【報　告】

新型ブロック“テトラポット”を使用する仁淀川導流堤の計画設計について

吉　田　光　太　郎*

要　旨　仁淀川導流堤を復旧するにあたつて，従来の工法では，たちまち破壊されてその目的を達することができないので，河川流および波浪に対し十分対抗できる永久的工法の採択をきめた。その計画設計をできるだけ適当なものにするため，多くの資料収集と調査が行われ，また導流堤の先端にはフランスのネールピック研究所の考案による新型ブロック“テトラポット”を使用して，波力の減殺と工費の節減をはかつた。工費の節減額は 15% である。

1.　河川および気象の概要

仁淀川は四国山脈の雄峰石鎚山（標高 1 921 m）にその源を発し，愛媛県境を経て高知県中央部を南東流して大平洋に注ぐ。その幹川流路延長 130 km，流域面積 1 584 km² で，下流約 15 km の両岸に約 3 000 町歩の耕地を擁し，この区間は直轄工事区間となつている。下流部沖積平野はきわめて低く，洪水時には逆水位は数mも高くなり，河口閉塞の防止により水害をまぬかれ，または軽減する耕地は約 1 500 町歩である。流域の 90% は山地で，林相はあまり良好でなく裸地および荒廃地 112 km² で地すべり地，崩壊地もところどころにあり，河口より放出される砂礫量は年平均 2 000 000 m³ 以上と推定され，高知県中部海岸の海浜砂礫の補給源となつている。河川の縦断勾配は中流部 50 km は 1/130，下流部 30 km は 1/500～1/800 で，中流部以上は水路式発電がその落差をあますところなく利用している。河口より上流付近の川巾は，狭さく部 600 m，，複断面部 800～1 000 m である。なお流域の地質は北方から三波川層（結昌庁岩層），御荷鉾層（以上前石炭紀），秩父古生層，沖積層の順に北東方向に並列している。岩石は砂岩，頁岩その他である。

流域平均年雨量 2 400 mm，既往最大年 5 084 mm（名野川），既往最大日雨量 600 mm（池川）で，河口付近の計画高水量は 12 000 m³/sec である。種々の水文資料中河口処理に密接なものを抜きだすと次のとおりである。

表—1　河口における夏季最小日流量（m³/s）

昭和	16	18	21	22	23	24	25	26	27	平均
流量	11	12	6	11	7	12	21	10	7	7.2

表—2　河口における月平均流量（m³/s）

年＼月	16	18	21	22	23	24	25	26	27	28	平均
1	46.4	14.3	28.1	57.0	28.0	35.7	71.5	39.2	55.5	21.7	40.0
2	33.0	29.0	35.7	28.1	38.8	79.8	67.6	57.0	54.7	20.4	44.0
3	68.3	28.5	79.4	34.0	83.2	69.5	35.6	84.0	59.0	43.0	59.0
4	51.8	115.0	66.0	45.3	40.8	29.2	50.6	105.0	73.6	33.7	61.0
5	58.2	77.8	86.3	62.6	67.0	116.0	161.0	41.0	58.0	80.5	81.0
6	144.0	204.0	108.0	66.3	28.3	205.0	88.5	52.6	99.0	308.0	130.0
7	160.0	793*	74.8	146.0	135.0	188.0	630*	433.0	227.0	104.5	184.0
8	349.0	202.0	92.5	53.5	196.0	322.0	265.0	400*	35.8	30.4	172.0
9	91.2	803.0	37.0	26.8	90.6	202.0	694*	32.7	18.0	159.5	81.0
10	116.0	54.0	87.0	29.0	39.4	45.0	39.2	129.0	17.8	41.6	40.0
11	35.3	34.0	25.6	14.7	41.6	30.2	57.4	30.1	37.9	28.1	34.0
12	48.6	30.0	50.0	28.5	31.0	39.4	42.6	33.2	18.2	32.4	36.0

*　平均値計算より除く。

表—3　河口における 500 m³/sec 以上の洪水調べ

年＼	年最大洪水量	日数
16	1 900	11
18	8 000	14
21	760	12
22	530	1
23	3 500	3
24	3 300	11
25	9 000	20
26	4 700	14
27	850	6
28	2 260	8

表—4　河口における冬期各月最大日流量（m³/sec）

月＼年	1	2	3	4	11	12
16	100	183	226	128	113	190
18	33	94	88	484*	110	197
21	85	64	248	217	68	159
22	217*	58	68	217	43	138
23	63	86	287	99	413*	86
24	144	512	180	490	73	61
25	280*	158	110	197	150	89
26	81	455*	470*	278	78	163
27	163	328	120	260	336*	42
28	90	55	134	106	57	90
平均	96	139	166	200	91	125

*　は平均値計算より除く

次に風について種々の風図を作成した。一般に風向の一日中の変化は，日中は南寄りの海風となり夜間は陸風となる。波に対する影響のおもなる風向は海風であるから，その方向別頻度の分布をしらべると，年最多風向は SSW であつて夏季のそれはやや東に寄り，冬は西に寄つている。しかし台風別の風図によれば，比較的頻度は小であつても，巨大な波浪をともなう，SE 風がしばしば現われ，洪水とともに一挙に大量の砂礫を移動せしめることは，注目すべきことである。日平均風速と

表—5　10 m/s 以上風向別回数

方向別	年 25	26	月1～3	4～6	7～9	10～12
N～ENE	1	1	2	—	—	—
E～SSE	10	5	—	3	10	1
S～WSW	2	0	1	—	1	—
W～NNW	6	9	5	4	1	5

*　正員，前高知県土木部長，熊本県土木部長

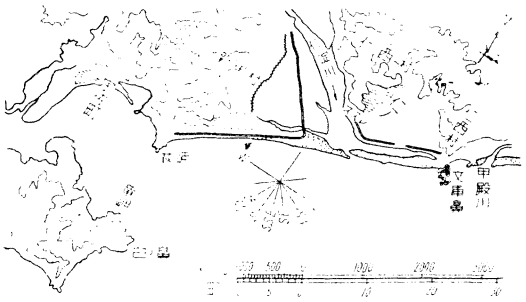
表—6 波向百分率

波向＼月＼年		4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	年
SSE	27	52	49	58	47	59	52	72	82	77	74	60	77	63.3
	28	84	92	98	89	49	71	78	61	40	47	34	68	67.6
SE	27	24	29	37	50	41	38	20	3	6	5	17	18	24.0
	28	—	—	—	—	51	29	20	14	35	39	59	32	23.2
S	27	19	16	1	3	—	8	6	10	11	21	23	5	10.2
	28	16	8	2	11	—	—	2	25	15	14	7	—	8.4
ESE	27	5	6	4	—	—	2	2	5	6	—	—	—	2.5
	28	—	—	—	—	—	—	—	—	10	—	—	—	0.8

最大10 分間風速をしらべ，さらに波浪を起し，その方向を偏移せしめると考えられる 10 m/s 以上の風が継続して吹いた回数を，高知測候所の昭和 25 年および 26 年の記録によりあげると表—5 のようになる。

次に外海からのうねりは，仁淀河口では ESE～S（図—1）がおもなものであるが，昭和 27 年，28 年の 2 カ年実測せられたものを波向百分率で示す（表—6）。波高も実測せられたが，正確な，また台風時の資料にとぼしい。沿岸流は西より東に向ういわゆる黒潮が主流であつて，とくに11月より 5 月の間が多く，西流は 6～10 月に比較的多い。流速は刻々変化しているが，大潮時には 20～30 cm/s，小潮時には 10 cm/s 内外である。

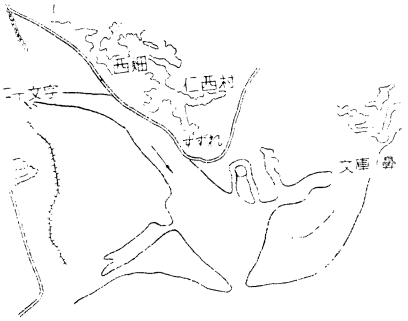
図—1 仁淀川河口付近平面図



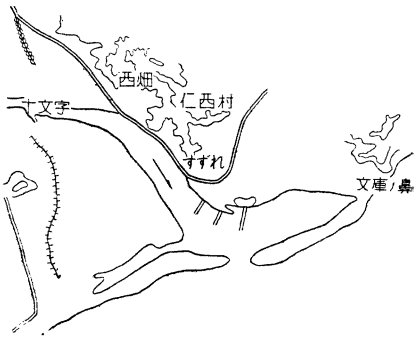
2. 河口付近の状況と導流堤

仁淀川はその放出砂礫量も比較的大で，延長約 2 km，標高 60 m にもおよぶ巨大な円洲をもつて流路を遮つている。河川流，風向，風力，波浪および海岸地形等のそれぞれ不定な外力や要素が複雑に組合わされて現出する河口の状況は，常に変化して固定せず，その一定の傾向を発見することは容易でない。しかし平水時は堆積が優勢で漸次河口が狭められ，もしこれを啓開するにたる洪水（500～1 000 m³/s と考えられる）に恵まれなければ閉塞に近い状態となる。開口部への漂砂堆積が進んだときは，小洪水では容易にこれを開き得ないばかりでなく，洲の最も弱くなつた位置に開口するため，河口位置は洪水ごとに変動し，かつ砂丘の内側に遊水池を生じ，水流が焦点を失つて河口は依然悪い状態をつづけている。過去 1 世紀の河口形状のうちから，代表的なものを抜いて

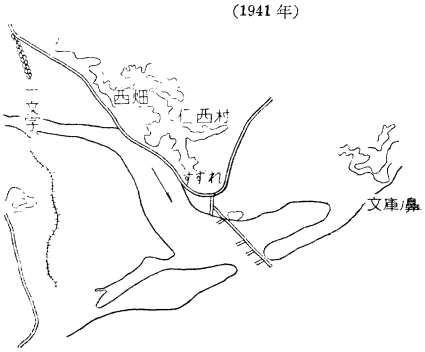
図—2（a） 仁淀川河口変せん図
（1915 年）



図—2（b） 同　　上
（1927 年）



図—2（c） 同　　上
（1941 年）



図—2（d） 同　　上
（1950 年）

図—2（e） 仁淀川河口変せん図
(1954 年)

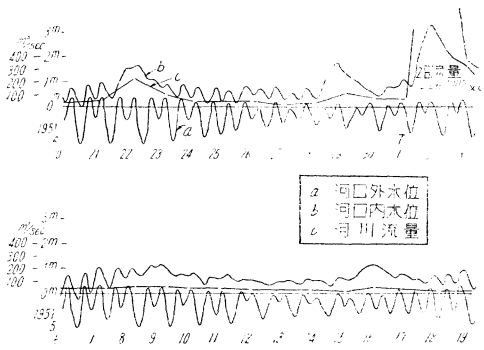
あげると，図—2 である。かつて左岸砂丘の前面は松原がつづき，河流ははるかに右岸寄りであつたものが最近の状況にいたつたのは，右岸構造物の新設に加えて海岸の全体的な erosion の優勢が考えられている。近年の開口部は大別すると次の二つである。すなわち現位置付近で小範囲前後左右するものと，遠く文庫ノ鼻（図—1）付近に開口するものである。文庫ノ鼻は岩礁が点在し，浜漂砂移動の上から重要な要素をもち，あまり高い堆積を生じないのであるが，夏季の波浪による侵食作用によつて付近の洲は低平化され，正面周口部の通水抵抗が大きい場合，始めてここに開口すると考えられる。しかしこの付近は冬季の西寄りの卓越風によつて堆積海岸となるから，永くここに開口し得ないのが常である。中四地建においてここ数年河口付近の深浅測量を行つているが，これに接続し県は萩岬（図—1）に至るいわゆる新居海岸を実測している。これらの資料からみられることは，新居海岸は勾配 1/10 よりやや急で侵食傾向にあり，昭和 29 年 12 号台風は約 1 500 m の海岸堤防を脚部から大破し，その復旧はようやく成つたが，さらに，防砂突堤の計画を余儀なくされている。しかしここでの海底地形は，河口部にみられるコンターの乱れはもはやほとんどなく，−15 m くらいまでは海岸線にほぼ平行している。また仁淀川右岸堤が砂丘に達する付近より東へ約 500 m の閂洲の部分は標高 40～60 m で，特に大部分を占める 60 mの区域は高浪も容易に越えず，1/10 くらいの勾配で，あまり大きな年次変化はみられない。開口部はたえず前後左右に位置を移動し，大出水のあとでは二重にも三重にも低い閂洲を形成している。これら漂砂移動の要素である流れ，特に河川流と波の屈回折を含んだ流れを明らかにしなければ海岸変化の説明は困難であるが，ここに地形的に注目すべきは萩岬と龍岬の間から両方に深く湾入している「横浪三里」といわれる浦ノ内湾の影響で，その湾口付近の調査も必要と考えるが，まだそこまで行われるに至つていない。なお河口付近の底質も一応調査したが完全な資料となつていない。

さて仁淀川河口の導流堤が現在までどのような経過をたどつたかを調べるのも計画上重要な参考と考える。図—2 にみるごとく，ほぼ現在の状態になつたのは昭和 2 年の洪水以後であつて，左岸側に大きく切れこみ，このため仁西村の耕地は次第に侵食せられ流亡の危険にさらされたので，ここに始めてすずれより下流に 3 カ所の水制が設けられた。この水制は延長 120 m くらいで元付の半分は鞍掛とし，河心の方の半分は連続牛わくであつた。しかしこれは侵食防止の根固めを目的としたもので，昭和 7 年の出水によつて流失し，ただちに復旧できず昭和 16 年まで放置された。昭和 16 年に始めて導流堤の形がとられ，延長 580 m が砂洲に向つて突き出されたが，これは幅 5.0 m，高 2.5 m の石張堤（控 50 cm）であつたので，強大な波浪と水流に，とうてい抗することができず，昭和 23 年に先端 300 m が流失した。終戦前後から杭出し，等でその保護につとめていたが，昭和 25 年キジヤ台風に際し，またまた根元の延長 150 m が流失して導流堤としての効用は全く失われるに至つた。昭和 29 年の数次にわたる台風は近来まれなもので，導流堤は跡かたもなく失われ，昭和 27 年に完成した海岸堤防 250 m までも欠潰し，ここに十分堅実な導流堤の築設が要望せられるに至つた。その導流堤は石張堤や簡単な捨石堤の，しかも低いものでは，とおてい維持できないと考え，今回の計画となつたわけである。

3. 仁淀川の河口処理計画

河口が閉塞またはこれに近い状態になつたときは，小洪水および大洪水の初期には，河口が必要な通水断面をとることができず，従つて河川水位は上昇して上流に至る関係耕地の冠水と排水不良を招き，さらに河川工作物の被災を助長する。また河口付近の左岸一帯も直接脅威をうけるので，適切な導流堤を築設してこれらの被害を防除せんとするもので，河口の安定によるプラス効果もあわせ，その効果は年平均 1.5 億円と推定されている。河口の不良によつて河川水位が容易に低下しない状況は河口内外水位曲線の一例（図—3）によつて明らかにみ

図—3 仁淀川河口内外水位曲線



ることができる。図—3 は河口の状態を示すため，内外水位曲線を対照させたものである。すなわち下部の曲線 a は潮汐の変動を示し，従つて開口部付近の海面水位であつて，これに対し上部の曲線 b はすずれ験潮器（約 1 000 m 上流）の実測水位であるから，この二曲線に挟まれた縦距は二点間の水位差，ひいては必要な導水勾配を示す。これはさらに，河口の閉塞状態を意味する導水抵抗をあらわすものであるといいうる。もしも河口の状態が最良ならば，b 曲線はその最も低い点から a 曲線にほぼ平行な曲線となるはずである。しかし実際のこの記録では河口不良のため，b 曲線たる河川水位が容易に低下していないことを示している。同図 c 線は，このときの河川流量を付加したものである。いま河口処理の施設として考えられる導流堤につき一般的な方針をあげると

a） 比較的小流量でも掃流力を効果的に発揮できるように導流堤の位置，方向，長さ等を計画して河口を閉塞させないと同時に，この固定された部分をほぼ一定の川幅，水深に維持し洪水に際しては，この開口部を足だまりとして速かに通水断面を確保する。

b） 導流堤の堤体近くは，はなはだしく深掘を生じ，その安定を損することを避ける。

c） 波浪および漂砂その他，海象に対し適切に導流堤を計画する。

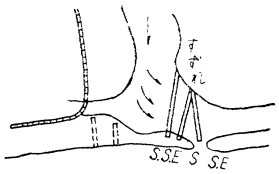
d） 洗掘や波力による破壊を防ぐ構造とする。

e） 河川を閉塞せんとする漂砂の移動を防止する防砂堤を考慮する。

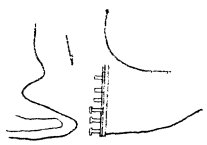
f） 施設を海岸構造物としてみたとき，その築造後における海岸変化，その他の二次的影響をも検討し，その対策をたてる。

以上であるが仁淀川について，その各項を検討する。まづ高知県における多くの河川は大なり小なり河口処理の必要が認められるが，仁淀川を含む二，三の河川を除いてはほとんど導流堤としての考え方により得ない。それらはいかに施設をしても数 m^3/s の平水量ではとうてい常時河口を開放し得ないからである。いわゆる小河川では特殊地形にあるものを除き，**e**）の防砂堤によつて極力河口の埋没を防ぎつつ河口の開放は洪水のみに頼らざるを得ない。仁淀川はその流況から掃流力を考えうるので，**a**）の導流堤としての施設が成り立ち，地形的水理的検討から左岸に導流堤を一本計画した(図—6,7)。本来導流堤が河川流に対し期待するものは，むしろ **b**）と矛盾するが，**b**）は **d**）とともに経済的工法たることを特に考慮したものである。次にその位置方向は，波と沿岸流から特に遮蔽する特別な形はこの場合考えられず，また海や風等の条件から絶対的な法線を帰納することは困難で，**c**）にもかかわらず上流部河川法線を主たる要素とし，きわめて自然に水流を海へ誘導せんとした。すなわち導流堤の方向はほぼ SE となつている。法線決定にあたり，導流堤先端をなるべく西へ寄せて河川流を右岸側砂丘へ押しつける形（図—4）はあえて採用しなかつた。その理由はウェルやケーソン工法によれば必要な根入をうることは可能であつても，現況での経済的施工が困難となるため，捨石堤を採用したことと，右岸の強大な砂丘を水流によつて切り崩し，洪水のたびに所要の断面を迅速にとらせうるかどうかの点も問題であつたからである。しかし将来もつと河口をしぼるか，導流堤自体に幅をもたせる必要を生じても，図—5 のような副堤その他の追加施設を可能とするよう考慮した。すなわち完全な資料や徹底した観察の結果が，早急には得らるべくもなく，理論的研究や実験結果のみに頼ることも不適当であるので，工事が手戻りにならぬことを前提とし，調査実験を今後並行させながら上述の工事計画を行うようにきめた。法線決定にあたり付言すると，河口付近の水制があまり利かない例を筆者は数多く体験しているので，すずれ岩礁のはねる力を重くみなかつたことである。左岸導流堤の延長は，現在の洲にほぼ達する 530 m をまづ計画した。

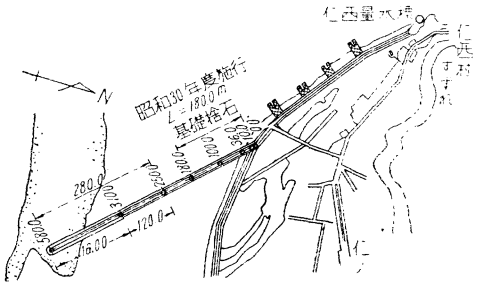
図—4



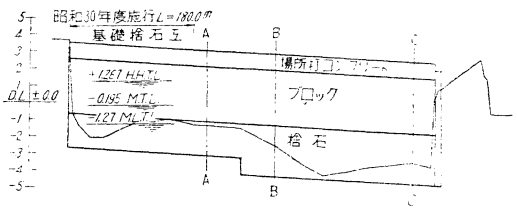
図—5



図—6 平　面　図



図—7 縦　断　面



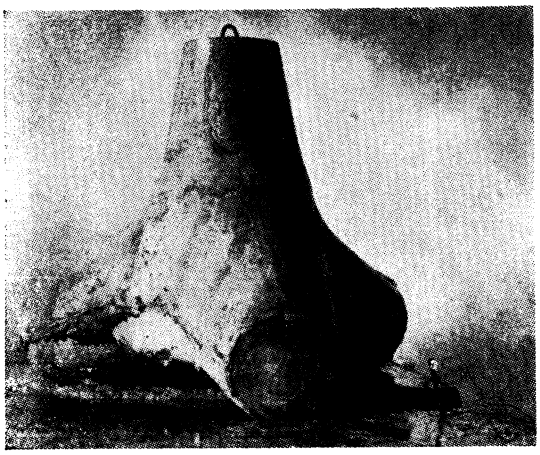
e）の防砂堤は右岸本堤の延長線上，または若干東へ寄せて築造することが考えられるが，現在ではその効果

が認めにくいので，計画しない。f）の検討：例えば導流堤背面が波浪に対しどのようになるか，あるいは沿岸の流れや海岸形状がどのように変るか等の検討は，実測資料の収集と実験等によつて行い，必要な計画を追加する考えである。導流堤背面の現遊水池は将来，砂浜または耕地とする計画である。最後に d）にもとづく方法として，フランス，ネールピック水理研究所の考案による四脚ブロック“テトラポット”を採用することとした。その効用は次に述べるが，導流堤の保護工として先端 160 m 両側および，これにつづく 120 m は河川流の洗掘側に用いることとした。これにより捨石堤の断面を小にし，工費を節約しようとするものである。

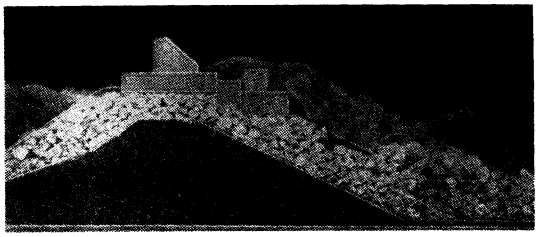
4. テトラポットの一般的効用

テトラポットは，波の破壊力をその突起によつて殺す機械的効用と，同時に堤体全体の安息角を大ならしめて材積を小にする工費上の効用とをねらつたものである。保護工としての一種の異形捨ブロックである。上の二つの効用のうち後者の特性は導流堤の中間部，川側にも応用したが，本来このブロックは波を外力とする防波堤に考案せられたものである。そこでまず防波堤に利用せられたこの工法を説明するが，その最大の要素は形である。いま鉄筋コンクリートの柱を互いに直交せしめると六脚のブロックができ，各ブロックを2個以上立体的に組合わせると，ブロックや捨石よりもはるかに安定がよく，突起する脚は波の形を崩し波力を減殺することが容易にうなづかれる。さらに，物体が平面上に安坐するには三脚を 120° 踏んばつた方がよいから，交角をかえて二脚減じた対称形とし，さきの柱に丸味と肉をつけて鉄筋をはぶき，重量を増して実験および実地に使用したところ，かみ合せもよく上述の特効を発揮し得たのがこのテトラポットであるといいうる。**写真—1** の形は，どちらへ転倒させても同形であつて，かみ合せといつても乱

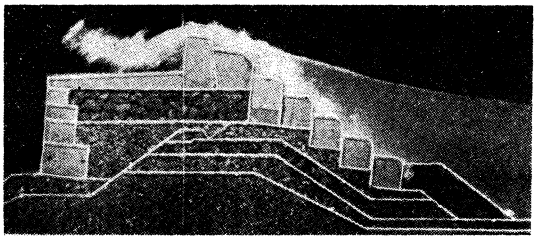
写真—1



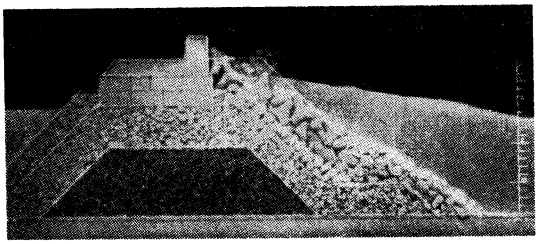
写真—2



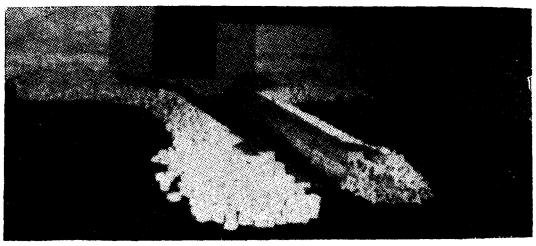
写真—3



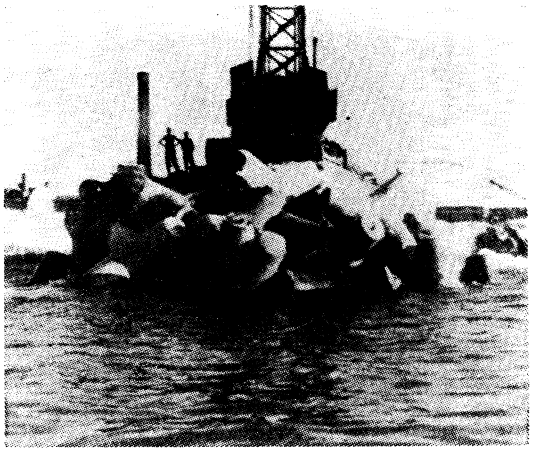
写真—4



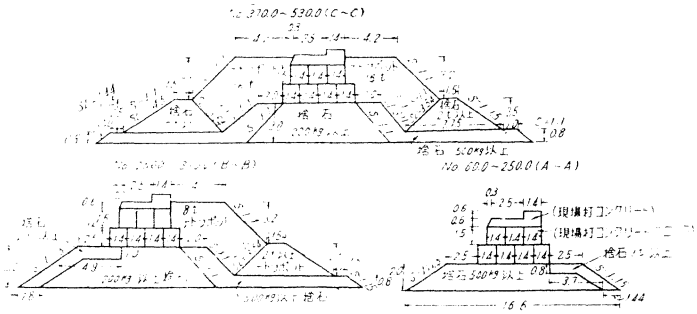
写真—5



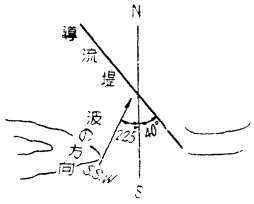
写真—6



図—8　標準断面図



図—9



積でよく，その空隙率は 50% であるから，おして材積の節約をしることができる。**写真—2,3,4** はそれぞれブロック配列堤，乱積ブロックおよびテトラポット堤の，同じ波浪に対する効果を示す実験写真である。この写真でも，堤体全体の大きさ，すなわち捨石基礎の大きさに注意されたい。材積の節減をよく示しているのは，テトラポットが最初に実施に使用せられた，カサブランカの海水取入堤の模型写真である（**写真—5**）。最近のネ研究所の資料によると，仏領モロッコ Safi 港で，堤高 7.5 m，前面の水深 14 m の防波堤が波高 4.0 m，週期 15 秒のN波に対し，45 t ブロック（法勾配 2：1）は洗い流されたものもあつたが，25 t テトラポット（法勾配1：1）はびくともしなかつたと報じている。

5.　テトラポットを使用する仁淀川導流堤

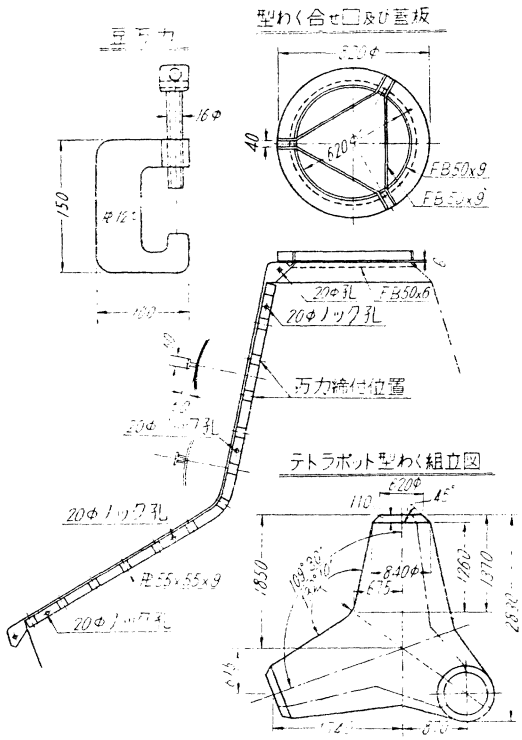
仁淀川導流堤の位置方向高さおよび延長等はすでにのべたとおりであるが，その構造は，使用材料，現場の条件および運搬方法等を検討の上，**図—8** のごとき断面とした。特に現場の水深が 2～3 m であることは種々の制約を与えた。検討の内容は a）ケーソン類のごとく現場作業の比較的長期なものは，高浪の来襲が予測されるこの付近では適当でない，b）船やケーソンによる水上輸送は困難である，c）付近で 1～2 t の捨石は豊富に採取できる，d）ブロックの輸送は根付から遂次前送できる構造としたがよい，等である。

次にブロックの大きさをどれくらいとすべきかであるが，仁淀川河口の海岸状況と高知県太平洋岸の実績を勘案すれば，ブロックの場合少くとも 25 t 以上なければ安定が期せられないから，テトラポットは 16 t を先端部に使用し，クレーンの規模，レール運搬の難易等に適応せしめた。導流堤中間部 120 m のテトラポットは 8 t としたが，右岸砂丘による遮蔽を考え，SSW 波につき一般の波力公式をもつて吟味すると（**図—9**）

$$P \fallingdotseq 4.7\ \mathrm{t/m^2}$$

ただし　$H = 4.0$ m　　$\alpha = 62°30'$

図—10　テトラポット型わく図



ブロックについていえば，波向方向の奥行が約 4.0 m を要することを意味するが，この波力に対し，**図—8**（B～B）断面のごとく計画した。もちろんこの部分は河川流の衝突をも考慮したものである。かくしてこの導流堤に設計せられたテトラポットの数は，16 t 571 コ，8 t 405 コである。最後にテトラポットの製作であるが，**図—10** のごとく鋼製型わく（4 コの対称形）を打込台の上に安置し，万力で結合して打設する。16 t のものは，堤体の先端に使用せられるから，冬季は砂丘上で製作することを考慮している。