

離岸堤施工による地形変化

上 森 千 秋*

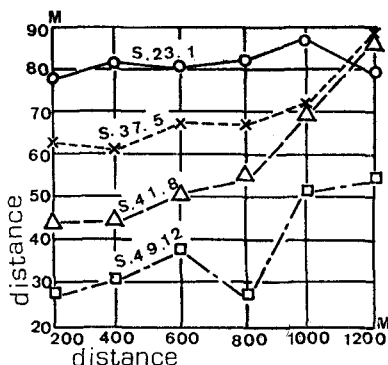
1. ま え が き

近年、海岸侵食防止のため離岸堤がよく用いられている。漂砂移動の激しい海浜に離岸堤を施工すると、波の回折現象により、比較的速やかに離岸堤背面の前浜に tombolo が形成され始めるとともに、離岸堤端の延長汀線の侵食が起る。離岸堤背後の波の減衰や tombolo の形状についてはいくつかの報告があるが^{1),2)}、この tombolo の堆砂がどこから、どのようにして供給されるかは、まだよく判っていない。

本文は、現在離岸堤を継続施工している高知海岸を対象にして、施工後の地形の追跡調査および若干の実験結果から、tombolo の発生機構および漂砂下流側の侵食機構を明らかにし、より安全で効果的な離岸堤の設計施工に対し有益な資料を得ようとするものである。

2. 久枝海岸の侵食と施工までの経緯

久枝海岸とは、物部川河口から高知港域までの 8.2 km の建設省直轄高知海岸の一部で、物部川河口に隣接した約 1.2 km の区間をいう。この海岸は土佐湾の湾奥中央部にあり、波は周期が長く ($T \approx 8 \text{ sec}$ 以上)、かつ屈折発散して flat で、物部川から多量の土砂の供給と相まって、前浜勾配や漂砂粒径が大きく、安定した堆積海浜と見なされていたが、昭和 36 年第二室戸台風以降侵食が顕著になった。

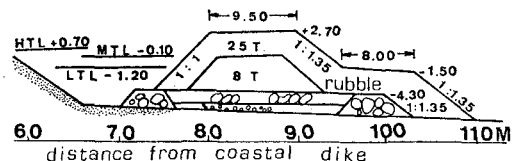


図—1 浜幅の経年変化

図—1 は久枝海岸の汀線の後退状況を示している。筆者³⁾の調査結果によると、昭和 36 年までは平均浜幅（海岸堤から汀線までの距離）が約 75 m あったものが、38 年には 70 m となり、以後図のように減少し、23 年から 49 年まで平均して 30~50 m ほど後退した。

この原因として、昭和 28 年から高潮対策事業その他で施工された海岸堤および根固工による反射波の増大、物部川および付近海岸の砂利採取（河川砂利は昭和 42 年禁止まで許可量約 30 万 m^3 ）等の影響も考えられるが、昭和 31 年物部川永瀬ダム完工による河川流砂の減少が大きく効いているようである。永瀬ダムを最大に杉田、吉野ダムを合せ堆砂量は 48 年まで計 1,100 万 m^3 ほどで、堆砂物の約 1/3 が砂礫であるとして下流の armoring も考えると約 400 万 m^3 の供給減となり、物部川の直接影響範囲を幅 10 km、沖合 500 m とすると、平均して約 80 cm の浜地形の低下となり order 的大体説明できよう。

この付近の海岸堤は基礎根入が +2.5 m で、パラペットを入れた堤高が +9.5 m となっており、前面に +8 m 内外、天端幅 10 m、法勾配 1.3 割の異形ブロックによる根固工が施工されているが、前面の浜は低く、幅も 30 m ほどになり、高波は根固工や本堤に撃突して危険な状態になっていた。



図—2 離岸堤断面図 (No. 3)

そこで建設省は種々検討の結果、大体 図—2 のような構造で、海岸堤より 80 m の距離に延長 100 m、間隔 50 m の離岸堤を計画し、48 年度から着手し 53 年度末まで 12 基を完工した。ただ 8 号堤から 11 号堤までの 4 基は、切戸放水路の関係で汀線に近づけてある。

3. 離岸堤施工による地形変化

(1) 第 1 基 (4 号堤) 施工後の災害

昭和 49 年から 20 m (53 年度から 40 m) 間隔に、大

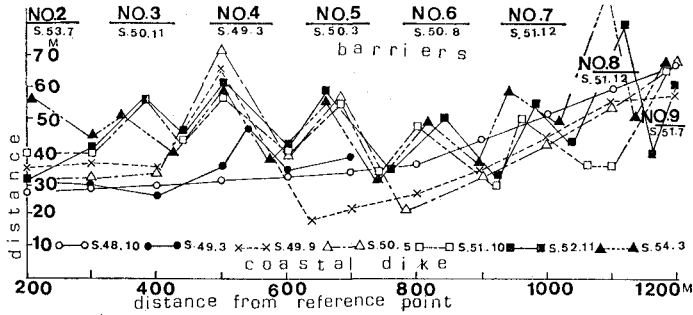


図-3 離岸堤設置後の汀線変化

体2ヶ月に1回実施している汀線測量結果から主な変化を 図-3 に示す。この図でわかるように49年3月4号堤完工と同時に、その背面に tombolo を形成するとともに、その両端延長上の汀線を急に侵食した。

同年8月18日台風14号による $H_{1/3}=3\text{m}$, $H_{\text{max}}=5.2\text{m}$, $T=9.5\sim 10\text{sec}$ の波によって、この離岸堤延長の西側汀線 40~100m 間が著しく侵食され、根固工が最大 1.5m 沈下し、海岸堤は 1m ほど前傾し、継目がずれ、約 80cm 沈下した。建設省は土俵、ブロック、鋼矢板等による応急復旧を行った。続いて来襲した台風16号は大型で、高知県中土佐町へ上陸(9月1日18時)したが、土佐湾は8月30日から $H_{1/3}=3\text{m}$, $T=13\text{sec}$ 以上の高波となり、上陸前の16時に大分波浪観測所で $H_{1/3}=5.8\text{m}$ を記録し、あと scale out した。この波により31日未明から堤防の損壊が拡大し、9月1日5時(ほぼ満潮時)には海岸堤および根固工は 2.5m も沈下し、7時には鋼矢板補強部の西側は完全に倒壊し、越波によって鋼矢板施工部の裏込土砂が流失し、10時には海岸堤延長 200m が完全に倒壊するとともに、100m が部分損壊を受け、背後のハウス園芸地帯に大被害を与えた。

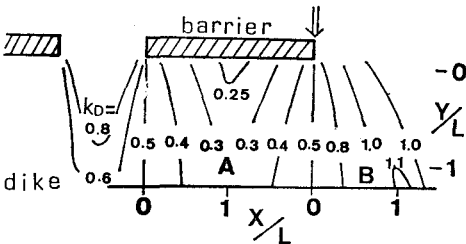


図-4 離岸堤による波の回折

この被災原因は、図-4 に見られる回折図において回折係数 $k_D>1$ となるB点で侵食が著しく進み、根固工の沈下、海岸堤の基礎洗掘による中詰土砂の吸い出し、およびブロックの撃突による堤体の亀裂、脆弱化と、越波による背面の洗掘が加わり、遂に海岸堤の倒壊となったものと考えられる。

(2) 汀線および断面の変化

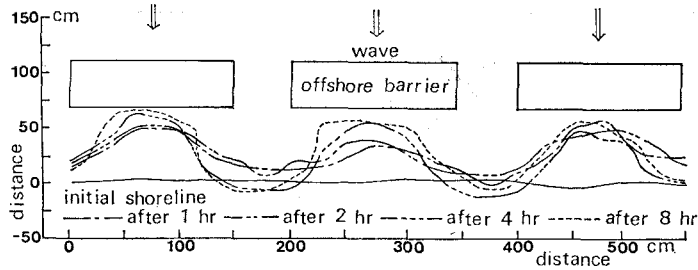
図-3 によると、離岸堤施工直後に tombolo が発生し、離岸堤右端延長汀線の著しい侵食が起り(図中の ×, Δ 印線)、次の堤を施工するとある程度回復している。

tombolo の形状は、施工の早い No. 4 に異状堆砂し、その先端は右下りになっていたが、歳月の経過によって右寄りのものが前進し、次第に平均化した汀線形状に安定して行くようである。さらに興味ある現象として、54年になってから No. 8 の離岸堤の沖側へ汀線が現われたことである。この現象は 図-3 では省略したが、ほぼ汀線付近(海岸堤から 50~60m)に設置した No. 9, 10, 11 号堤でも起った。No. 10, 11 間の開口幅は 30m であるが、この間の汀線の侵食は著しくない。これは本来の汀線が離岸堤の沖にあるかどうか不明であるが、若し開口部の侵食が余り進まず、離岸堤沖に tombolo の先端が安定するとすれば、ブロックの個数も少なく、施工も楽な新しい離岸堤の設置位置が提示されることになる。

表-1 は 20m 間隔の測線における海岸堤から汀線までの距離(浜幅)と、同測線の TP 0m 以上および海岸堤から沖合 120m までの TP -10m 以上の土砂量(断面積)の 図-3 に示す区間の総平均の経年変化を示したものである。これによると浜幅は、離岸堤を3基施工し

表-1 浜幅および浜断面積の変化

測定年月	48.10	49.6	49.10	50.5	51.5	51.10	52.3	52.11	54.3
離岸堤番号	—	4	4	4,5	4,5,6,3	4,5,6,3 9	4,5,6,3 9,7,8	4,5,6,3 9,7,8	1~12
浜幅(m)	45.14	35.52	42.03	44.11	45.65	46.54	46.24	49.56	50.6
±0m以上の断面(m ²)	—	73.56	90.95	80.86	114.50	97.74	105.22	111.00	122.11
-10m以上の断面(m ²)	—	711.23	726.58	808.82	1003.17	806.24	817.66	851.79	1080.30

図—5 離岸堤設置による汀線変化 ($H_0/L_0=0.01$)

た時点までは変化はみられず、4基施工後効果が現われ、52年になってから確実に増加傾向にある。断面積も浜幅と同様の傾向を示し、汀線から上の浜の容積は49年から54年までに約48 m^3 、この1km区間で4万 m^3 余が確実に増加していることがわかる。すなわち離岸堤は経年的に数多く施工してはじめて効果が現われるようで、離岸堤の外側まで堆積土砂量が増加しているのは興味深い。このことは砕波帯内へ離岸堤を設置することによって、来襲波のenergyを吸収し透過波を減衰するばかりでなく、海岸からの反射波も減衰させ、離岸堤前後の海面の乱れを少なくすることによって、沈砂、堆積効果を上げることが示すものであろう。

現地約1/50縮尺で実験した結果、離岸距離が開口幅の3倍ぐらいだと、汀線の凹凸が少なくtomboloも扁平で、開口部汀線の侵食も顕著でないが、離岸距離が開口幅の2倍以下になると汀線の凹凸が顕著になり、とくにflatな波の場合には図—5のように短時間のうちにtomboloを形成し、時間の経過とともに発達してゆく。

4. tombolo の発生機構

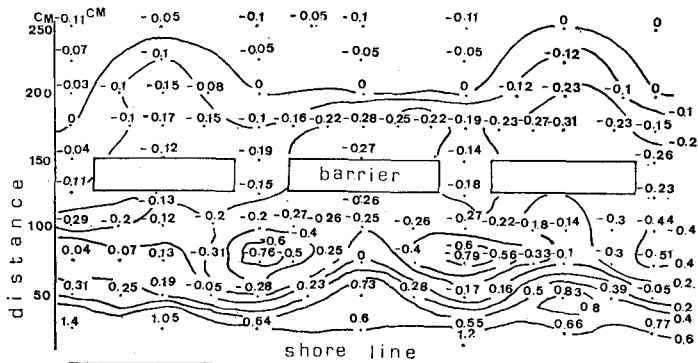
図—4は不透堤による波の回折状況を示すものであるが、透過堤の場合でも若干の透過波があるにしても、これに似た回折を起し波は離岸堤背後へ廻り込む。透過性離岸堤の波高減衰効果について多くの実験があるが、現地条件に合う沼田¹⁾の実験から $H_0=3m$, $T=12sec$ の

透過率を求めると $k_t=0.4$ となる。この減衰波から相当沖波波高をだし、筆者⁴⁾のnull point $H_0/T\sqrt{sgd_{50}} \approx 1$ (ここで s ; 砂の水中比重, d_{50} ; 砂の中央粒径とし、左辺 >1 なれば侵食、左辺 <1 なれば堆積を示す)を用うると、離岸堤背面では回折を無視して $d_{50}=0.67mm$ 以上の砂礫は堆積し、波が減衰しない開口部では $d_{50}=4.1mm$ 以下の砂礫は侵食されることになり、離岸堤背面で堆積、開口部では侵食され易い条件と、それぞれの箇所における漂砂の堆積、侵食限界粒径が与えられる。

図—6は実験によって離岸堤付近の波による平均水面の変化を測定したものの一例で、開口部延長で海面は低下し、離岸堤背面はtombolo状に高くなる。過マンガン酸カリによる流向、流速の測定結果によると、離岸堤背後から開口部へ集まり沖へ向う流れが強く、tomboloの先端に向う砂移動を起すような流れは発生しない。また沖から離岸堤を通り内側への流れがあるが、微弱なもので掃流砂を起すほどのものではない。

このことから離岸堤背後においては、a, 開口部の砕波点で洗掘巻き上げられた砂の一部は、波による質量輸送で移動し、離岸堤背面へ等回折線状に沈積する。b, 開口部延長前浜へ回折波の峰線に直角に這い上った波は、早く水面の下った堤背面方向へ偏流し、砂をtomboloの先端の方へ移動することによって、それが形成され発達するように考えられる。

次に離岸堤背後汀線の漂砂粒径の分布について考察する。自然海浜では、前浜に作用する波のenergy fluxの



図—6 離岸堤付近の平均海水面の変化

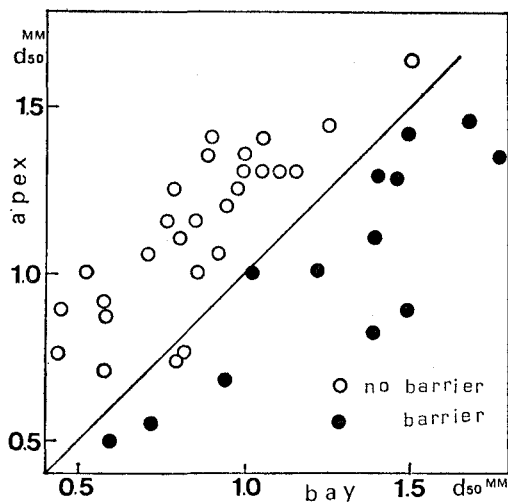


図-7 apex と bay の中央粒径

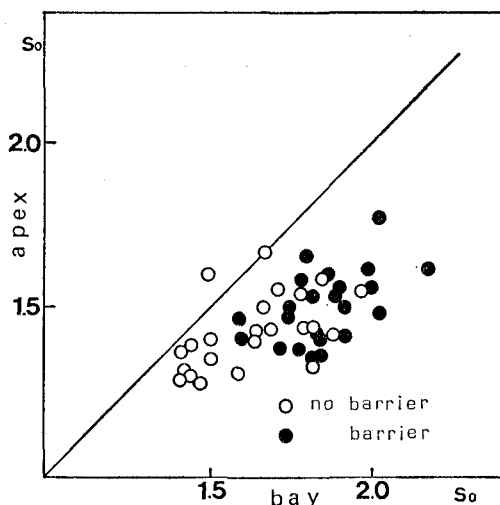


図-8 apex と bay の淘汰係数

相違から発生する波動流によって、汀線方向に比較的規則正しい波長を持つ汀線の凹凸現象、すなわち cusp を発生することがある。cusp が発生した前浜部の漂砂粒径は、凸出部 (apex) が凹部 (bay) より一般に大きい。これは波による篩分け作用によって、堆積時に大きい砂礫を押し上げ残してゆくことによるものであろう。

図-7 は実験結果から離岸堤の有無による apex 部と bay 部との粒径の相違を示したものである。離岸堤の背面は apex 部に当るが、波動流が弱いので大きい漂砂は移動できないため、開口部汀線付近の比較的小さい砂が移動して、離岸堤背面の tombolo 形成に働いているようである。従って bay 部に大きな砂礫が残り、離岸堤の無い自然海浜と逆の現象が現われるようである。

図-8 は離岸堤の有無による apex 部と bay 部の砂礫の篩分け係数 $S_0 = \sqrt{d_{75}/d_{25}}$ を比較したものであるが、離岸堤の有無にかかわらず apex 部の篩分け係数が小さく、よく篩分けられている。ただし離岸堤の無い場合には比較的大粒径の砂礫が集まり均等化が進むに反し、離岸堤の背後ではその逆となる。いずれにしても、その地点における波動流速の相違から、そこへ移動する粒径範囲が決まり sorting が起ることを示している。

最後に tombolo 状堆砂の来源について考察する。図-9 は現地で昭和 51 年 8 月から 2 ヶ月間螢光砂を追跡した結果⁵⁾で、実線は投入点 (A, B, C, D) からの移動距離、点線は移動量の積算値を示す。これによると開口部汀線 B 点では汀線沿い左右と沖方向、水深 6.5 m の D 点では岸方向の移動が卓越するが、中間の C 点では移動が不定で、外浜からの砂は離岸堤内側でほとんど見られなかった。52 年 10 月末から 1 ヶ月間同様の追跡によると⁶⁾、汀線 B 点から冲向移動は前年同様であったが、C 点、D 点のものは前年と異なり投入 3 日後から岸向移

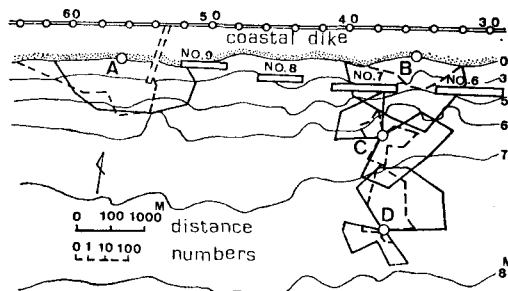


図-9 螢光砂の移動追跡

動を示し、侵入経路は不明であるが 2 週間後には離岸堤内へ確かに侵入した。これらの移動は初期移動形態に属し、浮遊砂と推測されるが、1 ヶ月後には更に多くの侵入砂数をみる事ができ、離岸堤の外側では岸向きの全面移動あるいは集団移動の傾向もみられた。両年度の相違は、螢光砂追跡中の波特性の相違によるもので、52 年の移動傾向は、11 月の地形測量の堆砂増を裏付けるものであろう。

実験において、初期地形に対し侵食土量と堆積土量を測り、離岸堤内側の土砂収支を計算すると、flat な波の場合には離岸堤内側の土砂量は増すが、steep な波の場合には tombolo が形成されても堤内側の土砂量は減じている。堆積性の波を継続作用させて、最終的に増加した離岸堤内側の土砂量は、全堆積土砂量の 4~9% となった。

以上、現在までの結果から判断すると、高知海岸では外浜からの漂砂の供給は確かにあり、離岸堤の積極的な漂砂の捕獲効果も考えうるが、tombolo を形成する砂礫の大半は離岸堤内側の漂砂移動によるものと考えられる。

5. あとがき

高知海岸の離岸堤施工区間を対象にして、離岸堤の継続施工に伴う地形変化を考察し、蛍光砂による漂砂の追跡、さらに若干の模型実験等により、離岸堤背面に発生する tombolo の発生機構について考察した。

いままでの結果によると、tombolo は主として、汀線付近の漂砂が、波の回折現象とこれに伴う流れによって離岸堤背面に移動、沈積し発達するものと思われる。

また離岸堤は、いくつか継続施工して効果が現われ、単に離岸堤内側の漂砂を安定化するだけでなく、離岸堤の沖から岸向の漂砂移動を促進させ、これを堤内に捕獲するとともに、碎波帯内の漂砂の沈定化にも効果をあげているようである。

tombolo の形成機構については、更にミクロ的な解析の必要があるが、離岸堤の効果的な設置位置、開口幅との関係については、それぞれの海浜の d_{50}/H から決まる回折係数を一つの指標として、ある基準値をだすことができる。

さらに離岸堤の継続施工中に一番端に発生する汀線の

侵食防止対策として、a, 漂砂の下流側から施工する。
b, 次の工事用に製作したブロックを $K_D > 1$ となる汀線に仮置して危険部を保護することが考えられる。

また離岸堤を汀線付近に設置することの可否については、開口部の侵食との関連で更に検討する必要がある。

最後に、建設省高知工事事務所から多くの資料の提供をいただいた。また本研究の一部は、大阪大学榎木教授を代表とする文部省科学研究費「自然災害計画研究」によってなされたものである。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 例えば、沼田 淳：ブロック堤の消波効果に関する実験的研究，第 22 回海講論文集，pp. 501-505, 1975.
- 2) 例えば、篠原謙爾，池田 茂：離岸堤による砂浜の変形，九大応力研所報 No. 26, pp. 261-267, 1967.
- 3) 上森千秋：高知海岸の漂砂浜について，第 14 回海講論文集，pp. 280-285, 1967.
- 4) 上森千秋：河川吐口の閉塞とその処理に関する研究，高知大農学部紀要，No. 9, p. 120, 1962.
- 5) 建設省高知工事事務所：高知海岸漂砂調査報告書，p. 42, 1976.
- 6) 建設省高知工事事務所：高知海岸漂砂調査報告書，p. 55, 1977.