

直立防波堤の洗掘災害

市 川 武*

1. はしがき

荒海に面した海岸に築造される防波堤は主として大型の函塊により建設されるのが通例である。駿河湾に構築されている防波堤はすべてこの大型函塊堤であるが、浜勾配の急な砂浜海岸のために、用宗漁港、大井川港、蒲原港（日本軽金属）がそれぞれ洗掘による災害を受けている。

この報告は田子浦港防波堤の洗掘状況を主体として、昭和 40 年 9 月 24 号台風の被災および復旧工法について、洗掘状況を模型実験により調査したものである。

2. 田子浦海岸の自然概況

田子浦海岸の波、海岸性状および防波堤については別に報告してある^{1), 2)}。駿河湾は富山湾と並んでわが国の

図-1 田子の浦港平面図

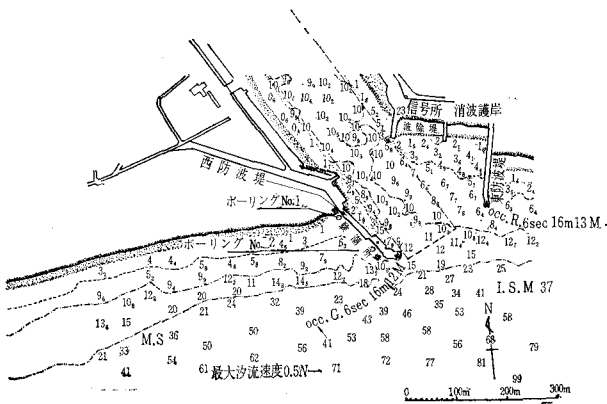


図-2 (a) 海岸断面図 No. 5

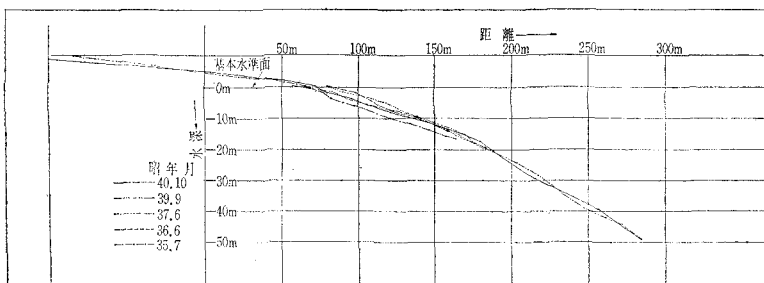
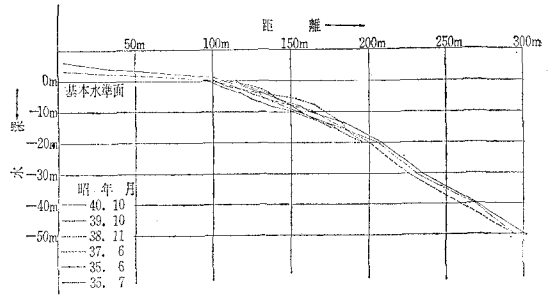


図-2 (b) 海岸断面図 No. 9



海湾では、最も深いものであり、その最深部は 1500～2000 m もあり、1500 m までの平均海底勾配は約 1/10 できわめて急傾斜な砂浜海岸であり、さらに駿河湾が南西に向って開放状態にあるため、台風通過経路によってはきわめて強大な波浪に浸される場合が多い。

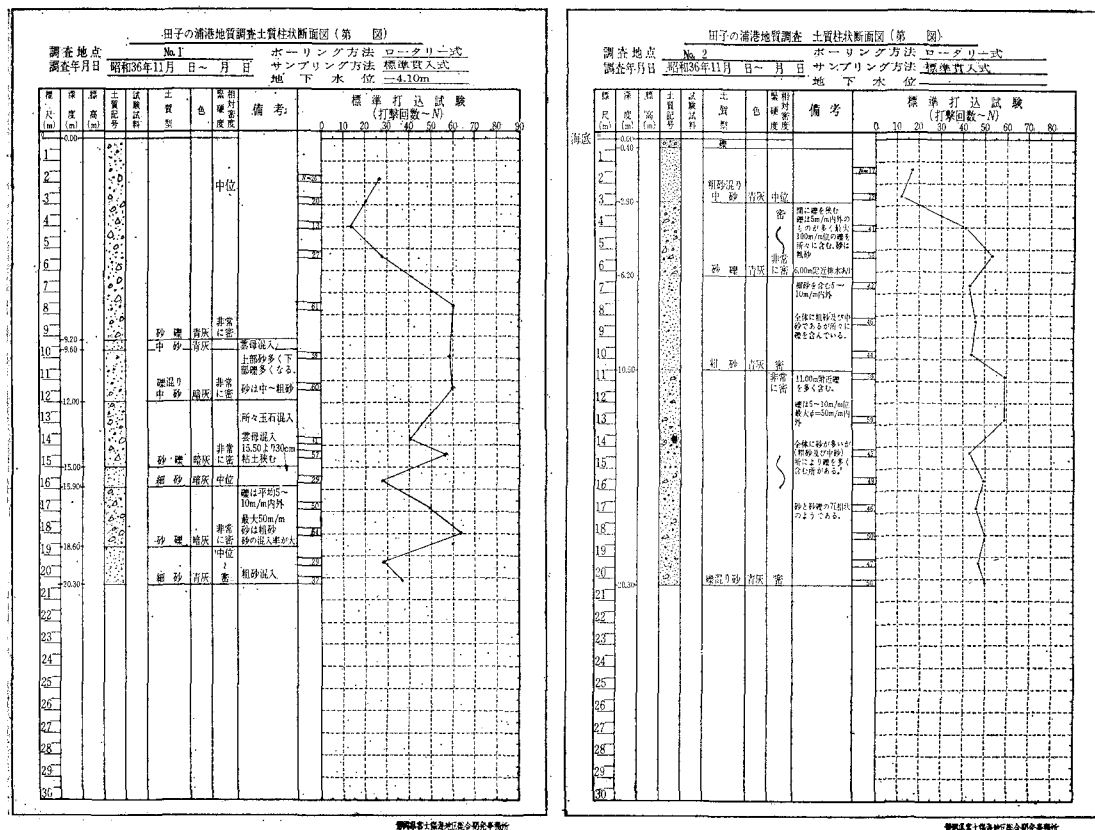
図-2 は昭和 37 年から昭和 40 年までの海岸断面の変化を示すものであるが、港口より西 500 m の No. 5、港口より西 100 m の No. 9 についてのみ示している。No. 5 については、過去 4 年間に大きな変化はないが、No. 9 の防波堤近傍においては防波堤の影響から -15.0 m 以浅が 2.0～3.0 m 浅くなっている。また -15.0 m 以深においても水深の変化が見られるが、この付近は工場からの排液により沈殿物が大量にあり、その層厚約 2.0 m で台風時等の大波により、沈殿物に移動が生じ、そのため深さに変化が生じたもので、砂地盤における変動は少ないものと考えられる。この断面図は汀線から -15.0 m までの勾配が 1/7、-15.0 m から -50 m までの底勾配は 1/3～1/4 と非常に急な勾配であることを示している。

つぎに底質粒径であるが、浅部 -5.0 m 付近までが、5.0～50.0 mm の砂礫であり、-15.0 m 付近で 2.0～3.0 mm の粗砂で深くなるにしたがって粒径は小となっている。

3. 地質調査による洗掘地盤の推定

* 正会員 静岡県富士臨海地区総合開発事務所長

図-3 土質柱状図



柱状図は西防波堤における(平面図対比)ものであるが、①洗掘を受けていない海底地盤の相対密度は洗掘を受けたために粒子間げきを増し相対密度の減少を生じていることが予想される。そのために標準貫入値は原地盤のそれより低下している傾向があり、少なくとも砂質地盤ではそのことが比較的明瞭に表現されているのではなかろうか。②波浪による水の攪乱作用により砂礫ないし砂層に含まれる細粒土(シルト、粘土)は洗い流され、比較的清浄な堆積状態を示しているのではなかろうか。この2点について柱状図より推定すると、No.1 測点においては、①の考察結果で6.0m、②で9.6mが推定され、No.2 測点においては、①の考察結果で5.0m、②で6.2mが推定される。

4. 過去の台風と伊勢湾台風による防波堤前面の洗掘

(1) 過去の台風

過去において田子浦海岸に來襲した大波について表示したものが表-1である。またこの台風の通過径路を図-4に示しているが、台風は第二室戸台風(この台風は田子浦海岸に大きな影響はおよぼしていない)を除いてはすべて北緯30°線において、潮岬南方から西300kmの間の海上を通過していることが見受けられる。表-1のうち実測波記録のないものについては推算値のみを示している。これらの台風のうち、大正6年9月、昭和33年9月狩野川台風、昭和34年9月伊勢湾台風お

表-1 過去の台風

台 風 名	日 時	接近時の 台風中心 示度	実 測 波		ウィルソン推定波		宇野木波高	備 考
			波高	周期	波高	周期		
大 正 9 年 9 月	30 日 24 時	952mb			9.5m	16.6秒	11.0 m	
台 風 テ ス	昭和28年9月25日21時	970			9.1	15.6	7.0	
台 風 ア リ ス	昭和33年7月23日7時	975	6.4 m	14.5秒	6.6	11.1	7.0	テトラ防波堤破壊
台 風 ヘ レ ン	昭和33年9月18日5時	955	7.0	17.4	7.7	16.0	9.0	
狩 野 川 台 風	昭和33年9月26日18時30分	945	8.0	17.0	10.4	17.5	10.0	
伊 勢 湾 台 風	昭和34年9月26日21時30分	950		17.0	10.5	17.0	9.0	
第 二 室 戸 台 風	昭和36年9月16日15時	940	3.95 (17時)	13.5	4.7	11.8	6.4	
台 風 24 号	昭和40年9月17日23時	955	9.20	13.8	12.5	17.0	11.0	防波堤被災

よび昭和40年9月の24号台風は波高8.0~9.0mで、この海岸に最も影響大なるものであった。これらの台風のうちで防波堤に直接被災をおよぼしたもののあるいは防波堤前面洗掘量の明白なものは昭和40年24の号台風と昭和34年の伊勢湾台風である。

図-4

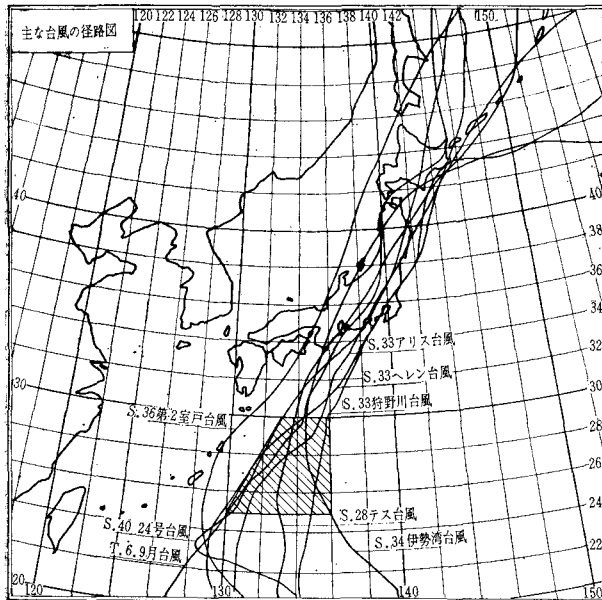


表-2 伊勢湾台風

推算波	時刻	昭和34年9月 26日18時	昭和34年9月 26日20時	昭和34年9月 26日22時	昭和34年9月 26日24時	昭和34年9月 27日3時
ウイルソンによる推算波	波高	8.5 m	10.3 m	10.5 m	9.8 m	7.6 m
	周期	16.2 秒	17.3 秒	17.0 秒	16.5 秒	10.3 秒
修正波	波高	6.5 m	7.8 m	8.0 m	7.5 m	5.8 m
	周期	16.2 秒	17.3 秒	17.0 秒	16.5 秒	10.3 秒

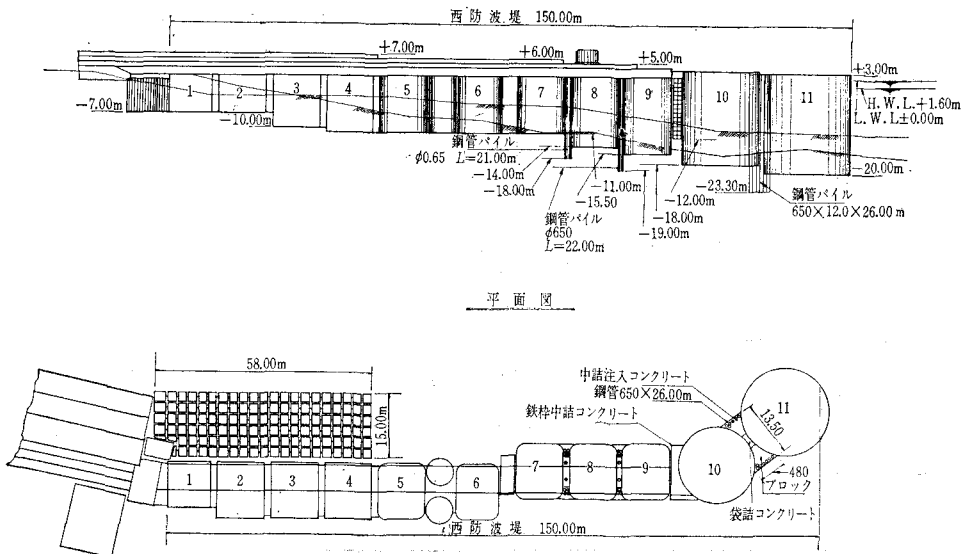
(2) 伊勢湾台風の洗掘

この台風は昭和34年9月26日18時に紀伊半島に上陸22時名古屋の北部を通り飯田付近に達したものである。

実測波高は波高計の故障で得られなかったので推算波を表-2に示している。表中修正波高は最大波を示す22時における海岸遡上高、周期と狩野川台風における海岸遡上高、周期の類似の関係および、ウイルソン推算波の両台風の類似を合せ考慮して、22時における波高を狩野川台風時の実測波高8.0mと同一とし、他の時刻の波については単純に同率で減少せしめたものである。表-2の修正波高によると8.0mに近い波高は約5時間、6.0m波高の波は10時間田子浦海岸に來襲したものと思われる。

西防波堤は前述のごとき急傾斜な海底変動のいちじるしい荒海の海岸に構築される関係で空気ケーソン工法で大塊を海底面に沈設したものである。このケーソン沈下工事中伊勢湾台風に襲われたが、この時防波堤工事は第3号ケーソン(図-5 西防波堤縦断面図)は-10.0mまで沈設し終った状態であり、中詰コンクリートおよび底部コンクリートは打設前であった。台風前の第3号ケーソン前面水深は-3.4mであり、この状況で台風風の波浪を受けたのであるが、第3号ケーソンの変位は見られなかった。しかしながら第4号ケーソンの沈設にあたり-8.5m付近で、昭和33年7月台風アリスにより崩壊したテトラポッド防波堤の残留物が数個発見された。テトラポッドはその形状からまたコンクリート重量から推しても砂中深くは沈埋しにくいものであるが、その発掘さ

図-5 西防波堤平面図および断面図(縦断面図)



れた位置から -8.5 m すなわち海底から約 5 m 洗掘されたことが明らかであり、また第 3 号ケーソンの変位の無かったことから 6.5 m 以上の洗掘が無かったことも明白である。

5. 昭和 40 年 9 月台風 24 号と防波堤洗掘被害およびその対策

(1) 台風 概 況

この台風は中心の通過経路が伊勢湾台風よりさらに東側を通過し、伊勢湾の南から、甲府、前橋を抜けたもので、中心気圧は 955 mb で、伊勢湾台風に匹敵するものであった。この台風による波の時間的変化は表-3のごとくである。

波高実測記録は 17 日 23 時で切れているが、これは水圧式波高計のコンクリート製台座 (2.0×2.0×1.0m) が流出したため記録不能になったためである。この台風はウイルソン推算波高も考慮に入れるならば 8.0 m 以上の波が約 3.0 時間継続したものと思われる。

台風 24 号の特異性は、前記台風と比較して、周期が 14 秒という短いものであった。本海岸においては通常は波高 8 m 級の場合の波は、16 秒~17 秒の周期である。

(2) この台風による洗掘被害状況と原因考察

被害の主なものは、④ 7 号ケーソン (図-5 西防波堤縦断面図) の西側が洗掘され堤体は西側が 1.5 m 沈下して海側へ傾斜した。これによると台風前の地盤線とくらべて堤体西側の土砂洗掘量は 6.5 m であった。⑤ 10 号ケーソンの海側 (南西) 前趾が 2.5 m 洗掘沈下し、海側へ傾いたものでその傾斜は 13° であった。⑥ 10 号ケーソンの取合継手部の 9 号ケーソン間および 11 号ケーソン間の西部が破壊した。

防波堤海側添の洗掘状況は台風中は破壊部分以外は予想できないが、台風通過直後については図-5 の西防波堤縦断面図および図-6 の防波堤添深浅図に示すごとくである。昭和 37 年建設当時の地盤線に比して 7 号ケーソンおよび 10 号ケーソンにおいては、約 6.0 m の地盤

表-3 昭和 40 年 24 号 台 風

日時刻		昭和40年 9月17日 15時	昭和40年 9月17日 17時	昭和40年 9月17日 19時	昭和40年 9月17日 21時	昭和40年 9月17日 22時	昭和40年 9月17日 23時	昭和40年 9月18日 1時
実測波高	波高	3.0m	2.7m	2.8m	4.0m	6.4m	9.2m	
	周期	13.7秒	13.2秒	13.9秒	14.5秒	14.3秒	13.8秒	
ウイルソン 波高	波高		3.3m	7.4m	7.4m		12.5m	11.5m
	周期		9.0秒	14.2秒	14.2秒		17.9秒	16.3秒

の差異が見られる。

この防波堤の被災原因はつぎの事項が考えられる。第 1 には台風 24 号の波が表-1 に示す他の台風の波に比して波高が高く、しかも周期が 14 秒で他の台風波周期 16~17 秒に比して短く、したがって波形勾配が急であったことが一つの原因であり (図-6 の防波堤添深浅図は昭和 37 年から現在までの防波堤添の海側深浅図の変化を図示したもので、昭和 40 年 9 月台風 24 号直後の深掘れが他といちじるしく異なっていることを示す)、図-2 の防波堤西側 No. 5, No. 9 の断面図に示すごとく、非常に急勾配であり、防波堤前面において砕波することでも ($H/1/3=9.2\text{m}$) 十分考えられ、洗掘力と、もどり流れのために深部への落込みが特に大となったものと思われる。

つぎに図-5 防波堤平面図によると 1 号から 6 号ケーソンまでの法線と 7 号から 10 号までの法線が約 5 m ずれているために添波、波力の収れんが生じ、7 号前面が他に比して特に深掘れが大であったことが推定される。つぎにこの 6 号と 7 号ケーソンの凹部に消波方塊として方塊が投入されていたが、この方塊はほとんど深部に流出した。10 号ケーソンについては平面的にも防波堤折曲部に当り当然深掘れが予想されたが、この洗掘過程はつぎの順序によるものと思われる。ある程度洗掘が進んだ時点でやや脆弱な 10 号間の継手部が破壊された。この部分の構造は図-7 の D-D 断面に示すごとく外海側半分をコンクリートブロック、中央を袋詰コンクリート、港内側をプレキャストコンクリートで固めたものであるが、下部は -13.0 m で根入は浅い。最初は中詰ブロック等の沈下ならびに破壊が生じ、10 号 11 号間の継手部が被災した。つぎに 10 号 9 号間の継手部の破壊

であるが、これは他の継手部 (7 号 8 号間および 8 号 9 号間継手部は沈下のみで破壊は生じていない) と同様に外わく鋼板の鉄筋コンクリート造であり、10 号ケーソンがロッキングを生じたさい半月形の継手部が二つに両断されて港内側と港外側に落ち込んだものである。前後の継手部が

図-6 西 防 波 堤 添 深 浅 図

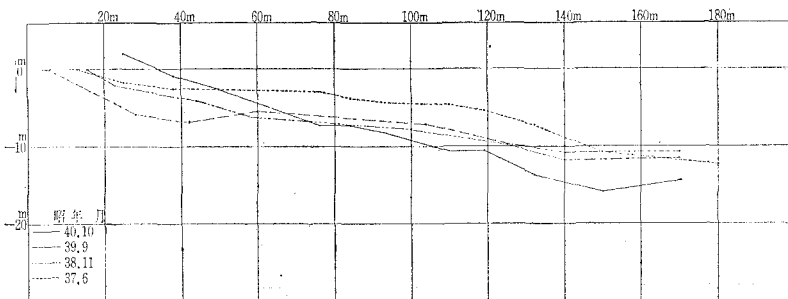
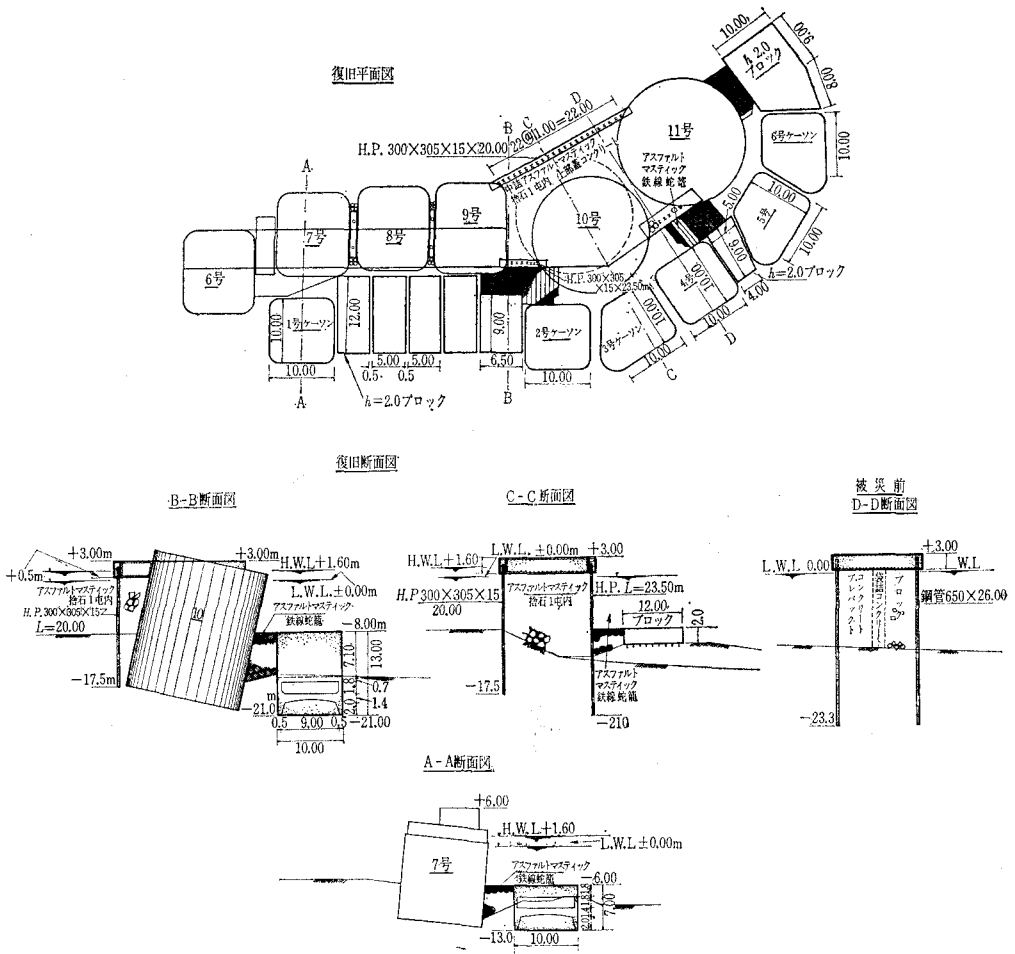


図-7 西防波堤復旧平面図および断面図



なくなったために、波による流れがこの間から港内側へ通じ、10号ケーソン周辺を洗いさらに洗掘を助長したものと考えられる。台風の波が平常に戻った後の防波堤添深浅図(図-6)を見ると11号ケーソン前面は-14.5m、10号ケーソン前面は-16.0mで10号ケーソン前面が11号ケーソンと比較して1.5m洗掘が多くなっているのは以上の理由からであろうと思われる。しかも11号ケーソンは根入れが10号に比して2.0m深いので被災を免れたものと考えられる。

6. 防波堤復旧工法

復旧工法として、本体を水平に起こすことは不可能と考えた。第一に根固め工法、第二に10号ケーソン前後の継手工法の決定である。

根固工法は通常平方塊、またはサンドマットが洗掘防止工として使用されるが、この海岸のように海底勾配の問題、底質移動の問題があるので安定性の上からもこれらの工法は不適当と思われた。ブロックの外側にすべり止め鋼杭を詰杭形式で海底に打込む案も考えたが施工

上の難点から、図-7のように10号および7号ケーソンの前面に空気ケーソンを沈めることに決定した。さらにケーソン間はこのケーソンを支えとして大型根固めブロックを敷きつめることとした。このブロック1個の重量が約300tになるので、海底のすえつけ位置で製作し、また本堤と根固めケーソンとの間はサンドマスチックで固めることとした。

継手工法はC-C断面図に示すごとく、外側をH杭で固め、中詰に1t石を詰める。このままでは同じ災害をくり返すことになるので1t石間をアスファルトサンドマスチックを流入して継手部の一体化を計った。この継手工はすでに完了している。

石材中にアスファルトマスチックを完全に注入するために、使用石材、現地産骨材を使用して水中注入実験を行ない施工法およびアスファルトマスチックの配合を決定した。

アスファルトマスチック配合

アスファルト	シェル石油	12%
石粉	住友セメント炭カル	25%

砂	田子浦海岸砂	33%
小砂利	フルイ下発生材	30%

本継手工法は従来の防波堤捨石部の被覆工に使用されたものと異なり、継手工約 2000 m³ 全体にサンド マスチックを注入するため継手中詰石材の注入層の厚さ決定を主目的に、水中で高温 (180°C~200°C) のマスチックの流入状態を調査するためのものである。

実験は、2.0×2.0×1.5 m の鉄函を使用しつぎの5種類を水中で実施した。

第1の実験：500 kg/個の石の2層積に同時グラウト

第2の実験：800 kg/個の石の2層積に同時グラウト

第3の実験：200 kg/個2層、各層ごとにグラウト上層は陸上施工

第4の実験：500 kg/個石2層、各層ごとにグラウト

第5の実験：200 kg/個~1000 kg/個 同時グラウト

その結果、第1、第2の実験は不良、サンドマスチックが各石材間に行きわたる前に凝固している。第3、第4の実験は1層ごとに施工したため当然良好であったが、2層同時グラウトの第5の実験が特に良好であった。その理由は、第1、第2の実験で限られた鉄函の中にバケットから一度にマスチックを投下したため内部の水とマスチックの交換が滑かに行なわれず水が外へ流出できなかった。その点を考慮して第5の実験においては、バケット投下口を半開きにして徐々にマスチックの注入を実施したための成功と思われる。なお水中でのマスチックの温度変化は(水中遠隔温度計により測定した)、投入時クッカー車において 180°C、函内投入後函底部において7分後に 120°C になり、その後徐々に下降して 80°C になるのに 60 分を要している。日本舗道 K K のこの合材の水中実験によると 60°C~80°C で流水の先端が固結するという結果がでている。

7. 洗掘傾向の調査

自然の波による洗掘はその実測に非常な困難性がともなうため、波と直立壁の関係位置、洗掘傾向および根固工の根入の問題について模型実験を行なった。

実験は 図-9 に示すごとく浜勾配を 1/10 および 1/5 とし、波方向は直立壁に直角として行ない、使用砂は

図-8 アスファルト マスチック水中で温度変化図

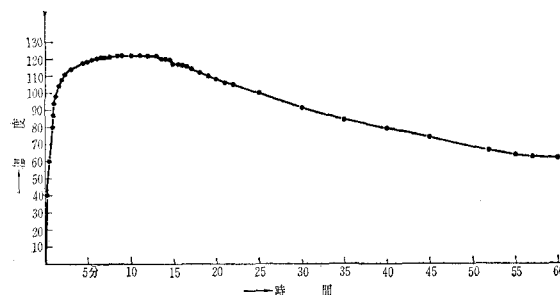


図-9 模型の平面図および縦断面図

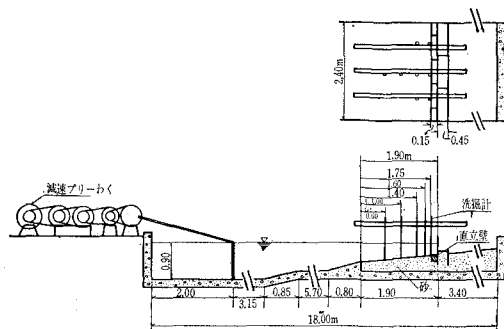


図-10 実験使用砂の粒度曲線

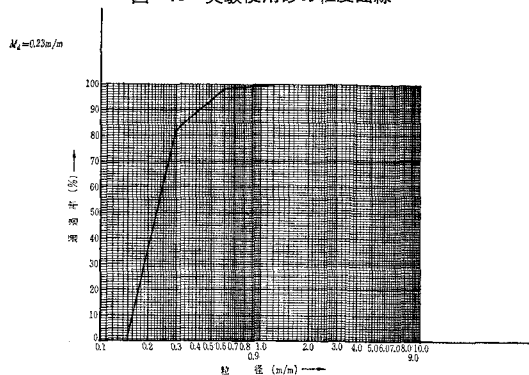


図-11 波高と壁前面の洗掘量の関係

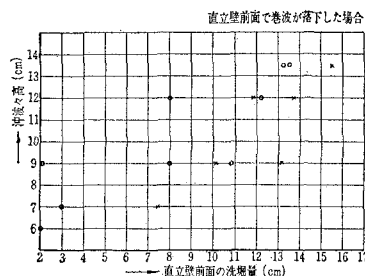


図-10 の粒度曲線に示すごとく $d_{50} = 0.23 \text{ mm}$ 、比重 2.6 の細砂を用いて実施したものである。使用した洗掘計は直径 9 mm の丸鋼の先端に径 40 mm の円形鉄板を溶接したもので、地盤高の変化にしたがって自由に沈下できるように上部の角材に取付けたものである。表-4 は波と直立壁前面の洗掘量を示したものである。いずれの場合においても巻波が直立壁前面に落下した場合の直立壁前面に最大の洗掘が生じている。

図-11 は波高と壁前面の洗掘量の関係を示したものであるが、特に巻波の落下が直立壁前面に生じた場合を各勾配について図示したものである。これによると波高と同等かそれ以上の洗掘が生じている。表-5 は根固めブロックを壁前面に埋込んだものであるが、洗掘量大なる砕波の場合は根固めのない場合の洗掘量の約 5 割の洗掘を予想しなければならないようである。また重複波の場合洗掘量は当然少であるが根固め効果は現われていない

表—4 波と直立壁前面洗掘量

実験番号	勾配	沖波波高 (m)	周期 (秒)	直立壁前面 洗掘(時間 40分)(cm)	直立壁 前水深 (cm)	摘 要
1	1/10	12.0	1.71	12.3	13.0	
2		9.0	"	10.3	"	
3		13.5	"	13.3	"	
4		6.2	"	2.3	"	
5		9.0	"	1.0	23.0	
6		12.0	"	1.8	"	
7		13.5	"	4.4	"	
8		6.2	"	3.0	10.0	
9		9.0	"	3.3	"	
10		12.0	"	8.0	"	
11		13.5	"	13.5	16.6	
12		9.0	"	8.0	"	
13		6.2	"	1.1	"	
14		6.2	"	3.3	8.6	
15		9.0	"	3.3	"	
16		12.0	"	3.5	"	
17		13.5	"	5.6	"	
18		4.0	2.4	3.2	"	
19		6.0	"	2.0	"	
20		7.0	"	1.2	"	
21		9.0	"	4.0	"	
22		4.0	"	0.2	16.6	
23		6.0	"	1.4	"	
24		7.0	"	3.0	"	
25		9.0	"	2.1	"	
26		7.0	"	1.0	23.0	
27		9.0	"	6.0	"	
28	1/5	12.0	1.71	12.2	17.6	根固ブロック
29		12.0	"	5.9	"	根固ブロック
30		12.0	"	0.6	"	根固ブロック
31		12.0	"	11.9	16.6	根固ブロック
32		12.0	"	3.5	"	根固ブロック
33		12.0	"	4.1	"	根固ブロック
34		7.0	2.4	2.5	23.6	
35		12.0	1.71	4.5	"	根固ブロック
36		12.0	"	2.6	"	根固ブロック
37		13.5	"	3.7	"	根固ブロック
38		13.5	"	5.1	"	根固ブロック
39		9.0	2.4	4.5	"	根固ブロック
40		9.0	"	4.8	"	
41		13.5	1.71	4.7	"	
42		12.0	"	4.2	"	
43		12.0	"	13.7	"	
44		13.5	"	14.5	"	
45		9.0	"	10.2	"	
46		7.0	2.4	7.5	"	
47		9.0	"	13.2	"	

表—5 根固めブロック前面の洗掘量

上段 根固め(15×15×30 cm) ブロックのない場合

中段 根固め天端が地盤高と同一の場合

下段 根固め天端が地盤上 4.0 cm の場合

底勾壁	波高 (cm)	周期 (秒)	40 分後の堤前 面洗掘量(cm)	壁前面水深 (cm)	摘 要
1/10	12.0	1.71	12.2 0.6 5.9	17.6	砕 波
1/5	12.0	1.71	11.9 3.5 4.1	16.6	砕 波
1/5	9.0	2.40	4.8 — 4.5	16.6	重複波
1/5	13.5	1.71	5.1 3.7 4.7	23.6	重複波

8. む す び

直立堤前面の洗掘量は従来明らかにされたものは少ないが、浜勾配の急な場合 8.0 m の洗掘が現実生じていること、洗掘大なる防波堤に根入れのある根固工を用い、波の荒い防波堤継手にアスファルト マスチックを石材の緊結材として用いたことを報告し、これが類似海岸構造物の参考になるならば幸いである。

参 考 文 献

- 1) 市川, 他: 駿河湾田子浦海岸の波と漂砂, 海岸工学講演集 1961.
- 2) 青島・市川: 掘込港工事の問題点, 土木学会誌, 1962.