

大型模型実験による緩傾斜ブロック堤の被災機構に関する研究

野口 賢二*・田中 茂信**・鳥居 謙一***・佐藤 慎司****

1. はじめに

本研究は, 表面をコンクリートブロックで被覆した緩傾斜ブロック堤を対象としている。緩傾斜ブロック堤は, 「越波・シブキの低減, 親水性の向上」(豊島ほか(1988)など)の目的から数多く計画, 施工されている。

しかし, 全国的に海岸侵食が激化するに従い, 緩傾斜ブロック堤の被災が後を絶たない。緩傾斜ブロック堤は, のり勾配により堤防・護岸としての消波性を保持しているため, 堤体材料の吸出し等により被覆ブロックが沈下し, 変形が過度に進むと本来の機能を維持できなくなる。さらに, 被災した緩傾斜堤を復旧する場合に, 同様な構造で復旧することが適切でないと考えられることが多い。ところが, 緩傾斜堤の被災機構が完全に解明されていないために大幅な構造の変更を検討できないのが実情である。

緩傾斜ブロック堤の被災機構についていくつかの実験的研究があるが, 実験スケールが小さいために現地で生じる砂や礫の移動を再現しているとは言い難い。一方, 現場では被災に至る経緯を追跡したり高波浪来襲時の状況を安全に確認することは難しい。そこで, 本研究では, 緩傾斜ブロック堤内部で進行する被災に至る過程を解明するために片面ガラス張りの水路を用いて大規模水理模型実験により検討した。

2. 実験の目的

2.1 従来の研究における被災機構

前野ら(1990)は, 被覆ブロックのめくれに注目し, 孔なしの階段型ブロックによる実験で裏込め工内に生じる浸透流により液状化が生じ堤体砂を吸出し侵食することを示した。その浸透流による沖側への掃流砂は波の遡上時に顕著であると述べられている。また, 侵食の防止にはクラッシュラン層等の良好なフィルタ層や吸い出し防止材の敷設が有効であるとしている。また, 平均水面の位置を境に沖側では堆積, 岸側では侵食が生じること

を示した。

宇多・柳澤(1991)は, 侵食が激しい海岸において著しい被災が生じていることに注目し, 有孔ブロック緩傾斜堤の被災について研究した。海岸侵食により前浜が消失し, さらに法先部が侵食を受け礫層内の浸透流が法先部より流出するようになり, 浸透流とともに堤体材料が吸出される。この対策として, 根固め部の吸出しを防ぎ海岸侵食を低減させることが重要であることが指摘されている。

2.2 緩傾斜堤の全国被災実態調査

1995年に建設省は, 緩傾斜堤の全国被災実態調査をおこなった。これによると既設の緩傾斜堤(階段ブロック, 有孔ブロックを含む)564件中56件の被災事例が挙げられている。この56例を緩傾斜堤の形状が変化した場所により図-1に示した4つの被災パターンに分類すると, 緩傾斜堤下部の被災が18件, 中部が14件, 上部が18件となっている。

下部の被災については, 宇多・柳澤が示したように, 侵食が極度に進んだために法先より緩傾斜堤の構成材料(裏込め工や堤体砂)が侵食により損失して被災に至ったと考えられる。

中部および上部被災については, 遡上波により裏込め

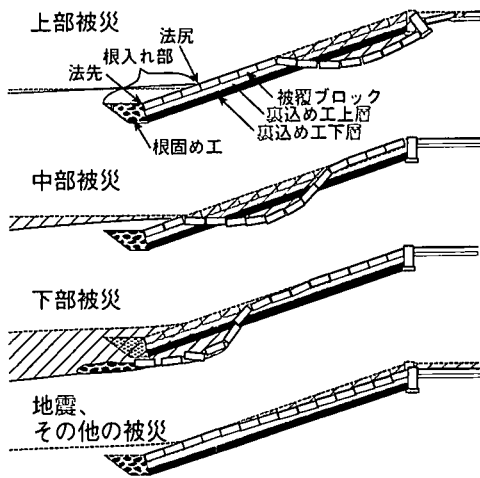


図-1 緩傾斜堤被災パターン

* 正会員 建設省土木研究所海岸研究室 研究員
** 正会員 工修 建設省 豊橋工事事務所 所長
*** 正会員 工修 建設省土木研究所海岸研究室 室長
**** 正会員 工博 東京大学教授 大学院工学系研究科

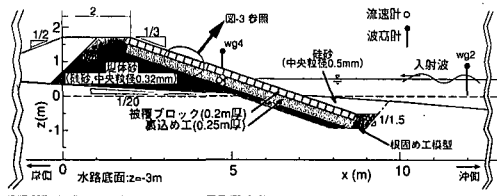


図-2 実験模型

工の礫や堤体砂が吸い出しや飛び出しにより欠損して堤内に空洞が生じ、被災が生じると考えられる。その対策として現地では、裏込め工の割栗石を蛇籠等で保護しているほか、栗石層と堤体砂の間にクラッシュラン層を設けたり吸い出し防止材を敷設している。それにもかかわらず堤体砂が吸出され被災が生じているのが実態である。さらに、緩傾斜堤前面に海浜が残っているような、海岸侵食が未だ深刻でない海岸においても中・上部の被災が生じている。

この中・上部被災に関する被災の機構については、いつから空洞化が始まるのか、割栗石は堤外へ出ているのか、石と砂のどちらが先に堤外へ抜けるのかなど構成材料の移動について把握されていないのが現状である。

さらに、被災後の堤体形状がどのようにして決まり、その後の復旧はどのようにするのが最適かを知る上で被災機構の解明が不可欠である。

このような現状に対し、小規模な実験では裏込め工の礫の動きや堤体砂表面の現象が十分に再現できないといった問題がある。そこで、中・上部被災に至る堤内砂および裏込め工下層の被災機構を解明するために、堤内で発生する浸透水や裏込め材の挙動を容易に観察できる有孔ブロックを用いて、大型水理模型実験を行った。

3. 実験方法

実験には、長さ 135 m、幅 2 m、深さ 5.3 m のピストン型反射吸収式造波装置付き水路を用いた。模型は、1/3 勾配の緩傾斜ブロック堤とし、図-2 に示す構造とした。模型設置以前に水路内の地形が高波浪後の海岸地形となるように波を作用させ、そこに緩傾斜堤模型を設置した。

被覆ブロックは、有孔ブロックを用いた斜面を想定して図-3 に示す凹型の平面形状をしたブロックを製作した。ただし、観測ガラス面に当たるブロックについては孔における水の流出を観察できるように L 型にした。被覆ブロック寸法は、幅 48 cm、奥行 25 cm、厚さ 20 cm である。被覆ブロックの一般的な形状から、ブロックの孔の大きさを平面積の 20% とした。

模型は、図-3 に示すブロックの配置と裏込め工の構成を組み合わせた。ブロック配置 I は凹型を順列で並べ、ブロック配置 II は孔が向き合うように並べたものとし

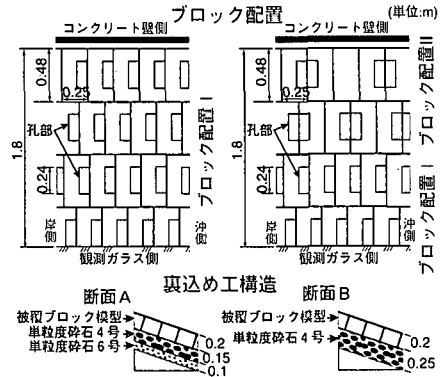


図-3 ブロック配置および裏込め工の構成

た。また、裏込め工は、粗礫層と粗礫層を持つものを断面 A、細礫層だけで構成されるものを断面 B とした。ブロックと断面の組合せは、シリーズ a はブロック配置 I と断面 A、シリーズ b は模型を 2 分割して観測面側にブロック配置 I と断面 B でコンクリート壁側をブロック配置 II と断面 A とした。各層に利用した材料は、模型縮尺に合わせて粗礫層には単粒度砕石 4 号（粒度範囲 20~30 mm）、細礫層には単粒度砕石 6 号（粒度範囲 5~20 mm）のうち、粒径 10 mm 以上のものを用いた。また、堤体砂には、現地砂の粒径に近い中央粒径 0.32 mm の珪砂を用いた。

実験模型の想定縮尺は、シリーズ a で 1/2 とした。このとき、粗礫層は現地の割栗石層、細礫層は現地のクラッシュラン層に相当する。しかし、完全な縮小模型としたシリーズ a では侵食が進まなかった。浸透流による被災では 1/2 でもスケール効果が生じることが分かったので、シリーズ b では堤体とクラッシュラン間での土砂移動のみに着目し、図-4 に示すように模型を簡略化した。

表-1 実験ケース一覧

シリーズ	ケース	ブロック配置 +裏込め構造	波高 (m)	周期 (sec)	水深 (m)	沖波			碎波 位置 (m)
						波高 H_0	波長 L_0	波形 勾配	
初期地形作成		なし	0.90	5.0	0	0.94	38.8	0.024	
a	a1	I+A	0.48	8.0	0	0.43	99.1	0.004	27
	a2	I+A	0.30	10.0	0	0.24	156.6	0.002	25
	a3	I+A	1.09	4.9	0	1.15	37.3	0.031	31.5
	a4	I+A	0.88	5.0	0	0.92	38.7	0.024	—
	a5	I+A	0.33	8.0	0.5	0.30	99.3	0.003	—
b	b1	I+A, II+B	0.59	6.0	0.5	0.60	56.2	0.011	21
	b2	I+A, II+B	0.50	6.0	0.5	0.51	55.8	0.009	14.2
	b3	I+A, II+B	0.56	5.0	0.5	0.60	38.8	0.015	27
	b4	I+A, II+B	0.57	5.9	0.25	0.57	54.1	0.011	25.5
	b5	I+A, II+B	0.74	5.9	0.5	0.75	54.1	0.014	21

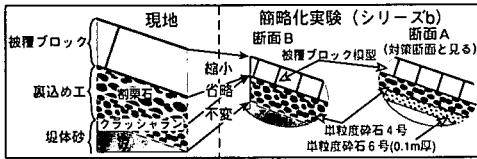


図-4 実大模型簡略化の概念

割栗石で構成される裏込め上層の透水係数は格段に大きいので、下層内の流れに与える影響は小さいことから、裏込め上層を省略したものを想定した。

実験水路内の測点位置や砂面等の移動現象に関する座標は、図-2に示したように緩傾斜堤天端背後肩を $x=0$ 、水路底面から3mの高さを $z=0$ として定義した。

入射波および模型の組合せを表-1に示す。堤内の裏込め工および堤体砂は、それぞれのシリーズ内で変化しても最終ケースまで整形し直さなかった。造波時間は、60分を目安として現象の把握が完了した時点で終了とした。

電磁流速計を断面A粗礫層底部に、シリーズbでは断面A細礫層底部と断面B礫層底部に設置して礫層内の流速を計測した。また、容量式波高計で沖側入射波形 (w_{g1}) を $x=103$ m、流速計直上 (w_{g4}) の $x=4.8$ m で波高を計測した。測定は、サンプリング周期0.1秒で1024データを同時に取得した。また、水路側面のガラス観測面から堤体内部の変化状況をビデオ撮影した。

4. 実験結果

4.1 礫の移動形態

シリーズaでは、礫層および堤体に変化が生じなかった。しかし、模型の構造を現地スケールを簡略化したシリーズbの断面Bでは、造波開始後すぐに堤体の侵食が始まった。

ケースb1で撮影したビデオより裏込め工の礫の移動形態を追った。堤体砂の侵食が進むと初めに一番下の礫が下へ落ちる。このとき周囲の礫の移動はほとんど見られなかった。さらに侵食が進んでも侵食された砂面の上方の礫が下へ移動するだけで水平方向への移動はほとんど見られない。礫層の変化はゆるやかで、下方の礫のひとつが落下しても周囲の礫はお互いの噛み合わせで若干動くことはあっても同時に落下することは少ない。侵食が広がることでこれが繰り返されて上方へ伝達され、最終的には侵食された砂面の上方の礫が全体的に下方へ移動した形となる。また、本研究の実験範囲内では礫が被覆ブロック孔から飛び出たり、層内を流されることはなかった。

4.2 堤体砂面の変化

図-5に水路ガラス側面より観察された砂面の変化を

示す。ケースb1~b3は水深を一定にして入射波を変えた。ケースb4では25cm水位を下げた波を作用させ、その後ケースb5で再び水位を戻し水位変動による堤体砂の変化を見た。図中には、模型設置前に高波浪時を想定して作成した初期地形を点線で示した。また、静水位と引き波時の水位も示した。

緩傾斜堤中部で最も侵食しており10cm程度砂面が低下した。侵食が始まる平坦面(ケースb1の $x=4.2$ m付近)は、概ね引き波時の水位付近であり、引き波時の水位や静水位を変えても同様な付近に平坦面が生じることが分かる。一方、沖側の法面下部の礫層内では、侵食された堤体砂の堆積が生じた。根入れ上の砂は、大きく堆積や侵食をされなかった。

ケースb4では、静水位を上昇させたことによりケー

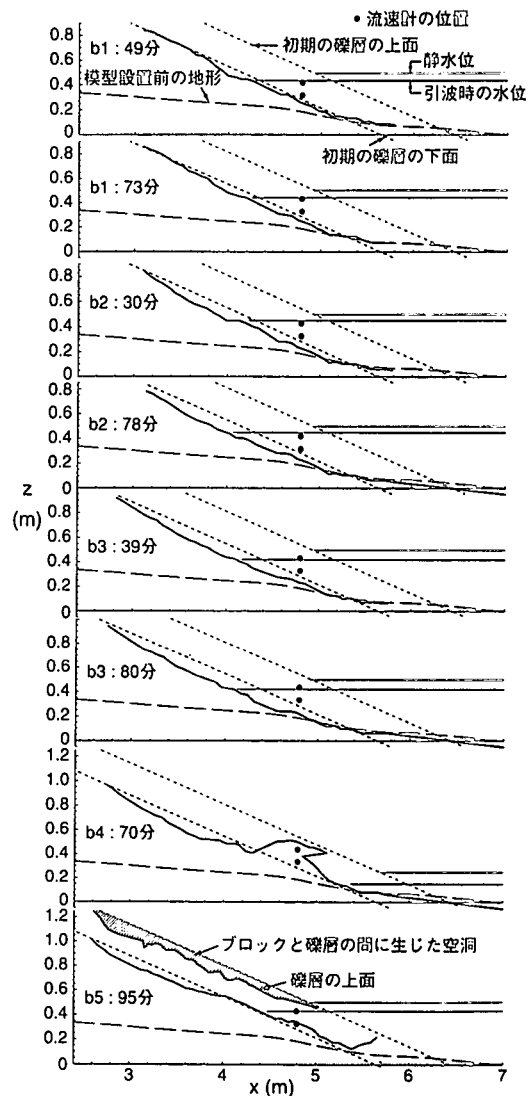


図-5 堤体砂面の侵食と礫層内の堆積状況の変化

ス b3 の最終砂面から侵食は進まず、逆に堆積が生じた。この堆積した砂を観察すると緩傾斜堤前面および沖側の海底材料である粗いものも多く含まれていた。ケース b4 は、波の条件は以前のケースと同程度であるが、水位を下げたために相対的に遡上高が低下し、裏込め工内の水位と堤外の水位の斜面での位置が沖側へ移動した。このため、ケース b3 までの侵食により形成された堤体砂面の勾配に対して生じる浸透流流速が小さくなり、大きな侵食が生じなくなったと考えられる。一方、被覆ブロック孔からの流出流速も小さくなり、遡上波で打ち上げられた緩傾斜堤前面の砂が孔から入り裏込め工礫層に堆積したと考えられる。

静水位を元に戻したケース b5 では、浸透流が水みち確保とともにケース b4 で堆積した砂を徐々に吐き出すとともに、さらに岸側へ侵食が進んだ。

初期地形と侵食地形をそのまま比較することはできないが、初期地形を目安として全体の変化を見ると堤体の侵食はある安定した地形へ向かうとする傾向があることが分かる。これは、現地において緩傾斜堤が被災を受けた時によく見られる「元の地形に戻ってしまう」現象に似ている。

裏込め工礫層表面については、堤体砂砂面の低下に追従して低下している。また、被覆ブロックと礫表面の間には空洞が発生するが、被覆ブロック同士の噛み合わせが落下を防いでいる。ここに噛み合せを無くす現象、例えば大きな波力やブロック間隙の増加など、が生じるとブロックが沈下・散乱すると考えられる。

4.3 被災に至るメカニズム

ここで、本研究で得られた緩傾斜堤の中・上部被災に至る堤内部の機構を図-6 の模式図に示す。また、この機構による被災に至る過程は以下になる。

- 1) 裏込め工内の浸透流が堤体砂砂面を侵食する。
- 2) 侵食は、平坦面を形成しながら岸側へ進む。一方、法面下部の礫層内では堆積が生じる。
- 3) 堤体砂が侵食された場所では礫が徐々に落下する。
- 4) 礫層と被覆ブロックの間には空洞が生じる。

4.4 位相平均波形

取得した波高・水位・流速のデータを造波機前面の波形より、peek to peek を 1 周期として分割し各位相平均を算出した。その例として図-7 にケース b1 の位相平均波形を示す。水位 w_{g1} は造波機前面での、水位 w_{g4} は礫層内を測る流速計の直上のものである。

断面 A の細礫層、粗礫層と断面 B の粗礫層のそれぞれ底部に埋設した流速計 ($x=4.8$ m) の波形をのり面に平行方向 (流下方向) の成分を実線で、のり面に鉛直方向 (流出方向) を点線で示した。計測した流速は、流下方向、

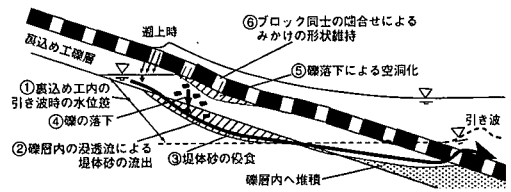


図-6 被災機構の模式図

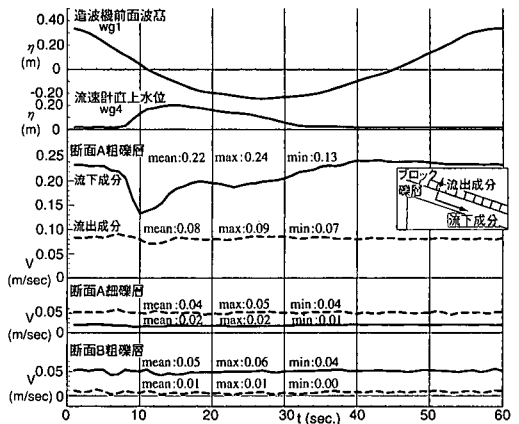


図-7 位相平均波形 (ケース b1)

流出方向が正である。

遡上開始時に最低流速となり、遡上波が引いた後から次の波が来襲するまでの間に層内流速は最大となる。この現象は、前野ら (1990) の示した遡上時に砂移動が顕著になることと対照的である。つまり、礫層内の浸透流は、波の遡上後に裏込め工内に残存した水の水位と堤外の水位差により脈動しながら流れる戻り流れであることがわかる。また、裏込め工下層に位置する断面 A の細礫層と断面 B の粗礫層ではともに流速が大きく減少し、上層での変動はほとんど伝播していない。ただし、断面 A の細礫層底部では流下方向よりも流出方向の成分が大きい。

細礫層の流下方向の流速低減効果を見る。断面 B の粗礫層底部では、平均流速 0.05 m/s であるのに対して断面 A の細礫層底部では平均流速 0.02 m/s と 1/2.5 となった。また、断面 A の粗礫層底部では平均流速で 0.22 m/s となっており、細礫層内で流速は約 1/10 に低減している。

富永・坂本 (1969) は、裏込め工のような礫を層状に設置した時の下側材料の抜け出しを防ぐ幾何学的条件として下層の粒径 d_2 と上層の粒径 d_1 比が $d_2/d_1 > 0.1$ を示している。この関係を堤体の安定化のために、割栗石から堤体砂まで繰り返すことも考えられる。本研究では被覆ブロックおよび割栗石層を簡略化しているので来襲す

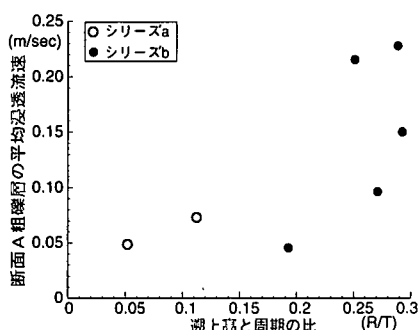
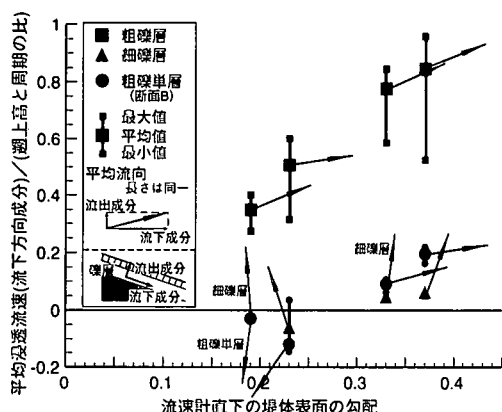


図-8 遡上高・周期比と浸透流速の関係

図-9 堤体砂の勾配と流速・ R/T 比の関係

る波高と浸透流の関係を定量化することはできないが、細礫層を設けることは浸透流による堤体砂の侵食で生じる中・上部被災に対して有効であることがわかる。これは、細礫層を設けることで流体力学的に堤体砂面上の流速を移動限界以下に下げることによって対処できることを示している。

4.5 波の遡上と粗礫層内の平均流速

本研究では、遡上高を目視により観測している。波や地形条件を含んだ結果と言える遡上高 (R) を周期 (T) で割った速度の次元を持つ指標と裏込め工の中間位置である断面 A 粗礫層の平均流速について整理したのが図-8である。シリーズ a および b において断面 A 粗礫層の流速が計られていてかつ遡上高が観測できたものについて記してある。この図によると、 R/T により傾向を示している。つまり、素早く広い範囲に表面水が供給される程、礫層内の流速が大きくなる。

4.6 堤体の侵食に伴う浸透流の変化

ケース b4 において初期水位を下げたことにより礫層内の侵食・堆積状況に変化が生じた。侵食が進行してい

た 4 m~5 m において沖側から層内へ堆積が生じた。そこで、図-5 をみると $x=4.5$ m 付近より沖側は、実験経過に伴い侵食域からむしろ安定もしくは堆積する位置に変化していることが分かる。このとき、堤体の形状が変化するに従い礫層下部の流速は小さいものの流向が大きく変化した。

この現象は、浸透層内の流速と引き波時の水位、その時の堤体砂面の断面形状に関係すると考えられる。そこで、波に起因する数値として先述の遡上高 (R) を周期 (T) で割ったものと浸透流速の比を縦軸に、流速計設置地点下 0.4 m 間の平均堤体地形勾配を横軸として関係を調べたものが図-9 である。図中の矢印は、各流速計の平均流向で大きさは同一で示してある。この図は、引き波時の水面より低いある 1 点に関する変化を示すものであるが、礫層下部では堤体の勾配が緩くなると岸向きもしくは堤体へ向かう方向となり、その場所の安定性を高める流向に流れが変化することを示している。

5. まとめ

本研究の実大規模の実験により、中・上部の被災機構を解明し、対策を提案した。それらをまとめるとつぎのようになる。

- 1) 波が遡上時に裏込め工に浸透し、浸透した水が遡上波より遅れて沖へ戻る際に礫層内の浸透流となる。
- 2) 浸透流により堤体砂が掃流され流出するために、侵食域が岸側へ広がる。
- 3) 砂面の侵食により砂面と礫層の間に空隙ができ、そこに礫が一つずつ落ちる。この現象が上層へと繰り返されて、最終的に礫層とブロックの間に空洞が生じる。
- 4) 浸透流による砂層の変形防止策として、裏込め工を通常の 2 層の下にさらに細かい礫からなる層を設けて堤体直上の浸透流速を低下させることが必要である。
- 5) 堤体の侵食は、平坦砂面を作りつつ岸側へ進む。
- 6) 引き波時の水面よりも低い礫層下部の流速は、侵食が進み堤体砂面の勾配が緩くなると、安定性を高める方向に変化する。

参考文献

- 豊島 修 (1988): 緩傾斜のり面による新しい海岸護岸工法, 東海大学紀要海洋学部, 第 26 号, pp. 103-114.
 前野賢彦, 山本方人, 遠藤泰司 (1990): 緩傾斜護岸裏込め砂の吸出し機構, 海岸工学論文集, 第 37 巻, pp. 499-503.
 宇多高明・柳澤 修 (1991): 緩傾斜堤の被災機構と安定化のための方策, 海岸工学論文集, 第 38 巻, pp. 656-660.
 富永正昭・坂本忠彦 (1969): 海岸堤防の根固め工について, 第 16 回海岸工学講演会論文集, pp. 269-275.