海岸工学論文集，第53巻（2006）
土木学会，661-665

動的平衡海浜に建設されたヘッドランド群の漂砂制御効果の定量的評価

宇多高明[1]・石井　隆[2]・杉山喜一郎[3]・西谷　誠[4]
荻原　智[5]・芹沢真澄[6]・石川　仁憲[7]

等深線変化モデルを清水海岸の離岸堤群式ヘッドランド周辺の海浜変形予測に適用し，ヘッドランド設置以前には13×10^4 m^3/yrの沿岸漂砂が流れる動的平衡状態にあったが，施設の建設により沿岸漂砂量が7×10^4 m^3/yrに低減された新しい平衡状態に達したことを明らかにした．その上で，将来の侵食対策について検討したところ，既設離岸堤を下手・上手方向に50m延長して間隔を狭めると，現況の養浜量を0.5～1.0×10^4 m^3程度低減させることができることが分かった．

1. まえがき

静岡・清水海岸は安倍川河口より三保松原砂嘴の外縁に沿って延びた長さ約17 kmの砂浜海岸である．この海岸では，安倍川での広範な砂利採取が行われる以前，ほぼ13×10^4 m^3/yrの沿岸漂砂が北向きに流れ，砂嘴北端部に堆積するとともに一部は海底谷を経由して深海へと落ち込んでいた（宇多，1997）．しかし1967年まで続いた安倍川での砂利採取に伴って河川流出土砂量が激減し，同時にその影響がerosion waveとして伝播し始めた．その後河川での砂利採取の停止とともに1983年から安倍川河口から発生したaccretion waveが静岡海岸から清水海岸方面へと伝播しつつある．一方，erosion waveが到達しつつあった三保松原先端部に近い清水海岸では，1983年頃激しい侵食を受けたことから2基の離岸堤からなるヘッドランド群が造られ，その間の汀線の安定化を図ることとなり，現在は5組のヘッドランド群が完成している．施工後，ヘッドランド群の直下手では汀線がフック状に後退し，護岸が露出するとともにその倒壊が危惧される状態となっている．またこれらのヘッドランド群周辺では自然に供給される沿岸漂砂量が少ないために毎年約3.5×10^4 m^3の養浜が行われているが，この工事に費用が嵩むことから侵食を激化させずに養浜量を減少させ，コストの軽減ができないかどうかが課題となっている．このことから，本研究では，まず清水海岸の特性である沿岸漂砂により動的平衡状態にある海浜形状を3次元的意味から等深線変化モデルにより再現した上で，施設形状と種類を変えつつ，養浜量の低減の可能性について検討する．

1 正会員　工博　(財)土木研究センター理事なぎさ総合研究室長
2　(財)静岡県総合管理公社 建設技術部長
3　静岡県島田土木事務所 工事第3課 副主任
4　静岡県静岡土木事務所 清水支所 主幹
5　静岡県静岡土木事務所 清水支所 主任
6　海岸研究室(有)
7　工修　(財)土木研究センターなぎさ総合研究室

2. 対象地域の漂砂特性

検討対象区域は図-1に示す三保松原砂嘴の外縁に位置する清水海岸のNo. 54～No. 68の区域である．この付近の海岸沖には緩勾配の大陸棚が発達しているが，北側のNo. 30付近には急峻な海底谷が迫る．清水海岸の離岸堤群式ヘッドランドの建設に伴う海浜変形については宇多（1997）に詳しい分析結果が示されている．図-2はこの資料を引用したものである．1988年には沖合の等深線が緩やかに湾曲した汀線と平行に延び，前浜から水深約5mまで約1/10と急勾配で落ち込んだ後，1/50と緩勾配の海底面となっていた．宇多（1997）によれば，このように自然状態にあった清水海岸にあっては，ほぼ13×10^4 m^3/yrの沿岸漂砂が流れていたことから，図-2の両端から同量の沿岸漂砂が流入・流出していたため動的平衡状態にあったと推定される．

この海岸において1992年までに2箇所にそれぞれ2基の離岸堤群からなるヘッドランドが建設され，図-2(b)のように離岸堤群Ⅰ，Ⅱの西側では直線的な汀線が保持されたが，下手（東）側では汀線位置が大きく後退するという海浜変形が生じた．例えば，写真-1は2005年10月14日に離岸堤群Ⅰを遠望したものである．手前に設置された消波堤の端部から前方へと礫が堆積してバームが形成されている．汀線は全体に凹状であり，中央部ではバームが護岸に非常に接近している．この付近では護岸からの越波が激しく，かつ護岸表面が白いことか

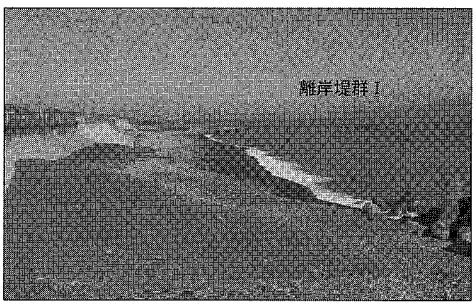

写真-1　離岸堤群Ⅰ（2005.10.14撮影）

ら，護岸前面の土砂が最近削り取られたことが明らかである．このような状況から護岸の被災を防止し，かつ越波を低減させるために，毎年約 $3.5\times10^4\ m^3$の養浜が行われてきているが，投入後すぐに土砂が流出することから養浜の効果について疑問の声が出されている．

一方，離岸堤群の設置により沿岸漂砂は自然状態で流れていた $13\times10^4\ m^3/yr$ と比較してかなり大きく減少したはずである．離岸堤群沖の等深線の蛇行から離岸堤群沖を沿岸漂砂の一部が通過していると推定されるが，実際にいくらの沿岸漂砂低減効果があったかはこの図からは分からない．

3. 動的平衡海浜の再現

ここではまず自然状態にあった清水海岸の動的平衡状態を再現し，その上で離岸堤群を設置して沿岸漂砂の制御効果を調べた．図-1には2004年3月の深浅図を示すが，この深浅図は図-2(b)と非常によく似ている．これより離岸堤群の建設後この海岸がほぼ動的安定状態にあったことが分かる．このことから図-1に長方形で示す沿岸方向に1.4 km，岸沖方向に500 mの区域を選定し，そこでの海浜変形を再現対象とした．この場合，沿岸漂砂は離岸堤群沖を一部が回り込みつつ下手へと流れていることから，汀線変化モデルの適用は困難であり，3次元的な海浜変形を予測することが求められる．

このことから，海浜変形計算には芹沢ら（2002）の等深線変化モデルを用いた．このモデルは平衡勾配とのバランスに依存した岸向き沖向きの漂砂と沿岸漂砂の作用両者が取り込まれており，3次元的な海浜変形予測が可能である．表-1にはこのモデルを用いた場合の計算条件をまとめて示す．初期地形は1989年当時の自然地形を宇多ら（1998）の展開座標の考え方にしたがい，緩やかに湾曲した汀線を直線に引き伸ばした座標をx軸とし，これと直角沖向きにy軸を定めた．初期海底勾配は1/10とし，この座標系の中に離岸堤群などを配置した．現況再現計算は1989年から2004年まで15年間とし，そこで再現性を確認した上で5年後の海浜形状の予測を行った．予測期間を5年としたのは現況で侵食が著しく，早期の対応を求められているからである．

波浪条件については通常時の波浪ではなく，時化時の波浪が海浜変形に大きな影響を及ぼすと考えて清水海岸での波浪観測結果（静岡県，2004）より5%出現頻度の波浪（換算沖波波高 $H_0'=3$ m，周期 $T=9$ s）を選択した．清水海岸での波浪観測結果によると，卓越入射波向がSであることから，沖合でS方向の波浪を入射させた場合の屈折角の変化をSnellの法則にしたがって算定し，砕波点での入射角を求めると17°となった．よってこの値をそのまま用いた．その他重要な値として h_c は7 m，h_R は3 mとし（宇多，1997），平衡勾配は1/10とした．鉛直方向の計算では $z=-7.5\sim+3.5$ m の範囲を $\Delta z=1$ m のセルで分割した．この計算では，沖合の海底面は非常に緩いので沖合への土砂の落ち込みはない．境界条件として，計算領域の右端から $Q_{in}=13\times10^4\ m^3/yr$ の漂砂量を与え，宇多・河野（1996）の与えた3次式にしたがってその水深方向分布を与えた．

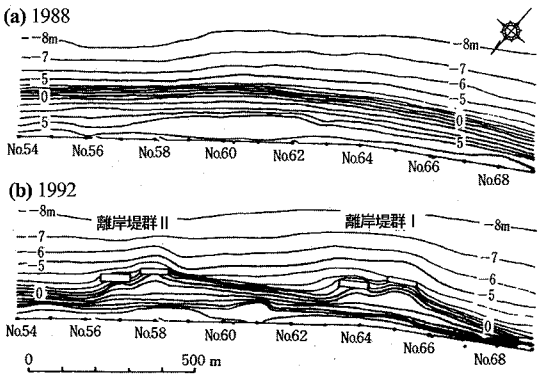

図-2　離岸堤群周辺の海浜変形

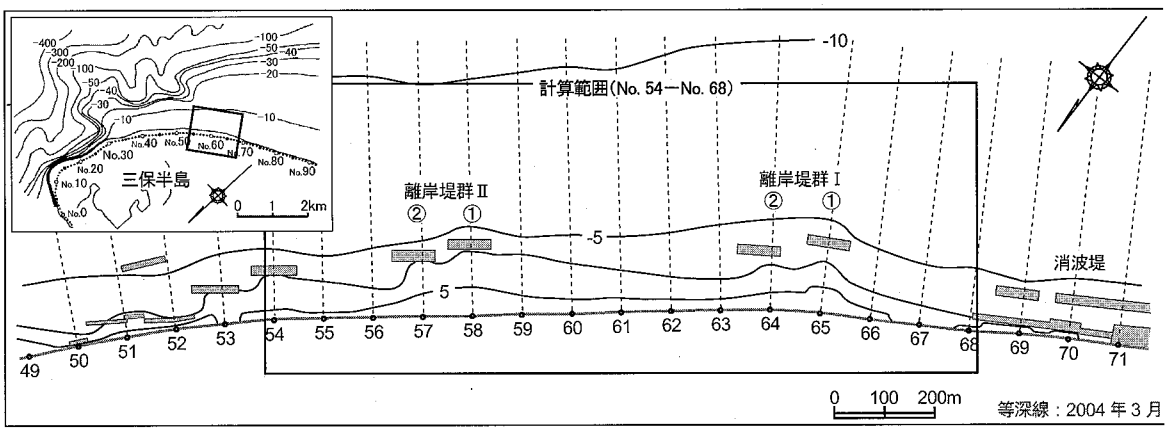

図-1　検討対象区域

一方，左端の境界条件としては，各水深帯に分布する沿岸漂砂量が沿岸方向に不変という条件を与えた．沿岸漂砂量係数を調整し，自然海岸の場合の各点の Q_i が Q_{in} に等しくなるようにすることで，流入量と同量の沿岸漂砂が左端から流出するようにした．その上で，計算領域内の汀線が実測とほぼ一致し，かつ時間的に完全に安定した動的安定海浜を再現した．この初期地形に離岸堤群を設置し，**表-1** に示す高波浪を 15 年間作用させた．

図-3 (a)は初期海浜と計算により求めた 10 年後の海浜形状である．両者は完全に重なる．**図-3**(b)，(c)は離岸堤群を配置した場合の海浜形状と，実測汀線変化量と計算汀線変化量 ΔY の比較である．計算では数年でこの形状に近づき，ほぼ 10 年で 15 年後と同じ形状となって動的平衡状態に至る．注目されるのは，実際の養浜量 3.5×10^4 m^{3}を上手側から供給したのみでは上手端から徐々に侵食が進み，実際の汀線変化が再現されないことである．このことから計算では上手側からの土砂供給量を trial & error で増加させ，最終的に供給量が 7×10^4 m^3/yr とすれば現況汀線でほぼ動的平衡状態に達することが明らかになった．

図-3(b)は**図-2** に示した実測深浅図と非常に良い対応を示し，離岸堤群の上手下手側の等深線変化をうまく再現している．また離岸堤群沖での等深線の蛇行についてもうまく計算できた．等深線の蛇行は離岸堤群の沖を沿岸漂砂が一部通過した場合に現れるものである．**図-3**(c)は実測汀線変化と計算値との比較であるが，多少の誤差は別にして全体的にかなりよく汀線変化を再現している．

表-1　計算条件

初期地形・構造物	初期地形：1989 年当時の自然地形を展開座標にモデル化した直線平行等深線地形 ($\tan\beta=1/10$) 構造物：離岸堤群と将来対策施設
予測期間	5 年
入射波条件	5%程度出現頻度波：Ho′＝3 m，T＝9 sec，波向 S（初期汀線への波の入射角 $\theta_w=17°$，屈折考慮）
潮位条件	M.S.L.≒T.P.＋0.0 m
h_C と h_R	$h_C=7$ m $h_R=3$ m
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $K_x=0.0042$（自然状態で $Q=13\times10^4$ m^3/yr の動的安定）岸沖漂砂量係数 $K_z=0.2K_x$ 小笹・ブランプトン項の係数 $K_2=1.62K_x$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	宇多・河野（1996）の 3 次式
平衡勾配	$\tan\beta c=1/10$
土砂落ち込みの限界勾配	陸上：1/2，水中：1/2
計算等深線範囲	$z=3.5$ m～－7.5 m
計算メッシュ	沿岸方向 10 m，鉛直方向 1 m
計算時間間隔 Δt	$\Delta t=2$ hr
境界条件	左端：$Q_m=7\times10^4$ m^3/yr の土砂流入（維持養浜＋自然供給） 右端：漂砂通過境界（等深線固定） 岸沖端：$q_z=0$（漂砂の流出入なし）
消波構造物の波高伝達率	離岸堤：$K_t=0.6$
数値計算法	陽解法による差分法
波浪計算法	方向分散法（酒井ら，2002） $S_{max}=25$

4. 離岸堤形状の改良と養浜による侵食軽減化

（1）養浜量の増減が周辺海岸に及ぼす影響

清水海岸は動的平衡状態にある海岸のため，安易に構造物を設置すれば侵食域が拡大する恐れがある．そこでまず養浜量の増減と，砂投入位置が周辺海岸に及ぼす影響について検討した．まず上手側からの毎年の土砂投入量を 1×10^4 m^3/yr 減少させた場合の汀線変化を図-4(a)に示す．この場合離岸堤群Ⅰの上手側の広い区域で汀線が大きく後退し，境界上（**写真-1** に示した付近）での最大汀線後退量は 20 m 程度にもなる．このことは経費がかかるという理由のみで養浜量を減少させると，著しい侵食が生じることを意味する．ここで養浜量の減少の可能性検討という本来の趣旨からはずれるが，離岸堤群の上手側に土砂を投入するのではなく，離岸堤群Ⅰの直下手の侵食箇所に 1×10^4 m^3/yr の追加的土砂投入を行った結果が図-4(b)である．この方法は離岸堤群直下手の汀線後退量の軽減にはそれなりの効果がある．しかし毎年砂を入れ続けることにかなりの困難を伴う．

（2）離岸堤群を T 字突堤群に改良した場合の海浜変形

離岸堤群式ヘッドランドではとくに高波浪時など，離

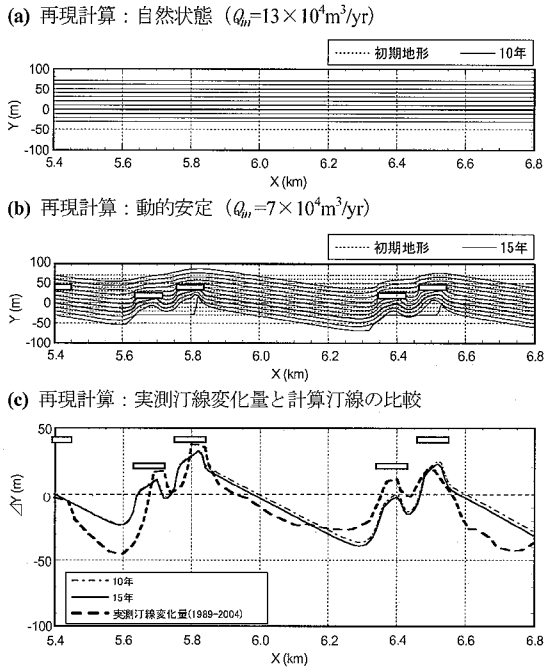

図-3　再現計算結果

岸堤の背後を沿岸漂砂が通過し，養浜砂が投入点付近にとどまらず下手方向へと急速に運ばれてしまうことから，養浜の効果発現度が低いとの指摘がある．この点を調べるために現状の維持養浜量を変えずに離岸堤をT字突堤として離岸堤背後における沿岸漂砂の通過を阻止した場合の海浜変形予測を行った．離岸堤群Iの上手側離岸堤のみを突堤化した場合の動的平衡状態にある等深線形状を図-5(a)に，汀線変化を図-5(b)に示す．上手側一基の離岸堤をT字突堤化した場合，突堤下手側で沿岸漂砂が阻止されるため，離岸堤群の背後に安定的に存在した舌状砂州の消失を招く．このことから，動的に平衡状態を保ちつつ海岸を保全し，かつ現況海浜を劇的に変化させずに保全するには突堤は有効ではないことが分かった．

（3）離岸堤を延伸した場合の海浜変形

現在の維持養浜量を変えずに個々の離岸堤の堤長を50 m延長した場合について動的平衡海浜を求め，それより汀線変化を抽出したのが図-6である．離岸堤Ⅰ-①を上手側に延長した場合，図-6(a)のように離岸堤群Ⅰの上手側の汀線は前進するものの，弱点である離岸堤群Ⅰの直下手では汀線後退量が5 m程度増大し逆効果となる．離岸堤Ⅰ-②を下手側に延長した場合には，図-6(b)のように離岸堤群Ⅰの直下手の最大汀線後退箇所が下手方向へ50 mずれる．しかし汀線後退量は初期汀線と比較してあまり変わらない．離岸堤Ⅱ-①を上手

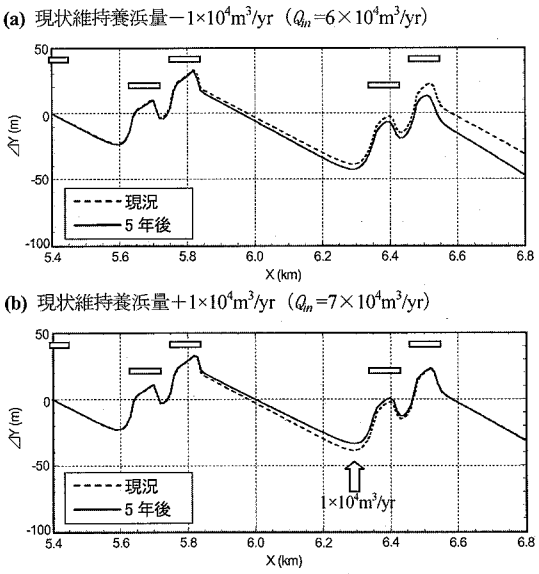

図-4　養浜量の増減が周辺海岸に及ぼす影響

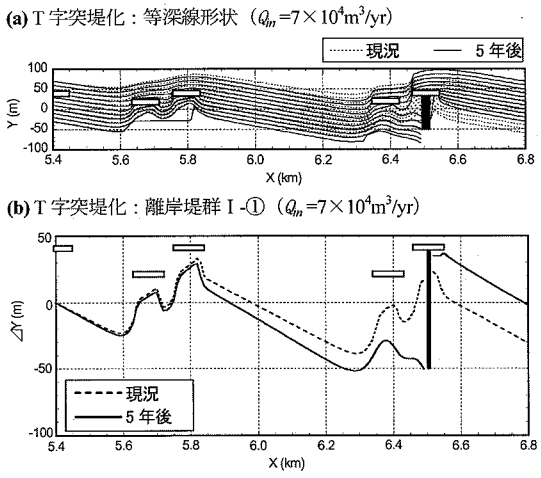

図-5　離岸堤群をT字突堤群に改良した場合の汀線変化

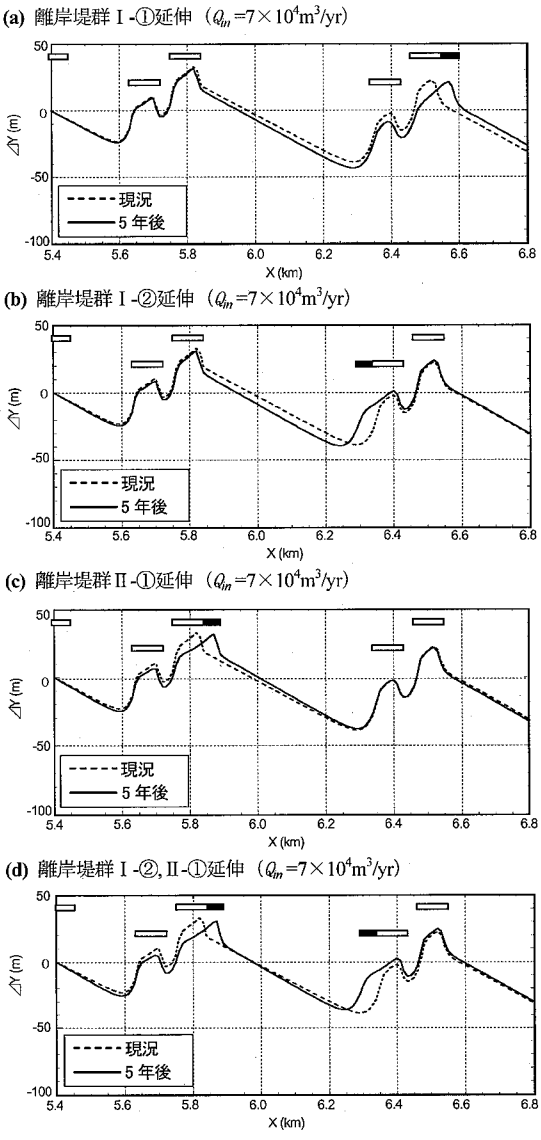

図-6　既設離岸堤を延伸した場合の汀線変化

側に延長した場合，図-6(c)のように上手側の広い区域で汀線が前進するが，離岸堤群間の距離が長いために離岸堤群Ⅰの直下手での汀線後退量の軽減には役立たない．

離岸堤Ⅰ-②と離岸堤Ⅱ-①を同時に延長した場合，図-6(d)のように，離岸堤群Ⅰの直下手での最大侵食箇所を下手側に50 mずらすと同時に，汀線後退を軽減することができる．このことから離岸堤群間の距離を狭めることは侵食防止上かなり効果が出ることがわかる．一方，離岸堤群Ⅰの2基の離岸堤を同時に延長した場合は，離岸堤群Ⅰの沿岸漂砂阻止効果が増加するため，上手側の汀線は大きく前進させることができるが，直下手の汀線の後退量が5m程度増加する計算結果となった．

（4）離岸堤群の延伸による養浜量低減の可能性検討

前節までに，維持養浜量低減の上から見た検討として，養浜量を単純に減少させる案やT型突堤化案などを検討したが十分な結果は得られなかった．一方，既設離岸堤を延伸することで汀線後退をほどよく軽減できることがわかった．そこで各離岸堤の堤長を80 mから50 m延長して離岸堤群間の距離を狭めた上で養浜量低減の可能性について検討した．まず，現在の維持養浜と同量の土砂投入を行った場合の汀線前進効果を調べた．等深線形状を図-7(a)に，汀線変化を図-7(b)に示す．この場合，離岸堤群Ⅰの上手側の汀線は大きく前進するとともに，離岸堤群Ⅰの直下手の汀線後退が著しい点が下手側に50 mずれると同時に，最大汀線後退量が軽減した．このことからこの案はかなり有効である．

さらにこの形式による養浜量の低減の可能性について上手側からの流入量を6.5，6×10^4 m^3/yr（投入土砂量：現在の維持養浜量から0.5，1.0×10^4 m^3/yr低減）とした場合の計算を行った．図-7(c)は投入量を1.0×10^4 m^3/yr低減させた場合の結果であるが，投入土砂量の減少により上手側下手側の汀線は後退したものの，離岸堤群下手側での汀線後退量は図-7(a)の場合と大きな差異はない．このことから，すべての離岸堤を延長することにより投入土砂量を減少させる上でかなり効果的なことが分かる．

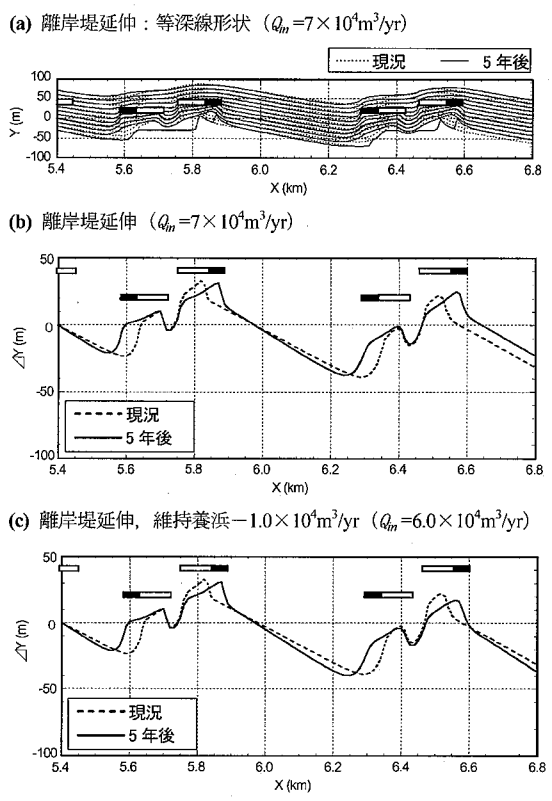

図-7　離岸堤延伸による養浜量低減の検討

5. 結　　論

①清水海岸の離岸堤群は，それらの設置以前の13×10^4 m^3/yrの沿岸漂砂が流れることによって動的平衡状態にあった海岸において，沿岸漂砂量を7×10^4 m^3/yrに低減させつつ動的平衡状態を作り出している．

②新たな動的平衡状態の沿岸漂砂量7×10^4 m^3/yrはこの海岸で行われてきている平均約3.5×10^4 m^3/yrの養浜量と比較して大きい．上手側からわずかに漂砂供給があるとは考えられるが，通過漂砂量より投入量が小さいことは構造的な侵食傾向を招く．

③このため離岸堤群の直下手では侵食が進み護岸の被災が危惧される状態にあり，対策が必要とされている．

④離岸堤の突堤化はそのすぐ下手で激しい侵食を招くので対策として有効ではない．

⑤既設離岸堤を下手・上手方向に50 m延長し，間隔を狭めると，現況の養浜量を$0.5\sim1.0\times10^4$ m^{3}程度低減させることができる．

参　考　文　献

宇多高明・河野茂樹(1996)：海浜変形予測のための等深線変化モデルの開発，土木学会論文集，No.539/Ⅱ-35，pp. 121-139.

宇多高明(1997)：「日本の海岸侵食」，山海堂，p. 442.

宇多高明・住谷廸夫・矢澤　肇・大谷靖郎・厚坂祐次(1998)：展開座標を用いた汀線変化モデルによる親沢鼻砂嘴の地形変化予測，海岸工学論文集，第45巻，pp. 541-545.

酒井和也・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・熊田貴之(2003)：波の遮蔽構造物を有する海岸における3次元静的安定海浜形状の簡易予測モデル，海岸工学論文集，第50巻，pp. 496-500.

芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池　鋼・熊田貴之(2002)：海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル，海岸工学論文集，第49巻，pp. 496-500.

静岡県静岡土木事務所(2004)：平成16年度清水西海岸高潮対策工事に伴う養浜モニタリング調査業務委託報告書，平成17年3月，p. 19.