

緩傾斜堤の被災機構と安定化のための方策

宇 多 高 明*・柳 澤 修**

1. はじめに

近年、我が国では海岸侵食が全国的に激化の一途をたどっている。沿岸漂砂の卓越する海岸に防波堤等の構造物が造られ、沿岸漂砂の連続性が断たれると、構造物の下手側海浜では侵食されて汀線が後退し、しばしば浜崖が形成される。浜崖の背後に民地が迫っている場合、浜崖の形成をそのまま放置することはできず、汀線維持のために護岸や緩傾斜堤が造られる。しかし、このような海岸に緩傾斜堤が造られると、それ自身被災すると共に下手側の侵食を助長することもしばしばである。これは沿岸漂砂の場所的均衡が失われた結果、構造物前面が次第に深くなり、入射波が大きなエネルギーを保持したまま緩傾斜堤に作用するためと考えられる。本研究では、沿岸漂砂によって侵食されて形成された急深な海浜を2次元的に再現し、緩傾斜堤の被災機構の解明を図ると共に安定性の向上法について考察し、併せて静岡県清水海岸の実例を取り上げて実験結果の検証を試みる。

2. 実験方法

実験は、2次元造波水路を用い、模型縮尺を1/50として行った(図-1)。実験時の水深は55cmに保ち、底質には中央粒径 $d_{50}=0.28\text{mm}$ の砂を用いた。初期海底勾配は1/30とし、水深40cmの位置に容量式波高計を設置して入射波高を測定した。

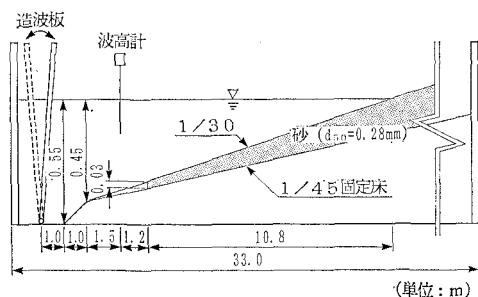


図-1 2次元水路の諸元

本実験では、緩傾斜堤前面の土砂が沖方向に移動し、さらに卓越した沿岸漂砂により緩傾斜堤沖の土砂が沿岸方向に流失して深くなる状況を再現した。まず海浜変形が堀川ら(1975)の海浜タイプ分類のⅡになるよう波浪条件を選択し、 $H_0'=9.1\text{cm}$ 、 $T=1.4\text{s}$ の波を選んだ。この波を安定な海浜形状が得られるまで十分長い時間作用させ、その後沖合に形成されたバーを人為的に取り除き、沿岸漂砂によって土砂が流失した海浜断面を形成させた。これは、実際には沿岸漂砂によって漂砂の下手側に砂が流失し、バーが形成されないことを意味する。

1/30の一樣勾配断面に波を32時間作用させたときの断面変化を図-2に示す。図-2の断面の形成後、沖合のバー部分は人為的に取り除き、1/30勾配斜面とした。このとき形成された海浜断面は、3次元移動床実験における緩傾斜堤前面の海浜断面(宇多・坂野, 1991)と良い一致を示す。以下ではこの海浜断面を初期海浜としてそこに堤体模型を設置した。

堤体模型の表のり勾配は1:5, 1:4, 1:3の3種類とし、被覆コンクリートブロック(ロウタスユニ)で被覆した。また、裏込め工の厚さは緩傾斜堤の設計の手引き(建設省河川局, 1989)によれば、少なくとも50cm以上とされていることから、実験の作業効率を考慮し、玉砂利($d_{50}=5\text{mm}$)の単層構造で、層厚2cm(現地換算1m)とした。堤脚水深は、初期海浜の汀線位置($d=0\text{cm}$)、水中部で海底勾配が急変する位置($d=4\text{cm}$)、緩傾斜堤の3~4段目まで波が打ち上がる位置($d=-4\text{cm}$)とした。また、緩傾斜堤の基礎工の形状は緩傾斜

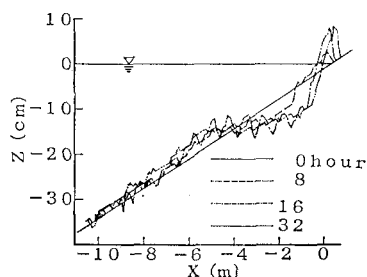


図-2 移動床2次元実験における海浜断面形の経時変化

* 正会員 工博 建設省土木研究所海岸研究室長

** 正会員 工修 (財)国土開発技術研究センター

堤の設計の手引きより2種類設定した。形状①は形成されているバームの上にブロックを張ったもので、のり先の基礎捨石は露出する。形状②では、バームに緩傾斜堤を埋設し、基礎地盤からの突出部分を極力小さくした。

実験では、緩傾斜堤の表のり勾配、基礎工の設置状態、堤脚水深、被覆ブロック間のクリアランスの沿岸方向の総和 (C)、のり先前面の基礎捨石量 (V) を変えた。造波開始後、60分間波を作用させ、その間被覆ブロックの移動、吸い出し状況、碎波波高および碎波水深の経時変化を調べた。また、表のり面の不陸の状態については、ポイントゲージで測定可能な範囲(水槽の両壁から13cmを除く中央部分)の被覆ブロックの沈下量を測定した。海浜地形は、堤体より移動限界水深までの範囲で、中央と両壁から13cm離れた3測線に沿って造波開始前と60分造波後に5cm間隔で測定した。

3. 実験結果および考察

(1) 裏込めの吸い出し現象

裏込めの吸い出しの発生過程を図-3に示す。従来の考え方では静水面付近で被覆ブロック間の空隙、および被覆ブロックの孔からマウンドの栗石(碎石)や砂が抜け出て被覆ブロックが崩壊すると考えられてきた(前野ら, 1990)。本研究における実験の観察によれば、吸い出し現象は図-3のようにまとめられる。のり面に遡上した水塊が被覆ブロック面下に浸透したとき、引き波に変わると、基礎地盤表層の砂がのり先方向に動き出す。このとき、堤体前面の基礎捨石も初期状態は保てず、沖方向に持ち去られるか、沈下してしまう。こうなると、水塊はのり先から被覆ブロック面下に入り込むようになり、被覆ブロック面下の浸透流により栗石が徐々に持ち

去られる。そして、波のうちあげ高が到達する位置まで、奥に向かって吸い出しが進んでいく。また、吸い出しの結果として被覆ブロック面の不陸が生ずる。ここで図-3に示す被覆ブロック面上の栗石や砂は、のり先を回り、波の遡上に伴いうちあげられたものである。

(2) 被覆ブロック間のクリアランスと緩傾斜堤の安定性

堤脚水深 $d=4\text{ cm}$ に緩傾斜堤を設置し、のり先には基礎捨石を設置せず、クリアランス比 C/B (C : 堤体幅に占める被覆ブロック間のクリアランス量の総和, B : 堤体幅) を変えたケース1 ($C/B=6.67\times 10^{-3}$) とケース2 ($C/B=1.33\times 10^{-2}$) を比較検討する。

ケース1, 2の被覆ブロックの沈下量の平面分布を図-4に示す。被覆ブロックが最も沈下した場所は、いずれのケースとも水路ほぼ中央の初期汀線位置 ($X=0\text{ m}$) である。また、両ケースともほぼ同心円状に被覆ブロックが沈下しているが、のり先では再び沈下量が大きくなる傾向がある。さらに、クリアランスの大きいケース2の被覆ブロックの沈下量はケース1のほぼ2倍に達する。また、被覆ブロックの前方への抜け出し(図中斜線部分)も著しい。被覆ブロックの最大沈下の見られた $y=-0.8\text{ cm}$ (ケース1), $y=-0.8\text{ cm}$ (ケース2) 断面における沈下量を η_1 , η_2 とすれば、 $\eta_1=0.49\eta_2+0.75$ (相関係数: $R=1.00$) が成立し、ケース2はケース1の2倍の沈下量であったことが分かる。この割合はクリアランス比にほぼ等しい。

次に、基礎捨石量 (V) と被覆ブロックの最大沈下量 ($\eta_{\max}$) の関係を図-5に示す。緩傾斜堤ののり先に基礎捨石 ($V=1680\text{ cm}^3$) を設置すると、被覆ブロックの最大沈下量は、それが無い場合に比べて $C=4\text{ mm}$ で

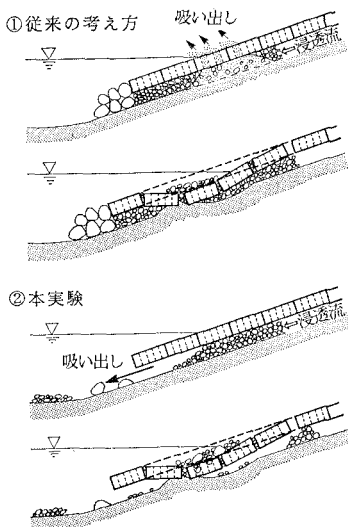


図-3 吸い出し現象の模式図

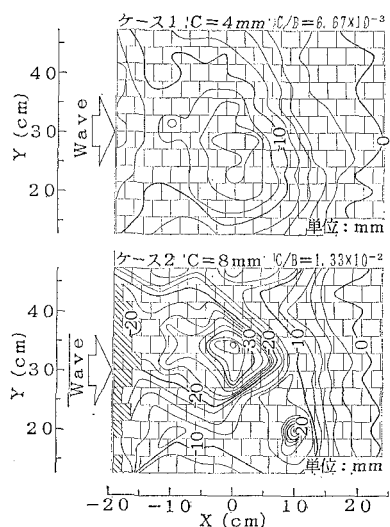


図-4 被覆ブロックの沈下量の平面分布(ケース1, 2)

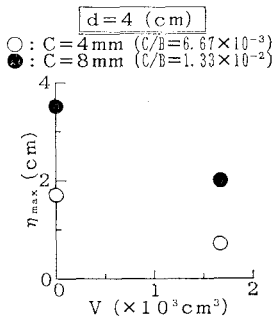


図-5 基礎捨石量 (V) と最大沈下量 ($\eta_{\max}$) の関係

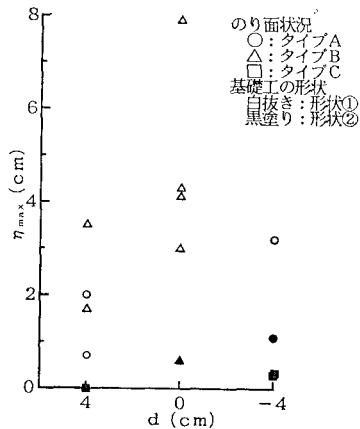


図-6 堤脚水深 (d) と最大沈下量 ($\eta_{\max}$) の関係

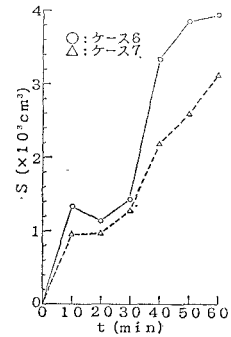


図-7 吸い出し量の経時変化

59%, $C=8\text{mm}$ で 43% 抑えることができる。また、基礎捨石が同量の場合、被覆ブロックの沈下には被覆ブロック間のクリアランスが大きく関与する。

これらより、被覆ブロックの沈下を抑えるためには、沿岸方向のクリアランス比を小さくすべきことが指摘される。また、表のり面の沿岸方向の幅が長くなるほど不陸を生じ易くなる。これを防ぐには、隔壁を設けて表のり面全体を小スペースに区切ることが有効である。このようにすればクリアランス比は小さく抑えられ、また不陸を生じて部分的に補修することが可能となる。

(3) 堤脚水深と緩傾斜堤の安定性

緩傾斜堤の堤脚位置はその安定性に深く関与する。そこで、以下では堤脚水深を $d=4, 0, -4\text{cm}$ と 3通り変えて実験を行った。緩傾斜堤のり面の被災状況をのり先の被覆ブロックが沈下する場合 (タイプA)、のり先と中央部で被覆ブロックが沈下する場合 (タイプB)、吸い出しはあってもり面の被災はない場合 (タイプC) に分けて分類する。図-6 には堤脚水深 (d) と被覆ブロックの最大沈下量 ($\eta_{\max}$) との関係を示す。ブロックの沈下量は、のり先が汀線にあるとき最大になる。のり先が静水面下 ($d=4\text{cm}$) にあるときには各タイプの被災が生じるが、最大沈下量の大きいのはタイプBである。のり先が汀線 ($d=0\text{cm}$) にあるときには、のり面の被害が比較的大きいタイプBしか生じない。のり先の前面に砂浜がある ($d=-4\text{cm}$) ときはタイプB、Cが生じる。

(4) 基礎捨石量と緩傾斜堤の安定性

のり面の被災が大い傾向にある堤脚水深 $d=0\text{cm}$ の場合に、現地で $1\text{ton}/\text{個}$ に相当する碎石をのり先に設置した。ケース6は被覆ブロックの沈下防止に必要と考えられる 1680cm^3 (現地単位幅当り $7\text{m}^3/\text{m}$)、ケース7は2倍の 3360cm^3 をのり先に設置し、比較検討した。

吸い出し量の経時変化を図-7に示す。横軸に経過時間 (t)、縦軸に吸い出し量 (S) をとって表した。どちらのケースも波作用時間が10分までに吸い出しが急速に進行する。10~20分では平衡状態が続き、その後吸い出しがさらに進むが、ケース6は40分を過ぎた頃から吸い出しの進行速度が鈍り、50分過ぎにはほぼ頭打ちの状態となる。一方、ケース7では吸い出しが継続する。波作用開始から60分では、ケース6の吸い出し量はケース7の1.3倍である。結局、基礎捨石量を増加したのみでは吸い出し防止の根本的な解決にはならないが、吸い出しの進行速度を遅らせることは可能と言える。

(5) 杭と蛇籠による基礎工と緩傾斜堤の安定性

被覆ブロック面の不陸の発生は、栗石の吸い出しによる地盤の不安定を原因とする2次災害であるから、栗石層の吸い出しさえ抑制することができれば、被覆ブロックの沈下はある程度防ぐことができるはずである。また、のり先からの吸い出しを防ぐには、基礎捨石の沖方向への移動を抑えれば良いと考えられる。そこで、緩傾斜堤が最も被災し易い状況となる位置 ($d=0\text{cm}$) に、捨石量 (V) を 1680cm^3 とし、基礎捨石のみを設置したケース6、基礎捨石と杭 ($0.3\text{cm} \times 0.3\text{cm} \times 12\text{cm}$, 47本、地盤に 8cm 埋設) を設置したケース13、基礎捨石と蛇籠を設置したケース14について比較した。

ケース6、13、14の緩傾斜堤前面における海底地形の変化を図-8に示す。ケース6では吸い出された栗石が $X=0 \sim -65\text{cm}$ の間に全体的に堆積した。ケース13では $X=-50 \sim -90\text{cm}$ の間で侵食され、土砂がのり面上に打ち上げられた。ケース14では $X=-50 \sim -90\text{cm}$ の間の土砂が $X=-15 \sim -50\text{cm}$ の間で堆積した。また、吸い出された栗石もこの部分に堆積している。要約すると、緩傾斜堤ののり先部を堅固にすればするほど地形変化量は大きくなる傾向がある。これはのり先部からの反

射波が関係し、反射率が大きいほど変化量も大きくなることを意味する。次に、のり先部分に注目し、10分間隔で撮影した写真より緩傾斜堤周辺の吸い出し状況を調べた(図-9 参照)。

ケース6では、造波後10分で $X=12\text{cm}$ まで空洞化が進み、20分では緩傾斜堤の下部には砂混じりの砕石が堆積した。30分後にはこの堆積した砂混じり砕石が再び吸い出され、40分後には $X=22\text{cm}$ まで吸い出しが進んだが、50分には吸い出し進行速度が鈍り60分ではほぼ安定した。最終的に緩傾斜堤の下部には大きな空洞ができた。

ケース13では、造波後10分では栗石は吸い出されていないが、基礎工部分の土砂が運び出され、その結果のり先の一部が沈下した。また、杭の部分で局所洗掘が見られる。20分後では緩傾斜堤ののり面上に基礎捨石が打ち上げられた。30分後、基礎捨石の下部に砂混じり砕石が堆積し、その後時間経過とともに同様な過程が続き、50分には空洞も生じた。最終的に60分には $X=18\text{cm}$ の範囲まで緩傾斜堤の下部に砂混じり砕石が堆積したが、空洞はケース6に比較して小さい。

ケース14では、10分後基礎捨石を包む蛇籠の下部が戻り流れにより侵食され、栗石が沖に移動し、被覆ブロックの沈下が始まった。この状況は30分まで継続し、50分になると被覆ブロックの沈下一層進み、砕石層の一部は完全に流失し、そこには砂混じり砕石がみられる。60分では、他の2ケースと比較して被覆ブロックの沈下は最も激しい。この場合、緩傾斜堤前面の蛇籠にはほとんど動きがなかったことが注目される。

結局、杭によって緩傾斜堤ののり先の基礎捨石が沖方向に移動しないようにした場合には、のり先の沈下は防げないものの、土砂が沖側より栗石層および基礎捨石の下部の空隙に入り込み、吸い出しを抑制して緩傾斜堤の安定性を高める。逆に、のり先の基礎捨石を蛇籠により一体構造にすると、蛇籠の下部に戻り流れが集中し、吸い出しを防ぐことはできなくなる。

4. 清水海岸の緩傾斜堤の被災分析

清水海岸は駿河湾の中央部に位置し、滝ヶ原川～三保半島の真崎に至る延長約 10km の海岸である。近年、侵食区域が隣接する静岡海岸から東側に移動し、清水海岸まで達し

た。このため、1988年には増地区において緩傾斜堤が設置された。しかし、沿岸漂砂の均衡が失われ、周辺の汀線が大きく後退するとともにこの緩傾斜堤は被災した(図-10 参照)。この地区においてのり面の不陸を測線に沿って測量した。各測量線上の被覆ブロックの沈下量を表-1に示す。これによれば緩傾斜堤の被災状況として、いずれものり先に近いほど被覆ブロックの沈下量が

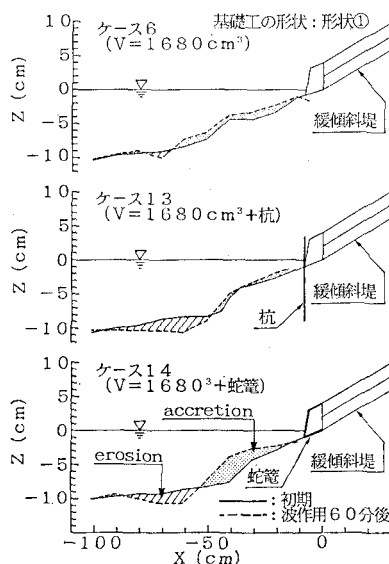


図-8 緩傾斜堤前面の基礎工とのり先における地形変化量の関係

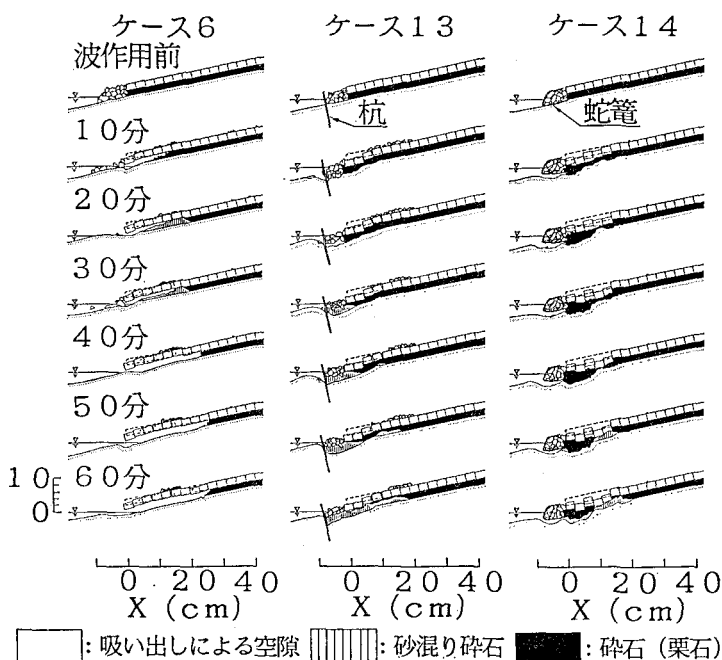


図-9 緩傾斜堤前面の基礎工と吸い出し量の経時変化

大きいことが分かる。

測点 No. 72+54 の測量状況を写真-1 に示す。被覆ブロックが沈下した原因は吸い出しによるものと考えられる。その理由として、被覆ブロックの下部が空洞化し、栗石が見られないことがあげられる。この測線の被覆ブロックの沈下量は平均 118cm である。以下、被災原因について考察する。

増地区の緩傾斜堤では当初計画において、基礎工は埋没した形状②であり、のり先には前浜が存在するはずであった。しかし、上手側からの漂砂の供給量が不足し、汀線の後退速度が予想以上に早まったこともあり、施工時には緩傾斜堤を短くして前浜を残す結果となった。そして、のり先には基礎捨石の代わりに被覆ブロック (3t 型 2 列 2 段積み の 4 個と 4t 型 1 個) と 12t 型テトラポッドが設置された。のり先をこのような堅固な状態にした場合、基礎捨石の代わりに用いた被覆ブロック下より砂や栗石が容易に吸い出される。また、沖方向に張り出してくる被覆ブロックはテトラポッドでおさえられるため、めくり上がる。この現象も実験で再現されている。この時、のり先の沈下をある程度の量に止めるためには、ケース13のように必要があれば自由に動ける基礎捨石で施工することが必要である。

さらに、被覆ブロック間のクリアランスの問題もあげられる。増地区に施工された緩傾斜堤のクリアランス比は $C/B=1.15 \times 10^{-2}$ である。実験では、2 種類のクリアランス比 (6.67×10^{-3} , 1.33×10^{-2}) について行ったが、表のり面の安定性を保つには、 $C/B=6.67 \times 10^{-3}$ 程度とかなり小さくする必要があった。このことはクリアランスをさらに小さくすべきことを示している。これには施工精度を向上させるか隔壁を造ることが必要とされよう。

5. 結 論

①従来、緩傾斜堤の裏込めの吸い出しは被覆ブロックの空隙やブロックの孔からマウンドの栗石が流失して生ずるとされていたが、本研究によれば、マウンドの土砂が戻り流れによってのり先を通過して沖方向へと流失するものであることが分かった。

②被覆ブロックの沈下量は、初期汀線付近で最大値を取る。最大値はクリアランス比と密接に関連し、クリアランス比が大きいほど沈下量も大きくなる。安定な緩傾

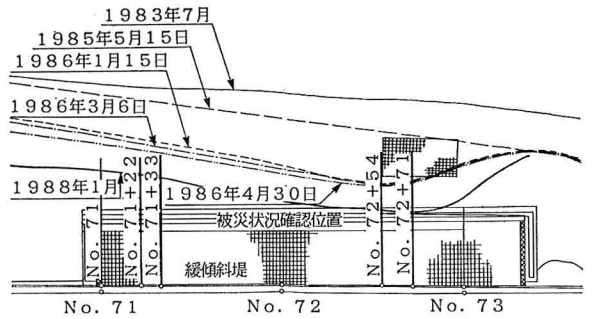


図-10 のり面被災状況の計測測線

表-1 被覆ブロックの沈下計測位置と沈下量

測 線	ℓ (m)	η (cm)
No. 71	6	150
	11	154
	16	164
No. 71+22	5	49
	14	158
	18	145
No. 71+33	12	70
	16	113
	20	113
No. 72+54	10	110
	14	130
	18	115
No. 72+71	10	75
	15	78
	20	79

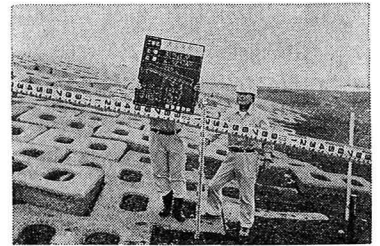


写真-1 No. 72+54 の被覆ブロックの沈下状況 (ℓ=18m, η=115 cm)

斜堤とするにはクリアランス比が小さいほど良く、そのためには隔壁構造とするのが望ましい。

③のり先の基礎捨石は、沈下量低減に役立ち、それが無い場合より約 50% の低減が可能である。

④清水海岸の緩傾斜堤の被災状況の調査によれば、被覆ブロックは汀線付近で最も沈下する状況が得られ、実験結果が現地状況と良く対応することが分かった。

参 考 文 献

宇多高明 (1983): 移動床実験において生ずる岸沖漂砂に起因する地形変化の特性, 土木技術資料, Vol. 25, No. 6, pp. 295-300.

宇多高明・坂野 章 (1991): 沿岸漂砂の卓越する場における緩傾斜堤下手側の侵食とその対策, 土木技術資料, Vol. 33, No. 2, pp. 37-42.

建設省河川局海岸課監修 (1989): 緩傾斜堤の設計の手引き, (社)全国海岸協会, 48 p.

堀川清司・砂村継夫・近藤浩右・岡田 滋 (1975): 波による二次元汀線変化に関する一考察, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 329-334.

前野賀彦・山本方人・遠藤泰司 (1990): 緩傾斜堤裏込め砂の吸い出し機構, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 499-503.