

暗渠と人工リーフを併用した新しい河口処理工に関する 実験的検討

宇多高明*・竹内正幸**・筒井胤雄***

1. ま え が き

波による河口閉塞の防止対策として最も広く用いられてきているのは河口導流堤であるが、暗渠工法もこれに次いで多く用いられ、特に小規模な河川でしばしば採用されている。この工法は、敷高が高く取れる場合には河口閉塞も起こらずに河川水の排水が可能であるが、敷高が低い場合にはしばしば暗渠の閉塞が起り、排水が困難となる。一般に、暗渠工法では不透過な壁体が汀線と直角方向に伸ばされるから、斜め入射波の条件下では突堤と同様な沿岸漂砂の阻止効果が発揮され、漂砂の上手側では砂が堆積し、下手側では侵食が起る。侵食側は暗渠からの排水を考える上で好条件であるが、上手側では暗渠内へ砂が侵入して砂州が形成され、それが流水を阻害することになる。暗渠は閉水路であるがゆえに、一度堆砂が起ると堆積土砂の排除は非常に困難である。このことから、暗渠の吐口への堆砂防止策の検討が必要とされている。本研究では、暗渠による河口処理の可能性が検討されている、三重県の七里御浜海岸において太平洋に注ぐ志原川河口を例として、暗渠周辺での堆砂状況を移動床模型実験により調べ、特に新たに堆砂防止対策として人工リーフの利用を考え、それらの適切な配置法を示す。

2. 実験概要

移動床3次元模型実験に先立って、相似性の確認のために模型縮尺1/50でフルード則にしたがう2次元移動床実験を実施した。検討対象の七里御浜海岸の汀線付近の構成材料が礫であることを考慮して、実験には中央粒径0.25 mmの砂を用いた。この砂を用いて、幅0.6 mの2次元造波水槽に模型海浜を造り、波を作用させて2次元海浜変形を調べた。現地スケール表示の図-1に示すように、海浜模型は、現地海岸の縦断面形より、汀線付近の勾配が1/7で、T.P.-14 mより1/70と緩くなる断面形とした。志原川の河口付近の海岸は礫で構成され、

しかもこの海岸は太平洋に面しているため、かなり周期の長い波が作用する。このため、海浜縦断面形は堀川ほか(1973)のタイプ分類におけるタイプIIIが卓越する。そこでタイプIIIの条件となるよう、Cパラメータを判定基準として周期を1.2 s、波高を3 cm程度として、いくつかの波浪条件を設定した。波を作用させる場合の潮位条件としては、満潮時にバームの形成が著しいことを考慮して、潮位は朔望平均満潮位(T.P.0.59 m)とした。全体で25ケースの実験を行った結果、20時間の波の作用において、砂州高が現地のT.P.4 mに近く、また汀線よりバーム頂までの距離(17~33 m)の再現性のよい波浪条件として、波高1.5 m(模型波高3 cm)、周期10 s(模型周期1.4 s)の条件が選択された。図-1には、20時間の波の作用で形成された海浜縦断面を単純化した断面形を実線で示す。

移動床平面実験は4ケース行った。表-1には各ケースの実験条件をまとめて示す。ケース①、②は暗渠のみの場合、ケース③、④は暗渠と人工リーフの併用案である。実験条件として、潮位は朔望平均満潮位のT.P.0.59 mとし、汀線より540 m(模型上10.8 m)に設置した波高計における入射波高は現地換算で1.5 m(模型3.0 cm)、周期10 s(模型1.4 s)とした。また波の作用時間は約3時間とした。初期海浜形状は図-1に実線で示す

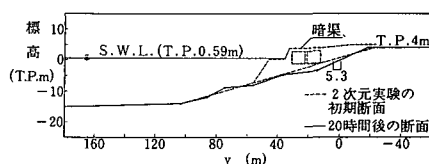


図-1 海浜縦断と暗渠工の位置

表-1 実験ケース一覧

ケース番号	対策工	備考
①	暗渠	
②	暗渠	ボックスを沖側に5.3 m突出
③	暗渠+人工リーフ	天端幅40 m, 堤長80 m, 長方形
④	暗渠+人工リーフ	天端幅40 m, 堤長93.4 m, 端部は半円形

* 正会員 工博 建設省土木研究所河川管理総括研究官

** 正会員 三重県土木部河川課技師

*** 正会員 (株) パスコ名古屋調査設計部

断面を沿岸方向に一様に整形した。移動床は沖合では T.P. -18 m まで 1/70 勾配で整形した。地形変化は沿岸方向に現地 25 m (模型 0.5 m) 間隔で設定した測線において測定した。波の入射方向は、平均海岸線に対する法線と時計回りの方向に 13° 傾いた方向からとした。ここに、海岸線に対する入射角は、志原川河口の南西約 5 km に位置する阿田和地先の人工リーフ周辺の汀線の方向角より推定された波向を、屈折を考慮して修正したものである。なお、実験結果は現地スケールで表示する。ただし、波の作用時間についてはそのまま模型時間で表示する。

3. 暗渠位置が堆砂に及ぼす影響

汀線に対する暗渠の相対的位置を変えた場合における、暗渠内の堆砂状況の変化について検討する。まず、図-2 にはケース①の初期地形と造波 3 時間の海浜地形を示す。暗渠は模型海浜の中央に設置されており、左右 2 連構造であるが、ケース①では岸側吐口の外壁の先端が初期汀線とほぼ一致する条件である。暗渠の前面には模型消波ブロックが敷き並べてある。この消波工の先端水深はほぼ 6 m である。また、暗渠の吐口の敷高は T.P. -1.0 m である。これを考慮して図-2 (a) に示す吐口部の等深線形状を詳細に調べると、汀線より陸側で

は暗渠が砂に埋まっており、汀線より沖側でのみ吐口が現れる。

図-2 (b) は、3 時間の波の作用後の海浜形状である。初期汀線への法線に関して時計回りの方向から波が入射したため、左向きの沿岸漂砂が生じ、しかも水槽の両端は不透透壁であって砂の出入りがないために、右側壁付近では侵食されて汀線が後退し、逆に左側壁付近では堆積して汀線が前進している。暗渠も両側の側壁と同様に沿岸漂砂の移動を阻止するから、暗渠の右側では堆積、左側では侵食が起こる。また、右側壁付近において造波前後の等深線の形状を比較すると、-4 m の等深線はほぼ初期形状を保ち沿岸方向に平行に伸びており、またその岸側には侵食の結果生じた緩勾配の侵食斜面が広がることから、この実験波浪条件下での地形変化の限界水深はほぼ -4 m にあると言える。この水深に対し、暗渠前面の消波工ののり先水深が大きいため、左向きの沿岸漂砂はほぼ完全に阻止されている。このため暗渠の右側面では堆砂が生じ、逆に左側面では侵食されて深くなった。したがって、暗渠の左側の吐口前面は深くなるので排水上は問題がないが、右側の吐口では右側より移動してきた砂が暗渠の中にまで侵入し、堆積して砂州を形成するため排水条件の悪化を招く。しかしこの実験では 2 連の吐口のうち岸側では堆積が生じたが、沖側吐口は開口している。

図-3 には、初期地形と造波 3 時間後の海浜形状より求めた地形変化量の平面分布を示す。暗渠が突堤と同様な効果を発揮して暗渠の右側で堆積、左側で侵食が生じた。また、侵食域では最大 3.5 m 掘られたが、堆積域での最大堆積厚は 1.5 m と、全体に広い範囲で薄く堆積している特徴がある。さらに暗渠の右側より砂が侵入したため、暗渠内では最大で 2.9 m 厚の堆砂が見られる。

以上のように、暗渠は突堤と同様に沿岸漂砂を阻止するので、漂砂下手側の吐口は排水に都合がよいが、漂砂の上手側では必ず堆砂が起こり、それが吐口を塞ぐことになる。この場合の問題点は、吐口内への堆砂が生じると、堆砂域の砂州は洪水の流下を阻害するので、砂州高が許容高以下になるかどうかであり、また砂州高が高い

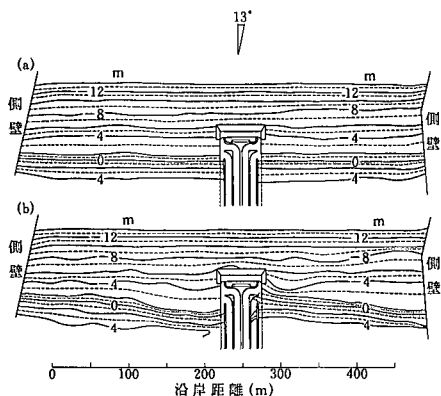


図-2 初期および波作用 3 時間後の海浜形状 (ケース①)

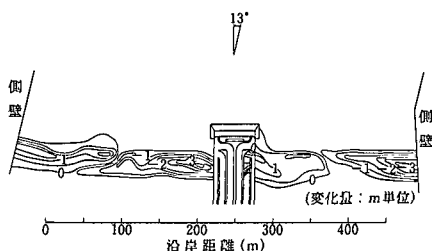


図-3 地形変化量の平面分布 (ケース①)

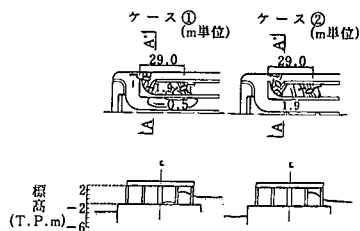


図-4 暗渠内の堆砂状況の比較 (ケース① vs. ケース②)

場合には吐口位置を岸沖方向に移動させることにより砂州高をより低くできるかどうかである。

上述の点より、ケース②では暗渠の構造はケース①と同一にしたまま、汀線に対する吐口の相対的位置を変え、吐口の位置を約5 m 沖へ移動させて同様な実験を行った。図-4 にはケース①、②の暗渠内での堆砂状況と、暗渠の出口を通る A-A'断面の形状を示す。ケース①では1号暗渠だけでなく2号暗渠内にも砂が堆積している。また断面図によると、暗渠が漂砂を阻止した結果として暗渠を挟んで左右岸で海浜に段差がつき、左岸側の地盤高が1.5 m も低くなっている。一方、ケース②でも1号暗渠内での堆砂状況はよく似ており、1号暗渠の外壁の先端から暗渠内への砂の打ち込み長さ、およびその形状はほとんど同一である。また暗渠内砂州の高さはともに T. P. 1.9 m であって砂州高に相違は見られない。しかし砂州高は変わらないものの、砂州の標高が高い範囲がケース①では広い。このように、暗渠の汀線に対する相対的位置を変えたとき、暗渠内の砂州高はあまり変わらないが、砂州の高い範囲が、汀線に対して相対的に暗渠が後退した場合広がるのが分かる。砂州が洪水流によりフラッシュされる場合、最も問題となるのは砂州高が高いため、せき上げ効果により河道上流部の水位が上昇することである。ケース①、②とも砂州高には差がないから、洪水初期フラッシュ時のせき上げ効果は両者でほぼ同一と考えられるが、砂州幅がケース①で広いことから、フラッシュに要する時間はケース①の方が長く、フラッシュ時のせき上げの継続時間はケース①が長いと考えられる。

4. 人工リーフと暗渠の併用による河口処理

人工リーフと暗渠を併用した場合の河口処理工について検討する。人工リーフを用いたのは、宇多ほか(1994)に示したように、河口処理においては河口前面の波高を低下させれば形成される砂州の高さも低下し、この結果河川水の流出が容易になると考えられるからである。このため、本研究では、図-5 (a) に示すように天端幅 40 m、天端水深 2.09 m (T. P. 基準での天端高は -1.5 m)、堤長 80 m、のり面勾配 1/3 の人工リーフを暗渠の前面に設置した。この条件のもとでケース①と同じ暗渠形式および波浪条件で海浜変形を調べた。3 時間の造波後の海浜形状を図-5 (b) に示す。もともと左向きの沿岸漂砂が卓越する条件に加えて、人工リーフの消波効果やリーフ上で誘起された海浜流の作用が重なったため、人工リーフ背後の暗渠周辺ではケース①の海浜変形と大きな違いが生じた。図-2 (b) に示すケース①では、右側壁より暗渠まで汀線が直線的に伸びていたが、図-5 (b) では人工リーフの背後で汀線が大きく突出している。一

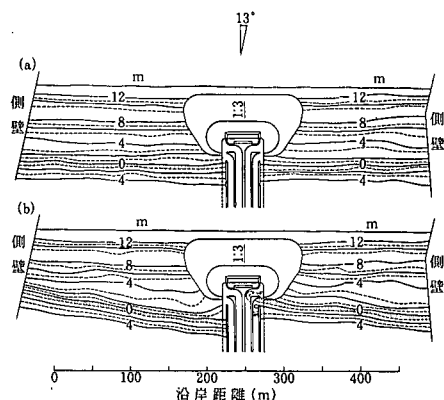


図-5 初期および波作用3時間後の海浜形状 (ケース③)

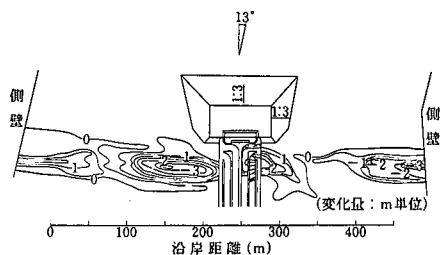


図-6 地形変化量の平面分布 (ケース③)

方、暗渠の左側では人工リーフの消波効果のため汀線の湾曲度が増加した。最も問題となる暗渠の吐口では、人工リーフの背後に形成された舌状砂州のために大量の砂が堆積し、1号暗渠だけでなく2号暗渠にまで堆砂が進んだ。図-6 には初期地形から3時間後までの地形変化量の平面分布を示す。同じく地形変化量の平面分布を示す図-3と比較すると、暗渠の沖への人工リーフの設置効果・影響を理解できる。暗渠の右側では人工リーフが舌状砂州を形成させたとき砂を暗渠の吐口部へと誘導したことが明瞭に見てとれる。すなわち、このような形式で人工リーフを設置することは、波高が低下すると同時に舌状砂州の形成が促進されることになり、暗渠吐口への堆砂防止には役立つどころかむしろ逆効果となることが分かる。一方、暗渠の左側の区域の地形変化状況を図-3, 6と比較すると、図-3では人工リーフのすぐ隣りで最も大きい深掘れが見られたのに対し、図-6では深掘れの位置が左側へ約50 m 移動している。この位置はちょうど人工リーフの外側に位置するから、これも人工リーフの消波効果による。

人工リーフ上では、一対の海浜循環流が形成されることはよく知られているが、本研究のように人工リーフの岸端に暗渠を接続した場合の海浜流の流況は十分検討されていない。そこで、造波開始3時間において、ビデオ

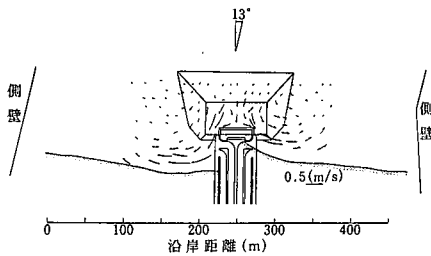


図-7 人工リーフ周辺の海浜流の流況 (ケース③)

撮影によるフロート追跡により海浜流の流況を調べた。図-7に流況を示す。人工リーフ上で一対の海浜循環流が生じ、波の入射方向から下手側で循環流の規模が大きくなっており、これは宇多(1994)の指摘した結果と同一である。暗渠の前面は不透過壁であるためにそこでは流れが左右に分かれている。また、人工リーフの岸側端付近の流れを左右で比較すると、堆砂が生じてリーフの岸側が浅くなっている右側では沿岸流成分が大きく、逆に侵食が進んで深みの形成されている左側では汀線と大きな角を持ったまま岸向きに流れている。この流れは汀線付近で非常に強い沿岸流に変化する。このように、人工リーフ周辺の海浜流の流況は周辺の地形とよい対応が見られる。

ケース③では、人工リーフによる暗渠内への堆砂軽減効果について検討したが、結果的に堆砂は軽減されず、むしろ逆効果であることが判明した。その理由として、人工リーフの設置位置が沖合過ぎたために、リーフ上で岸向き流れが生じたものの、この流れは暗渠の開口部への堆砂を防止する上であまり役立たず、逆に人工リーフそれ自体の消波効果によって人工リーフ背後の舌状砂州の形成が促され、この結果開口部への堆砂が助長されてしまったことが挙げられる。したがって人工リーフを設置するとしても、その規模を小さくした上、岸向きの海浜流が直接開口部前面を流れるようにする必要があると考えられる。そこで図-8に示すように、人工リーフの設置位置を岸側にずらした上、人工リーフ背後の著しい波高変化をゆるめるために端部を半円形として同様な実験を行った。図-8(b)には、3時間の波作用後の海浜地形を示す。全体的な地形変化はケース③の場合(図-5(b))と同様であるが、人工リーフの背後での舌状砂州の形成がほぼなくなり、滑らかな等深線形状となった。図-9には海浜流の流況を示す。ケース③の場合(図-7)と比較すると両者の違いが分かる。すなわち、暗渠右側の汀線近傍での沿岸流の流速がケース④で上昇しており、この流れは暗渠内への堆砂を防ぐ方向であることから、ケース④の効果が見て取れる。

図-10には、ケース③、④における暗渠内の堆砂状況

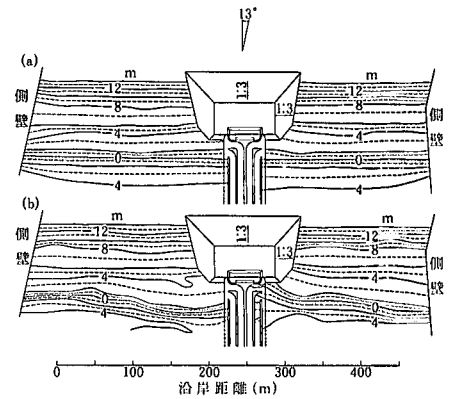


図-8 初期および波作用3時間後の海浜形状 (ケース④)

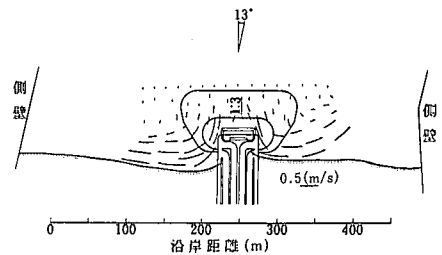


図-9 人工リーフ周辺の海浜流の流況 (ケース④)

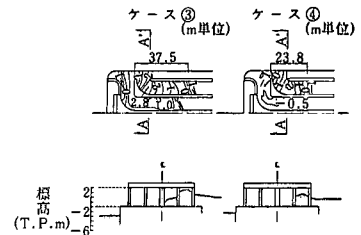


図-10 暗渠内の堆砂状況の比較 (ケース③ vs. ケース④)

を示す。ケース③では、1号暗渠内に大量の砂が堆積し、最大の堆積厚は3.75 m (T.P.2.75 m)に達している。また2号暗渠内にも全面的に堆砂が見られる。このことから、明らかに堆砂を助長したことが分かる。一方、ケース④では暗渠内の堆砂量は低下し、図-4に示したケース①、②と同程度となった。

5. 暗渠内堆砂状況の相互比較

暗渠内での堆砂状況について、3時間の波の作用後における暗渠の中心軸に沿う砂州高の分布の面より相互比較してみる。ケース①～④の実験結果を図-11にまとめて示す。ここに、暗渠の岸側吐口の外壁の先端に原点を置き、ここより上流側に距離を定めた。砂州高はケース①、②、④では同程度であるのに対して、ケース③は2.7

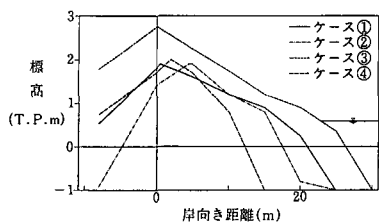


図-11 暗渠内の砂州形状の比較

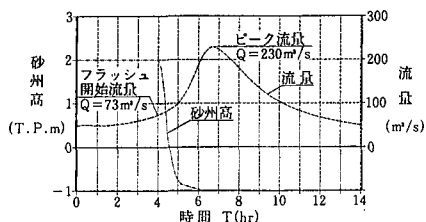


図-12 暗渠内堆砂のフラッシュ時の砂州高の経時変化

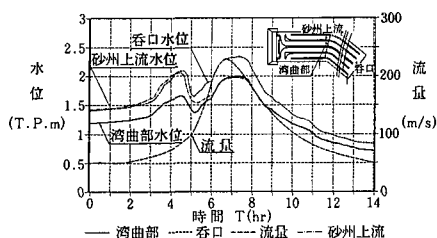


図-13 暗渠内堆砂のフラッシュ時における河道内水位変化

mと著しく高い。また、砂州の頂部位置はケース①、③、④では、外壁の先端にあるが、暗渠を約5 mだけ沖向きに突出させたケース②ではその分だけ砂州の頂部位置が暗渠内で上流へ遡っている。また、暗渠内での砂州幅はケース④が最も短い。暗渠内での砂州高と砂州幅から判断すると、小規模な人工リーフを設置したケース④が最も有効なことが分かる。

6. 砂州のフラッシュ実験

暗渠内に形成される砂州の高さはケース①、②、④でほぼ同程度であることから、暗渠の基本構造であるケース①を対象として砂州のフラッシュ実験を行った。志原川の流入する七里御浜海岸では、季節的な波向変動がある(宇多ほか, 1992)。波向変動がある場合、まず片方の暗渠が閉塞し、その後閉塞された暗渠がフラッシュされる前に他端の暗渠が閉塞する可能性も考えられる。そこで、3時間の波の作用後の暗渠内堆砂が暗渠の両側で生じるとして、2門に砂州を形成させた上で、図-12に示

す流量ハイドログラフを与えて洪水を流下させた。なお、時間はフルード相似則を考慮して現地スケールで示してある。この結果、T.P. 2 mの高さの砂州は流量73 m³/sよりフラッシュが始まり、約1時間でフラッシュが完了することが分かった。この場合の水位変化は図-13に示すようである。暗渠の呑口ほか、全体で3点での水位変化を示す。砂州の直上流の水位は呑口の水位とほぼ同様な変化を示したあと、砂州のフラッシュとともに急速に低下し、再び増大する。この暗渠の直上流でのH.W.L.はT.P. 3.2 m、吐口の天端高はT.P. 3.0 mであるから、ケース①で、4号暗渠内に堆砂した場合、呑口部の水位はH.W.L.以下となり、暗渠内への堆砂はあっても洪水は流下可能である。このことから、波向変動があっても暗渠の両側が閉塞したとしても、洪水はH.W.L.以下で安全に流下させることができることが分かった。

7. まとめ

中小河川の河口処理工として暗渠と人工リーフとを組み合わせた方式を新たに提案し、その効果を移動床模型実験により調べた。当初、人工リーフの消波効果さえ発揮できれば暗渠内の砂州高は低くなると考えたが、実際にはここで提案した暗渠は吐口が沿岸方向を向いているために、消波効果のみ発揮させるのでは十分でなく、むしろ逆効果であることが明らかとなった。そこで人工リーフの形状を変え、人工リーフ上で誘起される流れを利用して暗渠吐口への堆砂を防止する方式を提案した。実験結果によると、比較的小規模な人工リーフを用いた案は暗渠内の砂州高や砂州幅の低減に効果的なことが分かった。暗渠のみを突出させ、その前面に消波工を設置する方法は、見かけ上容易に見えるが、急勾配の砂礫海岸に構造物を設置することから、耐波設計や安定性の確保、あるいはコンクリート構造物の磨耗などの点で問題が残る。これに対して人工リーフでは緩やかに波のエネルギーを消すことから、これらの点において優れている。

参考文献

- 宇多高明・後藤康長・山本幸次 (1992): 三重県七里御浜海岸の海岸変形機構に関する一考察, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 351-355.
- 宇多高明・高橋 晃・水産嘉幸・高木利光 (1994): 人工リーフを用いた河口処理工の検討, 海岸工学論文集, 第41巻, pp. 506-510.
- 宇多高明 (1994): 現場のための海岸Q & A 選集, (社) 全国海岸協会, p. 236.
- 堀川清司・砂村継夫・鬼頭平三 (1973): 波による海岸変形に関する一考察, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 357-363.