

海岸防砂堤について

大阪市立大学教授 工学博士 永 井 莊 七 郎

1. 緒 言

波浪による海岸浸食防止工として、最近数年間、わが国の各地で防砂堤が築造され、その効果をあらわすようになってきた。工事実施と平行して防砂堤に関する実験もある程度行われたが、今までの実験あるいは研究は断片的であつて、波浪の特性と防砂堤の方向、長さ、間隔、構造などとの関係を究明した組織的な研究は、いまだわが国においてもまた外国においてもほとんど行われていない。従つて本文でも、断片的な実験結果及び2, 3の海岸における実施結果について記述するのみで、波浪と防砂堤に関する普遍的な見解は、現在実施中である防砂堤及び沿岸流に関する研究が終つて後に詳細に報告するつもりである。

2. 沿岸流と漂砂

一般に防砂堤が築造されるのは、砂浜における漂砂の移動を阻止して、海岸の浸食を防止するためであるが、この漂砂の原因は主に波浪と沿岸流であるから、防砂堤の研究には先づ第一に、波と沿岸流との関係を究明しなければならない。

(1) 漂砂の原因 海岸あるいは海底の砂が移動する原因は大体二通りある。一つは砕波によつて浮遊した砂が沿岸流によつて運ばれる場合で、もう一つは、波が海岸に斜めに当つて斜面の砂がシグザグ運動をしながら移動する場合である。

沿岸流は特殊な場所では潮流または海流によつて生ずるが (littoral current)、一般に海岸の漂砂の原因となる沿岸流は、海岸線に斜めに砕波した場合に生ずる沿岸流 (longshore current) である。

沿岸附近の波においては、水分子は楕円軌道を描きながら僅かづゝ海岸に向つて移動する。この浅海波の質量の輸送は、砕波するときに最も大きい。波が海岸線に斜めに進行して砕けると、砕波によつて海岸の方に運送された水量は、海岸線とほぼ平行に流れて沿岸流を生ずる。砕波によつて海水中に巻き上げられた海底の砂は、この沿岸流によつて徐々に運ばれ、漂砂が起るようになる。この沿岸流の速度は一般にあまり大きいものではなく、せいぜい 10~50 cm/sec 程度であるが、長期間一定方向に流れると、おびただしい量の砂を輸送する。

また海岸の斜面に波が当たると、斜面上の砂は波とともに斜めに打ち上げられ、つぎに波が引くのと一緒に落下し、このようにして斜面上を上下にシグザグ運動をしながら、徐々に移動して行く。

漂砂のある砂浜では、一般に上記の二つの方法が重なり合つて漂砂を生じているが、勾配の急な波が多く押しよせる海岸では、主に前者の原因によつて、また勾配が緩かな波が多い海岸では主に後者の原因によつて漂砂が起る場合が多いように思われる。このことについては十分実験を行つて、後に確言したい。

(2) 沿岸流の理論 非回転性浅海波が単位時間に、単位巾について輸送する運動量 M は、

$$M = \rho \pi a^2 C \cdot \coth kh / T \quad (1)$$

ここに、 ρ ; 水の密度、 a ; 半波高、 C ; 波の伝播速度、 $k = 2\pi/L$, L ; 波長、 h ; 水深、 T ; 波の周期。

この波の静水面の x 軸上の高さ δ は、

$$\delta = \frac{1}{2} k a^2 \coth kh = \frac{\pi}{L} a^2 \coth kh \quad (2)$$

(2)式を(1)式に入れると、

$$M = \rho C \delta L / T \quad (3)$$

砕波のときの M, C, δ, L, T をそれぞれ $M_b, C_b, \delta_b, L_b, T_b$ で表わすと、

$$M_b = \rho C_b \delta_b L_b / T_b \quad (4)$$

一般に砕波点の水深は波長に比してかなり小さく、

$$\tanh kh \approx kh \quad (5)$$

とおくことができるから、

$$\delta_b \approx a_b / 2 \approx H_b / 4 \quad (6)$$

$$\therefore M_b \approx \frac{1}{4} \rho C_b H_b L_b / T_b = \frac{1}{4} \rho C_b^2 H_b \quad (7)$$

今波の進行方向が海岸線となす角を θ とすると、砕波による輸送運動量の海岸方向の成分は

$$M_b \cdot \cos \theta = \frac{1}{4} \rho C_b^2 H_b \cdot \cos \theta \quad (8)$$

である。またこの波の静水面上の山の部分が砕波によつて輸送されると考えると、その質量 ρV は

$$\rho V = 2\rho \int_0^{L/4} (y - \delta) dx \approx \rho (a_b / \pi) L_b \quad (9)$$

従つて単位時間における輸送質量は、

$$\rho V / T_b = \rho (a_b / \pi) C_b \quad (10)$$

これだけの質量の水がすべて沿岸流となつて、 v な

あるので、後日沿岸流に関する詳細な報告を出す予定であるが、本文では昭和25年1月～3月、運輸省才三港湾建設局で行った沿岸流の実験結果と California 大学で1949年に行った実験結果とを要約して記す。

1. 筆者の実験⁽²⁾ この実験は、幅 2 m, 長さ 6 m, 深さ 0.3 m のコンクリート小型水槽の一端に、平均粒径 $d_m=0.15\text{mm}$ の標準石英砂を勾配 $1/10$ または $1/20$ に敷いて海岸を作り、水深を 7 cm にし、他端から波高 $h=2.65\sim 3.50\text{ cm}$, 波長 $L=76\sim 89\text{ cm}$, 周期 $T=0.94\sim 0.98\text{ sec}$ の波を起して沿岸流を調べたものである。

(a) 海岸線に直角に波が進行してくる場合には、汀線より約 60 cm 沖で海岸線にほぼ平行に砕波し、その砕波線に、海岸線に平行に砂州 (sand ridge) ができる。この砂州は次第に発達して大きくなるが、底の戻り流れのために頭部が削られ、ある時間たつと堆積と洗掘とが釣合状態に達して、それから大きくならない。直角に波がくる場合には沿岸流はもちろん生じない。

(b) 海岸線に斜めに波がくる場合、海岸線となす角度を 60° としたとき、水深が波高の $0.8\sim 1.0$ 倍のところで海岸線に大体平行に砕波し、そこに砂州ができる。この場合には、砕波後の水分子は往復運動をせず、水面附近のエネルギーの大きい水分子は陸岸に登って図-2 の C 点に達し、それから斜面に沿って D 方向に落ちる。また水底附近のエネルギーの小さい水分子は陸岸に登ることができず、斜面に沿って低い方に横に流れようとする。そこへ右側の砕波後の水分子が突き当って B→C'→D の方へ押し流し、このようにして海岸線に平行な流れを生ずる。この沿岸流は陸岸と砂州の間の溝の部で強く、砂州の沖側では弱い。

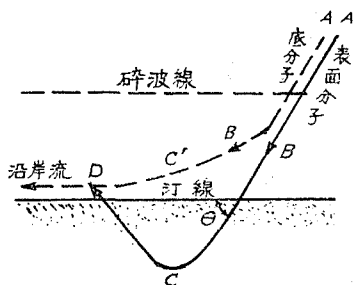


図-2 海岸線に斜めに波がくる場合の水分子の運動

また沿岸流の速度は波が海岸線に対して 60° で進んでくるときよりも 45° で進んでくるときの方が大きく、海底及び陸岸の勾配が $1/10$ のときの方が $1/20$ のときより大きい。陸岸を折つて $1/5$ の傾斜にした場合はさらに強い。

波が海岸線に対して 30° の角度で進んでくる場合に

は、砕波後の水分子の大部分が陸岸に登らないのでほとんど汀線に平行に流れるため、沿岸流の速度は強くなる。この場合には海岸線に平行な砂州はできない。

陸岸及び汀線附近において海底勾配が急に大きくなった場合には、砕波後の戻り流れが強いため、沿岸流は蛇行し、特に戻り流れが強い場合には、沿岸流を横断して沖へ流れ (rip current), この部分の砂州が切断される。

その他、沿岸流の速度と波の勾配、エネルギーなどとの関係は現在実験により研究中である。

2. Saville の実験⁽³⁾ California 大学で $66' \times 122' \times 2'$ の水槽内に $d_m=0.30\text{ mm}$ の砂を敷き、海岸の勾配を $1/10$ に造り、 $T=0.714\sim 1.50\text{ sec}$ の波を海岸線に 80° の角度で当てて実験したもので、その結果を要約すると、

(a) 漂砂のうち lateral translation の方は、直接 oscillatory wave の作用によつて、主に陸岸及び海底の砂がジグザグに移動する場合であり、longitudinal translation の方は浮遊した砂が沿岸流により運ばれる場合である。

(b) 波が荒い冬の海岸 (equilibrium storm beach) においては、漂砂は主に沿岸流により浮遊して生ずる。うねりの多い夏の海岸 (equil. summer beach) においては、漂砂は主に直接波の作用による beach drifting として運ばれる。この両者の限界は、波の勾配が 0.03 のときである。

(c) 波のエネルギーが同じときは、夏の緩かな波による漂砂の方が、冬の急な波による漂砂より遙かに大きい。最大の漂砂は波の勾配が $0.02\sim 0.025$ のときに beach drifting によつて起る。波の勾配が 0.02 より小さくなると、漂砂は急激に減少する。

(d) 漂砂の割合は、他の条件が同じならば、波のエネルギーに比例する。

(e) 漂砂のほとんど大部分は砕波と海岸との間で起る。

以上の内、(a), (b), (d), (e) は既によく知られているところである。(c) についてはなお検討の余地もあると思われるが、筆者は皆生海岸において、大きなうねり性の波によつて海岸の砂浜が数時間に甚だしく浸食されたことを目撃したことがある。

3. 防砂堤

海岸における防砂堤の目的は、沿岸流によつて運ばれる浮遊漂砂及び直接波によつて斜面を運ばれる漂砂を阻止して、防砂堤の両側に堆砂せしめることにある。この目的に最も適した防砂堤の長さ、相互の間隔、波及び海岸に対する角度などについては、今まで

に十分研究されていないので、目下実施中である実験の完了後、詳細に報告する予定であるが、本文には、最近数年間に実施された1,2の実験結果及び新潟、鳥取県皆生、京都府日置海岸における防砂堤の効果について、その概要を述べる。

(3) **防砂堤の実験⁽⁴⁾** すでに記した沿岸流の実験を行った水槽において、波高約3cm、波長約80cm、週期0.94~0.98sec、水深7cmとし、防砂堤の汀線よりの長さを20cmにして、陸岸勾配 $1/5$ 及び $1/10$ 、海底勾配 $1/10$ 及び $1/20$ なる場合に、防砂堤の間隔及び方向を変えて実験を行った。その結果を要約すると、

1. 陸岸勾配 $1/5$ 、海底勾配 $1/20$ 、汀線に対する波の進行方向 60° の場合 防砂堤がない場合には、砕波後の水分子は陸岸($1/5$ 勾配)を登つてこれを円弧状に洗掘し、その1部分は沿岸流に合流し、残りの部分は波の進行方向と反対方向に底部を戻り流となつて返つてくる。このため、陸岸及び海底勾配が一樣に $1/20$ の場合に比して、この場合は砂州の発達が弱い。

(a) 防砂堤を海岸線に直角に1本出した場合は、防砂堤の両側とも陸岸の洗掘は減少するが、特に上流側(沿岸流の)と堤の先端の下流側に堆砂が多い。これは防砂堤によつて沿岸流が阻止され、その主流が沖へ向つて流出し、堤先端の下流側に反対廻りの渦を生ずるためである。

(b) 防砂堤2本を海岸線に直角にその長さ(汀線から海側の長さ)の2倍(40cm)の間隔に出した場合には、上流防砂堤の上流側には1本の場合と同様に堆砂するが、その先端下流側の堆砂はなくなり、下流防砂堤の先端下流側にやゝ堆砂を生ずる。これは2本の場合には、沿岸流の一部が上流防砂堤に阻止されて沖へ流出するが、残りの部分は海岸線に平行に流れ、下流防砂堤の先端から沖へ流出し、その先端下流側に渦を生ずるためである。しかし2本の場合には1本の場合よりも渦が小さいので、堆砂も少ない。2本の防砂堤間の陸及び海底はあまり洗掘もされないし、また堆砂もしない。

(c) 防砂堤2本の間隔をその長さの3倍にした場合には、上流防砂堤の上流側及び先端下流側の堆砂は1本の場合とほぼ同じであるが、下流防砂堤の上流側には間隔が2倍のときより遙かに多量の堆砂を生ずる。これは、間隔が2倍の場合には、沿岸流は防砂堤の先端を海岸線に平行に流れ去り、また波も防砂堤間に侵入しなかつたが、3倍の場合には、下流防砂堤の上流側には、上流防砂堤の上流側にほぼ近い現象を生ずるためと考えられる。

(d) 防砂堤2本の間隔をその長さの4倍にした場合には、2本の防砂堤間の1部分がやゝ洗掘され、かつ下流防砂堤の上流側の堆砂も多少減少するようである。

(e) 1本の防砂堤を海岸線に 110° の角度に出した場合には沿岸流は防砂堤によつて甚だしく阻止されないで、海岸線にほぼ平行に流れ、砂州もできるが、堤の上下流に多量の堆砂を生ずる。このことは新潟海岸の防砂堤についても実証されている⁽⁵⁾。

(f) 2本の防砂堤を海岸線に 110° に、その間隔を長さの3倍に出した場合、上流防砂堤の上下流ともに堆砂を生じ、かつ下流防砂堤の上下流にも堆砂を生じ、防砂堤の効果は最も顕著であつた。

2. 陸岸及び海底の勾配を $1/20$ 、汀線に対する波の方向 60° の場合 防砂堤を1本出した場合及び3本をその長さの2倍の間隔に配置した場合について実験したが、1本の場合には1.(a)の場合とほぼ同じく、3本の場合には、沿岸流は多少蛇行するが海岸線にほぼ平行に流れ、砂州もできるが、防砂堤間にはあまり堆砂も洗掘もない。

以上僅かな実験結果から直ちに一般的な防砂堤の効果を論ずることはできないが、防砂堤の間隔は大体その長さ(汀線から海側の)の3倍程度が適當のようであること、方向は海岸線に直角よりも多少下流側に(沿岸流の)傾けて出した方が効果的であること、防砂堤の間隔をあまり狭くすると効果がないことなどが考えられる。

(2) 防砂堤実施の効果

1. 新潟海岸の防砂堤⁽⁶⁾ この海岸における代表的な防砂堤は、河口西防波堤基部のT字型5基と日和山地区の4基である。その構造はいずれも木杵石詰、鉄線蒲団籠で、後には穴開きブロックまたはセルラー・ブロックで造られた透過堤である。縦堤の長さは60~120mで、その水中部分は50~80m、横堤の長さは22~73mで、先端の水深は1.0~1.5m、天端高は東京湾中等潮位上+0.3~0.5mである。また砕波の波高は $H_b \approx 3 \sim 4$ m、砕波水深 $h_b = 4 \sim 1.5$ m、波長 $L = 70 \sim 100$ m、 $T \approx 7 \sim 10$ secで、強風は冬季の北西または西西北西の風で、10m/sec以上の強風が20~40時間連続して吹く。防波堤築造後の調査及び模型実験の結果によると、

(a) 防波堤の天端が常時水面上に出しているので、波が小さいときは横堤と横堤の間から波が入り、両側に抵がつて縦堤の基部に堆砂するが、波が荒いときは波が横堤で砕けて内側に飛び込むので、横堤の前面

を洗掘するとともに、越波と両横堤の間から入った波とがぶつかつて、内側に複雑な流れが渦乱を生じて海岸の砂をかきまぜる。このため横堤の構造は頑丈で、透水性とし、天端は水面以下にするのがよい。

(b) 横堤で波のエネルギーが減少させられるとともに、沖に向う戻り流れも減少するので、横堤と両岸との間では砂が逃げ出しにくい。従つてポンプで土砂を補給したが、効果がよい。

(c) 防砂堤の天端は、高くすると強い波力を受けるので、天端は海底にほぼ平行して先端に行くほど低く、水面下に置く方がよい。

(d) 防砂堤の方向は海岸線にほぼ直角か、風下側に 10° 以上傾けると効果があるようである。このことは筆者の実験結果と一致している。

(e) 潜堤を旧測候所前面の海岸線から約 150 m の沖合の水深 2.5~3.0 m の場所に、延長 245 m を蒲団籠で築造したが、その結果は、潜堤によつて波力が減殺され堤内部の渦乱を減少せしめるので、海岸線の浸食を防止し、またその両端及び中間部に適当な間隔に、陸岸と連絡する縦堤を出して区劃すると、その間に堆砂を生ずる。たゞし新潟海岸のごとく波が荒いところでは、捨石、蛇籠類では破壊されやすいから、セルラー・ブロックまたは鉄筋コンクリート杭などの丈夫な構造にしなければならない。また波の勾配が急な海岸では有効であるが、勾配の緩かな、すなわちうねり性の波が強い海岸ではかえつて有害である。

2. 日置海岸の防波堤 京都府宮津湾北岸の日置海岸では、長さ約 15 m のコンクリート・ブロック積 ($1 \times 1 \times 1.5$ m ブロック、約 3.3 t) の小防砂堤をほぼ 40~60 m の間隔に 7 本築造したが、その効果は顕著で、築造後約 1 年にして汀線が平均数 m 前進した。

この海岸は宮津湾の入口の北岸にあつて、荒天時の波はかなり小さい角度 (恐らく 30° 程度かそれ以下) で海岸に当り、また波高も小さいので、海岸における波のエネルギーは、新潟、皆生海岸などと比較すると遙かに小さいようである。この海岸における汀線及び深淺の変化を昭和24年度及び25年に亘り調査した結果、

(a) 防砂堤の築造によつて海底の砂 ($d_m \approx 0.2 \sim 0.6$ mm) が移動するのは汀線からほぼ 50 m、水深 3.5~4.0 m 程度までである。

(b) 沿岸流は干満潮時とも湾奥に向つて流れている。

(c) 海底には全く砂州はできない。これは筆者の実験においても、海岸線に対し波が 30° の角度で進んできて碎波した場合には砂州が形成されなかつた結果と一致している。この海岸では荒天時でも一般には波高が小さいので、防砂堤も小さいもので効果を発揮したが、大海に直面した海岸では、長さ 15 m 程度の小防砂堤ではほとんどその効果を期待することはできないであろう。日置海岸においても、台風が附近を通過して特にひどく海が荒れた場合には、折角堆積した砂が一度に流されることを聞いている。

3. 皆生海岸の防砂堤 鳥取県弓ヶ浜皆生海岸にはその浸食防止のため、昭和24年度以来29年度まで毎年1~2本の防砂堤が築造せられ、現在14本できている。その長さは 30~52 m、間隔は 75~100 m で長さのほぼ 2~2.5倍に配置されている。その構造は水中にある部分は捨ブロック (1ヶの重量 3.3 t) で、陸岸の部分は場所打コンクリートの梯形断面である。

同県米子土木出張所の調査によると、昭和25~27年頃はかなり堆砂をして汀線が 10 m 前後前進したが、28年及び29年の秋には反対に浸食されて、防波堤築造

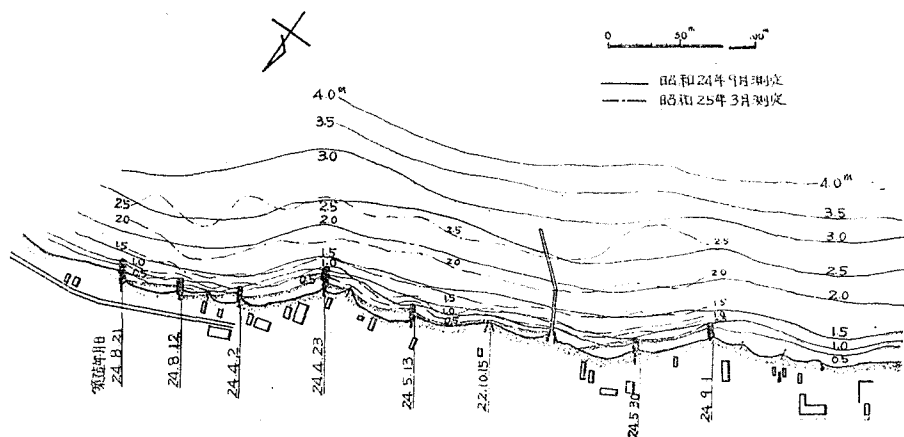


図-3 日置海岸深淺測量図

