

潜堤に関する研究 (II)

——沈下機構ならびに維持——

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

1. 緒 言

潜堤の機能として考えられる要素は第1報¹⁾に示したように、

(1) 潜堤によって波を砕波させ、あるいは一部の波のエネルギーを反射させることにより、堤内水域に伝播する波を減衰させ、これによって海浜に到達する波力を減少させる。

(2) 海浜土砂を移動させる能力をうばい、沖方向に土砂が流失されるのを防止する。
の2つが考えられる。

新潟西海岸においては、急速な海岸欠損の防御対策として、縦堤と潜堤の併用が水理実験の結果採用され今日に至っている。もちろん当初施工されたときより種々と改良補修され今日の形態をとるに至ったが、ここにおいて潜堤がはたして予期された機能を十分に果たしたかを検討するとともに、潜堤の補修維持の上に大きな問題を投げている潜堤沈下の機構を調査研究し、対策を樹立する必要が生じた。

幸いに新潟県において継続実施されてきた、現地観測の豊富な資料は、上記諸問題の解明に有力な材料となる。しかしながら現地における現象の複雑さと観測範囲が限定されているために、十分な資料をうることはきわめて困難である。そこでこれらを補足するために、実験的な研究が実施されている。ここには現在までに得られた結果の概要を説明する。

第1報においては潜堤を海岸に建設したときに、これが海浜変形にどのような影響をおよぼすかについて述べた。使用した潜堤は不透過の矩形壁であり、これは波動水路底に達し、従って堤の下を通しての砂の移動は全くたたれていた。第2報においては堤の沈下に主眼を置き、あわせて海底地形の変動ならびに堤内にての波の性質の変化状況を調べるために、新潟海岸において実際に施工された潜堤の模型を製作し、これらの実験の結果を現地観測の資料^{2), 3)}と対比させ、その妥当性を検討した。

2. 実験施設と方法

実験に用いられた造波水路は延長 17 m、巾 0.7 m で水深 35 cm (縮尺 1/20 の模型) および 30 cm (縮尺 1/40 の模型) とし一方の端に 1/15 勾配の海浜を造った (図-1)。海浜に使用した砂は千葉海岸の砂で、そのふい分け特性を 図-2 に示す。

潜堤模型は新潟海岸にて施工された 1 型、有孔ブロック型の 1/20 および 1/40 の模型 (写真-1, 2, 3) と、テトラポッド潜堤である。これらはいずれも透過性潜堤であるが本実験のブロックには不透過のものをも使用した。実験に使用した波の特性を 表-1 に示す。なおここには Froude 則により現地波に換算したものも記入してある。

各波について無堤時の海浜形状および波高の時間的な変化状況を調べ、これを基準として潜堤設置の影響を観察することとした。海浜部の形状は 1/15 勾配より出発しており、従って海浜は次第に変形してゆくが、かなりの時間を経過すれば、あまり変動をしない状態 (平衡勾配) に近づくといわれる。われわれの実験においても、このような状態に達してから潜堤を設置するのが実状に近いと考えられるが、技術的にもまた時間的にも制約さ

図-1 実験装置

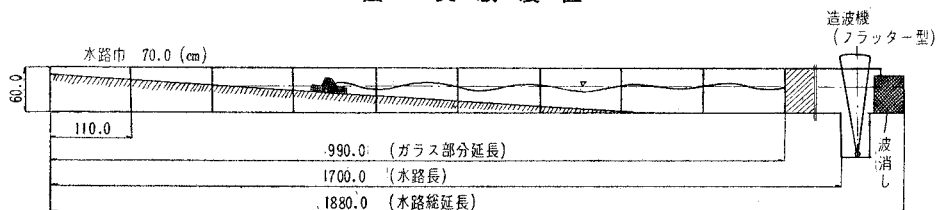


写真-1 逆 T 型潜堤模型 (1/20, 1/40)

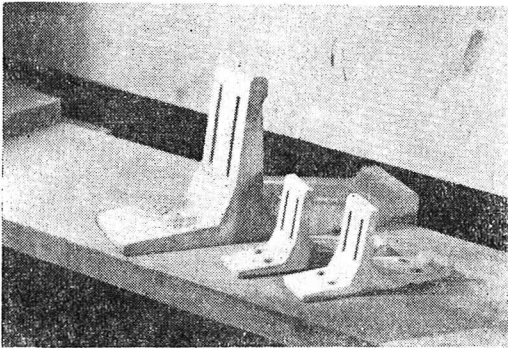


写真-2 有孔ブロック潜堤模型 (1/20, 1/40)

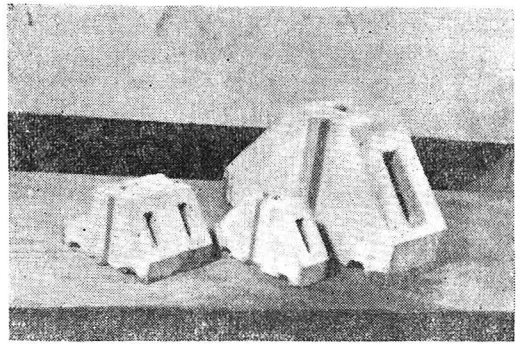


図-2 砂のふるい分け特性

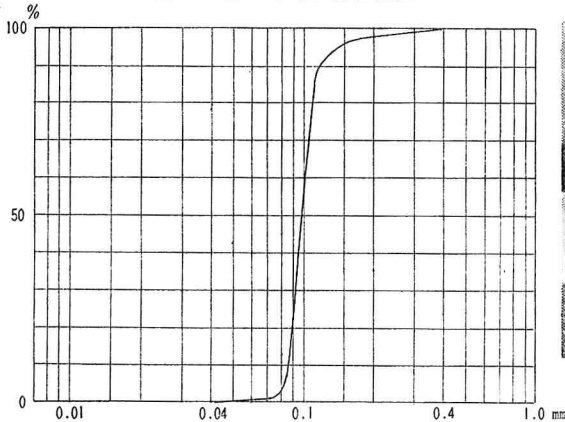


写真-3 有孔ブロック潜堤模型 (1/40)

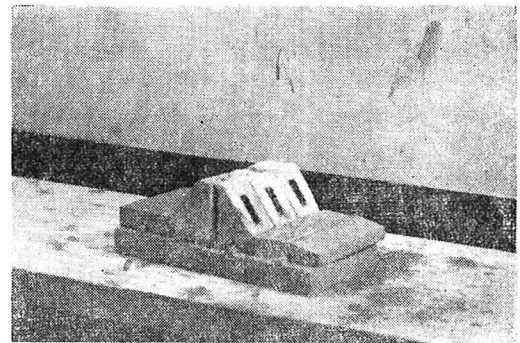


表-1 実験に使用した波

縮尺 1/40				縮尺 1/20				現地波		
波の種類	H_0 (cm)	T (sec)	H_{30} (cm)	波の種類	H_0 (cm)	T (sec)	H_{35} (cm)	H_0 (m)	T (sec)	H_0/L_0
1	8.3	1.74	8.2	4	—	—	—	3.26	11.0	0.018
2	8.8	1.11	8.0	5	—	—	—	3.50	7.0	0.046
3	3.9	1.23	3.6	6	7.8	1.74	8.7	1.57	7.8	0.017

れ、かつ潜堤の沈下は比較的短時間に起り、その後はあまり活発に沈下しない事実ともあわせ、実験継続時間は3時間とした。その間最初は5分ごとに、最後は30分ごとに海浜形状、沈下量、波高変化の観測を行った。潜堤先端高は最初静水面に一致させるか静水面上 50 cm (現地) とした。

波形の観測および堤内での平均水位上昇量を決定するために抵抗線式波高計を使用した。種々工夫を加えヒズミ計を利用してペン書きオシログラフまたは電磁オシログラフに記録する方式をとった。図-3 に示すのは、これまで当実験室で使用してきた抵抗線式波高計の回路図であるが、これがヒズミ計のゲージ結線方式と同じであることに着目し、ヒズミ計の発振部および増巾部を利用すれば、従来のものよりさらに感度がよく、かつ自由に感度の調整ができると考えて試作した。

上記ヒズミ計に使用する標準ゲージの

抵抗値は 120 Ω であるが、水中に設置した状態の波高計の抵抗値は約 5 k Ω もある。そこで 図-4 (a) に示す

図-3 波高計回路図

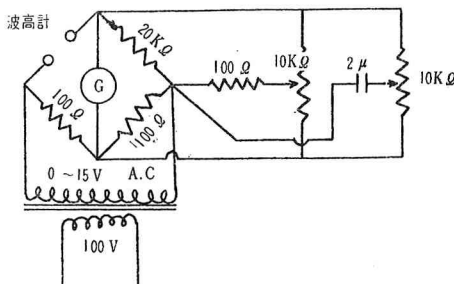


図-4 (a) 波高計

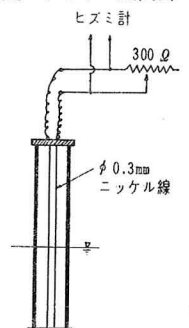
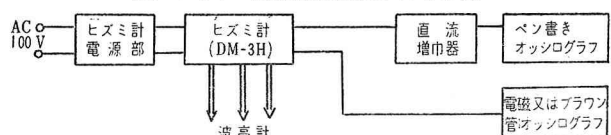


図-4 (b) 波形測定装置ブロック図



ようにバランス回路をかねて $300\ \Omega$ の可変抵抗を並列に接続し調整をとることとした。水路の水温による電流変化も多少あるが、これを無視できない場合にはこのほかに温度補償回路を加える必要がある。図-4 (b) は装置のブロック図である。この記録装置による波高計の Calibration を図-5 に示す (写真-4)。

図-5 波高計の Calibration

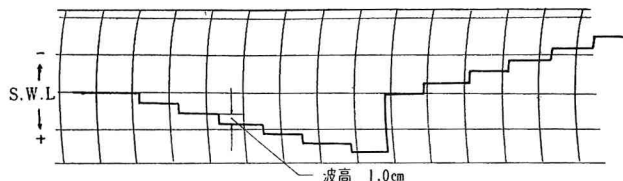
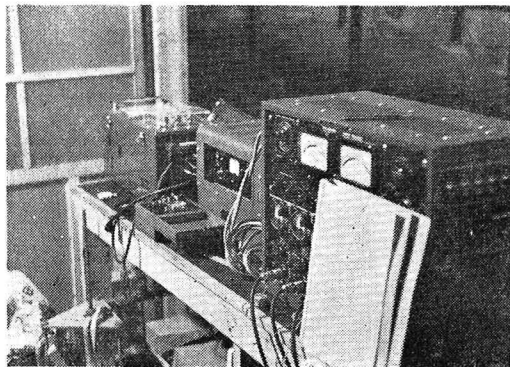


写真-4 測定装置



3. 実験結果と考察

実験はなお現在進行中であり、詳細な討議検討をするまでに至っていない。ここでは今までに得られた結果を報告するにとどめる。

3.1 潜堤の浸食防止機能

(1) 潜堤内水域における波高変化 前述のごとく無堤、有堤いずれの場合にも平滑に $1/15$ の勾配にならしたのちに波を起し、海浜ならびに波高の時間の経過にともなう変化状況を測定した。まず潜堤を設置したときの各地点での波高 H' と無堤時の波高 H との比 H'/H を求めたが、その一例を 図-6 および 図-7 に示した。これから明らかなように必ずしもこの比 H'/H は 1 以下とは限らず、場所によっては 1 以上となることがわかる。また潜堤の沈下にもなう波高比の増大が認められる。これは潜堤による強制砕波の機構ならびに砕波帯内の波の特性に起因すると考えられる。通常波高減衰率をもって潜堤の機能の尺度と考えているが、上記の結果から、その波高の測定方法には問題がある。

(2) 堤内水域における海浜変形 観測時間が短かったために十分に堤の存在による海浜変形を比較検討することはできないが、汀線の前進、後退、前浜勾配の変化状況を観察した。一般に潜堤の設置により汀線の後退の速度を軽減するか、前進せしめる場合が多く、また前浜勾配は堤を置かなかった場合に比して急勾配になることが多い。これは潜堤による波力の軽減に起因すると思われる。波高は前述のごとく必ずしも無堤時より低くなるとはかぎらないが、堤のかく乱による短周期波の発生にともない、波のエネルギーが散逸しやすくなるのではないかと推測されること、汀線付近での最終砕波の規模の相違等をも考慮して研究せねばならない。

堤内部の海浜の変形過程を無堤時、有堤時について比較して見ると、時間的な鉛直変動量の規模は堤の存在により、かなり軽減される。ただし堤の付近は後述のごとく砂の移動が活発になり変形は大きい。

図-6 有堤時と無堤時の波高比

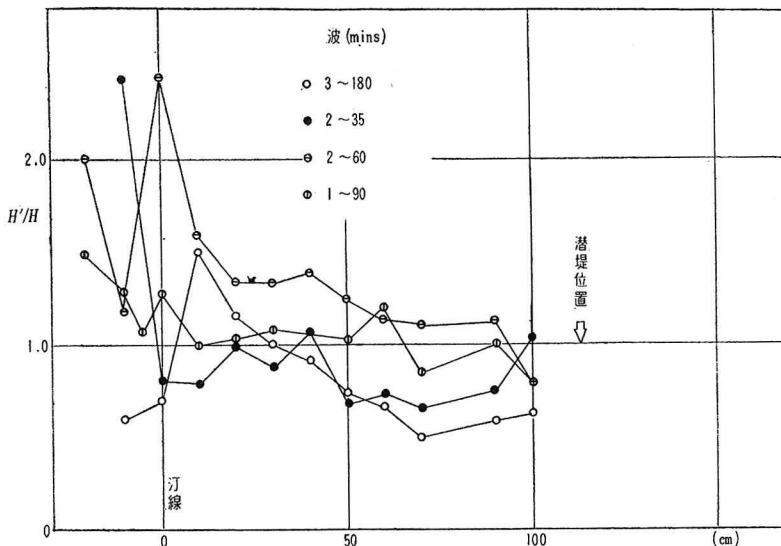
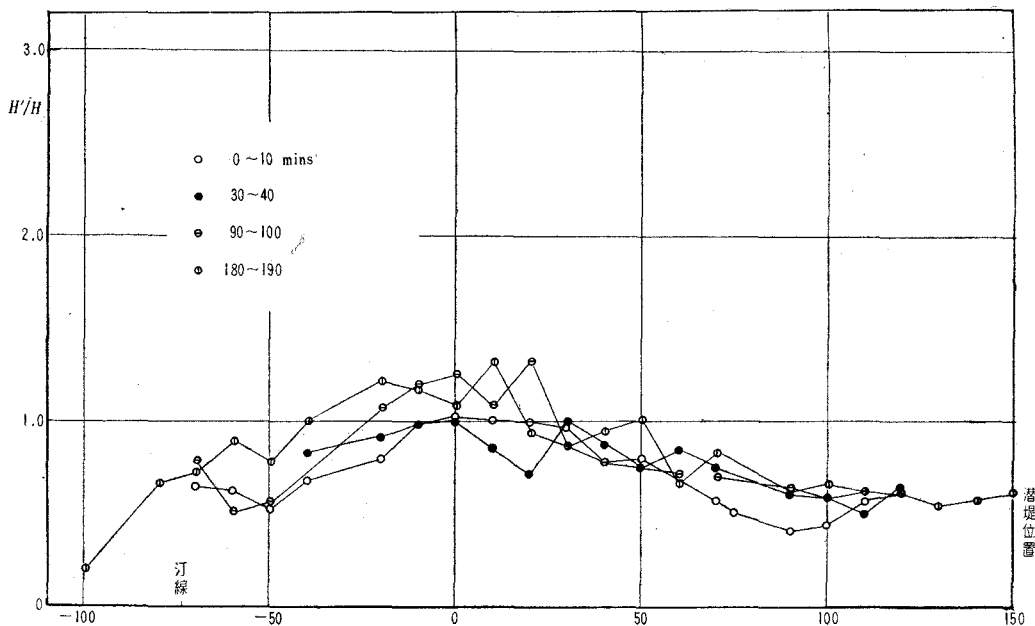


図-7 有堤時と無堤時の波高比, 波 6, Ⅰ型潜堤



3.2 潜堤の沈下機構

潜堤の沈下はいかに起るのであろうか。これについては, a) 洗掘による沈下, b) 堤体の波によるゆり動かしによる砂中へのめり込み, および c) 堤下面に沿っての砂の移動, 流出にともなう沈下, の3種が考えられる。まずいずれが根本的な原因であるかを観測してみた。

(1) 堤内水位上昇 図-8は沖, 堤内での波形の記録を示している。これからも堤の近くはかく乱が大きく, それが次第に波形を整えてゆく模様が見られることと, 堤内での平均水位がいちじるしく上昇していることを明らかに示している。われわれが固定床にて実験した結果⁹⁾によると不透過堤の高さと設置水深の比 h/d が 0.7 以下ではほとんど水位の上昇が認められないが, この比が 0.7 以上になると急激に水位の上昇が起ることを知った。図-9には水位上昇量の時間的な変化を示す。

(2) 潜堤の沈下量 上記のように堤がほぼ水面, あるいは水面上にある場合にはかなり顕著な水位上昇が堤内に生ずる。しかも堤側に波の谷がくれば, その瞬間かなりの水位の差を生じ堤を越える越流が見られるとともに, 堤の下面に沿っての砂の堤内より堤外へ向っての非定常な運動が認められる。この運動もまず堤ブロックのすき間から開始され次第に拡がってゆくのではないかと推測される。このようにして次第に堤の沈下が進行してゆく。

写真-5, 6, 7, 8, 9 および 10 は有孔ブロック堤, Ⅰ型ブロック堤およびテトラポッド堤の沈下の状況を示している。断面各ブロックの沈下の状況は, ブロックの積み具合等によると思われるが一律でない(図-10)。そ

図-8 波形記録 (有孔ブロック堤, 縮尺 1/40)
波 1 (10分後)

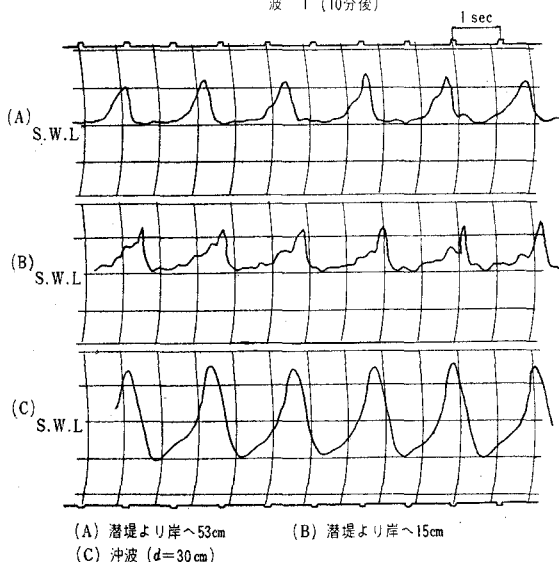
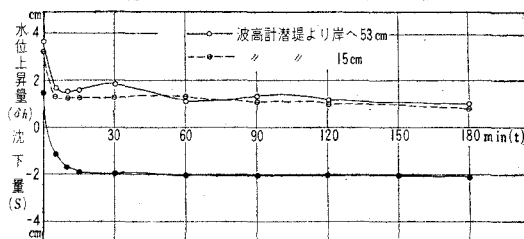
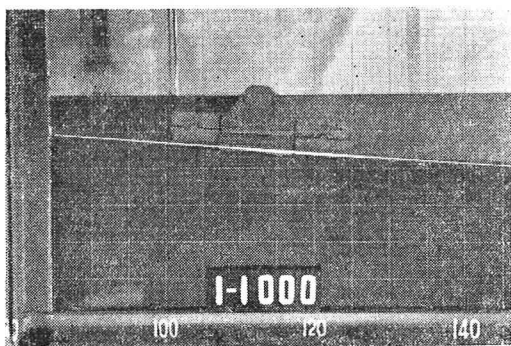


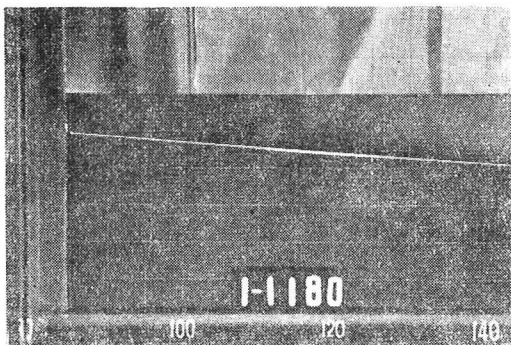
図-9 水位上昇量並びに沈下量の時間的な変化
(波 1, 有孔ブロック堤, 縮尺 1/40)



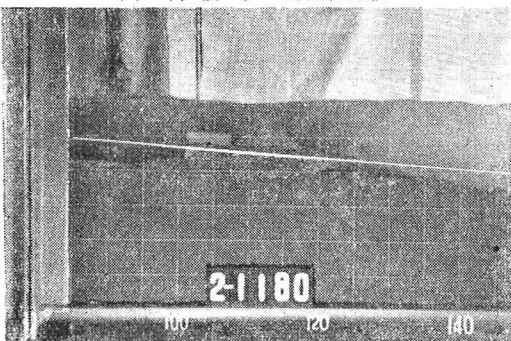
写真—5 (a) 有孔ブロック堤
(1/40), 波 1, 開始前



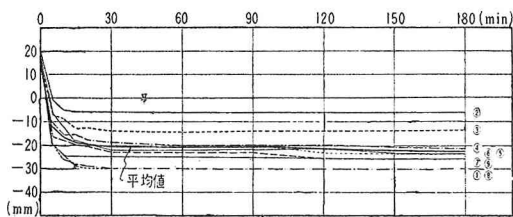
写真—5 (b) 有孔ブロック堤
(1/40), 波 1, 3 時間経過後



写真—6 有孔ブロック堤
(1/40), 波 2, 3 時間経過後



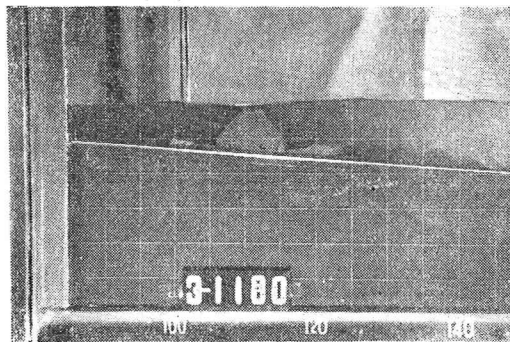
図—10 各ブロック沈下状況図
(波 1, 有孔ブロック堤, 縮尺 1/40)



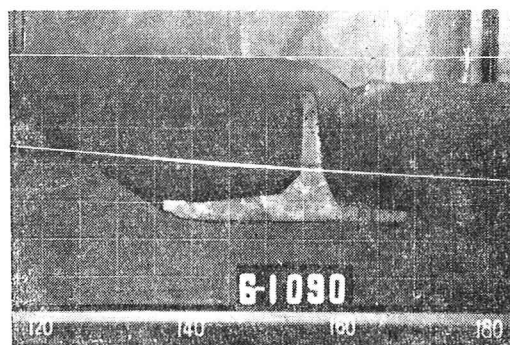
ここで平均値をもって沈下の時間的変化と考え比較を行うこととした。図—9 を見ても明らかなごとく沈下量と水位上昇量とは密接な関係を持っている。図—11 には波

による違いを示すが、Steepness の大きい波ほど、また波高の大きいほど沈下が顕著である。各種の構造による比較を行うまでに至っていないが、テトラポッド堤の沈下は他に比して少ないようである。

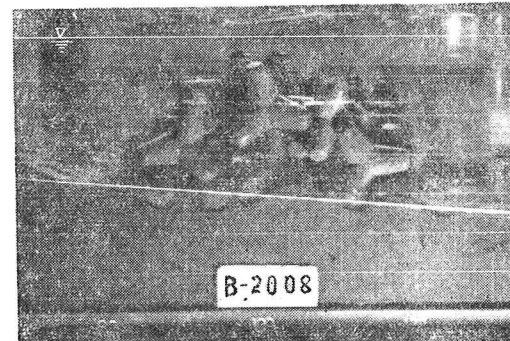
写真—7 有孔ブロック堤
(1/40), 波 3, 3 時間経過後



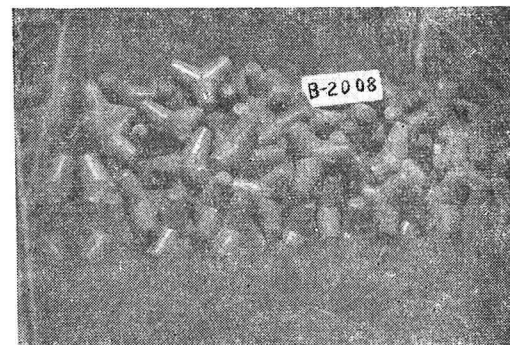
写真—8 上型ブロック堤
(1/20), 波 6, 1 時間 30 分経過後



写真—9 (a) 4 t テトラポッド堤
(1/20), 波 6, 2 時間 30 分経過後



写真—9 (b) 同 上



さてこの沈下の機構を考察してみよう。ある時間の堤面に沿っての動水勾配が限界値を越えれば、砂は動かされる、従って水位差が同じであれば底の長さが短い場合ほど砂はよく動かされる理くつになる。沈下の進行にともなって次第に堤内の水位上昇は減じ、かつブロック堤底面との有効接触長は増加するために、砂は次第に動かされにくくなり、ついにはほとんど変化しない状態に落ち着いてゆく。このようにしてブロックの散乱を生ぜしめない波によっても沈下は生じてゆくことが明らかになった。波が大きくなると前面のブロックが前方へずり出し、あるいはかみ合わせがゆるみ、洗掘も相まって一そう沈下を促進せしめる結果となる。この違いは 図-11 に示したとおりである。

さてもう少し詳細な考察を進めてみよう。このような Piping 現象に対しては Terzaghi の研究、また最近では栗津⁵⁾の研究がある。すなわち Piping 現象を起す限界の動水勾配はそれぞれ次のように表示される。

$$\frac{H}{L} = \frac{S-1}{1+\lambda} \quad (\text{Terzaghi})$$

$$\frac{H}{L} = 1.689 - 1.786 \lambda \quad (\text{栗津})$$

ここに H は水頭差、 L は有効水平長、 S は砂の比重、 λ は砂の空けき率である。いま $d_m = 0.1 \text{ mm}$ であるから $\lambda = 0.52$ と仮定すると限界動水勾配 H/L は大体 $0.76 \sim 1.09$ という結果をうる。つまり水頭差有効水平長の $76 \sim 110\%$ あれば砂は動き出すという結果になる。もし有効水平長として堤の底面長をとれば非常に大きな水頭差を要求することになり実験の状況を説明することはできない。しかしこの限界動水勾配の求められた実験とは異なって、われわれの実験ではブロック積みがいわれているためブロックの継目のように透水に対して大きな弱点となる場所が存在する。従って透水速度も場所的に見て平均の速度からの大きな偏差が存在している。そのために Terzaghi や栗津の公式から考えられる限界動水勾配よりもはるかに小さい動水勾配でも、局部的には限界状態に達するのであろう。

沈下に直接関係するのは堤の底面と砂の接触面の付近での砂移動であるが、沈下の初めの間は底面近くの継目でも盛んに透水があり、ここから砂が洗い流される。しかし沈下が進むと底面は砂中に没して底面近くの継目には次第に砂がつまってくる。このようにして底面近くの弱点が上に移動してくることによって沈下速度は下がってくるのではないと思われる。

沈下の実験に関する相似律については、水深、堤の寸法、波高、岸側水位上昇などの縮尺が一定に保たれると仮定すると、平均動水勾配は模型と原型で変らない。従って透水速度は砂の粒径や、ブロックの継目寸法などできまってくる。もし砂の粒径が模型と原型で変らないものとする、砂の中での透水現象については相似が保たれていることになるが、継目からの透水は原型の方が大きいので、やはり原型の方が砂の移動は盛んであるという結論になる。しかし岸側の水位上昇は模型の場合には誇張されやすい。つまり現地では三次元の拡がりがあり、横方向の流れとなって水位上昇は模型のように大きくないと考えられるから、ただちに量的に結びつけることはむずかしい。以上のような事情からと推測されるが $1/20$ と $1/40$ の縮尺の模型の沈下量から現地に換算した値は現在までの数少ない実験からは必ずしも一致した値をえていない。

写真-10 (a) 2 t テトラポッド堤
(1/20), 波 6, 2 時間経過後

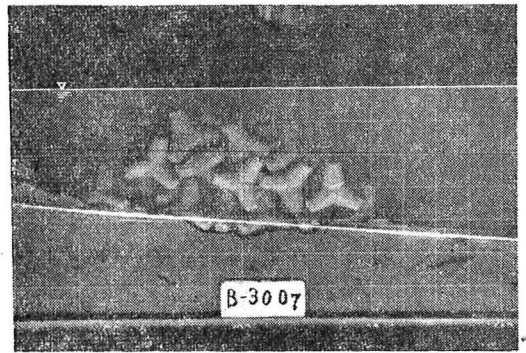
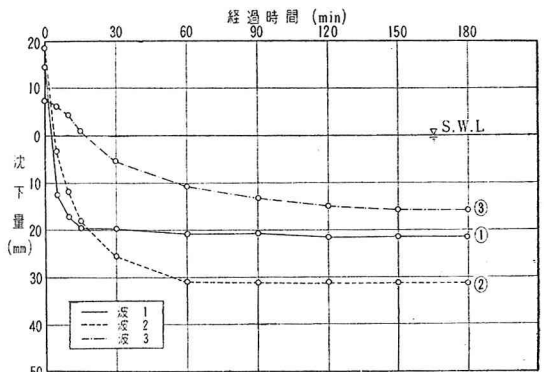


写真-10 (b) 同 上



図-11 波別沈下量変化図
(有孔ブロック堤, 縮尺 1/40)



では現地での実状はどうであろうか。新潟県において昭和 29 年以降 33 年までの測量結果(の平均値)をプロットしたのが 図-12 である。場所によっていちじるしい相違が見られ、中には天端水深が 3 m にも達しているものがある。これらの結果を調べてゆく場合に、われわれには地盤沈下の影響も見逃すことはできない。そこで昭和 29 年を基準として B.M. の変化量をとって比較した。あくまで沈下の平均値としての考察であるが各年ごとの傾斜を比較していえることは沈下は大体昭和 32 年に終り、それ以降は主として地盤沈下の影響で下がっているのではないかということである。

昭和 33 年度においてテトラポッドによる補強が実施され、現在はあまり下がっていないようであると聞くが、潜堤それ自体の機構としての沈下は一応おさまっているのではなからうか。われわれの実験結果からも水面下 0.60~1.20 m くらいは沈下するものと推定される。

現在までの段階では現地で用いられる透過性の可否、沈床の作用について論ずることはできない。また上型ブロック堤については現地では杭打ちが行われているが、これも今後の問題であるが、かえって杭があるために底面が抜けるおそれがあるのではなからうか。

最後に補強、補修の問題であるが、テトラポッド堤の沈下が他の堤に比して小さいようである点からも、波力により散乱を受けない重量のテトラポッドをもって堤の形状を保つのは有効のように思われる。

4. 結 言

潜堤の機能について各方面からの検討を加えてきたが、研究は現在なお進行中であり、当初の目標を達成するには至らず残された問題は多い。以下に研究成果の概要を述べれば、

(1) 潜堤の波減衰機能の解明にはまだ至らないが、種々の方面から検討した結果は、潜堤はその機能を有効に発揮しうる構造物であると考えられる。

(2) 潜堤は過去においてはその水理的な機能、例えば波高減衰率からのみ決定設置されたが、潜堤の築造によって海浜部の形状をいちじるしく変更され、かつ沈下というまぬがれがたい現象をとまなうことを考慮しなければならぬ。

(3) 潜堤の沈下はある限度に達すれば落ち着くであろう(ただし地盤沈下の影響は除く)。その補修、補強には、テトラポッドによるのが適当と思われる。

実験並びに資料整理は本学職員 手賀 啓、布川尚子、本間久枝並びに大学院学生 高 隆二の諸氏により行われた。ここに記して感謝の意を表する。なお本研究の最初の部分は文部省科学研究費の補助を受け、その他の部分は新潟県よりの委託研究の一部をなすものである。

参 考 文 献

- 1) 本間 仁・酒匂敏次：“潜堤に関する研究”，海岸工学講演集 1958.
- 2) 白石直文・沼田 淳・長谷直樹：“潜堤の効果について—新潟海岸の現場の観測による—”，海岸工学講演集 1958.
- 3) 新潟県信濃川工事事務所：“潜堤沈下状況図”，1959.
- 4) 堀川清司・鯨子 漁：潜堤に関する実験的研究，土木学会第 12 回年次学術講演会，1957.
- 5) 栗津清蔵：洗掘機構についての基礎的研究，学位論文，1957.

図-12 新潟潜堤沈下状況

