

小型潜堤による海浜安定工法の現地適用性について

平石 哲也* ・北山 斉** ・佐藤 恒夫*** ・中野 嘉和****
大音 満***** ・斎藤 亮一***** ・坂井 隆行***** ・岩垣 雄一*****

1. はじめに

京都府北部の天橋立海岸は古来より景勝地として知られているが、河川からの流出土砂の減少、沿岸漂砂を遮断する構造物の建設等により昭和 40 年代から海岸侵食が進んでいる。海岸侵食を防止するために、天橋立海岸では突堤群とサンドバイパス工法による海浜安定工法が実施されている(陳ら, 1993)。しかしこの工法では突堤の上流側のみ砂が堆積し、図-1(1)に示すような櫛形状の海岸が形成され、景観上の問題が生じている。図-1(2)に示す直線状の海浜を再度形成するために、突堤の下手側に小型潜堤を設置する工法が提案され 1992 および 1993 年に試験的に扇形の潜堤が施工された。

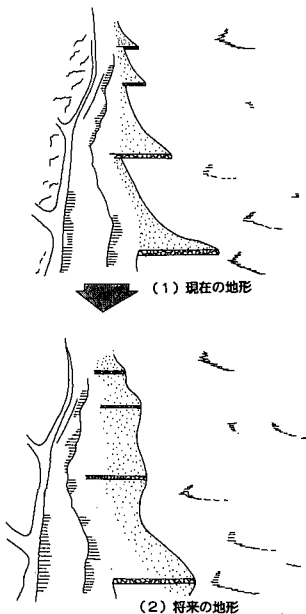


図-1 櫛(くし)型海岸の改良イメージ

試験潜堤の施工により突堤下手側にも堆積が生じることが明らかとなったが、そのメカニズムは不明であり、最適潜堤形状についても不明な点が多かった。そこで、模型実験により砂粒子堆積機構の解明と最適潜堤形状の考察がなされたが、実験では固定床でイオン交換樹脂を用いたので、実験結果をそのまま現地へ適用することはできなかった。そこで本研究では、実験結果を現地への

適用が可能なように解釈し、最適潜堤形状を提案するとともに、その提案に基づいて現地で施工された潜堤の効果を観測で把握することを目的とした。

2. 模型実験の概要

図-2 は天橋立海岸における試験施工された潜堤の位置を示す。図中の○数字は昭和 30 年代に設置された小型の突堤の番号で、天橋立における位置はこの突堤番号で表される。試験施工では、24 番に扇形潜堤、28 番に扇形潜堤の汀線側を省いた改良扇形潜堤が施工された。図-3 は試験施工された扇形および改良扇形潜堤の形状を示す。

施工後は突堤背後でも堆積が生じ、櫛形から徐々に直線状の海岸が形成されつつある。しかしながら、砂粒子の堆積メカニズムや、潜堤の体積がより小さく、経済性を上げ得る最適潜堤形状を検討するために他の形状も含めて模型実験が実施された(鈴木ら, 1995)。縮尺 1/20 の模型実験では改良扇形潜堤に加えて、扇形の中心角をさらに小さくした半扇形および沖側のみ潜堤を作った三角形潜堤を用いて、固定床で粒子移動に関する検討が実

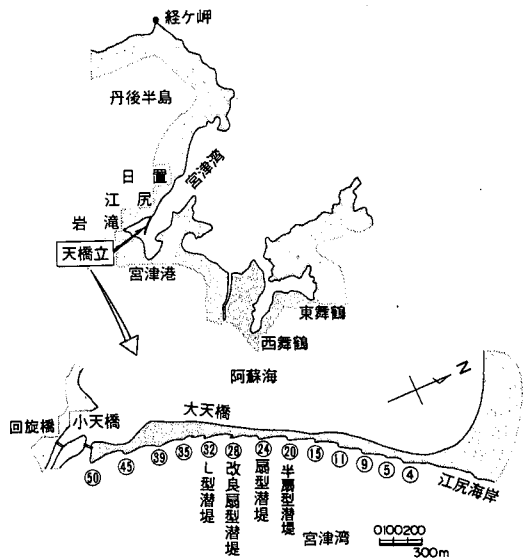


図-2 天橋立海岸における潜堤設置位置

* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部
 ** 正会員 工修 運輸省第三港湾建設局企画課
 *** 正会員 工修 運輸省第三港湾建設局神戸調査設計事務所
 **** 京都府土木建築部(前港湾課長)
 ***** 京都府港湾事務所
 (財)沿岸開発技術研究センター
 (株)エコー 環境水理部
 京都大学名誉教授

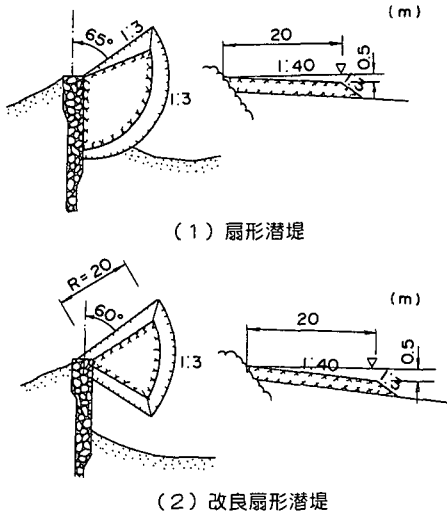
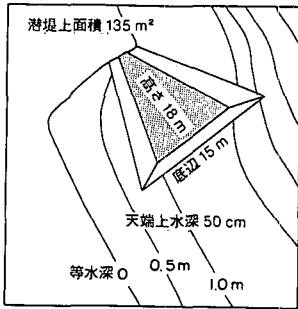


図-3 扇形および改良扇形潜堤の形状

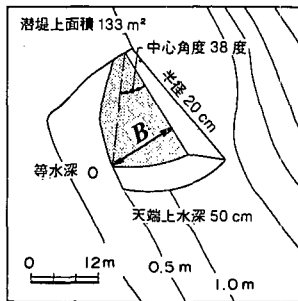
施された。使用された粒子は中央粒径および比重がそれぞれ0.8 mmおよび1.20であるイオン交換樹脂である。入射波は、現地観測結果(平石, 1998)を参照して有義波高 $H_{1/3}=0.42$ m, 有義波周期 $T_{1/3}=6\sim 8$ sとした。波向は、等水深域にほぼ直角である。

図-4は、実験でのみ対象とした三角形および半扇形潜堤の形状を示す。図中Bは潜堤の幅である。実験により、潜堤の幅が広がると波高が減少し、ある波高レベル以下になると潜堤上とその背後に粒子がトラップされ、突堤下手側にも堆積が促進されることが明らかとなった。

図-5は、潜堤背後の測点11番における潜堤を設置しない状態に対する潜堤設置後の波高の変化を比較したもので、この中では5, 6, 7として示した半扇形, 改良扇形および改良扇形で天端水深を若干大きくした潜堤形状においてイオン交換樹脂粒子が潜堤上と潜堤背後に留まる様子が確認できた。したがって、ある安定状態を作る条件より有義波



(1) 三角形潜堤



(2) 半扇形潜堤

図-4 三角形および半扇形潜堤の形状

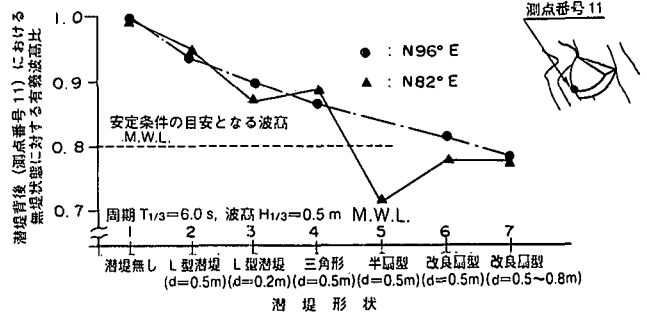


図-5 潜堤背後における有義波高比の変化

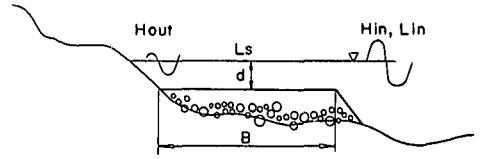


図-6 潜堤上の波高変化式に関する諸量の定義

高が小さくなると粒子が潜堤背後に堆積することが判明した。

三角形潜堤の場合に波高が減少しないのは、潜堤背後の水深が深く、潜堤上で波高が十分減衰しないためと考えられる。したがって、小型潜堤は汀線に接するように施工されるべきで、その形状を模式的に示すと図-6のようになる。図-6に示す諸量を用いて実験結果から潜堤幅Bを変数として波高変化を算出できる式として次式が導かれ、検証されている(鈴木ら, 1995)。

$$\frac{H_{out}}{H_{in}} = K_t = 1 - f \tanh \frac{B}{L_{in}} \tanh \frac{H_{in}}{d} \frac{H_{in}}{L_s} \dots (1)$$

ここで K_t は透過率で、 f は実験定数で $f=13.5$ である。潜堤幅Bは、改良型および半扇形潜堤でそれぞれ、22.2 および 12.6 m である。

3. 最適潜堤幅の決定

図-5に示すように、粒子が堆積する半扇形および改良扇形潜堤の場合には、波高比が0.8以下になっており、潜堤によって、ある安定条件以下に波高を減衰させる必要があることがわかる。底質粒子の波による移動は、佐藤ら(1964)によって実験的な検討が成されており、粒子の全面移動限界式が次式のように提案されている。

$$\frac{H_0}{L_0} = \left(0.4243 \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \right)^{2/3} \left(\frac{d_0}{L} \right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h}{L_0} \left(\frac{H_0}{L} \right) \dots (2)$$

ここで、 H, L は水深 h における波高と波長で、添字0は沖波の値であることを示す。 d_0 は中央粒径で0.2 mmである。式(2)に天橋立海岸における標準的な現地砂の比重 $\sigma=2.65$ および水の比重 $\rho=1.03$ を代入すると次

式が導ける。

$$\frac{H_0}{L_0} = 0.565 \left(\frac{d_0}{L} \right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h}{L_0} \left(\frac{H_0}{H} \right) \dots\dots\dots (3)$$

式(3)は水路における模型実験から導かれたものであるものの、底質の層厚が大きくなった場合には粒子の移動限界を明確に定義することは困難である。そこで、佐藤(1966)は、実験水路および現地における移動限界を示す式として次式を提案している。

[表層移動限界]

$$\frac{H_0}{L_0} = 1.35 \left(\frac{d_0}{L} \right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h}{L_0} \left(\frac{H_0}{H} \right) \dots\dots\dots (4)$$

[完全移動限界]

$$\frac{H_0}{L_0} = 2.4 \left(\frac{d_0}{L} \right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h}{L_0} \left(\frac{H_0}{H} \right) \dots\dots\dots (5)$$

式(4)、(5)を式(3)と比較すると、右辺第1項の数値が異なっており、この数値が実験結果のばらつきを考慮した修正係数となっている。式(2)と同様に、 σ および ρ を変数とした表現を用いると、次式が導ける。

$$\frac{H_0}{L_0} = \frac{1.35}{0.565} \left\{ 0.4243 \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \right\}^{2/3} \cdot \left(\frac{d_0}{L} \right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h}{L_0} \left(\frac{H_0}{H} \right) \dots\dots\dots (6)$$

$$\frac{H_0}{L_0} = \frac{2.4}{0.565} \left\{ 0.4243 \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \right\}^{2/3} \cdot \left(\frac{d_0}{L} \right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h}{L_0} \left(\frac{H_0}{H} \right) \dots\dots\dots (7)$$

式(6)および(7)の係数、 $1.35/0.565=2.39$ および $2.4/0.565=4.25$ は、実験で導かれた全面移動の初めを示す式(2)の修正係数に相当する。したがって、式(6)および(7)は次式のように書き直すことができる。

$$\frac{H_0}{L_0} = 1.35 \left\{ \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \right\}^{2/3} \left(\frac{d_0}{L} \right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h}{L_0} \left(\frac{H_0}{H} \right) \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{H_0}{L_0} = 2.4 \left\{ \frac{2}{\pi} \left(\frac{\sigma}{\rho} - 1 \right) \right\}^{2/3} \left(\frac{d_0}{L} \right)^{1/3} \sinh \frac{2\pi h}{L_0} \left(\frac{H_0}{H} \right) \dots\dots\dots (9)$$

上記の移動限界式は、もともとは水深を決定するものであるが、水深を固定すると、その水深での底質粒子が移動を始める波高を求めることができる。これを、ここでは移動限界相当波高 H_k とする。そして、表層移動限界および完全移動限界に相当する移動限界波高をそれぞれ H_{ks} および H_{kp} とする。今回の実験では潜堤上の波高低減効果により、ある一定値よりも波高が低下すると粒子が動かなくなり、潜堤背後に堆積することが判明した。ただし、実験では潜堤を不透過壁としていることや、実験縮尺効果が明らかではないこと、底質粒子を離散的に薄く配置し、表層移動限界と完全移動限界の判別ができ

ないことなどから、明確に移動限界式で底質粒子の安定条件を検討することは困難である。そこで、実験結果を考慮して、底質の移動限界に相当する波高が存在し、それは表層及び完全移動限界相当波高の間に存在すると仮定すると、潜堤上の底質は次式で示す移動限界相当波高以上の有義波が作用すると移動する可能性がある。

$$H_k = \alpha(H_{kp} - H_{ks}) + H_{ks} \dots\dots\dots (10)$$

ここで、 α は潜堤上の底質が移動する目安の波高を完全移動限界および表層移動限界に相当する波高に対する比率で表すもので、無次元係数となり、実験値と現地での値の双方に適用できる。

図-5で示したM.W.L.(平均潮位)で $T_{1/3}=6s$ の場合は、安定条件の目安となる波高に相当する α は0.47になる。図-7は、他のケースにおける α の設定結果である。図中の5番半扇形および6番の改良扇形潜堤では粒子は堆積したので、これらの2ケースの上限に相当する波高レベルを移動限界と考えて α をそれぞれ設定できる。

ここで、最適潜堤幅の決定法を提案する。潮位と入射波の関係が求まると、式(1)の関係から先端幅 B と K_t の関係が計算できる。たとえば図-8の実線は、M.W.L.、 $T_{1/3}=6s$ での B による K_t の変化を示している。なお、 H_{in} は54cmである。次に、式(8)、(9)で求められる表層移動限界および完全移動限界に相当する波高を求め、天橋立に關係する諸量を整理すると表-1のようになる。

表中では α が提示されており、式(10)から、 H_k/H_{in} として安定条件を生じる透過率 K_{ta} が求められる。たとえば図-8の例では $K_{ta}=0.78$ であり、少なくとも潜堤幅は $B=13.5m$ が必要になる。また、冬季の平均潮位に相当するL.W.L.では図-9に示すように、 B は11mで十分な効果を有することが可能である。以上のことをまとめると、比較的波周期が短い天橋立海岸においては、潜

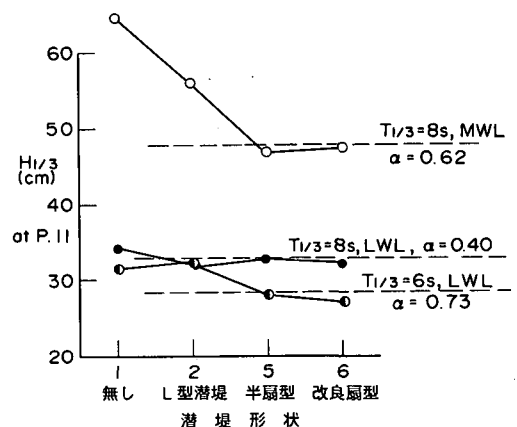


図-7 底質粒子の移動限界に相当する波高レベル

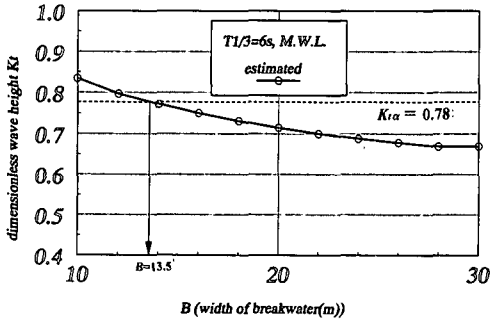


図-8 移動限界相当波高を用いた最適潜堤幅の決定法

表-1 潜堤背後で堆積を生じるための移動限界波高

潮位	周期	入射波高	移動限界相当波高		無次元係数	対応透過率
			表層	完全		
	T_m (s)	H_{in} (cm)	H_{est}/H_{in}	H_{sp}/H_{in}	α	K_{tr}
L.W.L.	6.0	55	0.44	0.78	0.73	0.69
L.W.L.	8.0	62	0.42	0.75	0.40	0.55
M.W.L.	6.0	54	0.58	1.0	0.47	0.78
M.W.L.	8.0	61	0.58	1.0	0.62	0.83

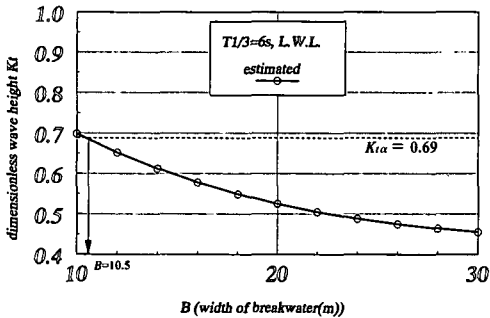


図-9 冬期における潜堤幅と透過率の関係

堤背後に砂をトラップし堆積させるためには、潜堤幅が11~14 m程度必要であることがいえる。したがって実験で検討した半扇形潜堤は $B=12.6$ m であり、堆積効果を挙げるためには最小の潜堤となっており、そのまま最適潜堤として現地で施工できることが明らかになった。

4. 現地における潜堤の効果

3. の検討で最適潜堤と判断した半扇形潜堤を、1997年2月に図-2に示す20番の位置に施工した。施工後の現地観測は、1997年2月、10月さらに1998年2月、10月に実施した。現地観測では天橋立海岸全域にわたって汀線測量を実施するとともに、沖合い150 m程度まで測線に沿って深淺測量を実施した。

図-10は、以前に設置された扇形、改良扇形潜堤および今回施工された半扇形潜堤周辺の汀線変化について、

観測区間毎に前進および後退を調べたものである。図の中立線から上方が対象期間における汀線の前進、中立線から下側が後退に相当する。24番位置の扇形潜堤ではすでに汀線の前進がみられており、かなり安定した変化を示し、観測期間中の汀線の変化は非常に小さい。28番の改良扇形潜堤においては1997.2~1997.10は汀線の前進がみられる。1997.10~1998.2の冬期においても若干の前進がみられる。1998.2から1998.10にかけては潜堤位置で前進がみられるが、潜堤設置位置の両側で若干後退が生じている。今回施工した20番の半扇形潜堤では、設置直後の夏期に著しく汀線が前進をしている。1997.10からの冬期にはやや後退しているものの、1998.2以降前進を示しており、半扇形潜堤の効果による汀線の前進が確認できた。

図-11は深淺測量から算出した各測定期間後との各潜堤周辺海域の堆積と侵食の様子を示している。図-11(1)の1997.2~1997.10までの変化をみると半扇形潜堤の位置で1.0 m以上の局所的な堆積が生じていることがわかる。1997.10~1998.2にかけてはやや侵食傾向にあるものの、1998.2~1998.10には堆積が生じ、その高さは0.2~0.5 m程度である。したがって、半扇形潜堤は、冬期には効果が小さくなり局所的に侵食作用を受け、若干の汀線後退がみられるが、サンドバイパス砂を投入する2月から砂のトラップ効果を発揮し、汀線の前進を促

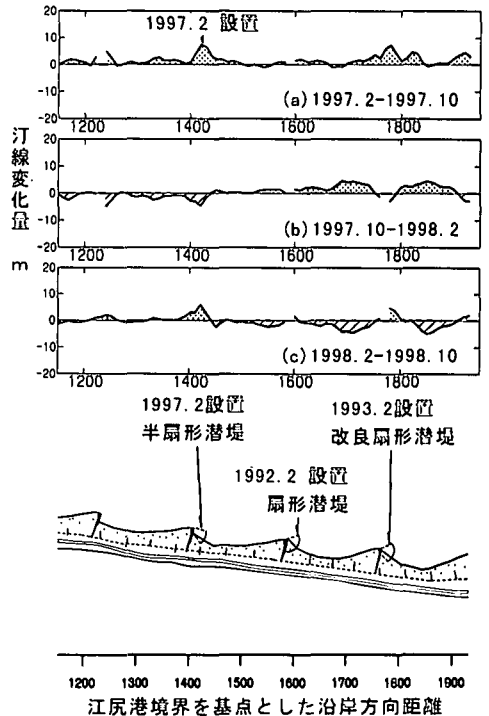
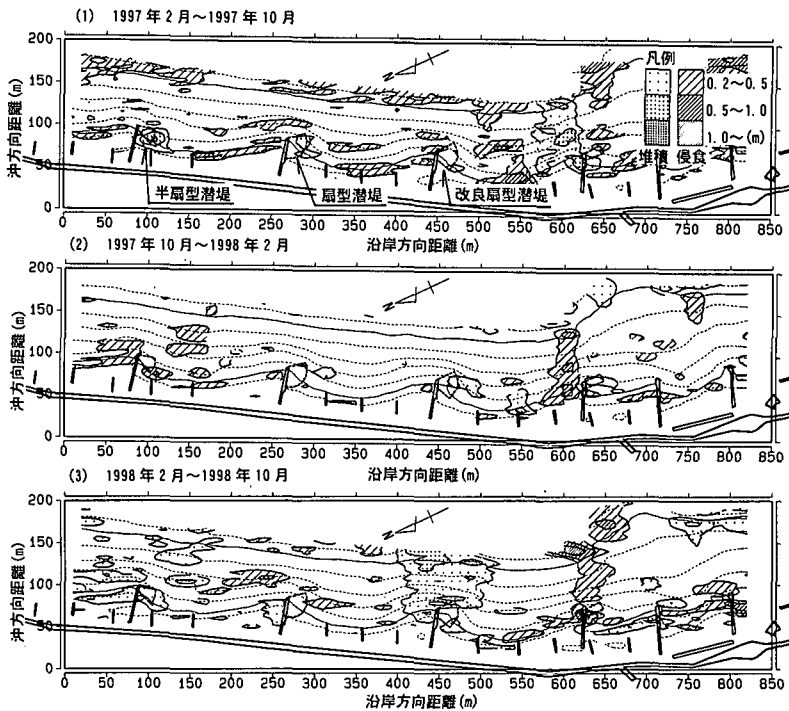


図-10 現地における潜堤周辺の汀線の変化



図一11 現地における潜堤周辺の水深変化

しているものと考えられ、現地における適用性は高い。

5. あとがき

本研究では、まず潜堤模型を用いた実験結果を再整理し、現地に適用できる係数を含んだ最適潜堤設定法を提案している。その結果、1997年2月に現地で施工された半扇形小型潜堤周辺の汀線および深浅測量を2年間にわたって実施し、提案された潜堤形状が現地においても楕円形海岸の整形に効果を及ぼしていることを示した。最後に、実験の実施および現地における観測に関しては多数の皆様のご尽力があったことを記し、深く感謝する。

参考文献

佐藤昭二・田中則男 (1964): 沖浜帯における波による砂移動について, 港研報告, Vol. 1, No. 1, pp. 23-33.

佐藤昭二 (1966): 漂砂, 土木学会水理委員会水工学シリーズ 66-19, pp. 19-1~pp. 19-29.

鈴木康正・平石哲也・富樫宏次・南 将人・岩垣雄一 (1995): 潜堤を用いた海浜安定工法に関する現地観測と模型実験, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 696-700.

陳 活雄・山田 稔・土屋義人 (1993): 天橋立海岸におけるサンドバイパス工法による動的安定海浜の形成, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 541-545.

平石哲也 (1998): 小型潜堤を用いた海浜安定工法に関する模型実験, 港湾技研資料, No. 896, 22 p.