

海岸護岸の実験的研究

— 根固工について —

東京大学教授 工学部 工学博士 本 間 仁
 東京大学助教授 工学部 堀 川 清 司
 東京大学大学院 工学部 安 川 浩

1. 緒 論

海岸保全施設の最も一般的なものは海岸護岸であり、海岸堤防であろう。これ等 構造物を設計するにあたっては、(1) その高さを何程にとるか、(2) 構造様式はどの様にするか、(3) 法面の被覆についてはどうか、(4) 前面の根固めはどうか、などが問題になって来る。例えば、高さの決定については後背地の重要性に対する考慮が極めて重要な要素になって来るが、水理学的な要素、つまり構造型式、あるいは前面の海底勾配による、波の遡上高さに関しては、内外共に数多くの実験的研究が進められ、有効な指針となっている。また一方においては、全国各所に種々の型式の構造物が築造されて居り、現地実験を行つていることであるから、これらの資料の累積もまた重要な指針となりえよう。しかしながら、実際に適用する場合には、なお明らかでない所も多いようである。

われわれは新潟海岸に築造されている護岸について検討を加える必要を生じた。特にこの海岸では、テトラポッドによる根固め方式が採用されているが、果して現在のような方式が妥当か、またその維持の面から見て根固めの沈下はどの程度進行するのか、これらが当面の諸問題になっている。

ここには、現在まで行つて来た、(1) 移動床を使用し、砂地盤にテトラポッドを根固めとして設置した場合の沈下散乱の観察、(2) 固定床を使用し、護岸前面のテトラポッド根固を透過あるいは越波した波の、護岸への遡上高の測定、の2項を主体にして述べる。今後は各種の根固形式と護岸との組合せについて調べていく予定である。

2. 実 験

2.1 実験条件

実験に使用した護岸形式は、新潟東海岸のものを参考にし、縮尺は 1/25 とした。また護岸根固形式は同海岸船江町前面、及び三菱裏の護岸根固によつたが、後者については、現地では 4t テトラポッドを使用しているが、この他に 1t テトラポッドを使用した場合についても実験を行つた。(図-1)

実験に用いた波は、新潟海岸冬季の代表的な波と考えられる波高 3.5 m (模型波高 15 cm)、周期 9.0 sec (模型波周期 1.8 sec) である。海底勾配は護岸前面から急に深くなっている場合を想定し、沖合の 1/60 勾配を 1/6 の急勾配によつて護岸前面につないだ。(図-2) また実験に用いた砂の平均粒径は 100 μ である。

2.2 実験施設及び実験方法

使用した水路は幅 70 cm、深さ 60 cm、長さ 18 m であり、造波材は flatter type である。

図-1 (a) 新潟東海岸船江町前面護岸根固

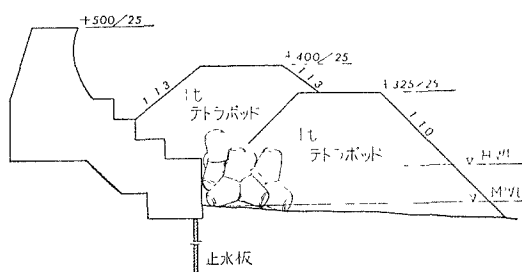


図-1 (b) 新潟東海岸 三菱裏護岸根固

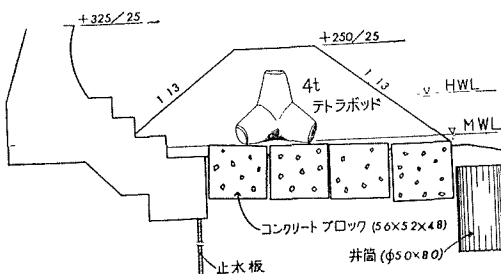
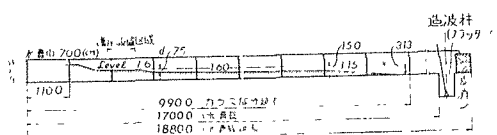


図-2 実験水槽並びに断面



先づ図-1(a)の護岸で根固めを置かなった時の護岸前面の洗掘状況を比較の為に観察した。次に図-1(a)の根固め断面に沿って、1t テトラポッドに相当する 62g のテトラポッドを積み、根固め断面の変化を測定した。また図-1(b)の護岸、根固めについても同様な測定を行った。

テトラポッド根固めの形状を求めるために、20 メッシュの幅 60 mm の金網で根固めを蔽い、その上から Point gauge をあてた。この様にして、ほぼテトラポッド根固めの包らる面を求めることが出来た。

2.3 実験結果

(a) 根固めのない場合

ここでは護岸のみを図-1に示す様に設置して波を当てた。写真-1(a)は波をあてる以前の状態を示し、(b)は 300 分経過した時の状態を示している。2 度同様の実験を繰返したが、いずれに於ても時間の経過につれて護岸前面は洗掘され、遂には洗掘が護岸下面に迄達

写真-1(a) 波を当てる以前

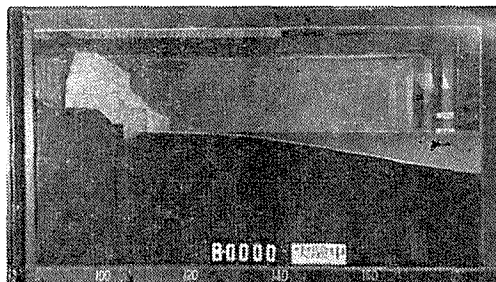


写真-2(a) 砂上 1t テトラポット根固
波を当てる以前

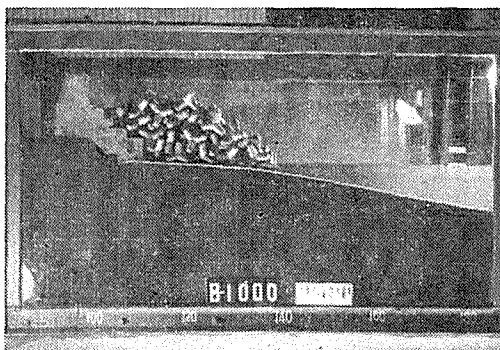


写真-1(b) 300 分経過後

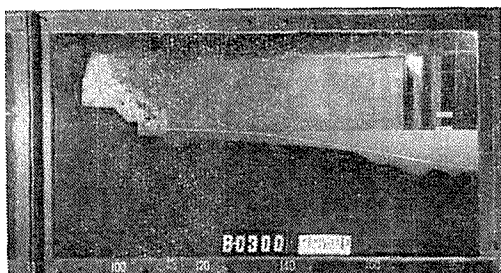


写真-2(b) 60分経過

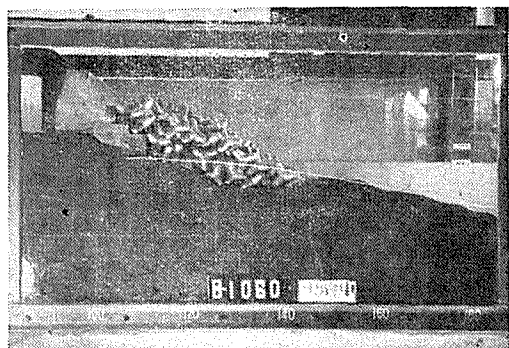


写真-2(c) 240分経過

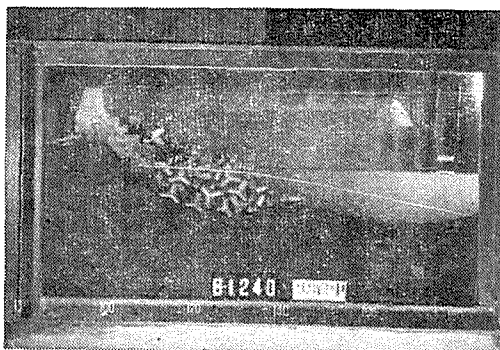


写真-2(d) 240分経過、嵩上げ直後

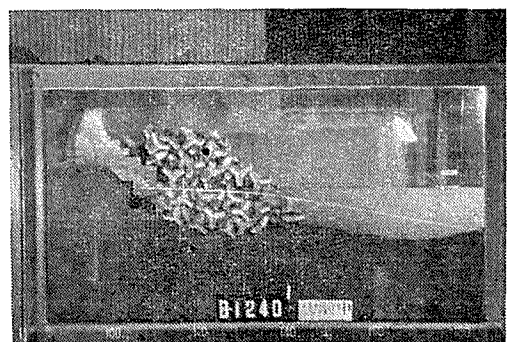
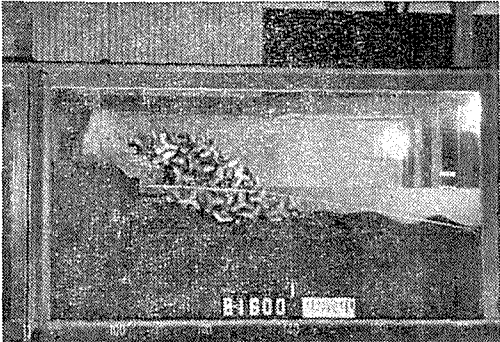


写真-2(e) 嵩上げ後360分を経過



して止水壁が露出する程になり、堤体が不安定な状態におかれると判断される。

(b) 1t テトラポッドのみによる根固め

護岸前面の根固がない場合には、前記の通り洗掘が顕著であつたが、次にテトラポッドを 図-1(a) の所定断面に 積んだ 場合の 沈下状況を 観察してみよう。B-1000 から始まる一連の写真-2 は、波を越してから 10, 30, 60, 120, 240 分、……を経過した時の状態を示すものであり、4 桁の数字の下 3 桁が経過時間(分)を表わしている。またその右肩の小さな数字が嵩上げ回数を示している。これらの写真は何れもガラス面近くの状況を示している為、水槽中央よりも沈下は大きく出ている。図-3 は各部分での静水面よりの深さを図示したものである。これによれば、根固の沈下は最初程顕著であり、ある程度沈下が進行すると、それ以降は非常に緩慢となる。この事は根固最下層のテトラポッドの位置に注目すれば明らかである。根固断面の変化は図-4(a)~(c) の通りであり、これから上記の事が云える。

さて、次にこの沈下の現象を護岸前面の洗掘防止の機能と結びつけて考えると、根固が初期の所定断面に近く維持されている間にも、引き波によつて根固の下面の砂が吸い出され、テトラポッドがその空隙を補うために沈下する。従つて護岸前面の砂の面は根固の沈下が進む限り下降し、護岸前面は露出の傾向をたどるものと思われる。一方根固の沈下は、護岸への防波機能を減ずるため護岸前面の戻り流れが増大し、洗掘は促進されるであろう。これは B-1000 から B-1240 に至る写真によつても納得されよう。しかしながら嵩上げにより最初の防波機能が回復し、またそれ迄の沈下のためテトラポッド根固めと砂との接触面が増大するに従い、引き波の際接触面に沿う動水勾配を減じ、引き波の掃流力が入射波のそれと平衡状態に達する時に、沈下は止まるのであろう。

(c) ブロック上のテトラポッドによる根固め

ここでは図-1(b) の根固め断面に沿つてブロック上に 4t あるいは 1t のテトラポッドを置いて実験を行った。沈下の進行状況は、前記砂面上に直接 テトラポッドを置いた (a) の場合と、写真及び根固沈下图から見た限りでは非常によく似ている。

先づ 4t テトラポッドをブロックの上に置いた場合には、テトラポッドは波によつて動かされることがないから、特定のテトラポッドの沈下はそのままブロックの沈下に対応している。これは写真-3、B-2000~B-2780 及び沈下图、図-5 によつても明らかである。沈下の機構については、前期砂面上のテトラポッド根固に於いて、最下層のテトラポッドの間を砂が抜けることによつて、主として沈下が進行したのに対し、ここではブロックの下面に沿つての流れによつて進行することになる。

また使用したテトラポッドが 4t であるか 1t であるかによる相異は図-6 に示した如くである。この図には波をあてる以前のブロック表面の位置と沈下が充分落ちついた時の位置とを示したものであり、波をあてる以前の高さの不同及び 2 度づつ行つた実験結果のバラツキを考慮に入れても、ブロック上に 1t テトラポッドを使用した根

図-3 根固め及びその前面の沈下と洗掘

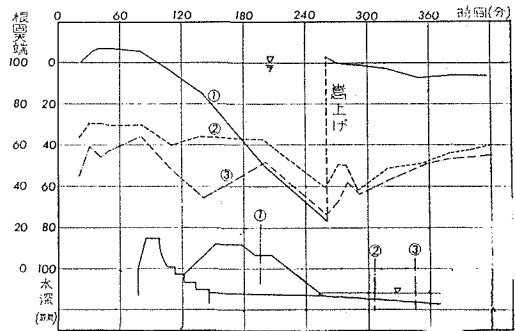


図-4(a) 砂上、1tテトラポッド根固の断面変化

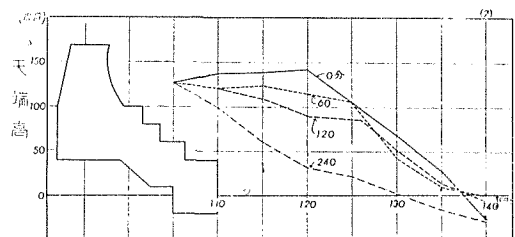


図-4(b) 1回嵩上げ後の変化

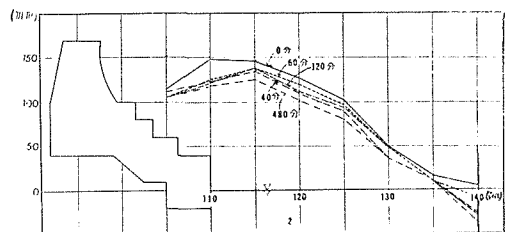


図-4(c) 2回嵩上げ後の変化

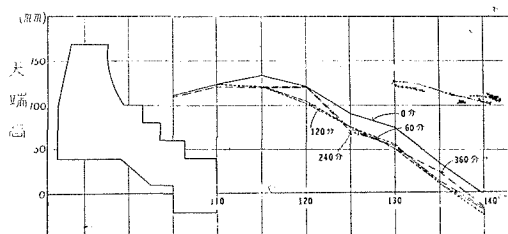


写真-3 (a) ブロック上, 4tテトラポッド
根固, 波を当てる以前

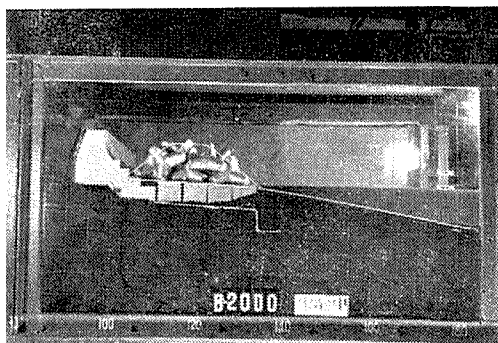


写真-3 (b) 60分経過

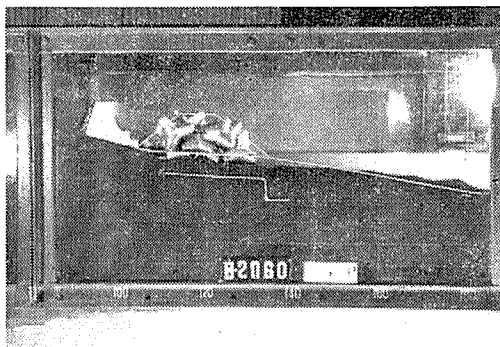


写真-3 (c) 300分経過, 嵩上げ直前

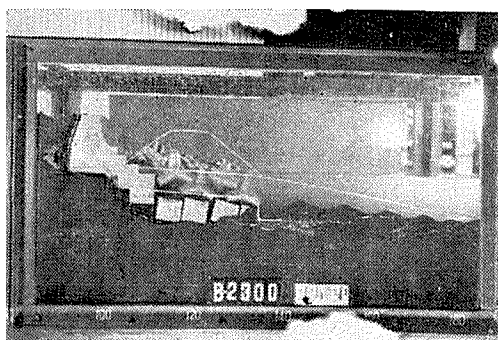


写真-3 (d) 同左, 嵩上げ直後

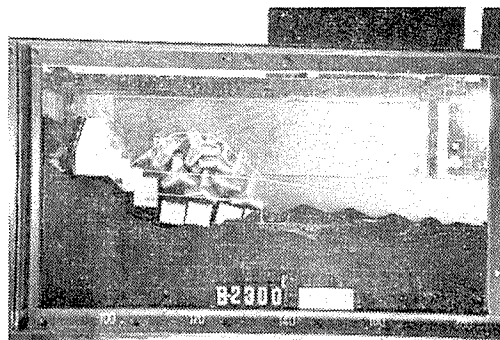


写真-3 (e) 嵩上げ後480分

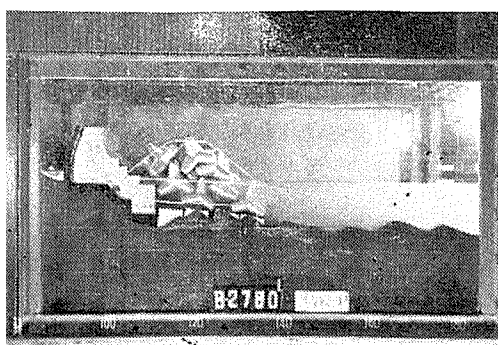
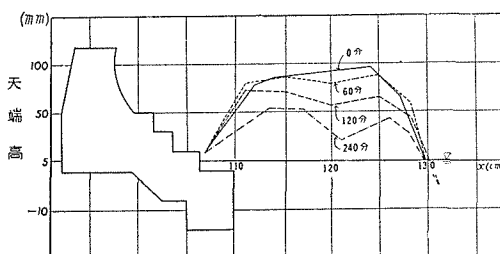


図-5 (a) ブロック上4tテトラポッド
根固の断面変化

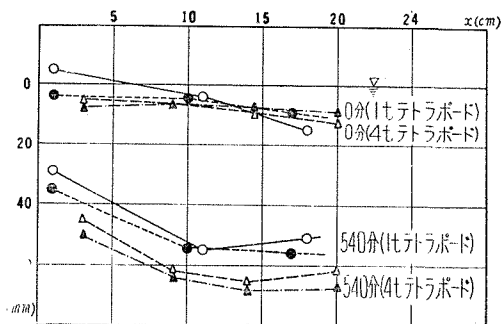
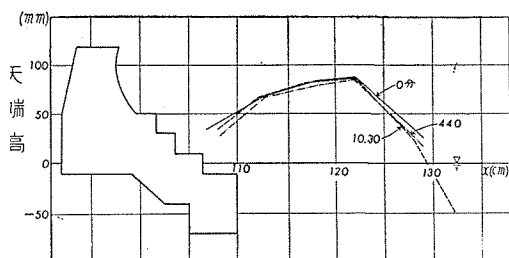


ブロック上4tテトラポッド根固の断面変化

図-6 540分経過時のブロック表面位置の変化

(○印は4tテトラポッド, △印は1tテトラポッド
いずれも2回づつの結果を示す)

図-5 (b) 1回嵩上げ後の変化



固の方が4tテトラポッドを使用したものよりも沈下が大きいと云えよう。この違いは、ほぼ同一の根固断面を形成する場合に、4tテトラポッドによるものの方が根固を越し、あるいは透過して護岸前面に達した水塊が、引く時にはブロック上面に沿って速かに抜け、ブロック下面に沿う流れの強さが若干軽減されることに起因しているようである。尚、図-7、図-8、写真-4はブロック上1tテトラポッド根固の断面変化と沈下、洗掘を示したものである。

図-7 (a) ブロック上1tテトラポッド
根固の断面変化

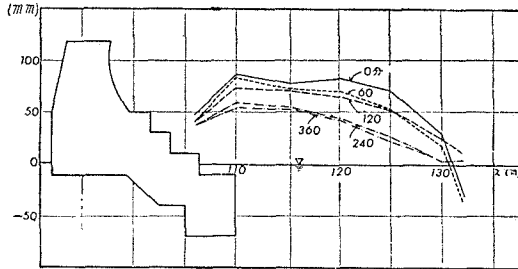


図-7 (b) ブロック上1回嵩上げ後の変化

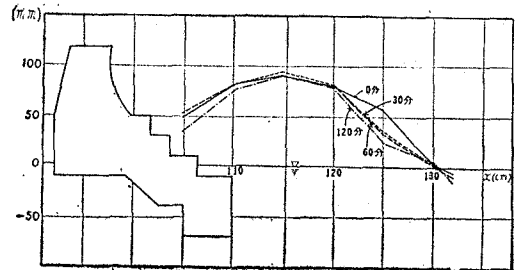


図-8 ブロック上1tテトラポッド
根固に於ける沈下と洗掘

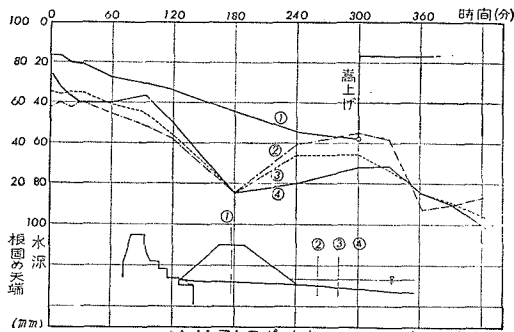


写真-4 (a) ブロック上1tテトラポッド
根固波を当てる以前

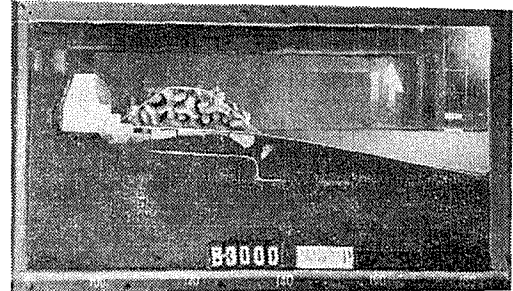


写真-4 (b) 60分経過

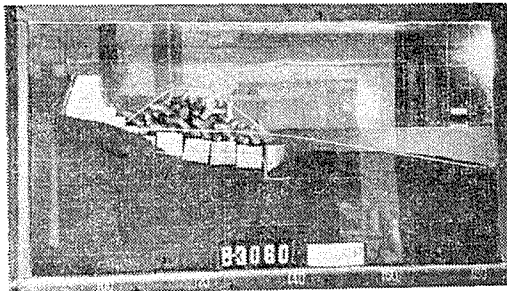


写真-4 (c) 300分経過

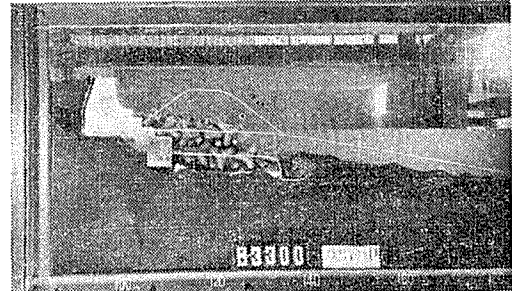


写真-4 (d) 300分経過嵩上げ直後

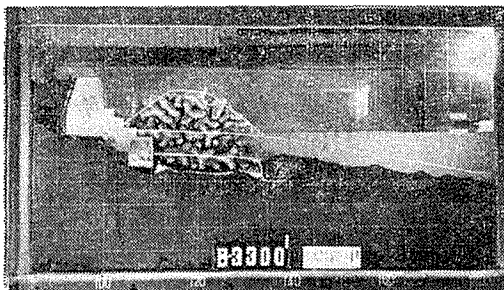
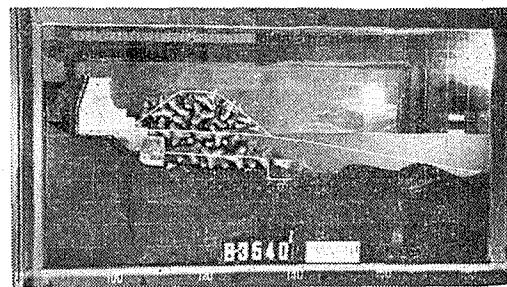


写真-4 (e) 嵩上げ後240分経過



2.4 実験結果に対する考察

新潟海岸においては根固ブロックの沈下による機能喪失に対する補強策として、テトラポッドが採用されて今日に至っている。われわれの実験の結果によれば、

- (1) 砂面上に直接テトラポッドを設置した場合、その根固の沈下は避けられないが、波の規模に応じてある所に落ち付く。従つて嵩上げによつて、計画断面は維持出来ると考えられる。
- (2) 下にブロックがあり、その補強としてテトラポッドを置いた場合にもやはり沈下は進行し、ほぼ(1)の場合と同じ状態に落つく。
- (3) ブロック上にテトラポッドを設置する場合に、同一断面に対しては1tテトラポッドより4tテトラポッドの方が若干沈下量は少い。
- (4) 何れの場合にも最初の計画断面と最終の断面を比較すると単位長あたりのテトラポッド所要量は1:2~2.5位になる。

以上である。

さてわれわれは新潟海岸に採用されている根固方式そのままをとつて考察を進めて来たが、これが果して根固の機能を果たす上に最良の断面形をとっているであろうか。つまり、根固の高さなり、天端幅について更に改良の余地があるのではないかと云う問題に直面した。これについての一考察を次章において試みてみよう。

3. 根固の機能に関する考察(固定床実験)

3.1 実験条件

実験に使用した護岸は図-9に示す如く、移動床に用いた護岸の波返し以下を単純化するために、1:1勾配の斜面とし、その前面に断面の異なる1tテトラポッド根固を設置した。また波返し部分の形状は同じとして護岸の高さは種々に変えた、縮尺は1/25、海底形状は移動床の場合と同様にし、モルタルで固定した。

また水位による根固の機能の相異を見るために、更に水位を1m(模型では4cm)高くした場合についても同様な実験を繰返した。

実験に使用した波の性質は表-1に示す様に変化した。後者は水位を1m高めた時の波である。

3.2 実験施設及び実験方法

実験水槽は移動床の場合と同じである。護岸の高さは3.0、5.0、7.0m(12、20、28cm)の3種とした。各々の高さに対して根固のない時の波の遡上高を測定した。テトラポッド根固の形式としては、底幅を1tテトラポッド、4、6、8列、高さ方向には2、4、6段に積み重ねて同様に波の遡上高さを測定した。勿論4段、6段と云つても文字通り厳密に配列されていない。

次に水位を1m上げた場合について同様な操作を繰返した。

3.3 実験結果

実験によつてえた遡上高 R を、 $H_0/L_0 \sim R/H_0$ により表示したが、図-10、図-11、図-12、は夫々護岸の高さが7.0、5.0、3.0mの場合である。図中 U 、 V 、 W は底幅がそれぞれ4、6、8列であることを示し、その隣の数字1、2、3、は根固の高さが2、4、6、段であることを示している。

図-8、図-9では大半が波返しの影響を受けないので、ほぼ同じ傾向を示すが、図-10の場合護岸の高さが十分でないために根固のない場合には、越波が激しいが、根固をおくとその結果は前2者とはほぼ同じようになる。波返しの効果を若干期待したが、われわれが実験に使用した程度の、即ち一般に実地に用いられている波返しでは

図-9 護岸模型断面

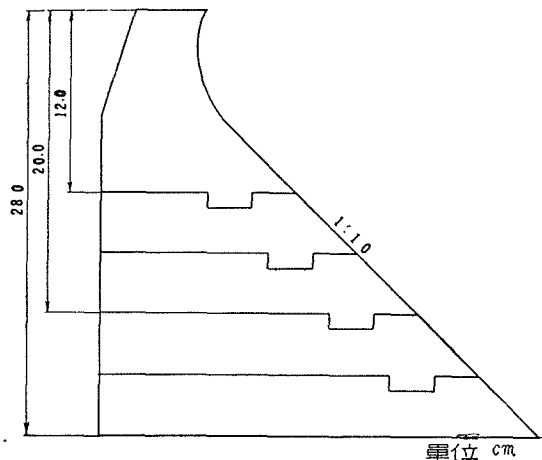


表-1

(1) 平均潮位			(2) 高潮位		
H_0/L_0	H_0 cm	T sec	H_0/L_0	H_0 cm	T sec
0.006	3.0	1.8	0.006	3.0	1.8
0.01	5.1	1.8	0.01	5.1	1.8
0.02	10.1	1.8	0.02	4.5	1.2
0.05	11.2	1.2	0.04	9.0	1.2

図-10 7 m護岸への遡上高

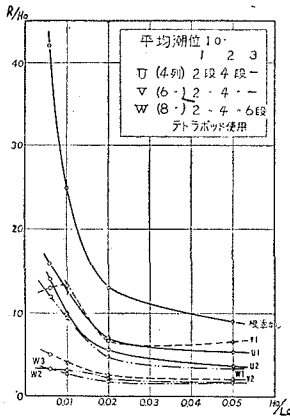


図-11 5 m護岸への遡上高

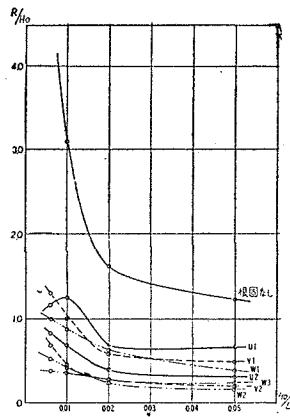
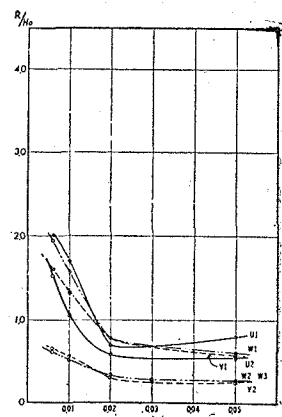


図-12 3 m護岸への遡上高



それ程大きな効果は期待出来ないようである。この事は建設省土木研究所での実験結果²⁾とも、ほぼ一致している。

われわれは特定の海底形状の上に特定の前面形状を持つ護岸を使って実験を行ない、かつ波の遡上現象は完全に Froude 則が適用出来るとの前提に立つて各曲線を求めている。従つて種々の条件の相異による違いや、どの程度の Scale Effect があるかについても考察を進める必要はあろう。例えば波の性質を H_0 , T のみによつて規定しているが、実際には碎波してしまつてから護岸に衝突するのであるから、碎波後の変形が問題になり、これを左右する前面での海底勾配が違えば、遡上高も当然違つて来るのである。護岸前面の法勾配や、粗滑がまた影響しよう。

さて、以上の如くして得た実験結果から判断するに、共通した事項として次のようなものを挙げる事が出来るよう。

- (1) 低い根固を水中にある程度以上延長しても、さして効果がない。
- (2) 水面上にあまり高く出してもその効果は期待出来ない。

(1) については、護岸前面が $1/6$ の急勾配であるため、4, 6, 8 列と 2 段積みめの根固を延長していくと、先端部分は水中に没し、水中に沈んだ部分は防波上効果が少いことを示している。また (2) はある程度以上の幅と高さを持たせても、その断面の割には効果がないと云える。従つてある水位の時には、防波上充分の機能を持った経済的な断面があると考えられる。しかしながらそのような根固でも水位が上昇した場合には防波機能を著しく減じてくることもあると推測される。

次に 1.0 m の水位上昇があつた場合に、同一形式の根固に於いて、防波機能がいかに変化するかを考察するために行つた実験結果が図-13 である。この実験に用いた根固は、6 列、8 列、10 列の底幅上に出来るだけ高く積んだものであり、平均潮位の場合の V2, W3 はこの場合の底幅 6 列、8 列のものに、ほぼ等しいものと思われる。

図-13 と図-10 の V2, W3 の R/H_0 の値と比較検討してみると、例えば $H_0/L_0=0.02$ の場合 R/H_0 が V2

図-13 水位上昇を考慮した 7 m護岸への遡上高

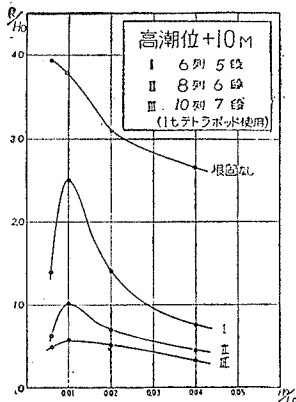
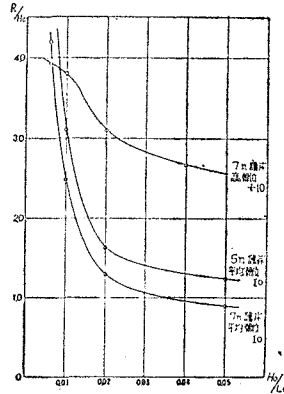


図-14 根固を欠く護岸への遡上高



では 5 倍強に、W3 では約 3 倍になり、1 m の水位上昇による根固の機能低下は著しいことが知れる。また 図-14 は根固のない場合の遡上高を示し、3 本の曲線はそれぞれ平均潮位時に於ける 7 m, 5 m 護岸及び 1.0 m の水位上昇の高潮位時に於ける 7 m 護岸による遡上高をあらわしている。ここにおいても水位上昇時の遡上高は平均潮位時の 2 倍或いはそれ以上に達しており、水位の上昇が護岸に大きな影響を及ぼすことが知れる。

3.4 実験結果に対する考察

本章に於いては根固の機能を護岸に及ぼす波力減殺の面から望める事とし固定床を用

いて底面の条件を単純化し、波の遡上高から各種の比較を行つて来た。前章の考察に於いて述べた様に、新潟海岸で使用されている根固の形状が妥当であるかを判断する目安を得るためにこの実験を実施した。この結果、われわれの様な条件下では 6 列 4 段積が一応経済的に妥当なものであり、従つて移動床の実験に使用した様な根固程大規模にしくともよいのではないかと考えられる。ただし、6 列 4 段積の根固の場合の移動床実験を行うに至っていないので、明確なことは今後の研究にまたねばならない。

本実験によれば根固の設置により波の遡上高は著しく低減し得る事が明らかとなつた。従つて、ある程度テトラポッド根固による波高低下を期待してもよい様である。ただし、根固の沈下により、或いは水位上昇により、その機能は著るしく低下することも念頭に入れておかねばならない。

4. 結 言

護岸の設計施工にあたり、根固をどの様にするかは、極めて重要な問題の一つである。しかしながら、この方面の資料が十分でなく、在来方式に従っているのが現状と思われる。新潟海岸及びその他の海岸で、最近根固上テトラポッドを使用する工法を採用して来て、かなりの成果を挙げて来た。しかしその形状をどの様にとるのが妥当か、未だ明確な基準がない様に思われる。そこで先づ護岸の研究への手がかりとして、根固の問題を取り上げて、現在も猶研究を継続中である。今後は再び移動床に戻つて固定にて得た結果と、沈下の面でとらえて行く予定である。更には在来の捨石による根固、ブロックによる根固とテトラポッドによる根固の優劣の検討を加えたいと考えている。

本研究は新潟県土木部よりの委託によつて行われているものであり、現地資料に関して種々便宜を与えられた各位に深甚なる謝意を表する次第である。また実験並びに資料の整理にあつては、東京大学工学部土木教室港湾研究室員の努力に負う所が大きい。

参 考 文 献

- 1) 石綿知治：テトラポッド。鹿島建設技術研究所出版部，1960 年。
- 2) 佐藤清一，岸 力：海岸堤防の形状特性ならびに陸岸への遡上，第 3 回海岸工学講演会講演集，1956 年 11 月。