位重量を γ_r とすれば、 $W = \gamma_r \cdot a \cdot b \cdot c$ で表わされる。また、水

の単位重量を w とすれば、その水中重量は $W' = (\gamma_r - w) a b c$ となる。
 方塊に作用する炭圧を p とすれば、 a - b 面に作用する炭力 P は $P = p \cdot a b$
 で表わされるから、 $P = \alpha \cdot W'$ より $\alpha / \gamma_r = (\gamma_r - w) C$ となる。但し、 α は
 炭力とそれに抵抗する水中重量との間の比例定数であり、 C はブロックの奥行
 である。

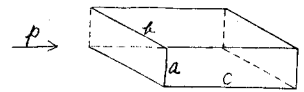


図-4 板覆ブロックのモデル

3. ビーハイブの安定重量に関する実験データ

ビーハイブでは $W = 0.541 C^3$ の関係を有する。

実験は、技研興業株式会社の八王子研究所において、想定縮尺 $1/20$ で為されたものであり、模型の諸元および
 実験より得られた安定限界炭高は、表-1 および表-2 のとおりである。

表-1 実験に用いられた模型

名称	ブロックの奥行 C		模型の空中		模型の単		水中重量 W'		(γ _r -w)C	
	模型	現地換算	重量 W	重 γ _r	模型	現地換算	模型	現地換算	模型	現地換算
0.5 ^型	5.2 ^{cm}	1.04 ^m	75.9 ^g	2.45 ^{g/cm³}	44.9 ^g	0.359 ^g	1.508 ^{g/m³}			
1	6.5	1.30	145.9	2.32	83.0	0.664	1.716			
2	8.2	1.64	297.5	2.36	169.7	1.358	2.230			
4	9.8	1.96	515.2	2.44	304.1	2.433	2.822			

表-2.1 ブロック重量と安定限界炭高

($R=10^m$, $d=2^m$, $B=10^m$)

$d/R = 0.2$

名称	実験値			式からの逆算値		
	T	L	H	H _c (γ _{hc})	H _c ' (γ _{hc})	H _c '' (γ _{hc})
4	6	48.4	3.6	2.7 ^m (1.5)	5.0 ^m (0.7)	4.0 ^m (0.9)
	8	70.9	3.8	2.7 (1.4)	3.7 (1.2)	3.3 (1.2)
	10	92.4	3.4	2.7 (1.3)	3.0 (1.1)	2.8 (1.2)
	12	113.4	2.8	2.8 (1.0)	2.5 (1.1)	2.4 (1.2)
2	6		3.0	1.9 (1.6)	4.0 (0.8)	3.2 (0.9)
	8		2.8	2.1 (1.3)	3.0 (0.9)	2.6 (1.1)
	10		2.4	2.1 (1.1)	2.4 (1.0)	2.2 (1.1)
	12		2.0	2.2 (0.9)	2.0 (1.0)	1.9 (1.1)
1	6		2.4	1.5 (1.6)	3.0 (0.8)	2.5 (1.0)
	8		2.4	1.6 (1.5)	2.3 (1.0)	2.0 (1.2)
	10		2.0	1.7 (1.2)	1.8 (1.1)	1.7 (1.2)
	12		1.8	1.7 (1.1)	1.5 (1.2)	1.4 (1.3)
0.5	6		2.0	1.3 (1.5)	2.7 (0.7)	2.2 (0.9)
	8		2.0	1.4 (1.4)	2.0 (1.0)	1.8 (1.1)
	10		1.8	1.5 (1.2)	1.6 (1.1)	1.5 (1.2)
	12		1.4	1.5 (0.9)	1.3 (1.1)	1.3 (1.1)

表-2.2 0.5^型ブロックの安定限界炭高

B	実験値				H _c (γ _{hc})
	R	d	T	H	
10 ^m	6 ^m	1.2 ^m	6 ^m	1.8 ^m	1.4 ^m (1.3)
			8	1.8	1.4 (1.3)
			10	1.8	1.5 (1.2)
		3.2	6	2.0	2.2 (0.7)
			8	2.0	2.2 (0.9)
			10	1.6	2.2 (0.7)
	6.0	6	6	3.4	3.1 (1.1)
			8	3.4	2.9 (1.2)
			10	3.4	2.8 (1.2)
		12	6	3.6	2.8 (1.3)
			8	3.6	2.8 (1.3)
			12	3.6	2.8 (1.3)
5	6	1.2	6	2.0	1.5 (1.2)
			8	1.6	1.5 (1.1)
			10	1.8	1.6 (1.1)
		3.2	6	2.2	2.4 (0.9)
			8	2.4	2.4 (1.0)
			10	2.4	2.4 (1.0)
	6.0	6	6	3.8	3.4 (1.1)
			8	3.8	3.4 (1.1)
			12	3.8	3.4 (1.1)

"注" 表中の () の数値は炭高安全率となる。

4. 覆層ドロックの重量に影響する要因とその表示法の検討

$\rho\alpha = \beta H^\gamma$ とすれば、2より $(\gamma - \omega)C = \beta H^\gamma$ であるから、表-2.1のデータを図-5にプロットすることにより $\gamma = 1$ が得られる。したがって、 $p = \alpha\beta H$ であり、次元方程式により $\alpha\beta$ は $[L^{-2}MT^2]$ の次元を有する。これは水の単重 ω を意味するから $p = \rho\omega H$ と表示することができ。但し、 ρ は無次元の係数である。

波高と重量との関係は、 $C = \rho\omega H / d(\gamma - \omega) = \eta H / (S_r - 1)$ 、但し $\eta = \rho\alpha$ 、 $S_r = \rho/\omega$ 、と $W = 0.541 C^3$ との関係により、式-2が得られる。

$$W = 0.2352 \eta^3 \frac{\gamma r}{(S_r - 1)^3} H^3 \quad (式-2)$$

これは、式-1で法勾配を考慮しない場合に相当する。

覆層ドロックの重量に影響する図-6の要因を、 $p = \rho(L, h, d, B, i)\omega H$ で表示する。実験は、 $i = 1/3$ の1種のみであり、 B は5mおよび10mの2種である。いま B ごとに考えれば $p = \rho(L, h, d)\omega H$ で、したがって $(S_r - 1)C/H = \eta(L, h, d)$ となり、 L, h, d の組合せとしては $h/L, d/L$ が考えられる。

表-2.1のデータを図-7に、また図-7と同じ $d/h = 0.2$ における、0.5 ± 型ドロックのデータをプロットしたものが図-8である。図中の点線を考えると、これは $y = \coth x$ の函数形に類似している。

波高 H は波動運動を表示する一指標であるから、必ずしも波高そのものを採用する必要はない。そこで波動運動を表現する諸式のなかから、 $\coth x$ 形のものである楕円軌道の軸長¹⁰⁾を H の

$$L_x = \frac{\cosh \frac{2x}{L}(h-d)}{\sinh \frac{2x}{L}L} H \quad (式-3)$$

代りに採用することとした。もし、安定限界重量がこれで十分に表現できるなら $(S_r - 1)C / L_x$ はほぼ一定値になるはずである。

表-2.2の $B = 10m$ におけるデータを、図-9に示す。期待に反して一定値をこえることなく、むしろ直線関係が得られた。パラメータ d/h の違いによる実験値の分離が明確でないので、 h/L の代りに d/L を横軸にとったものが図-10である。同図によれば、

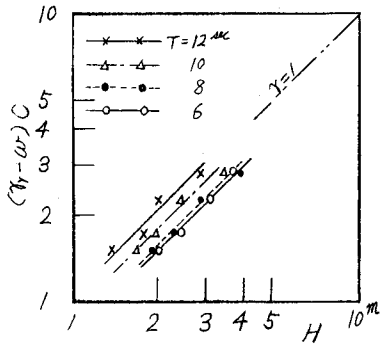


図-5 ドロックの諸元と波高の関係

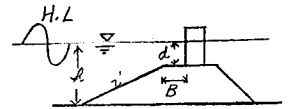


図-6 影響する要因

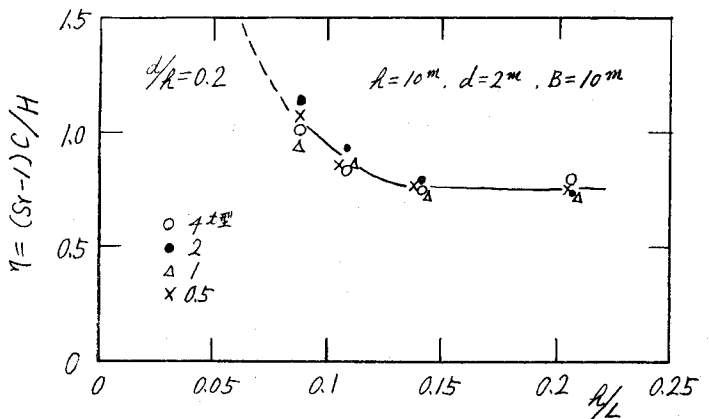


図-7 η と h/L との関係

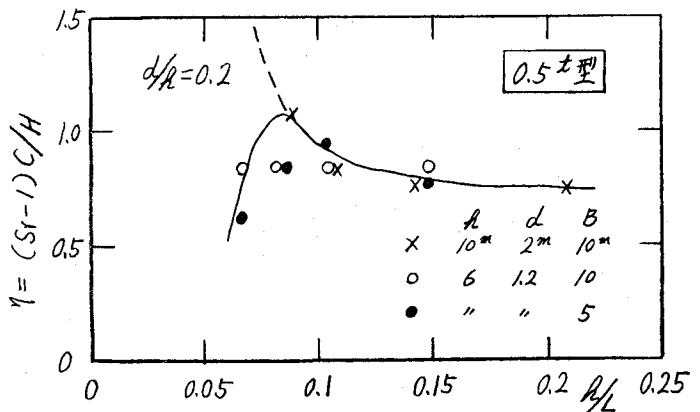


図-8 $d/h = 0.2, 0.5 \pm$ 型における η の値

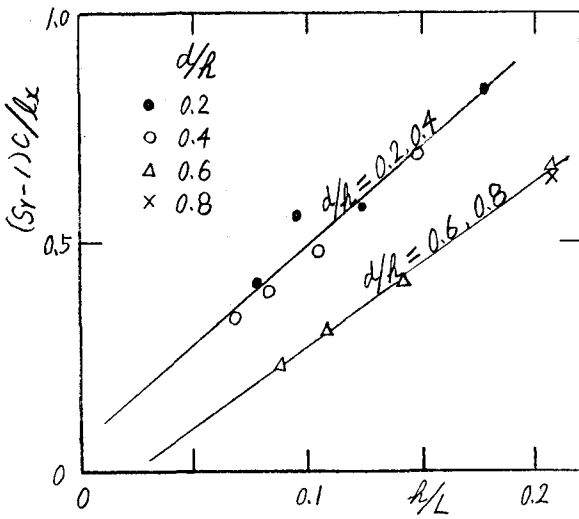


図-9 h/L の表示

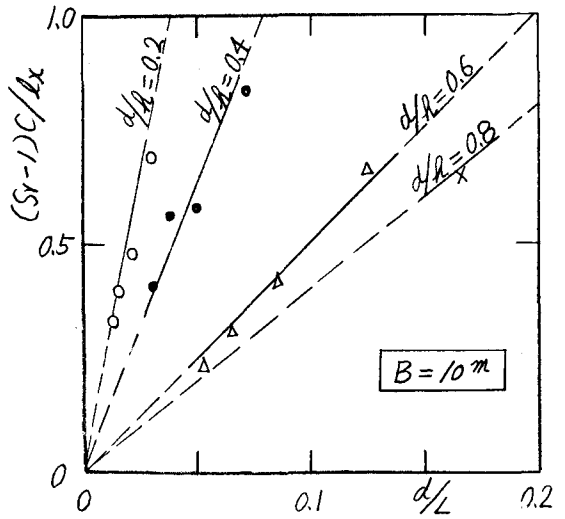


図-10 d/L の表示

$(Sr-1)C/Lx$ は d/h をパラメータとして比例関係にある。同様に、 $B=5m$ の場合のデータを図示したものが図-11である。

5. 表示法妥当性の検討

まえがきで述べた運一港建・新潟調設の実験値⁵⁾より、被覆ブロックとしてテトラポッドを使用した場合についてのデータを、図-10と同じ表示法でプロットしてみた。その結果が図-12である。ビーハイブとテトラポッドでは、その形状からして、それぞれ異なる水理機構で作用を遂げ、その結果としての安定限界重量が定まると考えられるが、同図によれば同一の表示をすることが可能であることを示している(図中の数字は d/h の値)。

$(Sr-1)C/Lx$

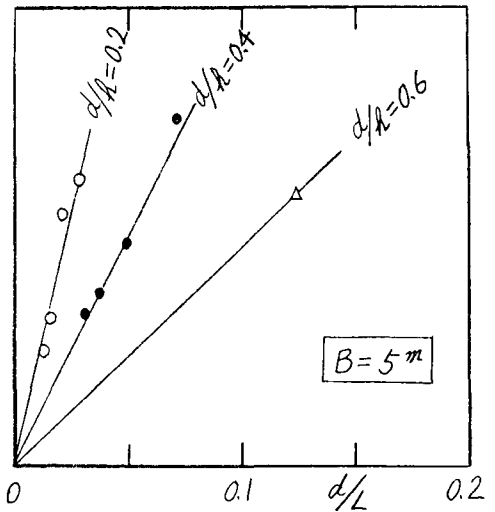


図-11 $B=5m$ における $(Sr-1)C/Lx$ の値

6. ビーハイブの重量算定式

図-10によれば、 $(Sr-1)C/Lx = 2.688(d/L)(d/h)^{-1.5}$ 、
 図-11から、 $(Sr-1)C/Lx = 2.500(d/L)(d/h)^{-1.5}$ が得られる(図-13参照)。したがって、これらを被覆ブロックの空中重量で表示すれば、

$B=10m$ の場合

$$W = 7.568 \frac{\gamma r}{(Sr-1)^3} \left\{ \frac{\cosh \frac{2\pi(h-d)}{L}}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \cdot \frac{h}{L} \cdot \sqrt{\frac{h}{d}} \cdot H \right\}^3$$

$B=5m$ の場合

$$W = 3.675 \frac{\gamma r}{(Sr-1)^3} \left\{ \frac{\cosh \frac{2\pi(h-d)}{L}}{\sinh \frac{2\pi h}{L}} \cdot \frac{h}{L} \cdot \sqrt{\frac{h}{d}} \cdot H \right\}^3$$

となり、もし卵石基礎幅 B に関して直線関係を仮定すれば式-4が得られる。

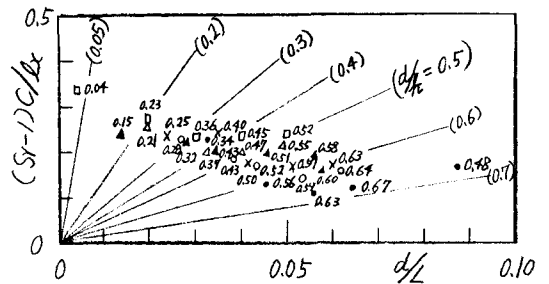


図-12 テトラポッドを被覆ブロックに使用した場合の $(Sr-1)C/Lx$ 、 d/L 、 d/h の関係

$$W = \frac{\gamma_r}{(S_r - 1)^3} (2.782 + 0.1786 \frac{B}{B_0}) \left\{ \frac{\cosh \frac{2\pi}{L}(H-d)}{\sinh \frac{2\pi H}{L}} \cdot \frac{L}{L} \cdot \sqrt{\frac{L}{d}} \right\}^3 \cdot H^3 \quad (式-4)$$

ここに

- W; ビーハイブの空中重量(t).
- γ_r ; " の空中単位体積重量(t/m^3).
- S_r ; " の岩米に対する比重(= γ_r/ω) $\omega = 1.03 t/m^3$.
- B; 割石基礎の天端幅(m).
- B_0 ; 基準幅で $B_0 = 1m$ とする.
- L; 構造物の建設水深(m).
- d; 割石基礎天端の水深で、ここでは堤体直立部前面水深を用いた(m).
- L; 水深Lにおける波の波長(m).
- H; 水深Lにおける波高(m).

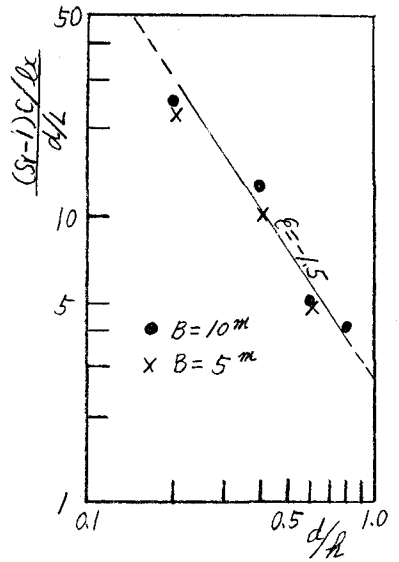


図-13 d/L の指数を求める。

6. 計算値と実験値の照合

式-4よりビーハイブの各重量に対する安定限界波高 H_c を求めた。

この値を表-2に実験値と共に示してある。強弧内の数値は実験値と計算値との比を示したもので、ブロック重量に対する波高安全率を示すことになる。表-2.2に示す0.5型ブロックに対しては、実験値と計算値は比較的一致している。もっとも、図-13で図中の直線より下側にあるデータに対しては計算値が実験値よりも小さく、すなわち設計上は安全を確保され、直線より上側にあるデータに対しては計算値が実験値よりも大きくなるので設計上は危険となる。けれども、実験値と計算値との数値そのものを比較すると明らかのように、実用設計の面からは十分な精度を有するとみなすことができよう。

しかし、表-2.1では、周期の短くなるほど計算波高は実験値よりも小さく、したがって過大設計となる。これは、図-7と図-8に示されるような傾向の違いによるものであり、ここで図-10と同じ表示で表-2.1を図示したものが図-14である。なお、計算波高は図中のバツ印に沿う直線に相当するものである。

いま $(S_r - 1)C/Lx = 0.6$ の場合の安定限界波高を H_c' 、さらに式-3の Lx において $d=0$ すなわち $Lx = \coth(\frac{2\pi H}{L})$ とした場合のものを H_c'' とし、表-2.1に追録した。実験値と比較すると、実用設計の面からは H_c' よりも H_c'' を採用するのが妥当と考えられる。すなわち、表-2.1のデータに対しては

$$W = \frac{\gamma_r}{20(S_r - 1)^3} \left(\coth \frac{2\pi H}{L} \right)^3 \cdot H^3 \quad (式-5)$$

が適用される。

ここで、式-5を表-2.2の $L=6m$, $d=1.2m$ の場合について計算してみると $T=6sec$ で $H_c''=1.8m$, $T=8sec$ で $H_c''=1.4m$, $T=10sec$ で $H_c''=1.2m$, $T=12sec$ で $H_c''=1.1m$ で設計上は過大となった。したがって、

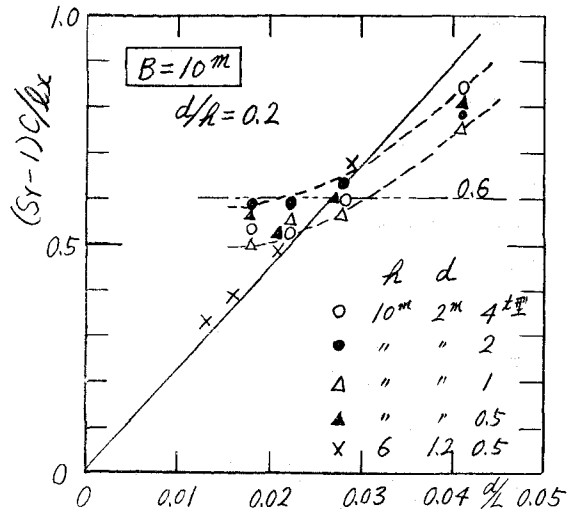


図-14 表-2.1のデータ

設計上は、 $H < d$ の場合には式-4を、 $H \geq d$ の場合には式-4と式-5で算出される重量のうち小さい方を採用するのが妥当であろう。

7. 消波ブロック重量算定に関する見解

式-1のハドソン式には、水深および波長の項が含まれていない。しかし、周期の影響は明らかに認められる^{10,12)}。式-5は $d=0$ としたものであるから、それは消波ブロックの重量を意味することになる。いま、水深 $1^m \sim 3^m$ における限界波高 H_L について、所要重量を求めると表-3のようになった。この結果は、あきらかに従来の持合せているデータとは一致しない。この違いについて直ちに指摘できる点は、式-5は砕波を前提としておらないこと、および被覆ブロックと消波ブロックの安定には根本的な違いがあることである。すなわち、被覆ブロックの移動は割石の散乱、直立部の不安定に直接的に影響を及ぼすのに対し、消波ブロックでは重量不足による転落が課題となるからである。

したがって、消波工に対しては波を砕くという機能に着目して過去に実施され集積された実験データを見つめる必要があるであろう。

表-3 H_L に対する式-5の値

L	H_L	T	L	W
1 ^m	0.8 ^m	6 ^{sec}	18.4 ^m	0.8 ^{kg}
		8	24.8	1.9
		10	31.1	3.6
		12	37.4	6.2
2	1.6	6	25.6	2.4
		8	34.7	5.5
		10	43.7	10.4
		12	52.6	17.9
3	2.4	6	30.7	4.7
		8	42.0	10.4
		10	53.1	19.5
		12	64.2	33.2

8. 結論

- 1) 異型ブロックの所要重量は波高の3乗に比例する。
- 2) 異型ブロックで割石基礎の被覆に使用されるものは、波の水深と運動における積円軌道の長軸長により、その重量を表現することが可能である。
- 3) 被覆ブロックとして使用されるビーハイブの所要重量は、式-4または式-5により求めることができる。

9. あとがき

異型ブロックの重量に関しては、傾斜堤における研究は数多く進められてきたが、我が国の一般的な使用例である図-1については、水深の浅い場合はともかくも防波堤の建設水深が15m前後となった現状では再検討の余地があるであろう。また、図-2の被覆ブロックとしての使用例については、従来より実験的研究によりその重量が求められてきたが、波の運動との関係が明らかでなかった。この拙文が今後の異型ブロックの重量算定の研究に若干の寄与することがあれば望外の喜びである。

参考文献

- 1) 竹田；消波コンクリートブロックの有効な使い方、セメントコンクリート、No.365、1977年7月。
- 2) R.Y. Hudson；Laboratory investigation of rubble-mound breakwater, Proc. A.S.C.E., Vol. 85, W.W.3, (1959)。
- 3) 竹田・宮津・瀧上・成田；防波堤基礎の荒振防止工法に関する研究、第15回北関東技術研究会発表論文集、昭和46年度。
- 5) 夏・一港建・新浜調設；安全港湾対策に関する防波堤の諸問題について、第12回管内工事報告会、1974年、非公開資料。
- 7) A. Boehmer, D. Donnelly；Laboratory study of rubble foundations for vertical breakwaters, Proc. 8th. Conf. Coastal Eng., (1962)。
- 9) 技術興業株式会社；ビーハイブをマウンド被覆層に使用する場合のビーハイブのNs値に関する水理実験報告書。