

西神戸高潮対策事業における消波護岸構造決定について

山 崎 博*・鳥 居 幸 雄**

1. ま え が き

神戸市域の南側、海岸沿いには、神戸港を中心に阪神工業地帯の一翼を形成する臨海重工業地帯が細長く、東西に伸びている。特に兵庫区和田岬地域、長田区、須磨区の南部地域の、西神戸地区は、昭和36年臨海造成地が完成し、諸種の企業が進出して繁栄を見せている。

しかし、埋立地背後の旧市街地が低地帯であるために、昭和39年9月25日、64'20号台風を引きつづき昭和40年9月10日、65'23号台風の高波により、護岸を越波した海水で、西神戸地区のみで約4000戸が床上まで、約3000戸が床下浸水し、和田岬地区、長田地区あわせて被害額91億円という甚大な被害をうけた。

神戸市は、このような災害による被害を再度くりかえさないように、昭和40年10月1日、臨時海岸防災本部を設置し、昭和41年の本格的台風期までに、前期工事として、海に面する南側護岸補強を完成させるように、西神戸地区高潮対策事業を進めた。この事業の計画の段階で、防潮、防波護岸の構造決定のため二、三の実験を行なったので報告する。

2. 事業計画

(1) 事業の概要および事業費

この事業は兵庫区和田岬から、須磨区妙法寺川左岸に至る海岸線延長約5.5kmの既設護岸(天端高+6.5m C.D.L.)をかさ上げし、越波のないように改良し、補強すると同時に、背後にある低地帯に浸水する高潮を防ぐために延長約9.9kmの内陸壁と、約2.4kmにわたる越波排水路の新設を行なうもので、全体計画平面図は図-1のとおりである。

このうち前期計画として、総事業費47億4000万円海側前面護岸補強を主体として護岸延長4.6km、内陸壁5.5km、排水路2.4kmを、昭和41年8月までに完成することとした。昭和40年12月着工したが、工事期間9ヵ月という急速施工を行なうため円弧すべり、沈下の問題に注意し、かつ天候に左右される工事であるため手戻りを極力防ぐ等、施工管理にはとくに留意した。これによって再度市街地に浸水することのないよう、また臨海工業地帯の生産が台風被害によってストップしないという所期の目的は一応達成できたのである。なお残工事は前期計画に引続き実施する見込みである。

(2) 計画海象諸元

過去15年間(昭和15年~39年)の台風期(8, 9, 10月)の朔望平均満潮位を表-1と神戸港に影響を与えた台風による最大偏差は表-2のとおりである。

写真-1 65'23号台風により既設護岸破壊状況

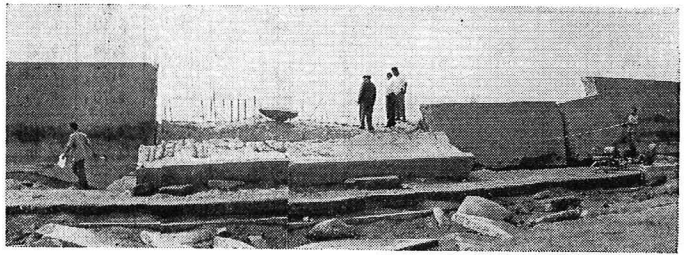
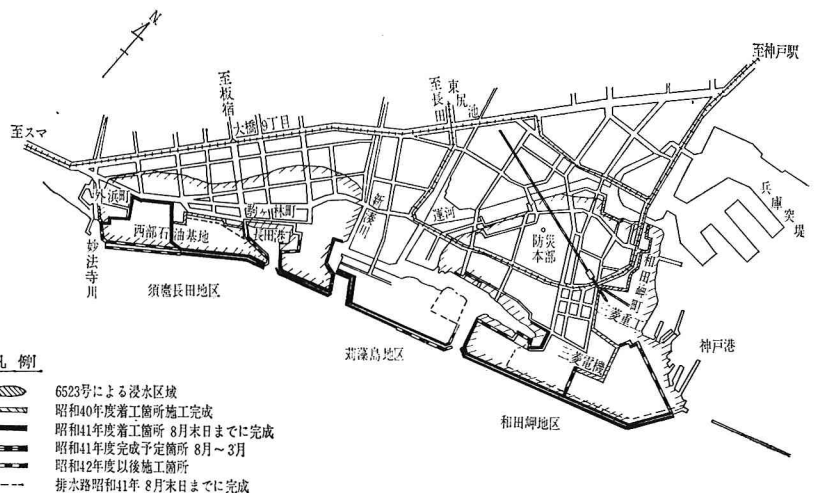


図-1 西神戸地区高潮防災計画平面図



* 正会員 神戸市臨時海岸防災本部, 本部長
** 正会員 同 計画課長

表一 神戸港における過去 15 年間の期望平均満潮位 (C.D.L cm)

期 望 平 均 満 潮 位							
25年	172	29年	168	33年	168	37年	155
26	169	30	161	34	165	38	147
27	164	31	168	35	152	39	160
28	165	32	166	36	158		
平均 163 cm							

表二 神戸港に來襲した台風の最大偏差

台 風 名	年 月 日	最大偏差
第 2 室 戸 台 風	36. 9. 16	193 cm
6 5' 2 3 号	40. 9. 10	190 cm
6 4' 2 0 号	39. 9. 25	168 cm
枕 崎	20. 9. 18	148 cm
シ エ ー ン	25. 9. 3	147 cm
洞 爺 丸 15 号	29. 9. 25	122 cm
モ デ ル S ₃		200 cm

表三

台 風 方 向 地 点		* 5028 号 シエーン台風		* 5915 号 伊勢湾台風 (室戸台風コース)		**6420 号 台風		6 5 2 3 号		備 考
		H _{1/3} (m)	T _{1/3} (sec)	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (sec)	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (sec)	H _{1/3} (m)	T _{1/3} (sec)	
神戸(東立地埋)	S					1.90	5.40	2.50	5.90	* 「大阪湾沿岸の台風時における波」(昭和 37 年 3 月運輸省第三港湾建設局尼崎工事事務所)より読み取った
	SSW					3.45	7.15	3.40	6.80	
	SW					2.10	5.50	2.80	6.10	
神戸中央	SSE	1.35	4.9	2.39	5.8	1.70	5.30			** 「第 6420 号台風に関する調査」(昭和 40 年 4 月第三港湾建設局)
	S	2.30	5.9	1.95	5.5	2.50	6.05	2.75	6.20	
	SSW	3.20	7.3	1.95	5.4	3.65	7.25	3.60	6.90	
	210					3.80	7.10	4.35	7.90	
神戸(西立地埋)	SSE							3.10	6.60	
	S							2.95	6.30	
	SSW							4.55	7.70	
	SW							2.70	6.00	
神戸(西立地埋)	S					3.60	7.10	4.00	7.40	
	191					4.10	7.35	4.75	7.90	
	SSW					4.05	7.40	4.75	7.90	

計画潮位として期望平均満潮位の平均値 +1.63 m と伊勢湾台風級を室戸台風コースに走らせたモデルにより、気象庁で推算されたモデル台風 S₃ の最大偏差 2.00 m を加えて 3.63 m ≒ 3.70 m とした。

波高は大阪湾における過去の実測記録および九州大学井島教授の方式による推算結果から 表三 のとおりで、この表から、神戸西部埋立地前面における波高は、SSW 4.55 m、周期 7.7 秒である。

以上を鯨島 茂氏を中心とする神戸市海岸防災審議会を設立して審議していただき、計画諸元として潮位ならびに波高をつぎのように決定した。

潮 位 +3.70 m
波 高 4.60 m

3. 模型実験

(1) 実験の目的

① 越波防止効果と防波護岸との関係

② 異形ブロックによる消波効果——越波防止効果との関係

を知るために、各種の護岸改良案について、設計の基礎データを求めるため ① については、運輸省港湾技術研究所に、②は神戸大学工学部に委託して模型実験を行なった。

(2) 実験の対象とした海象その他の諸元

計画諸元は 2.(2)で述べたとおりであるが、実験においては最高潮位を 3.70 m として、これ以下数種の潮位を対象とし、波高については有義波 $H_{1/3}=4.6\text{ m}$ を対象とするが、波の不規則性を考えて、波高は 4.0~7.0 m の範囲の波とし、また周期としては、風浪およびうねり性の波の代表として 7 秒および 10 秒とした。実験対象諸元は

潮位 +2.0~+3.7 m C.D.L.

波高 4.0~7.0 m

周期 7.0 および 10 秒

実験にあたっては、越波状況の観察ならびに越波量の測定に重点をおき、消波ブロック前面 カウンター ウェイト捨石の安定度および海底面の洗掘などについても合わせて観察を行なった。

越波量の測定は護岸の背後に仮水槽を設け、最初の 20~25 波以内の、護岸の天端を越波し、仮水槽にたまった水量の測定を行ない、それを波数と周期で除して平均する方法を用いた。こうして求めた

越波量は、一定波高の波が続いて来襲する規則的な波に対する値なので、実験的に求めた波高と越波量の関係を用いて、実際の台風時における不規則性を 64' 20 号台風の西の宮における波高計のデータを基として越波量の補正推定を行なった。

(3) 実験設備

模型の縮尺は消防ブロックの大きさ、水槽で起こし得る波高の関係により 運輸省 港湾技術研究所では 1/28、神戸大学では 1/30 とした。なお、この報告では、特に断わらない限り、現地諸元に換算した値で記述されている。実験に使用した水槽は、運輸省港湾技術研究所のものは長さ 33.1 m、幅 0.49 m、高さ 0.97 m で、神戸大学のものは長さ 30.0 m、幅 1.80 m、高さ 2.0 m でそれぞれ鋼製両面ガラス張りの造波水槽で造波機は、フラッタ形式およびおし出し形式である。

防波改良護岸建設地点の海底地形としては、測深図の結果を参照して、模型設置水深を -9.0 m とし、前面

170 m の区間は海底勾配 1/80 として、-11.10 m の深さまで次第に深くし、その先は一樣水深とした。

(4) 防波護岸構造断面の決定

断面決定のための検討断面は、被災時と同様形式の直立壁型の天端を十分高くした場合と、これに波返しを取付けた場合、ならびに前面に消波工をおく形式の消波護岸型の3つの形式である。また検討を行なった護岸構造の主要諸元は表-4のとおりである。

模型実験に用いた条件はつぎのとおりである。

潮位 2.0 m, 2.7 m, 3.2 m, 3.5 m, 3.7 m

周期 7.0 sec, 10.0 sec

波高 3.8 m, 4.6 m, 5.2 m, 6.2 m, 7.0 m

a) 直立壁形式の護岸構造の検討 護岸の前面に消波工を設けず、直立壁を +10.0 m の高さまで築造し

(図-2)、波返しを取りつけた場合の越波量を図-3に示し、越波実験時における状況を写真-2に示した。同写真または、図-3からもわかるように越波量は周期によって異なり、10秒の波高6.2mで $0.13\text{m}^3/\text{m}\cdot\text{sec}$ である。周期7秒についてはほとんど0に等しく、越波限界の波高は4.70m程度である。しかし、この場合は写真-3のように跳波が大きい。

同形式で波返しのない場合でパラペット天端高も+10.0mの高

図-2 直立護岸断面

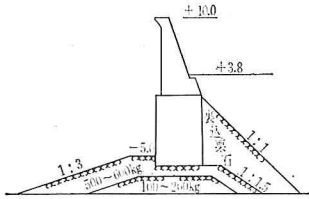


図-3 越波流量曲線

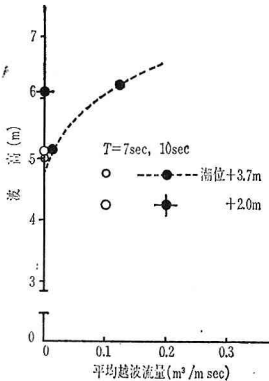


写真-2 直立壁護岸かさ上げ(波返し付)

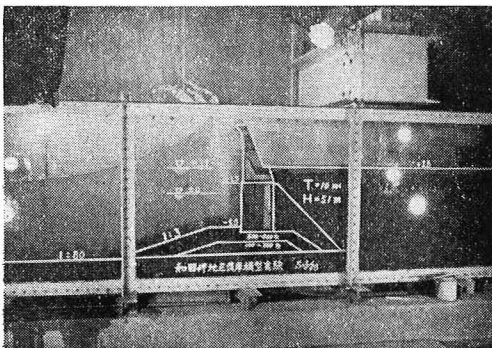


表-4 実験を行なった護岸構造の主要諸元

護岸型式	パラペット		消波工		捨石マウンド		副堤
	天端高	波返し工	天端高	天端巾	天端高	天端巾	
㊸ 直立堤	10.0	あり	—	—	—	—	—
㊹ " "	10.0	なし	—	—	—	—	—
㊺ " "	10.0	あり	—	—	-0.5	26.0	—
㊻ " "	9.3	"	+5.0	7.0	-5.0	5.5	—
㊼ " "	9.3	"	+5.0	12.5	-6.0	19.5	—
㊽ " "	9.3	なし	+6.5	10.6	-10.0	25.0	—
㊾ " "	9.3	"	+6.5	10.6	1:4.5勾配 で-9.0m まで	56.0	—
㊿ " "	8.5	"	+7.0	6.7	-4.0	6.0	—
㊻ " "	8.5	"	+8.5	9.0	-4.0	6.0	—
㊼ " "	8.5	"	+6.5	6.5	-6.0	6.0	—
㊽ " "	8.5	"	+7.0	6.5	-6.0	6.0	—
㊾ " "	8.5	"	+7.5	6.5	-6.0	6.0	—
㊿ " "	8.5	"	+8.0	6.5	-6.0	6.0	—

写真-3 直立壁護岸かさ上げ

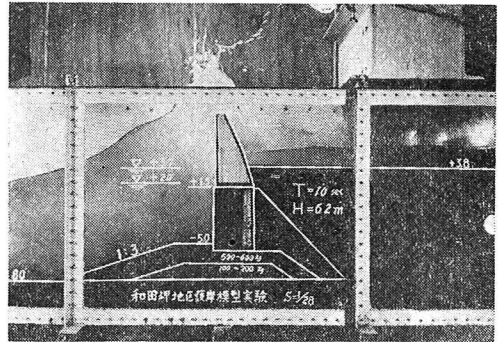
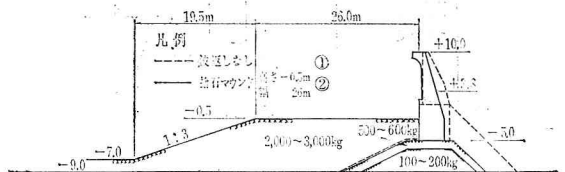


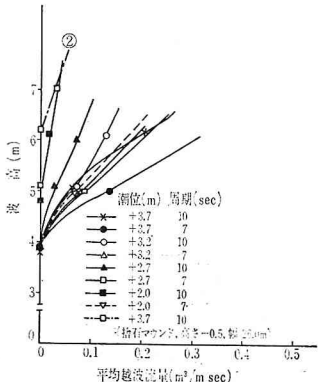
図-4 直立壁断面



さまで築造(図-4の①)する場合の越波量は図-5のようで、潮位3.7m, 3.2m, 2.7m, 2.0mに対して、これらのおおのについて、周期10秒と7秒に対して

行なってみた。これよりみると周期によってやや異なる傾向を示す。すなわち周期10秒の波はほぼ完全な重複波となって水面が盛り上がり、パラペット頂部より高まった部分が堤内に流下する(写真-3)。潮位3.7mのときの越波限界波高は $H \approx 4.0\text{m}$ で

図-5 越波流量曲線



ある。

一方周期7秒の波のときは、半砕波的な形状をしており、しぶきは直立壁の天端からさらに10m相当の高さに飛び上がる。このため、潮位が低いときでも越波流量曲線はあまり変わらないようである。このような短周期の半砕波的な波に対しては、曲面波返し工が有効に働き、波は沖へ向って跳ね返されてしまって、図-3よりわかるように越波量はほとんどないと思われる。潮位3.7mで10秒の場合の越波限界は波高 $H \approx 4.0$ m以下、また周期7秒の場合の越波限界は波高 $H \approx 3.9$ m以下の波であれば、越波を生じない。潮位3.2m, 2.7m, 2.0mのおおの周期10秒, 7秒については図-5のように潮位3.7mよりも越波量は少ない。越波限界はほとんど変わらないようである。図-4の②のように、捨石マウンドをおいた場合(捨石マウンド-0.5m長さ26m)の越波流量は図-5で、潮位3.7m, 周期10秒, 波高7.0mでも、 $0.03 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ 程度の越波流量であるが、波返しを取り付けているため跳波が20m程度あり、これが沖の方へ向って上っているため越波量が少ないのである。

b) 消波堤形式の護岸構造の検討 図-6の①の護岸形式はパラペット高+9.3mで波返しを取付けたもので、前面に消波工を設けたものであり、図-6の②の護岸形式も前面に消波工を 図-6の①形式よりも長く置いた

図-6 前面消波工

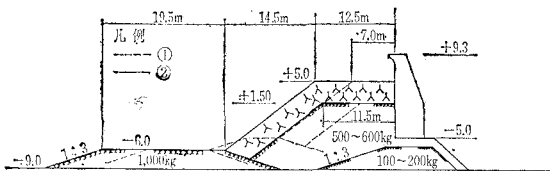


図-7 越波流量曲線

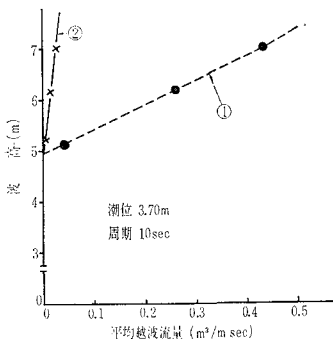
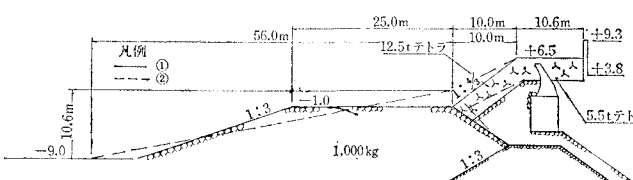


図-8 前面消波工、護岸後退



ものである。これらの越波流量は 図-7 のようで、消波天端幅が 7.0m の場合は波高 7.0m で越波量 $0.43 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ である。

これに対し天端巾 12.5m の場合は $0.03 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ と非常に少ない。しかし天端が長い場合でも周期 10 秒で、波高が大きくなると沖に向ってではあるが跳波が大きい。越波限界は双方とも、波高 $H \approx 4.8$ m のようである。

図-8の①, ②のような護岸形式の場合についての越波流量曲線は 図-9 のようである。これは旧護岸の後に高さ+9.3mの護岸を設け、旧護岸を消波工でおおような形式である。これによると新設護岸と旧護岸との間に水がたまって、排水されず越波流量は多くないが、このたん水によるパイピング現象なども考えられるのではなかろうか。

図-9 越波流量曲線

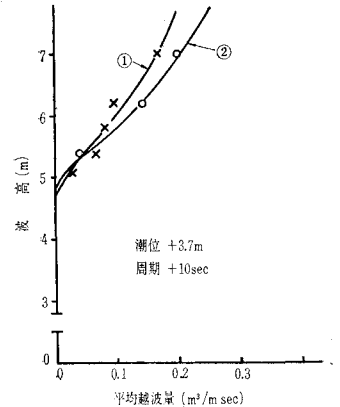


図-10, 図-11のように旧護岸を+8.5mまでかさ上げし、さらに前面に消波工を設置した場合で消波工の天端幅 6.7m の場合の越波量は 図-12のように波高 6.2m で $0.44 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ で越波限界も周期 10 秒で波高 $H \approx 3.8$ m である。

図-10 前面消波工断面

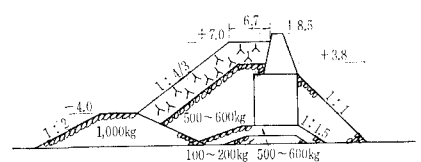
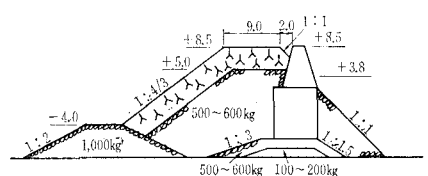


図-11 前面消波工断面



また、図-11の越波量は、図-13に示す越波流量のとおりであり、図-10に比して越波量は、波高 6.2m の場合でも $0.07 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{sec}$ と非常に少ない。また、越波限界も波高 5.2m と高い。

(5) 期待越波流量による各構造断面案の比較

図-12 越波流量曲線

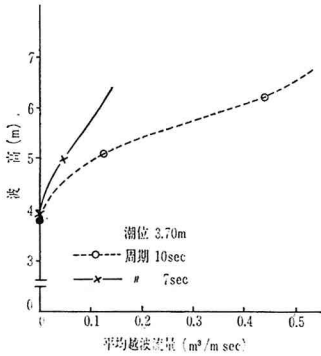
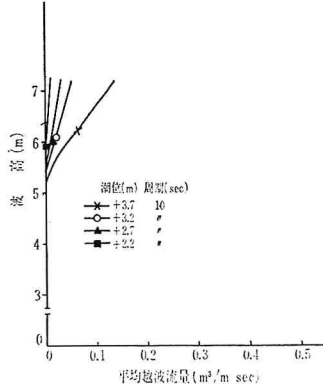


図-13 越波流量曲線



円弧すべりの発生を防ぐため、カウンターウェイトが必要であり、跳波が比較的小さいので後者の形式 図-14 に決定した。そして護岸天端高は計画潮位 (3.7 m) + 設計波高 (4.6 m 上率 1) + 余裕高 0.2 m, 計 8.5 m とした。さらに消波工天端高 6.5 m, 7.0 m, 7.5 m, 8.0 m について、再度実験を行なった。実験結果を 図-15～図-18 に示す。実験は

図-14 前面消波工

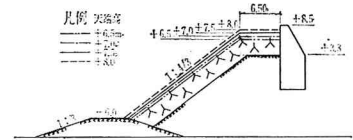
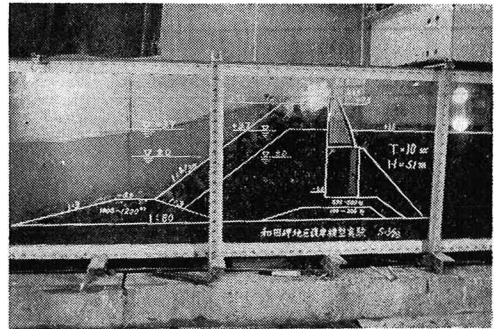


写真-4 前面護岸標準断面



以上述べて来た実験結果は、すべて周期、波高の一定な規則的な波を対象としたものである。しかし、実際の海においては、周期、波高の異なる波がつぎつぎに來襲し、しかも各波の進行方向もある程度まちまちである。したがって実験結果、特に越波流量の実験値を現地値に換算するには、こうした現地波浪の不規則性を考慮する必要がある。このため理論的には多くの問題があるが、ここでは近似的につきのような方法で現地越波流量の換算を行なうことにした。

今までの実験結果にも見るように、越波の現象においては周期も影響するが、まず第 1 には波高が越波量を規定する。そこで、海の波の不規則性のうち波高の不規則性に着目し、各波高の出現確率を考慮して、越波流量の期待値をつぎのように求める。

$$\text{期待平均越波流量} = \sum_{H=0}^{H_{\max}} (\text{規則波の越波流量} \times \text{その波高の出現確率})$$

この計算には、何より波高の出現確率、すなわち波高の確率分布を知る必要がある。ここでは、理論値として Rayleigh 分布、実測値として台風 64'20 号の西の宮の波高観測記録における波高分布曲線 (神戸の設計波高 $H_{1/3}=4.6\text{ m}$ に書き換えたもの) の 2 つを用いた。しかし、実際上で問題となる波高の大きな所では、両者の差はほとんどなくなって、無視できるようになったので、計算としては両者の平均を用いている。また最大波高 $H_{\max}$ としては、台風時の大阪湾の波のスペクトルなどから考えて、 $H_{1/3}=4.6\text{ m}$ となる事態の継続時間が 15～30 分間と見られる点を考慮して一応 $H_{\max}=7.5\text{ m}$ とした。

(6) 構造基本型決定

以上の実験の結果直立壁形式と前面に捨石マウンド消波護岸形式とにしばられたが、前者は基礎が小さく不安定であり、また実際の台風時には相当の風が予想されるので、跳波が堤内に入ることが予想される。後者は跳波が比較的小さいし、丁度建設地点が軟弱地盤であるため

図-15 越波流量曲線

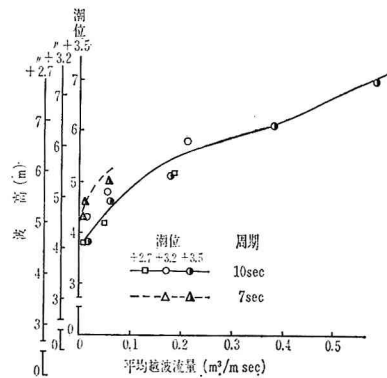


図-16 越波流量曲線

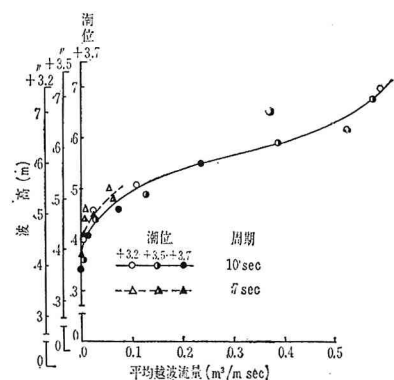


図-17 越波流量曲線

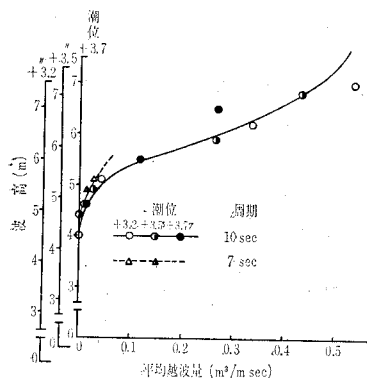


図-18 越波流量曲線

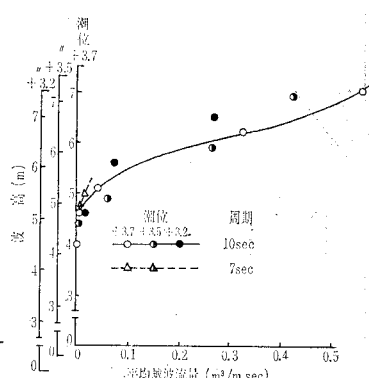


表-5

潮位 +3.7 m, 設計有義波高 $H_{1/3}=4.6$ m における期待流量

護岸断面形式	越波限界高 (m)	期待平均越波流量 (m³/m·sec)	期待最大越波流量 (m³/m·sec)
J	3.2	0.0362	0.119
K	3.5	0.0321	0.105
L	4.1	0.0193	0.095
M	4.5	0.0155	0.115

各構造とも3種類の潮位について行なったが、その結果潮位の差は波高の変化と同程度の影響をおよぼすものと推定された。この推定のもとに潮位 +3.7 m の越波流量曲線を決定し、 $H_{1/3}=4.6$ m 周期 10 秒の波について越波流量の期待値を計算すると、表-5 のようになる。

この曲線によると天端高 +7.0 m から +7.5 m で越波量が大きく減少している。この結果より前面護岸構造は護岸天端高 +8.5 m, 消波工天端高 +7.5 m, 同天端幅 6.5 m, 消波ブロック 12.5 t と決定した。

(7) 消波ブロックの種類

消波ブロックの種類、消波ブロックの相違による越波流量の変化は、神戸大学工学部の実験水槽を用いて行なった。

- イ. カトロピー
- ロ. テトラポッド
- ハ. ペンター
- ニ. 中空三角

図-19 越波流量曲線

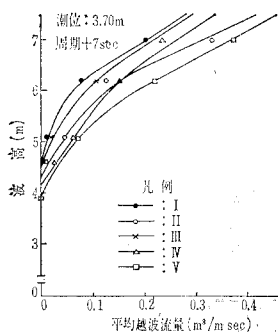
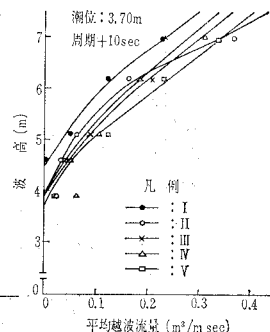


図-20 越波流量曲線



ホ. 三柱

以上の5種類で実験重量はテトラポッド 9.3 t, 三柱 6 t, その他のブロックはそれぞれ 12.5 t である。この実験の諸元は先に行なった護岸構造基本形と同様にとりつぎのようにした。潮位 +3.2 m, +3.5 m, +3.7 m (C.D.L.), 波高 3.9 m, 4.6 m, 5.1 m, 6.2 m, 7.0 m, 周期 7 秒, 10 秒のおおのについて行なう。

a) 各種ブロックの実験方法

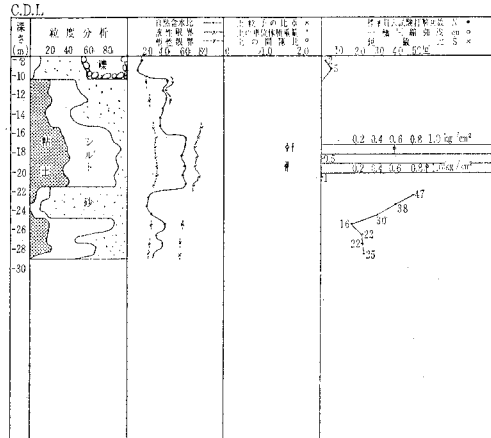
実験は 3-6 で決定した構造断面で行なった。

消波工の天端高は一定としたが、天端幅、厚さ(層)は各種ブロックの形状、寸法ならびに積み方などによりおのずから決定される。また消波工ののり面勾配は、1:4/3, 1:1.5 の二通りの勾配に限定して行なった。

b) 越波流量 潮位 +3.2 m, +3.5 m, +3.7 m について波高を変え測定を行なった。計画潮位 +3.7 m での越波流量曲線は 図-19 と 図-20 のとおりである。これによれば、傾向は各ブロックともほぼ相似しており、潮位、波高が同一であれば、周期が大である方が越波量が大きい。

越波状況は各種実験とも砕けたしぶきが飛ぶ程度であるが、波高が大きくなるにしたがって、ブロックの形状、積み方などによりやや異なる。一般的に天端の仕上りが凹凸が少ないとそ上が大であり、越波量が大きくなる傾向となる。また層厚が大であれば、ある程度越波流量が小さくなる。

図-21 和田岬海底ボーリング図



4. 実施工事

この事業に要する主要な材料は、表-6 のとおりである。

消波ブロックの使用は、本来ならば同一種類のものが

表-6 実施および全体計画主要数量表

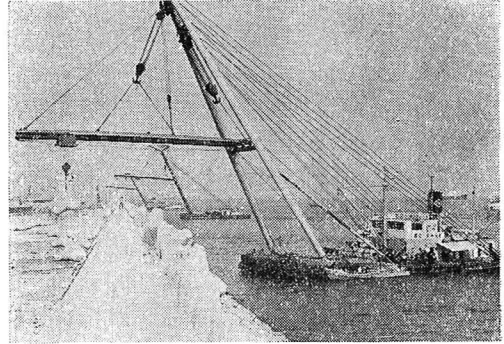
	契約件数 (件)	コンクリート (m ³)	鋼軌条, H形鋼 (t)	鋼矢板 (t)	鉄筋 (t)	敷砂 (m ³)	捨石工 (m ³)	異形消波 ブロック (個)
昭和40年12月～昭和41年8月	138	245 000	604	1 722	2 050	148 000	631 000	30 000
昭和41年9月～昭和42年8月		83 500	—	—	375	—	189 000	10 500
全 体 計 画		338 500	604	1 722	2 760	148 000	820 000	40 500

維持管理上からも良いが、前期計画を8月までに完成するためには 30 000 ケの消波ブロック製作を6月末日、遅くとも7月中旬までには完成しなければ、8月末まですえつけを完成できない。模型実験の結果と上述の工期内に完成することが困難であるとの理由から、6種類の消波ブロックを用い6月一杯で完了した。

(1) 消波ブロック製作、運搬すえつけ

ブロック製作は、ヤードを約 40 万 m² を提供し、コンクリートはすべて工場生コンクリートを用いることによって、現場における管理の繁雑になることを避けた。ブロックは三柱を除いてすべて 12.5 t であり、背丈が高いからコンクリートの打設にはフォークリフトにバケットを付け、バケットからシュートを通して打込んだ。かたわくの組立取りはずしとともにトラッククレーンあるいはクローラー クレーンを用い、陸上運搬には 11 t トラックあるいはトレーラを使用した。さらに一部海上へ搬出する場合には、陸上から 60 t 吊トラック クレーンにより海上の台船に積込んだ。ブロックのすえつけは海上からフローティング クレーンを改造して使用した。これは陸上に仮置きをしたブロックをアームに付けたキャリアーで写真-5のように取り込むことができたので非常に高能率に作業が出来た。クレーン船の改造費は平均して 2 700 千円を要したが、この工事は8月末から9月台風にそなえて、突貫工事ですえつけを行なわなければならないので、この方法をとった。動員された起重機船は 17 隻で 1 隻で 80～100 ケのすえつけを行なっ

写真-5 消波ブロックすえつけ
—陸上より直接取込み—



た。

5. あとがき

捨石量、生コン数量、消波ブロック数量ともに膨大な数量になる工事を9カ月間でいかに進めるか種々の問題はあったが、幸い天候に恵まれ大した工程のギャップも生じず、工事を完成することができた。

工事に関してはあらためてとりまとめることとして、今回は断面決定に関する実験等を取りまて報告した。ここにご協力頂いた運輸省港湾研究所の方々、神戸大学田中教授、審議会の諸先生方に厚くお礼申上げる次第であります。