

はしがき

砂浜海岸の侵食防止用に投入されるブロックは、基礎の砂が削られ易いため、ブロックは散乱し、消波効果が失われ、投資効果上の問題だけでなく、景観を著しく阻害する。そのため自然保護の観点からも、大きな問題となっている。

このようなブロックの散逸を、簡単に防止する方法として、格子網工法を開発したが、沈下を防止するものでないことから、あまり顧みられなかった。しかし、最近ようやくその実効性について、認められ始めてきた。そこで格子網上のブロックが何故安定であるのかについて、あらためて若干考察したものである。

なお、平成十年度農業土木学会および第53回土木学会年次学術講演会で、拙論を発表し、格子網はブロックの沈下よりも、水平移動の防止に主眼がおかれていることを説明したが、なかなかご理解を頂けないところもあると思われるので、メカニズムについて、一部重複して述べる。

§1 ブロック散乱のメカニズム

1 消耗の原因

ブロック散乱のメカニズムは非常に複雑であるが、最も単純化したモデルを図-1のように仮定する。立方体の重心Oから降ろした鉛直線が、底辺と交わる点をEとし、右側からの波で周辺や下の砂が削られ、Eの近くまでくると、Eを中心として $\theta$ 回転し、OはO<sub>1</sub>に、EはE<sub>1</sub>に移動する。順次このように回転しながら流れるようにして、沖の方に向かって水平移動を起こす。これがブロック散乱、消耗の一番大きな原因である。

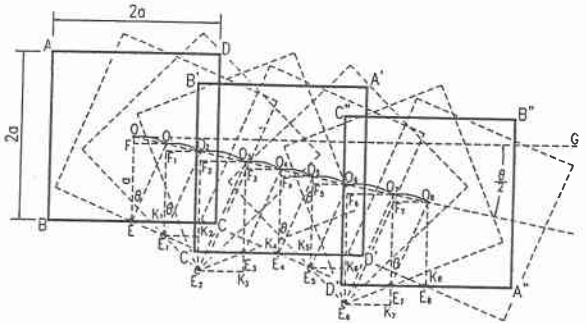


図-1 ブロック移動のモデル

この現象を最初に発見したのは、1959(昭和34)年頃である。オホーツク海に面する湧別川河口に湧別漁港があり、川の滞筋を維持するため、導流堤の根固めに、直営で2tのテトラを数百個投入したが、いくら入れても無くなる。全部沈下するとは考え難く、調査の結果、流氷時、流氷が岸から離れると、海はきれいに澄んでよく見える。その時、ブロックが数百m沖合いに、点々と散在しているのが発見された。しかし、当時このことに耳を傾ける人はいなかった。

2 いろいろな形のブロックの移動

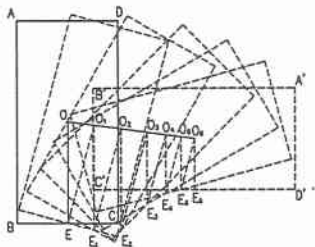


図-2 矩形(タテ長)

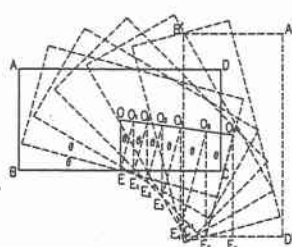


図-3 矩形(ヨコ長)

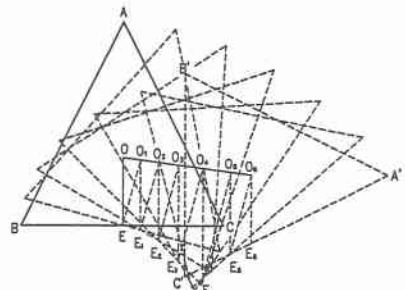


図-4 正三角形 (いずれも $15^\circ \times 6$ 回転)

Stability of concrete blocks on the lattice frame

by Kenji Ishikura

若干の形状について作図すれば、図-2～5のようになるが、重心の移動の傾きは、回転角すなわち中心角の $1/2$ となる。実際はブロックや石の形状は多種多様で、返し波や横波もあり、極めて複雑であるが、原理は図-2～5の組み合わせのように考えられる。

### 3 3段積みブロックの崩壊

図-6は、立方体の3段積みで、NO. 1が図-1のような形で抜け出し、つづいてNO. 2も同じように抜け出すと、NO. 4, 5, 6は自立できず、陥落するか、4, 6は前方に放り出されてしまい、天端は一気に落ち込む。

これすら沈下と捉えられている傾向があるのではなかろうか。実際は、沈下というよりは、散乱しているのであって、これが極端に消耗するときの一番大きな原因と考えられる。写真-1は、2段積みの例である。

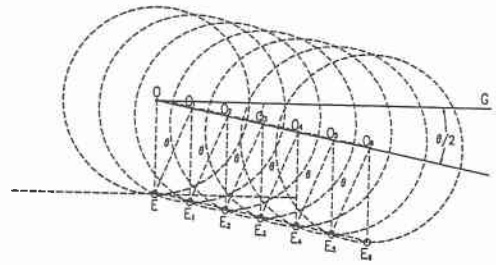


図-5 円形  $22.5^\circ \times 6$ 回転

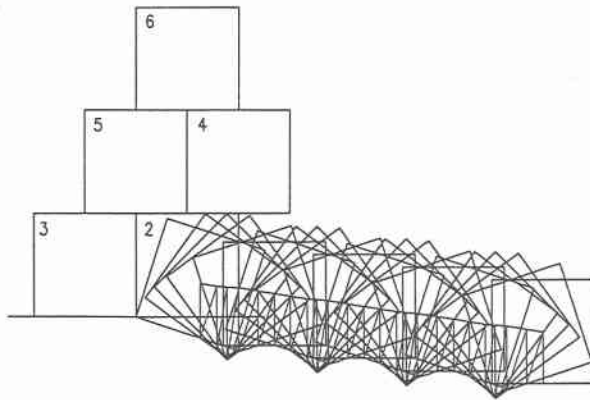


図-6 3段積みのブロックの崩壊



写真-1 捨石が洗掘され、前列のブロックが崩落している。

## § 2 ブロックの散乱を止める方法

そこでブロック散乱のメカニズムから、ブロックの散乱を止めるには、まづ水平移動を止めればよいことが分る。つまりこれが基本である。砂に埋まっているブロックや石材を再使用しようとするとき、その材料が何かに一寸でもひっかかっていると、絶対に動かない。それならば砂中に、何かひっかかるものを置けば、ブロックも動かない筈であると考えた。しかも砂上のブロックは、どんなに大きくても沈下や移動は波の思いのままである。鋼材も鋼管のような1本の部材であれば、簡単に転がる。しかしある程度の面的な拡がりをもった格子状の枠や網となれば、転がり難いだろう。この格子状網の部材に、ブロックがひっかかるように置けば、ブロックは格子網と一体となり、摩擦抵抗が増大し、簡単には動かない。沈下するとしても、構造物を作るような地盤なら、通常は相当の地耐力はある筈で、特に液状化現象の激しいところは別として、無限に沈下することはないと考えた。

## § 3 格子網とは

一辺の長さ10m内外のH形鋼、溝形鋼、山形鋼等を適当な間隔をもって、縦横に並べ、交差したか所をボルト締め、または溶接等により緊結し、網目の大きさ2m×2m前後の格子枠状の網（簡単に「格子網」という巨大な餅網）を作る。これをほぼ水平に均した砂地盤上に直接置く。網目の大きさは、ブロックや石の大きさに合わせて作る。この上に噛み合わせのよいブロックを、2層以上程度に整積みまたは乱積みにする。ブロックは通常3～5t程度であるが、ブロックは格子網の部材にひっかかり、動けなくなる。格子網1セットの全体重量は、少なくとも100～200t前後になる。しかも全体が消波構造で、底面の摩擦抵

抗が大きくなり、波浪により水平方向に移動することはない。また不等沈下により、格子網は変形するが、切断しなければよく、塑性領域内の変形は、実用上問題は無いとした。以上のことは、通常のご概念としては少々理解されるとしても、格子網上のブロックは何故動かないのかを、数値で示す必要が出てきた。

#### § 4 インブリケーション (imbrication 覆瓦状構造)

川の流れが運ぶ砂礫の粒径は、流速の2乗に比例し、体積は径の3乗すなわち流速の6乗に比例する。その関係は、表-1のようになる。

表-1 流速と運搬される砂礫の粒径・体積の関係

流 速	1	2	3	4	10
粒子の直径	1	4	9	16	100
粒子の体積	1	64	729	4096	100万倍

つまり流速50 cm/secで1gの礫が流されるとしたら、流速が5 m/secになったとき、1tの石も流されることを意味する。しかしときには図-7のように、数百kgの石が何か〇にひっかかり、上流側を下にして、1, 2, 3, 4と瓦が重なるようにし、流れの方向に強い抵抗を示して止まっていることがある。これをインブリケーション (imbrication 覆瓦状構造) という。ただしインブリケーションをしていれば石は動かされないわけではなく、河川では上流から大量の砂や細礫が供給されると、それが石の間隙に入って個々の石は動かされ易くなる。また図-7の石〇が、下流側からの侵食によってその足の下をすくわれれば、簡単に動かされ、それにひっかかっていた石1, 2, …も次々と動かされてしまう。

小樽港や留萌港の根固めの斜塊 (ブロック) は、天然のインブリケーションに似ているとは見えないであろうか。そしてそれが安定しているのは、動かない安定した基礎の上にインブリケーションを生じさせるように斜塊が列べられているからであろう。格子網はブロックの基礎を安定させ、インブリケーション効果を誘起するものと考えられる。

#### § 5 格子網にブロックをのせた初期の状態

格子網は、海底の砂地盤上に据え付けられると、上部の部材の天端が見える程度まで直ちに沈下する。整積みのときは、格子網の部材に印をつけ、ブロックの形状に合わせて据え付ければ簡単で、荷重は分散し、さらに沈下し、格子網は部材の天端から20~30cm程度は砂地盤に埋まる。設計の波力は、それから上のみ作用するものとする。またブロックの砂中に埋没している部分には、受動土圧が抵抗土圧として作用するが、実験等のデータがなく、不明確であるから考慮しないこととする。波力については、普通の場合、水深6mくらいでは、1t内外の捨石に移動を生ずることは稀である。')と言われている。しかし安全を期するため、最も大きな波圧を与えるMinikin式を参考とする (図-10)。同式の動水圧部分は、静水面を中心に、上下H/2の範囲でパラボラに分布するとしているので、この部分の波圧は底部には及ばず、静水圧のみが作用するものとする。格子網の端部に、ブロックがひっかかるように設置したときの状態を、図-8に示す。またBをヒンジ、Aを単純支持と仮定した力学モデルを図-9に示す。

(1) ブロックがB<sub>1</sub>を中心にして回転し、A<sub>2</sub>にひっかかる場合

格子網の部材B<sub>1</sub>は砂に埋まっているからヒンジとし、A<sub>2</sub>を単純支持と仮定する。波力PによりA<sub>2</sub>にPと同じ向きの反力が発生し、自重WはB<sub>1</sub>の回りに抵抗モーメントM<sub>R</sub>を与える。

$$p = \gamma \frac{H}{2}$$

(1)

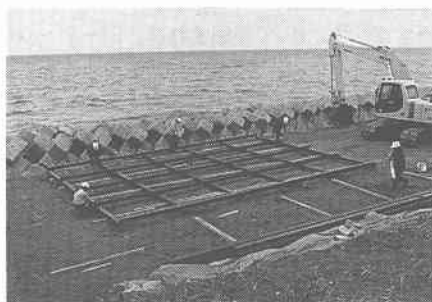


写真-2 格子網の組立

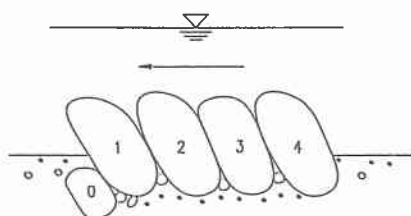


図-7 インブリケーション

H : 波高

$\gamma$  : 海水の比重

$$P = p h_1$$

$h_1$  : 波力が作用するブロックの高さ

$$y = \frac{1}{2} h_1 + (h_2 - h_3)$$

ブロックは波力により回転し、 $B_1$ 、 $A_2$  にひっかかる。 $B_1$  の回りに働くモーメントのつり合いを考える。

波力によるモーメント

$$M_p = P y = p h_1 (0.5 h_1 + h_2 - h_3) \quad (4)$$

自重によるモーメントは

$$M_w = W L_c \quad (5)$$

W : ブロックの水中重量

$L_c$  : ブロックの重心線と支点  $B_1$  の距離

ブロック接点  $A_2$  の反力を  $S_A$  とすれば、抵抗モーメントは

$$M_R = S_A h_3 \quad (6)$$

$\Sigma M_B = 0$  から

$$M_p - M_w - M_R = 0$$

$$M_R = M_p - M_w \quad (7)$$

$$S_A h_3 = P y - W L_c = p h_1 (0.5 h_1 + h_2 - h_3) - W L_c$$

$$\therefore S_A = \frac{1}{h_3} \{ p h_1 (0.5 h_1 + h_2 - h_3) - W L_c \} \quad (8)$$

$$S_B = P + S_A \quad (9)$$

$S_A$ 、 $S_B$  を集中荷重として格子網部材のはりに、作用させたときの応力が、許容応力以内であればよい。

ただし  $S_B$  は砂に埋まっており、その反力で打ち消されるものとする。

(2) ブロックが  $B_1$  を中心に回転し、 $A_2$  にひっかからない場合

なるべく  $A_2$  にひっかかるように設計するが、ブロックによってはひっかかり難いものもある。そのとき  $B_1$  の回りのモーメントが  $M_p > M_w (= W L_c)$  ならば、計算上ブロックは転倒する。ただし傾きが大きくなり、次の列のブロックに接すると、インプリケーション効果により、ブロック群は波力の方向に強い抵抗力を生じ、安定するであろう。しかしこの場合重要なことは、ブロックの一番下のひっかかりが安定していることで、これが条件である。

(3) 計算例

50 t 型テトラの法先の根固めに、6.3 t 型のテトラを使用

設計の諸元は図-10、11 に与えられている。

(a) 図-11 で、テトラの脚は  $A_2$  にひっかからないので、前項 (2) の場合として計算する。

テトラの諸元は 種別 6.3 (t 型)

実重量 5.75 t、体積 2.5 m<sup>3</sup>

h 2.07 (m) b 1.01

d 2.225 c 0.08

s 2.47 e 1.36

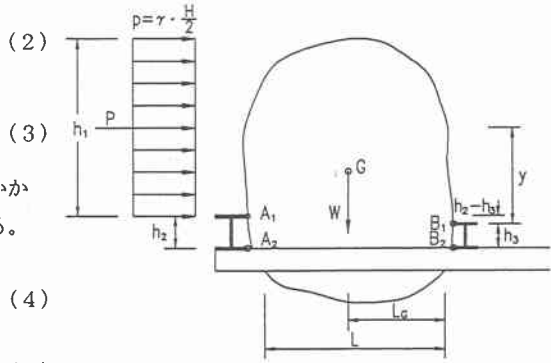


図-8 格子網の端部にブロックがある状態

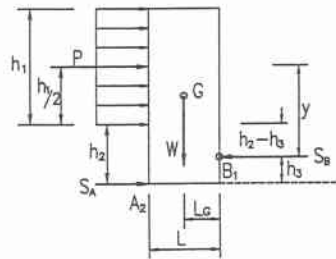


図-9

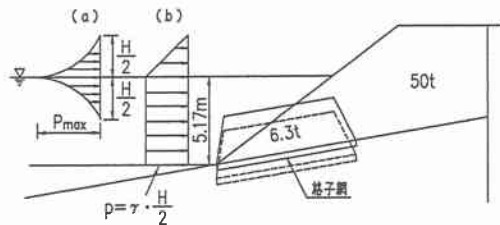


図-10 消波工法先の格子網による根固め

図-10 で波高は、一応  $H = 5$  m として計算した。  $P_{max}$  は図 (a) のようになるが、法先ブロックの

計算は図（b）の静水圧とする。

格子網の上にブロックを置くと、海底の波の流れが緩やかでも、流れと自重により、30cm程度は直ちに沈下する。ここではテトラの図形の中心まで沈下するものとする。沈下量は

格子網の外側部材の天端から 31cm、格子網の内側部材の天端から 36cm となる。

砂地盤から上の直立脚部の投影面積を  $A_1$ 、砂地盤から上の水平脚部の投影面積を  $A_2$  とする。

$A_1$ 、 $A_2$  の投影面積、重心から図形底面までの距離を計算すると次のとおりである。

	投影面積(m <sup>2</sup> )	重心から図形底面までの距離(m)
$A_1$	0.813	0.466
$A_2$	0.523	0.156

$$p = \gamma \cdot H / 2 = 1.03 \times 5 / 2 = 2.575 \text{ t/m}^2$$

$$P_1 = p A_1 = 2.575 \times 0.813 = 2.093 \text{ t}$$

$$P_2 = p A_2 = 2.575 \times 0.523 = 1.347 \text{ t}$$

投影面積  $A_1$ 、 $A_2$  に作用する波圧による、格子網部材の回りのモーメントは

$$M_1 = P_1 y_1 = P_1 (0.466 + 0.35 + 0.33) = 2.093 \times 1.146 = 2.399 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$M_2 = P_2 y_2 = P_2 (0.156 + 0.33) = 1.347 \times 0.486 = 0.655 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$M_r = 2.399 + 0.655 = 3.054 \text{ t} \cdot \text{m}$$

テトラの海中の重量

$$W = 5.75 - 2.5 \times 1.03 = 3.175 \text{ t}$$

(5) 式より

$$M_w = 3.175 \times 0.89 = 2.826 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$M_w < M_r$$

計算上は転倒する。ただしテトラの正規の置き方は、図-10と向きは反対であるから自重によるモーメントは

$$M_w' = 3.175 (2.225 - 0.89)$$

$$= 3.175 \times 1.335 = 4.239 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$M_w' > M_r \quad \text{OK.}$$

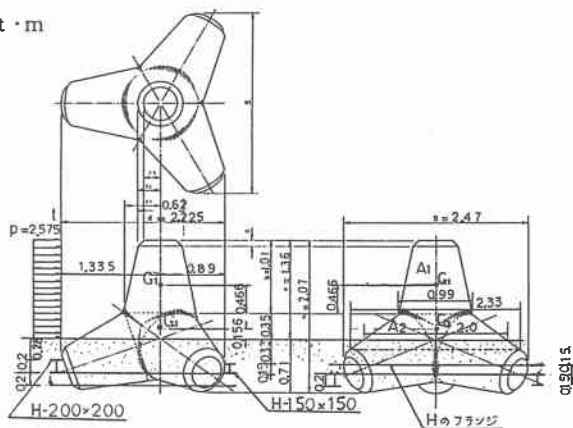


図-11 格子網上のテトラの配置

(b) ブロックの脚が、格子網部材  $A_2$  にひっかかる場合

(1) の場合である。

6.3t型テトラと同程度のブロックを想定し、 $A_2$  にひっかかる。図-11と(4)，(5)式より

$$M_r = M_1 + M_2 = 2.399 + 0.655 = 3.054 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$M_w = 2.826 \text{ t} \cdot \text{m}$$

(7) 式より

$$M_R = M_r - M_w = 3.054 - 2.826 = 0.228 \text{ t} \cdot \text{m}$$

(8)，(9) 式より

$$S_A = 0.228 / 0.15 = 1.52 \text{ t}$$

$$S_R = P + S_A = 3.44 + 1.52 = 4.96 \text{ t}$$

これに対し、部材の長さは2.575mで、両端単純支持と仮定すると、中央点のモーメントは

$$B_1 : H-150 \times 150 ; Z_1 = 75.1 \text{ cm}^3 ; M_B = 1/4 \times 4.96 \times 2.575 = 3.193 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$A_2 : H-200 \times 200 ; Z_2 = 160 \text{ cm}^3 ; M_A = 1/4 \times 1.52 \times 2.575 = 0.979 \text{ t} \cdot \text{m}$$

$$\sigma_n = M/Z, = 3.193 \text{ t} \cdot \text{m} / 75.1 \text{ cm}^3 = 4,252 \text{ kg/cm}^2 > 1,400 \text{ kg/cm}^2 \text{ (砂中に埋まる)}$$

$$\sigma_s = M/Z, = 0.979 \text{ t} \cdot \text{m} / 160 \text{ cm}^3 = 612 \text{ kg/cm}^2 < 1,400 \text{ kg/cm}^2 = \sigma_s$$

## § 6 施工

実際の施工に当たっては、格子網の端部の1列目にブロックを置いてだけでシケに遭うような施工はしないのが原則で、常識でもある。少なくとも1層は終えなければならない。従って格子網上のブロックは、単独で波浪に抵抗するのではなく、1セット全体で抵抗するもので、ここにもその特長があり、天然のインプリケーションに似た相乗効果もあると考えられる。また水深が5mより浅いところでは波力は小さくなり、ひっかかりの具合を、予めきちんと調整すれば十分安全である。捨石堤の法先は、ブロックや石を小さめにし、地中で連結して単独行動ができないようにし、全体がひとつのグループとなって抵抗し、自然の波の力で沈むところまで沈ませ、落ち着かせるのが最善の策であると考えられる。これは最小動の原理でもある。

非常に綿密に実験的研究を重ね施工された、廣井先生の小樽港防波堤の天端も、完成時は設計より数10cm高くしたが、竣工後は設計よりさらに数10cm沈下している。<sup>3)</sup> 最近、海岸の消波堤等を、単年度で基礎工から上部工まで完成させ、天端の設計高の確保が絶対的条件であるとのことを聞くが、海象変化の激しい海岸では無理なことである。通常防波堤の捨石基礎工はケーソンを置く前に少なくとも1, 2年放置すべきものと言われている。大切なことは、ブロックを散乱させないように、しっかりと基礎地盤上に構造物を作ることである。この点、野中兼山の種崎波止は興味深い。<sup>4)</sup>

よく粗朶沈床の考え方に似ているとの質問を受ける。粗朶は、今や入手が難しいばかりでなく、水面に浮くため、波浪の影響を受け易く、均一に沈めるのが非常に難しい。また廣井博士は、「かつて新潟港で防波堤の下に粗朶を使用したことあり、その成績は半ば不良であった。…永く激浪に抵抗できないことと、堆砂によって掩われなければ忽ち海虫に襲われる。概して防波堤の築造には適さない。」と記されている。<sup>2)</sup>

## § 7 ブロック固定の根拠

計算例から明らかなように、支点部材 $B_1$ と相対する部材 $A_2$ にひっかかれれば、部材に作用する力は非常に小さく、波力による格子網の破壊は考え難い。図-8で逆向きの引き波が弱くても、ブロックの下の砂を削り、支えるものがなければ重心が傾き移動する。またこのとき提体が不等沈下をしても、ブロックが格子網の $A_1$ を支点とし、 $B_2$ にひっかかれれば、(8)、(9)式から部材に大きな力がかからず、ブロックは動けない。ブロック固定の根拠はここにある。

## § 8 山地河川の大石と格子網上のブロック

山地河川の大石が動かないのは、大石の下に凹凸の岩盤があり、それにひっかかっているためである。格子网上的ブロックは、この山地河川の状態を海岸で実現している。しかも山地河川の大石も、その下の岩盤が洗掘されると、やがては動かされてしまうが、格子網はそれにも順応し、動かないところに特長がある。

あとがき

山地河川と格子網の関係については、筑波大学水理実験センター池田宏先生からお教え頂いた。インプリケーションその他についても色々ご注意ご指導を賜った。高知市三里(ミヅ)史談会の方には、野中兼山の種崎波止の調査で大変お世話になった。また論文を出すように勧めて下さった北海道石狩支庁国光正博課長並びに尾崎晃北大名誉教授、および資料をご提供下さった方々、以上の皆様に感謝しお礼申しあげます。

参考文献

- 1) 廣井勇 築港 丸善 前編 P.308,                      2) 同左                      P.333
- 3) 小樽築港工事報文
- 4) 1660年頃築造、1704年宝永の大地震で被災、修復。1854年安政の大地震津波に姿が現れ、種崎村を救う。
- 5) 合田良實・佐藤昭二 海岸・港湾 彰国社刊 P.343
- 6) 海岸保全施設におけるブロックの格子枠状鉄網基礎工法 平成10年度農業土木学会 国光, 石倉他2名
- 7) 海岸侵食防止工法の新しい試み 土木学会第53回年次学術講演会 石倉建治