

緩傾斜堤の設計手法について

青木東雄*・芦田義則**・森吉尚***
宇多高明****・小俣篤*****

1. まえがき

直立型または傾斜型の海岸堤防・護岸は、海岸保全施設として全国各地で広く施工されてきた。しかし、これらの施設は国土保全を主な目的にして計画・施工されてきたものであるために、海浜利用や親水性、あるいは環境面や景観上からみて適切な施設とは言難い面があった。それゆえ、水理条件を低下させることなく、親水性や景観の面からより良い環境を創出することができる工法として、コンクリートブロックののり面から成る緩傾斜型堤防・護岸（緩傾斜堤）が各地で採用されるようになった。しかし、緩傾斜堤の施工経験は浅く、体系的な技術的基準も無いため、今までは種々の文献（例えば、豊島、1986）を参考として設計が進められてきたのが実状である。また、表のり勾配を緩くすることで反射率を低減できることから、堤防前面への堆砂に過大な期待を抱いていた面もある。このため、緩傾斜堤の機能について正しく理解するための助けとなり、安定性及び保全効果の高い緩傾斜堤の設計を可能とする合理的設計法をとりまとめる必要性が生じた。そこで建設省では緩傾斜堤の効果と安定性に関する研究を行い、その成果をとりまとめることにより、緩傾斜堤の設計の手引きを作成した。本報ではこの手引きの骨子を明らかにする。

2. 研究方法

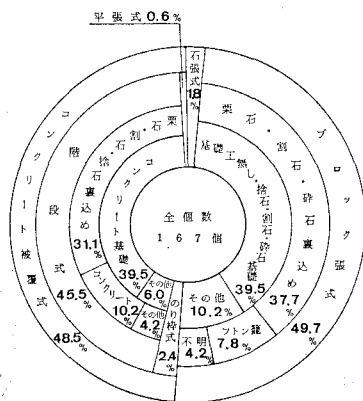
最初に、築造基準(1987)と同様に3割より緩い表のり勾配を有する堤防・護岸を緩傾斜堤防・護岸(両者を総称して緩傾斜堤と呼ぶ)と定義する。緩傾斜堤の表のり面をブロック張り式とすれば、粗度や透水性の効果によって打ち上げ高及び反射率の低減が図れる。また、ブロック張り式は施工性や経済性にも優れた点を有するとともに、異常波浪時の被災形態が全面崩壊とはならず、従来の直立堤で見られたような機能損失を伴う被災にはな

りにくい特長がある。これらの点より、特にブロック張り式の緩傾斜堤を対象として設計の手引きを取りまとめた。手引きの作成に際して、構造形式の分類は全国実態調査により、緩傾斜堤の適用性や安定性は被災事例調査により調べた。また、水理機能やのり先の洗掘は水理実験と現地観測により調べた。

3. 全国実態調査の結果

3.1 構造型式の分類

緩傾斜堤の各種構造型式に関する全国実態調査の結果を図-1に示す。これによりブロック張り式の緩傾斜堤の裏込め型式は栗石・雑石・砕石及び蛇籠・フトン籠に分類され、基礎工型式は基礎工無、捨石工及びフトン籠に分類された。これらの分類のうち、裏込めは現地盤上に栗石・砕石層を敷設することによって地耐力・支持力を強化し、表のり面からの浸透水や堤体からの浸出水に対するフィルターとしての機能を確保するために用いられている。また、浸透効果によって戻り流れが弱まることから、洗掘の低減も期待される。基礎工は、堤脚からの吸出しや洗掘による被災を防止するとともに、表のり被覆工の基礎部分を安定させることを目的として使われている。ブロック張り式の場合では基礎工無し、あるいは捨石・雑石層からなる基礎工を採用することが一般的である。



図一1 アンケート調査結果

* 正会員	(前)建設省河川局海岸課海洋開発官
** 正会員	建設省河川局海岸課長補佐
*** 正会員	建設省河川局海岸課
**** 正会員	工博 建設省土木研究所海岸研究室長
***** 正会員	建設省土木研究所海岸研究室

3.2 被災事例

被災事例調査では、緩傾斜堤の施工年月が浅いために、1987年末現在で全国より集められた事例は27件のみであった。これらの被災パターンは次の4タイプに分類された。

① 暴浪による洗掘、または沿岸漂砂の不均衡が原因で生じた侵食により法先の地盤が低下し、表のり面が全体的に崩落する。② 堤脚が海中にある場合に、平均水面付近から吸い出しが生じ、その部分が崩落する。③ 吸い出し、または沿岸漂砂の不均衡が原因で生じた侵食によって端部が崩落する。④ 波返工、天端工等の接合部の不良によって一部が崩落する。

沿岸漂砂の不均衡によって侵食が生じた場合における緩傾斜堤の被災は、緩傾斜堤の適用性または配置計画等に問題があったものである。また、暴浪による洗掘を原因とする場合は根入れ不足、または基礎工の不良等が原因と考えられる。②は裏込め工または吸い出し防止工の不良を原因とする。

3.3 緩傾斜堤の適用性

緩傾斜堤は、その構造より本質的に沿岸漂砂の制御効果を持つものではない。沿岸漂砂による侵食が生じている一連の海岸に緩傾斜堤を用いると、次の問題を生じる。

① 施工区間の漂砂下手側の侵食が顕著になり、端部が被災し易くなる。

② 侵食によるのり先の地盤低下により表のり面が崩壊する。

③ のり先が沖合に突出する場合には、小さな突堤として機能するために、下手海岸の侵食を助長する。

以上のように、当面の侵食箇所のみを対象として緩傾斜堤を侵食対策に用いると、海岸全体にとってはかえって侵食傾向を助長しかねないことになる。また、下手海岸での侵食問題は未解決のままであり、深刻な侵食を下手側に移すだけの結果となる。したがって、沿岸漂砂による侵食に対する根本的な対策として緩傾斜堤を用いることは出来ない。侵食対策としての緩傾斜堤は、海岸全体の侵食対策の中で、反射率の低い消波構造物として汀線の著しい後退を防ぐ過渡的手段として用いるべきである。

表のり勾配を緩くすると、のり面上を歩行することやのり面の利用が可能となる。また、海岸の景観に馴染んだ構造物とすることができる場合もある。このように、緩傾斜堤は海岸環境面からも有利な施設となり得る。ただし、前浜の狭い海岸では表のり勾配を緩くすると前浜のほとんどを緩傾斜堤が覆うことになり、かえって環境を悪化させてしまう場合も生じる。また、緩傾斜堤前面に根固め等の目的で大きな消波工を設置することは、海

岸環境上好ましくない。緩傾斜堤の採用が適当と判断される場合は以下のものである。

① 十分広い前浜がある海浜、または海底勾配が緩やかな海浜に新設する場合。

② ①に準ずる海浜で、既設の直立型護岸の前面に機能改良・補強の目的で設置する場合。

③ 海底勾配が比較的緩やかな場合、直立型護岸の前面に消波工の代替施設として設置する場合。

④ 直立型護岸の沖側に離岸堤あるいは消波堤が完成している海岸に機能改善のために設置する場合。

⑤ 海底勾配がかなり緩やかな海岸において、堤脚水深のやや大きい既設護岸の前面に、改良・補強工事として設置する場合。

一方、緩傾斜堤は以下の場合に採用が不適当と判断される。

① 最近になって急速に侵食が進みつつある海浜において、狭い前浜を覆って緩傾斜堤を新設する場合。

② 沿岸漂砂が著しい海岸の汀線付近に新設する場合。

③ 礫浜で堤脚位置が汀線付近となる場合。

④ 前浜が狭く、緩傾斜堤の設置により大量の越波が予想される場合。

4. 表のり面の粗度と透水性の効果

表のり勾配や堤脚水深を変えた場合の打ち上げ高の変化に関しては多くの研究がある。しかし、表のり面の粗度や透水性に関する研究は少ない。そこで表のり面の粗度及び透水性による波の打ち上げ高低減効果を実験的に調べた。滑斜面及び形状の異なる2種類のブロック（ブロックBの粗度はAより大きい）を用いて製作したのり面（裏込め無し）を用いて行った実験結果を図-2に示す。ここに R は打ち上げ高、 h は堤脚水深である。滑斜面よりブロックを用いた場合の方が、また粗度の大きいブロックほど打ち上げ高が低下することがわかる。次に、裏込めの透水性が打ち上げ高を低減させる効果を調べるため、緩傾斜堤と礫斜面の打ち上げ高を比較した（図-3）。ここに、 r は裏込め層厚である。透水層の存

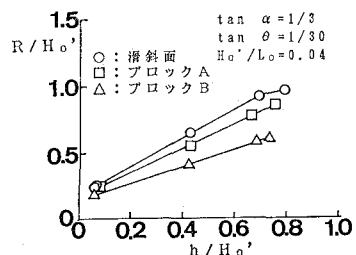
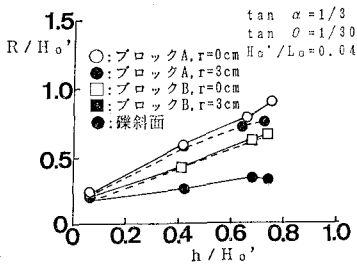
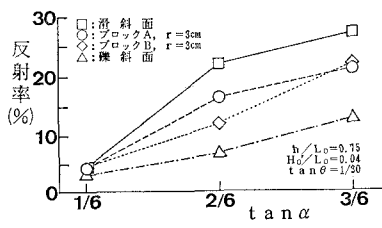


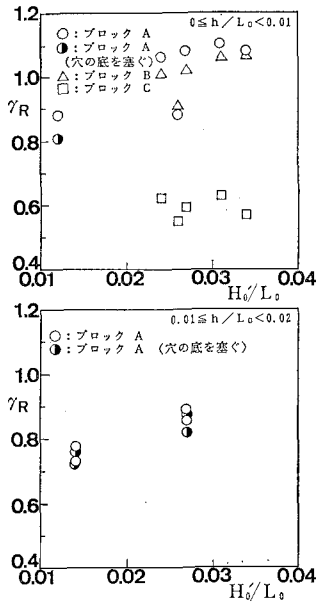
図-2 粗度と打ち上げ高の関係



図—3 透水性の効果
($r=3\text{ cm}$ は現地では約 90 cm に相当)



図—4 表のり勾配 $\tan \alpha$ と反射率の関係



図—5 粗度の効果(現地観測結果)

在による打ち上げ高の減少効果はほとんど無いことがわかる。一方、礫斜面では、打ち上げ高はかなり低下している。実験は縮尺 $1/30$ で行われ、模型の裏込め層厚 3 cm は現地では約 90 cm に相当することから、一般に用いられる $50\sim 100\text{ cm}$ の裏込め厚さでは、透水性による打ち上げ高の低減は期待できないと考えられる。更に、反射率の測定結果を図—4 に示す。表面粗度や透水性が大きいほど反射率も低下することが明らかである。

粗度と透水性による打ち上げ高の変化については、現地観測による確認を行った。皆生海岸(鳥取県)と小松海岸(石川県)において、表のり勾配 3 割の緩傾斜堤を対象としてブロックの形状や透水性の有無による打ち上げ高の変化を観測した。小松海岸では形状の異なる 3 種類のブロックを対象とした。また、皆生海岸では穴あきブロックを対象として、一部の区間において穴の底を塞ぎ透水性をなくした法面を設定した。さらに、両海岸共にブロック表面を滑面仕上げとした区間を設定して比較対象とした。各のり面での打ち上げ高の観測結果を滑面での打ち上げ高との比 γ_R として図—5 に示す。ブロックの穴の底を塞いだケースと、そのままのケースに差は見られず、透水性の打ち上げ高低減効果は小さいことが分かる。一方、ブロック形状によって打ち上げ高はかなり異なり、場合によっては約 40% も打ち上げ高が低下する。したがって、使用するブロック毎に粗度による打ち上げ高低減効果を考慮し、天端高、表のり勾配を決定する必要がある。

5. のり先の洗掘

海浜に設置された堤防の前面で生じる洗掘に関する実用的研究成果は少なく、精度良く評価することは難しい。小規模実験による検討は数多いが、漂砂の相似則が確立されていないために、現地海岸への適用性は低い。そこで、ここでは緩傾斜堤ののり先の地盤低下量を推定するために以下の方法を提案した。

高波浪によって生じる堤前面の地盤高の低下は、沖向き漂砂による海浜変形と、構造物近くでの局所洗掘から成る。海底勾配が $1/30$ よりも緩い緩勾配海岸では大きな局所洗掘は生じず、主に沖向き漂砂に伴う地盤低下が卓越すると考えられる。また、海底勾配 $1/10\sim 1/30$ の海岸では両者を合わせた地盤高の低下が生じ、その量は大型模型実験の結果より見積もることが可能と考えられる。そこで、まず現地の海浜変形資料(表—1)より沖向き漂砂に伴う海浜変形を調べた。その結果、地盤低下量 $\Delta h_{\max}$ の目安を以下のように得た。

- ① 堤脚位置が陸上部(M. W. L. 以上)の場合
 $\Delta h_{\max} = 1\text{ m}$

表—1 海浜変形の調査事例一覧

利 用 資 料	海底勾配
駿河海岸測量成果(建設省静岡河川工事事務所)	約 $1/40$
阿字ヶ浦海岸測量成果(建設省土木研究所)	$1/60\sim 1/80$
新潟海岸測量成果(建設省信濃川下流工事事務所)	約 $1/100$
Torrey Pines Beach, California (Nordstorm and Inman, 1975; Aubrey, 1979)	$1/40\sim 1/50$
Bethany Beach, Delaware (Hallermeir, 1988)	約 $1/25$
Nags Head, California (Sonu, 1968)	約 $1/50$

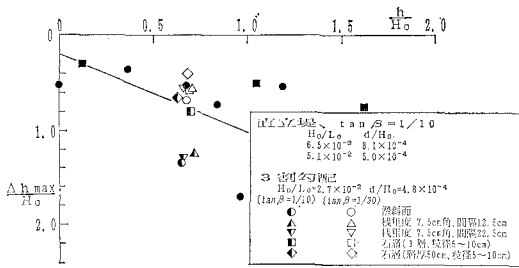


図-6 地盤低下量 $\Delta h_{\max}$ と法先水深 h の関係

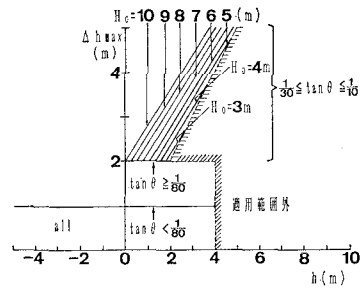


図-7 地盤低下量 $\Delta h_{\max}$ の簡易算定図

② 堤脚位置が海中 (M.W.L. 以下、但し、堤脚水深 $h < 4\text{m}$) の場合

・海底勾配 $\tan \theta < 1/80$

($\tan \theta$ は砕波帯内の平均的な値)

$$\Delta h_{\max} = 1\text{m}$$

・海底勾配 $1/80 \leq \tan \theta < 1/30$

$$\Delta h_{\max} = 2\text{m}$$

次に、長さ 150m、幅 2m、深さ 5m の大型水路を用いて、 $\tan \theta = 1/10, 1/30$ 、表のり勾配 $1/3$ の条件で行った実験結果より、局所洗掘を含めた地盤低下量を見積もった。さらに、 $\tan \theta = 1/10$ で直立堤を対象とした大型実験結果(佐藤ら, 1966)を加えて、 h/H_0' と $\Delta h_{\max}/H_0'$ の関係を図-6 に示した。 $\tan \theta = 1/10$ の直立堤では $h/H_0' \approx 1.0$ で $\Delta h_{\max}/H_0'$ は最大値をとるが、 $h/H_0' < 1.0$ では図中の実線

$$\frac{\Delta h_{\max}}{H_0'} = 0.8 \frac{h}{H_0'} + 0.2 \dots \dots \dots (1)$$

にはほぼ従っている。表のり勾配 3 割のケースの場合、 $\tan \theta = 1/10$ で滑斜面と棧粗度を設置したケースを除き、 $\Delta h_{\max}/H_0'$ は式(1)にはほぼ等しいか下回っている。これらのことから、裏込めを有する一般のブロック張り式緩傾斜堤であれば、 $1/30 \leq \tan \theta \leq 1/10$ 、 $h/H_0' < 1.0$ の場合には式(1)より $\Delta h_{\max}$ を見積もることが可能と考えられる。ただし、最小限度として海浜変形による地盤高の低下を見込む必要があると考えられるので $\Delta h_{\max} \geq 2\text{m}$ とする。

以上の算定法をまとめて図-7 に示した。簡易算定法であるため不整合部も存在するが、近隣海岸や類似海岸の状況を考慮しつつこの図により地盤高低下量を予測すれば良いと考えられる。ただし、式(1)を用いるに当たっては以下の点に注意する必要がある。

① 底質の中央粒径が $d > 0.001H_0'$ である礫海岸では、式(1)による洗掘深は実際よりやや過大となり易い。

② 堤脚水深が大きい場合 ($\tan \theta > 1/30$ 、 $h > H_0'$) の場合、 $\tan \theta < 1/30$ 、 $h > 4\text{m}$ の場合には、堤脚水深が大きいほど洗掘量は小さくなる傾向がある(例えば、佐藤ら, 1966参照)。

③ 表のり勾配が 4 割より緩い場合には、式(1)は過

大な値を与える可能性がある。

④ 内湾や内海で設計沖波波高が $H_0' < 3\text{m}$ の場合には、図-7 で求まるような $\Delta h_{\max}$ は生じないと考えられるため、 $\Delta h_{\max} \geq 1\text{m}$ として近隣海岸や類似海岸の事例を参考に決定する必要がある。

6. 構造上の問題

6.1 堤体と表のり面

堤体は一般には盛土で作られ、締め固めが十分可能な材料を用いることが原則である。したがって、堤体材料としては、多少の粘土を含む砂質または砂礫質の材料が用いられる。ただし、既設堤防の前面に施工する場合や緩傾斜護岸の場合には、盛土に生じるわずかな変形が堤体の機能損失・破壊につながることは少ないため、礫質の材料を用いても良いと考えられる。また、緩傾斜堤では、隔壁が水みちとなり弱点となる可能性があるため、原則として隔壁は設けないものとした。

表のり被覆工の構造上重要な点はブロックの重量と厚みである。ブロックの重量算定については、現在のところ問題を生じていないことからハドソン式を用いれば良い。ただし、のり先の洗掘 (1m 以上) を見込んで計算する必要がある。なお、のり先が汀線付近に位置する場合は、揚力によりブロック等の散乱が生じた例が見られるので、偏平で揚力を受け易いブロックを汀線付近で用

表-2 摩耗厚さの算定表

波 浪 地形条件		底質	常時波が打ち上がる 領域で見込むべき摩 耗厚	
内 海		—	特に見込む必要なし	
外海	遡上波が平常時に堤体に達する	砂	重要度に応じて年間 1mm~1cm	
		礫	重要度に応じて年間 1cm~10cm	
	遡上波が平常時に堤体に達しない 規模の前浜が有る	砂	重要度に応じて年間 0.1mm~1mm	
		礫	重要度に応じて年間 1mm~1cm	
	年数回程度しか遡上波が堤体に達 しない、または 堤脚水深が深く底質の研磨作用が 無視できる		—	必要なし

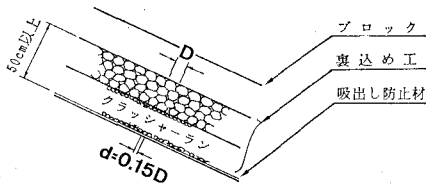


図-8 裏込め工の例

いるのは避けた方がよい。

ブロックの厚さはブロックの強度や摩耗を考慮して、原則として 50 cm 以上とした。また、波力が大きく底質粒径の大きい海岸では、表のり面が急激に摩耗する事例が見られる。そのため、表のりは十分な摩耗厚を見込んでおく必要がある。摩耗厚は近隣の施設より推定することが望ましいが、近隣に参考となる事例がない場合には、摩耗実態調査結果（全国12海岸対象）より作成した表-2 により推定すれば良い。

6.2 裏込め

細砂等の材料から成る堤体の表のりにブロック張り式を用いる場合には、空隙からの吸出し防止を目的とした裏込め工が必要とされる。特に、堤脚位置が海中にある場合には、裏込めが相当厚くても汀線付近での吸出しが多発する。これを防止するには、層厚を厚くするとともに、上層から下層へ粒径を徐々に小さくして、噛み合わせを良くする必要があると考えられる。以上の点から、裏込め工の最低厚さを 50 cm 以上とし、下層と上層の粒径比を $d/D > 0.15$ （富永，1970）にすることとした（図-8 参照）。また、全国調査によると、吸出し防止材の効果が認められる例もある。吸出し防止材は継ぎ目が容易に広がらないように確実な施工を行うとともに、裏込め工の下層に設置する必要がある（図-8 参照）。

6.3 根入れ深さと基礎

根入れは、のり先部の地形変化に対して堤体の安定性が十分に確保されるように設計施工する必要がある。のり先部の地形変化には、5 節で述べた洗掘に加えて沿岸漂砂の不均衡によって生じる海岸侵食に伴う海浜変形も考慮する必要がある。これらの海浜変形や洗掘による地盤高の低下量を予測し、それに応じた根入れ深さを確保することが原則である。緩傾斜堤の根入れ深さは施工性や経済性の面より次の方法で定めることとした。

① 施工性・経済性から見てドライ施工（仮締め切り不要）が可能な場合

予測される地盤低下量より根入れ深さを大きくする。ただし、所要の根入れ深さが大き過ぎて施工が困難となるような場合には、1m 以上の根入れ深さを確保して、根固工による洗掘防止を行うものとする。

② 水中施工となる場合

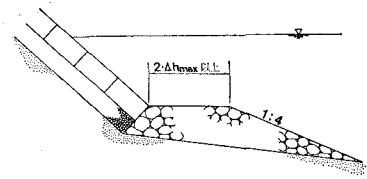


図-9 基礎工の例

根入れにより洗掘に対処するのではなく、基礎工を設置するものとする。この基礎工は、主に高波浪時ののり先地形変化に追随するためのものであり、地形変化の影響が堤体に及ばないだけの規模とする必要がある。

基礎工に関しては、洗掘に対して十分な根入れ深さを確保できれば大きなものは必要としない。この場合には波の作用によるブロックの沈下を防ぐため、捨石・雑石等を用いた基礎工を設置すれば良い。水中施工で根入れをしない場合には、高波浪時の地形変化の影響が堤体に及ばないだけの規模を有する基礎工を設置する。その諸元を厳密に決定することは困難なため、ここでは高波浪による法先地盤の低下によって基礎工が変形したとき、その勾配が 2 割以上となることを条件として、図-9 に諸元の目安を示した。

7. あとがき

「緩傾斜堤の設計の手引き」は最低限度の技術的基準を示したものであり、今後なお研究、改善されるべき余地も残されている。緩傾斜堤の設計・施工技術については、各海岸の実情や経験に応じた創意工夫が今後とも行われることを期待する。なお、本手引きの作成にあたっては豊島修東海大教授より懇切丁寧な指導を賜った。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 海岸保全施設築造基準連絡協議会編 (1987): 改訂海岸保全施設築造基準解説, 269 p.
- 佐藤昭二・田中則男・入江 功 (1966): 直立壁堤脚部の波による二次元洗掘実験, 第13回海岸工学講演会講演集, pp. 156~161.
- 富永正昭 (1970): 越波と根固め, 水工学に関する夏期研修会講義集, pp. A8-1~A8-28.
- 豊島 修 (1986): 緩傾斜護岸 Q&A, 海岸, No. 26, pp. 95~104.
- Aubrey D. G. (1979): Seasonal patterns of onshore/off-shore sediment movement, Jour. Geophys. Res., Vol. 84, No. C10, pp. 6347~6353.
- Hallermeier R. J. (1988): Applying large replicas of shore erosion by storms, Proc. 21st Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1415~1429.
- Nordstorm C. E., and D. L. Inman (1975): Sand level changes on Torrey Pines Beach, California, Miscellaneous Paper No. 11-75, CERC, 35 p.
- Sonu C. J. (1968): Collective movement of sediment in littoral environment, Proc. 11th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 373~400.