

清水海岸北部の侵食実態とその再現

Beach Erosion of Northern Part of Shimizu Coast and its Measures

宇多高明¹・大橋則和²・芹沢真澄³・三波俊郎⁴・石川仁憲⁵・宮原志帆⁴

Takaaki UDA, Norikazu OHASHI, Masumi SERIZAWA, Toshiro SAN-NAMI
Toshinori ISHIKAWA and Siho MIYAHARA

On the northern part of the Shimizu coast in Suruga Bay, beach erosion has been severe because of lack of longshore sand supply and offshore discharge of littoral sand through the steep slope of the coast. On the beach with the foreshore being extremely narrowed the extension of wave dissipating structures placed along the shoreline is planned to reduce wave run-up. In this study, beach changes in this area are investigated using bathymetric survey data and the grain size analysis of seabed material. Then, the optimum arrangement of wave dissipating facilities was studied using the contour-line-change model.

1. まえがき

宇多ら (2008) は、清水海岸のL字突堤から三保半島の北端部に位置する三保飛行場までの海浜変形実態について分析し、L字突堤の北1.4kmに位置する4号消波堤付近を通過する約6万m³/yrの北向きの沿岸漂砂があること、またこの通過沿岸漂砂が飛行場前面の急勾配斜面を経て水深75mまで落ち込んでいることを示した。一方で、現況においてはL字突堤の北側には1~4号消波堤が既に設置され、汀線の安定化が図られてきたものの、1~3号消波堤間では汀線の後退が著しく、高波浪時堤防からの越波も生じている。このように清水海岸北端部の海浜は依然として急激に変化しつつあり、対策の必要箇所が増加しつつあるのが現状である。前浜が非常に狭まった場所では、越波対策として消波堤を部分的に延長し、前浜防護が進められる予定である。本研究では、まずこの区

域の海浜変形の実態を詳細に調べ、その上で等深線変化モデル (芹沢ら, 2002) を用いて消波堤延伸の最適計画について検討する。

2. 縦断形変化と底質中央粒径の水深方向分布

清水海岸における沿岸漂砂の卓越方向が北向きであることを考慮し、図-1に示すように調査区域の南端に位置するL字突堤を横切る測線No.32より、2号消波堤の北側直近に位置する測線No.25まで5測線の縦断形変化を調べた。図-2には2006年夏季実施の底質調査に基づく中央粒径 d_{50} の分布とともに縦断形変化を示す。

L字突堤を横切る測線No.32では (図-2 (a)), L字突堤が北向きの沿岸漂砂を阻止したため1985年以降顕著な堆積が起き、2007年までに汀線が90m前進した。縦断形は2002年まではほぼ-8mで二つに折れ、岸側の1/4.2に対し沖側では1/18と相対的に緩やかであったが、2007年では縦断勾配の明瞭な変化点は見られず、汀線から-10mまで1/9と岸側沖側の勾配の平均 (1/8.3) に近い勾配で土砂が堆積している。1号消波堤を通る測線No.30では (図-2 (b)), 1985年から1995年までは汀線が前進したが、その後後退傾向に転じた。消波堤が設置されているため全体的に汀線変化は小さく、汀線がほぼ固定されている。また汀線付近では $d_{50}=10\text{mm}$ 程度の礫が集中的に堆積している。注目されるのは、消波堤沖の-7mから-23m付近での堆積である。この水深帯を覆う土砂の粒径は0.2mmの細砂であり、それが1985年から2007年まで単調に堆積し、例えば-15m地点では海底勾配が1/9 (1985年), 1/8 (1995年), 1/6 (2002年), 1/5 (2007年) と単調に増加している。このような縦断形変化は、L字突堤の先端を超えた細砂が、No.30の消波堤沖を通過しつつ沖へと流出していることを示している。1号消波堤の直下手側の測線No.29では (図-2 (c)), 1985年から1995年では堆積傾

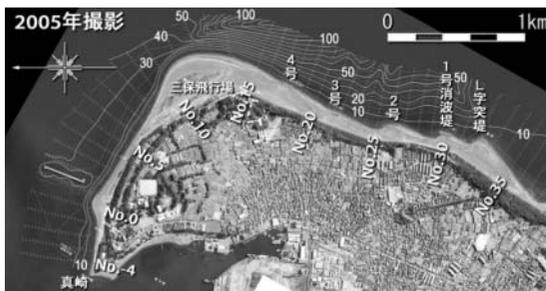


図-1 清水海岸北部における測線配置

1	正会員	工博	(財) 土木研究センター常務理事なごさ総合研究室長兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科
2			静岡県静岡土木事務所清水支所
3	正会員		海岸研究室 (有)
4			海岸研究室 (有)
5	正会員	工修	(財) 土木研究センターなごさ総合研究室

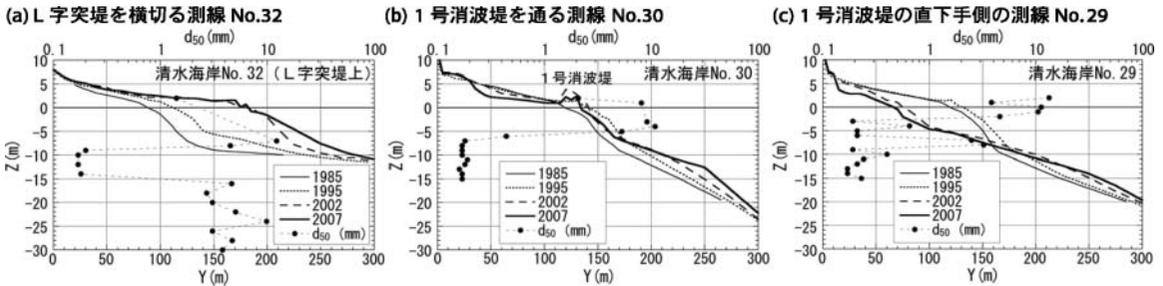


図-2 縦断形変化と中央粒径 d_{50} の分布

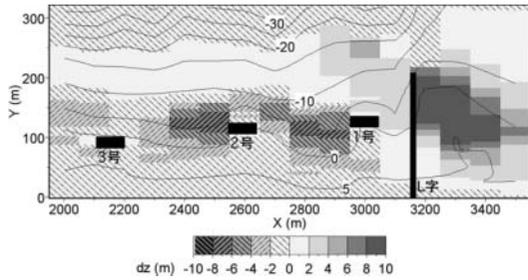


図-3 1985年から2007年までの地形変化量の平面分布

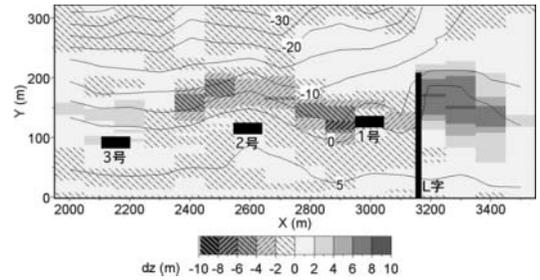


図-5 1995～2001年の地形変化量の平面分布

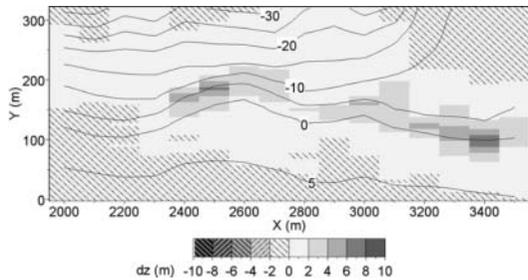


図-4 1990～1995年の地形変化量の平面分布

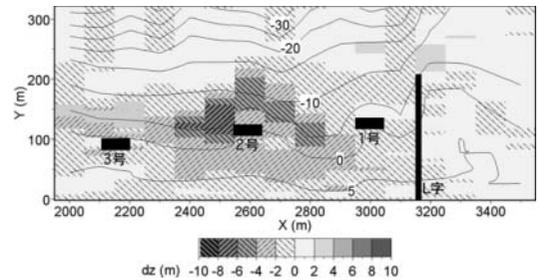


図-6 2001～2007年の地形変化量の平面分布

向にあったが、消波堤の建設と同時に-7m以浅が大きく侵食され、2007年まで汀線は65mも後退した。この測線にあってもNo.30と同様、-10m以深での堆積は継続的に起きており、しかも $d_{50}=0.2\text{mm}$ の細砂が集中的に堆積していることが分かる。このように1号消波堤からその下手側100m間では消波堤沖で細砂が水深の大きい場所に沈み込むようにして堆積しつつあることが分かる。細砂の堆積域の水深は10m以深にある。

3. 水深変化量の平面分布と沿岸漂砂量分布

1985年基準の水深変化量を算出して平面的な地形変化について分析した。まず図-3は、1985年から2007年までの地形変化量の平面分布を示す。図には2007年の深淺図を併記している。図には3つの特徴が見られる。第1は、L字突堤の右(南)側において大量の土砂が堆積したことである。その最大堆積厚は12mに達する。これは北向きの沿岸漂砂がL字突堤によって阻止されたためである。第2の特徴は、L字突堤北側に位置する1, 2号消波堤の北側で顕著な侵食が生じたことである。これは1, 2号消

波堤によって北向きの沿岸漂砂が阻止されたことによる。第3の特徴は、L字突堤の先端から斜め沖向きに堆積域が伸びていることである。この土砂移動は、 $d_{50}=0.2\text{mm}$ 程度の細砂が選択的に海底谷へと落ち込みつつあることに対応している。

次に約5年おきの地形変化について分析した。1990～1995年の水深変化量分布では(図-4)、 $X=2.4\text{km}$ 以南の汀線に沿って堆積域が帯状に分布するという特性が見られる。しかし1995～2001年の水深変化量では(図-5)、L字突堤の建設に伴ってL字突堤の南側では堆積が、これと対照的に北側では侵食が始まり、とくに1号堤の北側隣接部が集中的な侵食に曝された。その後2001～2007年では(図-6)、L字突堤の南側では堆積が見られなくなり、また侵食域が図-5と比較して北側に移動し、図-5では著しい侵食を受けていた1号堤の北側直近では侵食量が減少した代わりに2号堤の北側直近で著しい侵食が起きた。このように侵食域は時間経過とともに北側へと移っている。

宇多ら(2008)では三保半島先端の真崎から4号消波

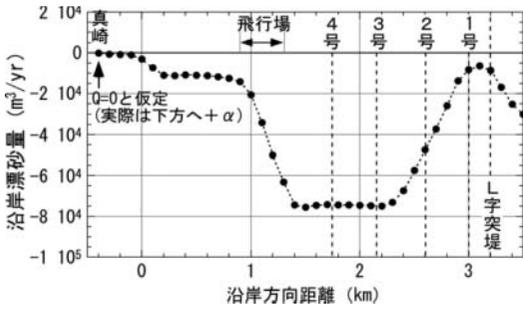


図-7 沿岸漂砂量分布

堤までの区間について断面積変化量を積分することにより漂砂量分布を推定したが、本研究では4号消波堤より南側において、境界条件の設定上重要な意味を持つL字突堤まで検討区間を延長し、1998～2006年の土砂量変化から沿岸漂砂量分布を求めた。沿岸漂砂量の算定においては真崎を通過する沿岸漂砂量は小さいことから、真崎での沿岸漂砂量は0と仮定した。図-7には沿岸漂砂量分布を示す。L字突堤から1号消波堤の間での沿岸漂砂量は約0.7万m³/yrと小さく、3号消波堤に向かって急激に増大し7.5万m³/yrとなる。

4. 等深線変化モデルによる地形変化予測

(1) 計算条件

実測データをもとにして芹沢ら(2002)の等深線変化モデルを用いて予測計算を行い、その上で侵食対策の一環として既設消波堤を延伸した場合の効果を比較した。

表-1 計算条件

計算ケース	現況再現計算 1998～2006年 予測計算 消波堤延伸+養浜
予測期間	10年
初期地形	・現況再現：侵食前の1998年地形を展開座標でモデル化した直線平行等深線(海底勾配1/8) ・将来予測：現況再現計算結果
入射波条件	砕波波高 $H_b=3\text{m}$ 、波向 $\theta_w=20^\circ$
潮位条件	M.S.L. \approx T.P.+0.0m
限界水深・バーム高	波による地形変化の限界水深 $h_c=12\text{m}$ バーム高 $h_R=3\text{m}$
漂砂量係数	沿岸漂砂量係数 $K_1=0.0022$ 岸沖漂砂量係数 $K_2=0.1K_1$ 小笹・プランプトンの係数 $K_3=1.62K_1$
沿岸・岸沖漂砂の水深分布	宇多・河野(1996)の3次式
平衡勾配	$\tan\beta_c=1/8$
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	$z=+3.5\text{m}\sim-12.5\text{m}$
計算メッシュ	沿岸方向 $\Delta X=20\text{m}$ 、鉛直方向 $\Delta Z=20\text{m}$
計算時間間隔 Δt	$\Delta t=10\text{hr}$
境界条件	・左端(上手側)：1998年以前： $Q_m=7.5\text{万m}^3/\text{yr}$ の動的安定状態 1998年～将来： $Q_m=0.7\text{万m}^3/\text{yr}$ ・右端(下手側)：漂砂通過境界 ・岸沖端： $q_z=0$ (漂砂の流出入なし)
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, 2003) $S_{\text{max}}=25$
その他	消波堤の波高伝達率： $K_r=0.4$

本計算は汀線付近における礫質の土砂移動を対象とし、L字突堤沖を通過する細砂の流れは予測対象としない。表-1には主な計算条件を示す。計算対象区間は、L字突堤から4号消波堤まで延長1.4km区間(測線番号ではNo.32～No.18)である。まず1998年から2006年までの実測地形変化をもとに再現計算を行いモデルの適用性を確認し、その上で消波堤を延伸した場合の効果比較を行った。予測期間は10年間とする。現況再現においては侵食を受ける前の1998年地形を展開座標により海底勾配が1/8の直線平行等深線地形に置き換えた。この初期地形が動的平衡状態にあったとして、上手(南)側のL字突堤からの流入沿岸漂砂量が図-7に示したように、1998年以前の7.5万m³/yrから1998年以降の0.7万m³/yrへと減少したと仮定して地形変化予測を行った。

波浪条件としては出現頻度が約5%の波($H_0=3\text{m}$, $T=9\text{s}$;年数回波)を想定した。波の入射方向は、L字突堤上手側の汀線直角方向とし、スネルの法則により屈折計算を行うと $\theta_{0n}=20^\circ$ となる。波による地形変化の限界水深 h_c とバーム高 h_R はそれぞれ実測縦断形変化をもとに12mと3mとした。また平衡勾配は1/8とした。その他の諸条件は表-1に示すようである。

消波堤は3基設置されており、いずれも長さが100mである。以下では、これらの消波堤を南向き、または北向きに50mないし100m延長する案や、新設の消波堤を既設消波堤の陸側に40mずらす案など、延長方向、長さ、および設置位置を変化させた。さらには養浜を行うケースについても検討した。計算ケースは全体で11ケースである。

(2) 現況再現計算の結果

図-8は動的平衡状態にある海底地形である。右(南)端から7.5万m³/yrの沿岸漂砂が流入し、同量の沿岸漂砂が左端から流れ去っている。この状態から出発し、1998年以降上手側からの沿岸漂砂の流入量が0.7万m³/yrへと

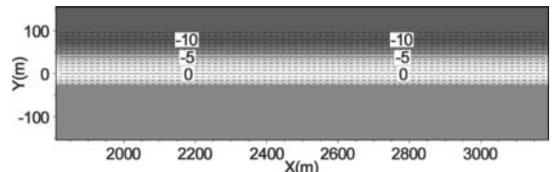


図-8 動的平衡状態にある海底地形

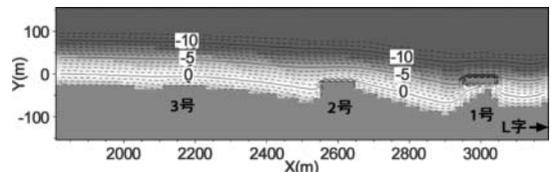


図-9 上手側からの沿岸漂砂の流入量が0.7万m³/yrへと減少したときの2006年までの予測結果

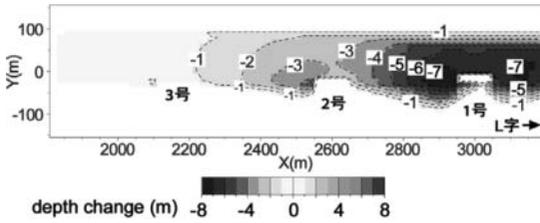


図-10 1998年から2006年までの地形変化量の平面分布

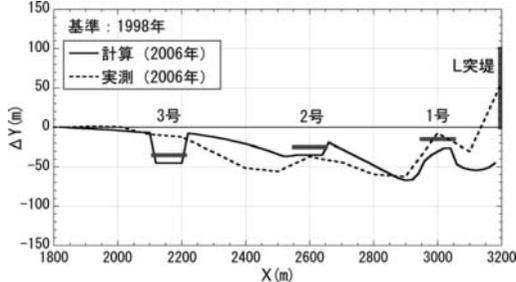


図-11 実測と予測汀線の比較結果

減少したときの2006年までの予測結果を図-9に示す。北向きの沿岸漂砂が減少する結果、南端部（L字突堤の北側直近）から侵食が進む。対象区域の南端近傍に位置する1号堤周辺で著しい侵食が起き、汀線が後退する。しかし北側に離れた3号堤付近では汀線は直線状のままである。図-10は1998年から2006年までの地形変化量の平面分布を示すが、L字突堤と1号堤の北側隣接部で著しい侵食が生じ、地盤高の低下量は最大7mに達する。図-11は、実測と予測汀線の比較結果である。L字突堤と1号消波堤の間の汀線後退量は過大、一方2、3号消波堤の汀線後退量はやや過小評価であるが、全体的な汀線変化はほぼ再現されている。実際には、L字突堤や消波堤の建設には時間を要しているが、計算では構造物条件を当初から組み込んでおり、この結果沿岸漂砂量の減少が急激に起きたことが予測・実測汀線の相違の理由と考えられる。以上のような実測地形変化がほぼ予測されたことから、現況再現がほぼ可能と考えて予測計算を行い、現状のまま放置した案との差によって消波堤の延伸効果を調べることにした。

(3) 各ケースの予測地形と現況との差の比較

10年後の海浜形状の予測結果から現況再現計算結果を差し引いて変化量を求めた。図-12, 13には計算結果を示す。現況のまま10年間放置した場合がケース1であり、これとの比較を行うことによって各ケースの効果を調べることができる。ケース1と比較して、1、2号消波堤を北（左）向きに伸ばすと（ケース2, 3）、いずれの場合も消波堤の背後では堆砂が生じるが、侵食域を北側に押しやり、かつ最大侵食量を増大させる。とくに100m延伸した場合（ケース3）において侵食助長が顕著である。1号堤はそのままにして、2、3号堤を南向きに伸ばす

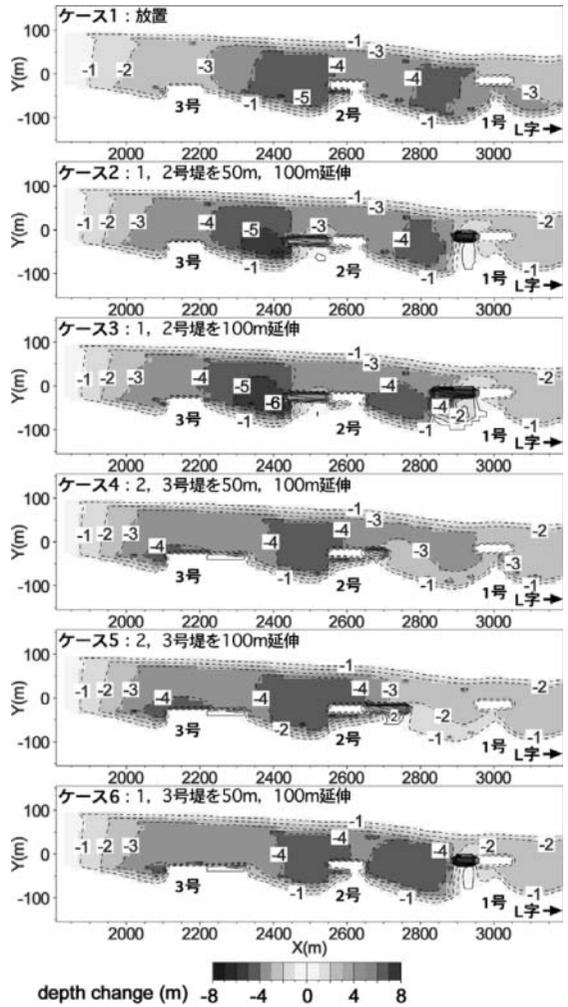


図-12 現況のまま10年間放置した場合と各ケースの予測結果の差（ケース1～6）

と（ケース4, 5）、延長した消波堤の南側での堆砂を助長することから、消波堤を北向きに伸ばすのが逆効果であったのと対照的な結果をもたらす。2号消波堤はそのままとして、1号堤を北向きに、3号堤を南向きに延長すると（ケース6）、3号堤は堆砂効果を發揮するが下手方向に伸ばした1号堤では逆効果となる。また、汀線後退にあわせて消波堤を陸側にずらし、北向きに階段状とする案（ケース7）でも堆砂効果は出ない。

以上より、いずれの消波堤にあっても侵食軽減のために消波堤を北向きに伸ばすことは有効ではなく、また新設消波堤を陸側にずらして階段状とする案もまた有効ではない。これらと比較して、消波堤を南向きに延伸する案はいずれの消波堤であってもそれなりの堆砂効果を見込むことができる。ここまでの検討では、2、3号堤を南向きに延伸するケース4またはケース5が相対的に有利である。

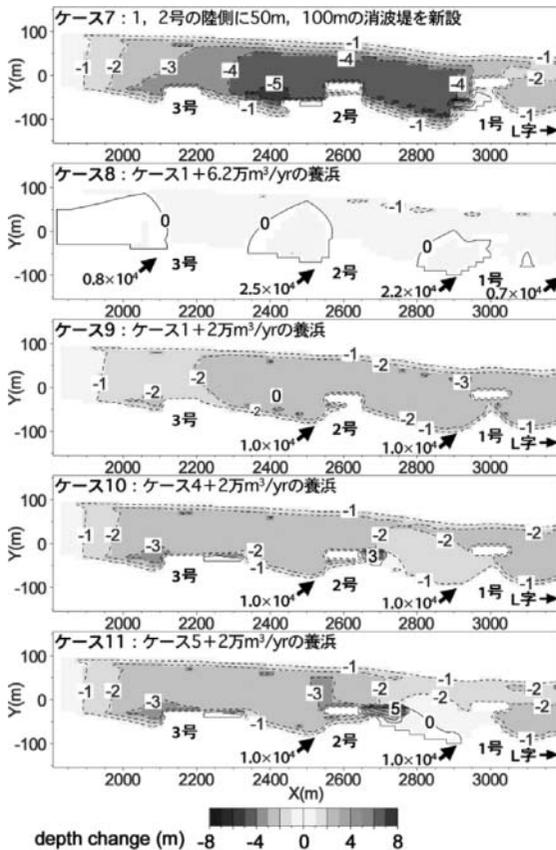


図-13 現況のまま10年間放置した場合と各ケースの予測結果の差（ケース7～11）

次に、消波堤の延伸と養浜の組み合わせについて検討した。ケース1の条件において、この付近に流れているのと同様な $6.2 \text{ m}^3/\text{yr}$ の養浜を行えば、ケース8のように侵食はほぼ防ぐことができ、養浜の効果は明らかである。しかしこれだけの量の養浜を継続することは現実的ではないと考えられるので、消波堤の延伸を行った上で養浜量を $2 \text{ m}^3/\text{yr}$ まで落とした場合について検討したのがケース9, 10, 11である。これらのケースは現状のまま放置するケース1と、侵食の低減に有効なことが既に分かっている消波堤を南向きに延伸するケース4, 5を対象として $2 \text{ m}^3/\text{yr}$ の養浜を行うものである。養浜のみ行うケース8と比較すると、ケース10, 11では消波堤の延伸区間より南側の侵食を遅らす上で効果が出ている。とくに2号の南端部から100m南向きに延伸したケース11では侵食の軽減だけでなく、上手側の砂浜復元にも役立つことが分かる。しかし同時に2号堤の北端部では侵食がやや助長される。

結局、消波堤を南向きに延伸する案はいずれの消波堤であってもそれなりの堆砂効果を見込むことができ、また養浜はいずれの場合にも有効である。 $2 \text{ m}^3/\text{yr}$ の養浜を前提とするならば、2, 3号堤を南向きに50m, 100m延伸して養浜を行うケース10が最適となる。

5. 結論

L字突堤は長く突き出た構造を有するため、北向きの細砂の流れ帯を沖向きに押し出している。このため、L字突堤の北側に位置する1号消波堤沖を通して斜め沖向きに細砂の流れが形成され、海底谷への損失が起きている。この細砂の流れを構成する砂の d_{50} は 0.2 mm であり、汀線付近を移動している $d_{50}=20\sim 30 \text{ mm}$ の礫とは粒径が大きく異なる。またL字突堤北側の汀線付近は著しい侵食を受けるとともに、侵食量は1, 2号消波堤の北側でとくに顕著である。この区域では、1998年以前 $7.5 \text{ m}^3/\text{yr}$ の沿岸漂砂が流れていたが、1998年以降沿岸漂砂量 $0.7 \text{ m}^3/\text{yr}$ に激減し、また年間 $6 \text{ m}^3/\text{yr}$ の土砂が飛行場付近から失われている。

消波堤の建設案については、北向きに伸ばす案、および新設消波堤を陸側にずらして階段状とする案とも有効ではない。これらと比較して、消波堤を南向きに延伸する案はいずれの消波堤であってもそれなりの堆砂効果を見込むことができ、とくに2, 3号堤を南向きに延伸するケース4またはケース5が相対的に有利である。さらに養浜はいずれの場合にも有効であるが、 $2 \text{ m}^3/\text{yr}$ の養浜を前提とするならば、2, 3号堤を南向きに100m, 50m延伸して養浜を行うケース4, 5が適する。3号消波堤北側での汀線後退を際立たせない意味では、3号消波堤を南向きに100m, 2号消波堤防を50m延伸し、その上で $2 \text{ m}^3/\text{yr}$ の養浜を行うケース10が最適と判断できる。

参考文献

- 宇多高明・西谷 誠・大橋則和・三波俊郎・石川仁憲 (2008) : 清水海岸北端部の土砂動態と前浜掘削後の埋め戻し観測, 海岸工学論文集, 第55巻, pp.671-675.
- 宇多高明・吉添高兆・町井 靖・西谷 誠・芹沢真澄・三波俊郎・石川仁憲 (2007) : 清水海岸のL字突堤沖における細砂の移動帯の形成機構, 海岸工学論文集, 第54巻, pp.421-425.
- 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.