

海岸（干拓）堤防の断面形状と波浪エネルギーの減殺効果について

——特に波のうちあげ高と波圧強度——

農林省九州農業試験場干拓部 加 藤 重 一

1. 緒 言

本報は、海岸堤防の断面形状いかんが、来襲せる波浪エネルギーの減殺効果にいちじるしい影響をおよぼすことを強調し、とくに堤壁に入射する波のうちあげ高と波圧強度とについて、たがいに連繫をもたせながらそれらの性質をあきらかにせんとする。

現在この問題に関しては、波のうちあげ高につき佐藤、石原両博士ほかのすぐれた研究があり、波圧強度については Sain flow 式および広井式や Minikin 式などがその代表的なものとして使用されているようであるが、実際上つぎのような不備があるようである。すなわち、波のうちあげ高についてはこれを一言にしていえば、部分重複波の影響が無視されていることで、1) 砕波点を浅水最大波高点とみなすこと、2) 簡単な堤防壁面、たとえば純垂直堤壁などをもつて、直立型一般の堤防にあたる波のうちあげ高に関する性質を代用すること、3) 砕波衝撃によるうちあげ高を Stoker 理論で一律に決めること、4) 砕波衝撃と称される種々なる機構の異なつた衝突状態を無視すること、5) Clapotis 入射のとき、8割反射を採用しても無意味なこと、などの欠点があり、その他堤高決定に際し、飛沫状態が考慮されていないなど不十分な点があるようである。また波圧強度については従来の計算式は実際における特別な 1 case を説明するにすぎず、実用上きわめて不便なことは周知のとおりである。これを要するに今までの研究は従来の水波理論解の検証ともいへば、この方面の実際への応用についてはまだ初期段階を出ていないものとみなすことができよう。

本研究は、上に記した不備を補うべく、実際におけるあらゆる堤防形状を網羅した広範囲な実験により、個々のもつうちあげ高と波圧強度についての性質をあきらかにした。なお本実験においては、浅水度 a/λ を考慮した Ballistic Pendulum 型造波機による模型波を使用し、また水槽は大型で、かつ現場実測値ともチェックして相似関係にも少なからぬ考察を行なつた。

2. 実験の方法

実験装置は、1) 実験水槽：長 25×幅 1×高 1.20(m) (両面ガラス張り)、2) 造波装置：Ballistic Pendulum 型式、3) 波圧測定装置：磁ヒズミ式微小波圧計と 6 素子電磁オシログラフで同時連続記録する。

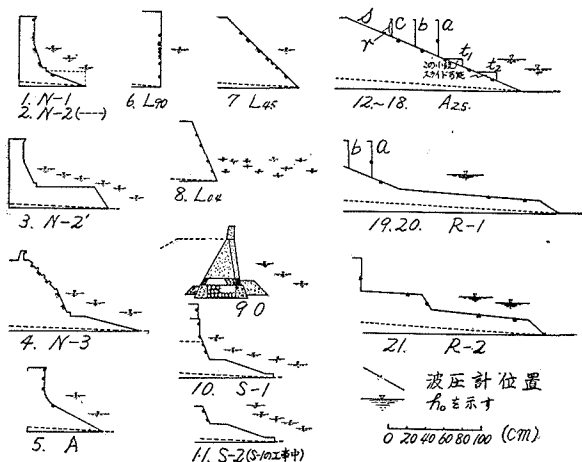
実験方法については、1) 堤防模型：收拾した全国海岸（干拓）堤防約 300 断面のうちより図 1 に示す 21 種の形状を選び、これらを 3 つのグループに分けて実験に供した。2) 模型波：模型波にもたせた浅水度、 a/λ は 0.04~0.5 (7 種) で Shallowness は 0.00~0.30、Steepness はほぼ 0.0054~0.072 の範囲である。3) 測定量は模型波の各ディメンジョン、うちあげ高、波圧、砕波の性質、反射率および反射状況などである。

なお本造波機による模型波の検定、おのおの場合の分子運動、無堤時の場合などについても詳細に実験を行なつた。

3. 堤防にあたる波

堤防に入射衝突する波については現在砕波点を境として Clapotis 型と砕波衝撃型の 2 つにわけ

図—1 堤防模型断面図



られているが、実際に説明するには不十分である。以下簡単に本研究で行なつた3グループの型の堤防形状についてみよう。

(1) 堤防断面形状 Group I (図-1~11)

Group I は直立型と称される一般海岸堤防のあらゆる形状のものを総括する。これに関しては前述佐藤、石原両博士他の研究があるが、これを修正補筆すべき二、三のことがらを略記しよう。

(1) 波が堤防型 Group I に入射衝突する機構上において、Clapotis 型と砕波衝撃型との全く異つた型式に分けられるほか、後者をさらに砕波点衝撃型、最高点衝撃型および落下点衝撃型などに区分すれば合理的と考える。本報はこの機構上の区分をもつて一貫し説明する。

(2) この Group に属する形状は千差万別であるが、ほぼ堤防ノリ面下半の形状が折線か曲線かによつて、入射波に非常に異なつた影響をおよぼす。概して前者は砕波促進的であり後者は抑制的である。この1例を次に示す。

(2) 堤防断面形状 Group II (図-1, 12~18)

Group II は緩勾配堤を総称するも反射率の小さいものおよび 45° 以上の急傾斜のものは除く。

この型の堤防に入射する状態は Group I とは全く異なり、一様にノリ面上で返り波と重なり、巻込み叩・打作用をくりかえす。すなわちこの型にあつては入射波が Clapotis であつても砕波であつても勾配上に入射する機構は同一で、概して Group II 型堤防は入射波を一律に規正する作用をもつということが出来る。

なお堤防形状が Group I から II に遷移するものについては次章に特筆し、これとともに Group I, II をもつて現行全堤防形状のもつ性質を総括したい。

(3) 堤防断面形状 Group III (図-1, 19~21)

前二者の実験結果よりさらに筆者が合理的な断面を求めんとする意味で、Group III は大階段をもつ形状を総称する。この場合、大階段の長さとその台上の水深を砕波落下点の生ずる限界に定めることが条件である。

したがつて、この Group の堤防に入射する状況は Group II と同様入射波を一律に規正し、この場合は台上に落下点を生ぜしめるような機構となる。本体壁面に生ずるうちあげ高や波力はきわめて小さい。なお1段式や2段式の形状の特徴その他のことがらについては4. でふれる。

以上を要するに、かく堤防形状が異なれば、その波力減殺効果も異なるということは一にかかつて反射率の相違によるものであることを指摘しなければならない。次章以下はこの反射率と相俟つた部分重複波の性質をしらべるとともに、波のうちあげ高および波圧との関係についてみよう。

4. 波のうちあげ高

波のうちあげ高を考察するにあつては、入射する波の性質について知ることが肝要であり、本研究では各堤防ごとに下記の諸関係、1) 波形と砕波水深との関係につき $H_b/\lambda_b \sim h_b/\lambda_b$, $H_0/\lambda_0 \sim h_b/\lambda_0$ および $a_{1b}/H_0 \sim h_b/\lambda_b$, 2) Steepness と砕波条件につき $h_b/H_b \sim H_b/\lambda_b$, $h_b/H_0 \sim H_0/\lambda_0$ および $H_b/H_0 \sim H_0/\lambda_b$, 3) 砕波帯につき水深変化による波高ならびに波頂高の変化状況および砕波帯の長さなどについて考察したが、ここではスเปース数の関係で一切を割愛しなければならない。つぎに波のうちあげ高にもつとも関係のある反射率につきその性質をしらべた。その結果のみを図-2 に掲げる。反射率の計算は一応 Hearnly にしたがつたが Group II および III になると反射の位相が異なり、この方法は必ずしも妥当でない。得た曲線はかく堤防ごとに数100点のプロットよりその平均をもつて整理したものである。

さて波のうちあげ高については、ここでは石原博士の方法にしたがつたが、別に Shallowness を Parameter として $a_u/H_0 \sim H_0/\lambda_0$ の関係やその他についてもしらべ、堤防形状のもつ特徴につき一般化したのがこれも省略する。以下簡単に図-3 $a_u/H_0 \sim h_f/\lambda_0$ (Parameter: H_0/λ_0) についてのみ概説するにとどめる。

(1) 堤防断面形状 Group I

Group は3種のうちあげ状態、i) 越波限界線(実線): a_{uw} , ii) かなり飛沫の越える限界線(破線): $a_{u\beta}$, iii) 最高飛沫打上線(鎖線): a_{ur} をもつて示し、かく H_0/λ_0 ごとに B.P. (○印) および M.P. (△印) などを併記した。

図-3 (a) および (b) は現行海岸堤防の一般型で形状において酷似するが、前述打線施工と曲線挿入の差異により非常に異なつたうちあげ高状態を示している。このグラフについての詳細ははぶくが a_{uw}/H_0 と $a_{u\beta}/H_0$ との値について、1) N-1 の飛沫はAより大きい a_{uw} の値は逆に小さいこと、2) B.P. および M.P. の生ずる位置にいちじるしい相違のあること、3) a_{uw} と $a_{u\beta}$ のピークの生ずる位置に差異のあることなどは特筆に値する(これらの理由は明瞭)。なおもつとも近い値を示す、Aのグラフに Stoker 理論で無堤時に相対する

図-2 反射率

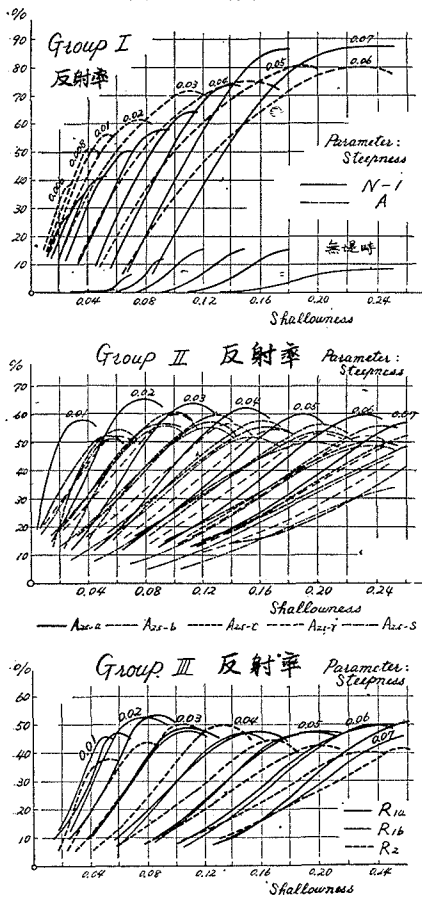


図-3 (a) 波の打ちあげ高

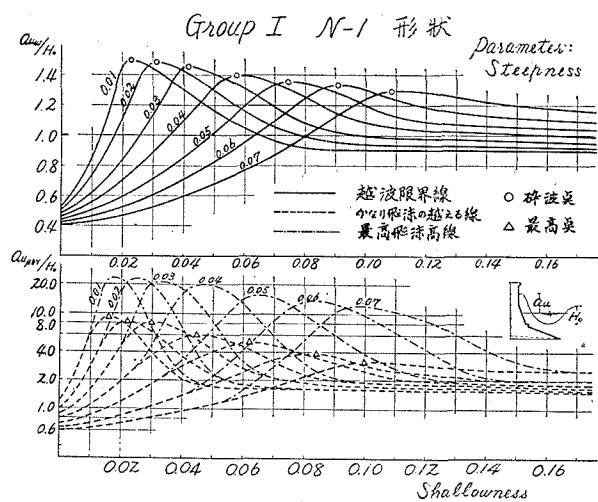


図-3 (b) 同上

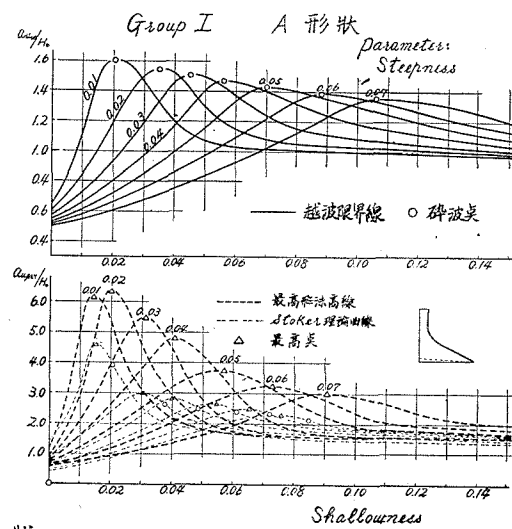


図-3 (c) 同上

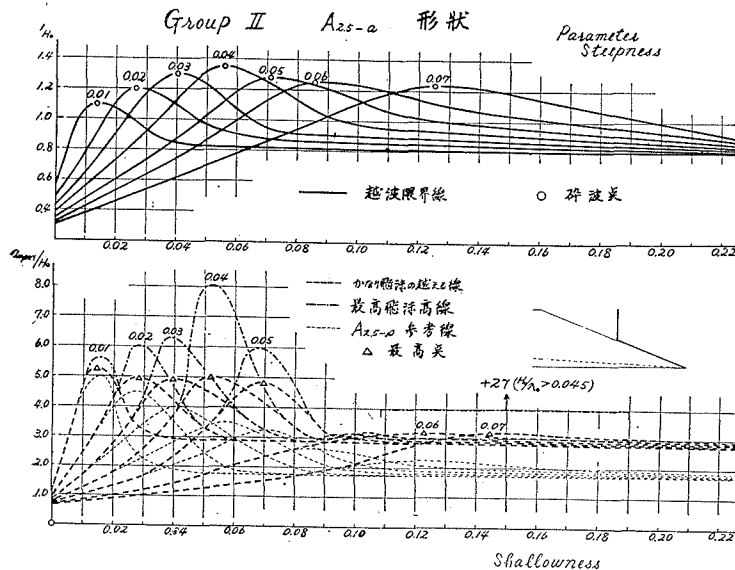


図-3 (d) 波の打ち上げ高

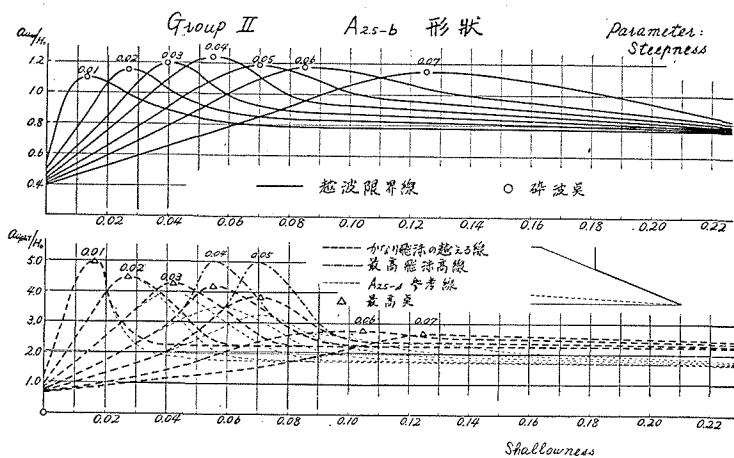


図-3 (e) 同上

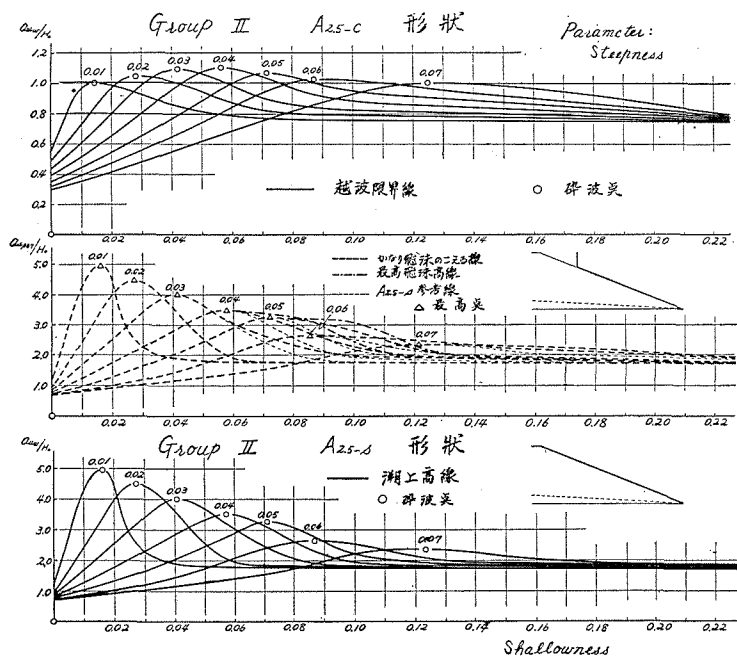


図-3 (f) 同上

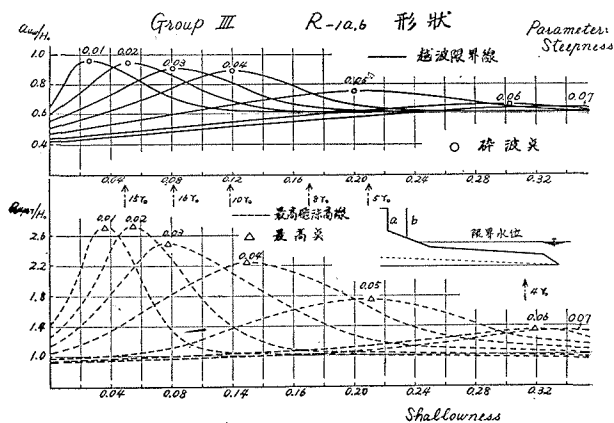
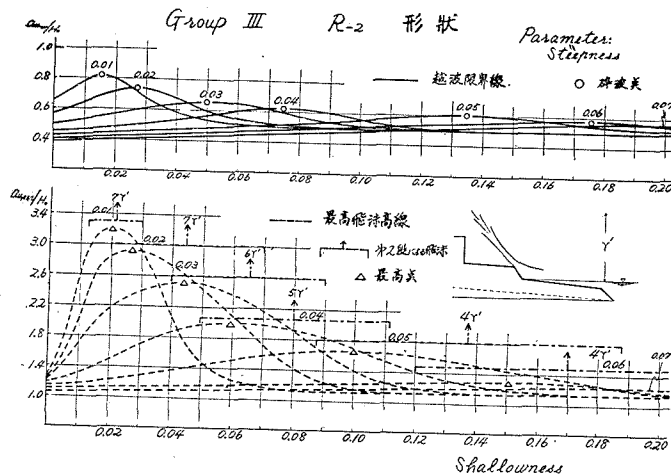


図-3 (g) 波の打ち上げ高



計算値を併記したが、かなりの相違のあることをしる。

(2) 堤防断面形状 Group II

図-3, c~e は 2.5 割勾配をもつ緩勾配堤 $A_{2.5-s}$ とノリ面上のかく位置に垂直壁を設けて Group I との間の堤防遷移型 $A_{2.5-a,b}$ および c と称すべき一般混成堤の性質についてそのうちあげ高の性質をしめす。

まず $A_{2.5-s}$ についてはすでに佐藤博士により研究されている。本研究でもグラフでみるように、同様の結果を得たがこの堤防の a_u は測上高を測定したもので、ただこの曲線だけでは実際上の意味が少ない。そこで $A_{2.5-a}$ などについてみなければならない。図-3, c~e は Group I と同様の表示法で a_u の性質をしめすものであるが、1) 画く曲線のピークは $H_0/\lambda_0=0.04$ にあること、2) Shallowness が大きくなると垂直壁の影響でさらにもう一つの最大点が生ずること（つまり 2 種の堤防形を合成したような性質をもつこと）、3) -a, -b および -c 断面と垂直壁の位置が後退すると、以上の傾向をもちながら -s 断面に近づくことなどが明瞭にわかる。そこで -s 断面の曲線を他断面の $a_{u\beta}$ 線に相当するものと仮定して -s 断面にも a_{uw} 線と巻込み状況より推定して決定し記入したが、これは -c 断面の a_{uw} にほぼひとしいことがわかった。かくグラフには細破線で -s 断面の曲線を参考線として併記しておいた。なお Shallowness の範囲が大きくなること、B.P. 点が M.P. のあとに生ずることなどは興味ふかい。この結果から実際上に種々興味あることが示唆される。

(3) 堤防断面形状 Group III

この形状になると $a_{u\tau}/H_0$ の値ですらほぼ 3 にすぎない。この Group に属する堤防の性質も Group II とほぼ同様のことがいえる。すなわち、1) 大階段法面を境として 2 種の形状が合成したとみるべき性質をもっている、2) B.P. 点は M.P. 点よりおくらせて生ずる。この理由は階段によつて、まず波高が高まり、これとほぼ同様に水深の小なる台上未満で B.P. となるからである。3) R_{1-a} と b との差はほとんどないと言つてよい。なおグラフにしるした矢印は R_{1-} においては台上水深が深く、壁に D.P. が生じたときの飛沫高で、この場合はこの型の特徴は失する。 R_{2-} では第 2 段法に落下衝突する飛沫高をしめす。

以上本章については初めに掲げた諸関係とともに考察し実際上どのような意味をもつかについて考察したが、これも略する。

5. 波力の強度

波浪エネルギー減殺効果については前章の波の打ち上げ高と同時に波力強度についてもみなければならない。波力については非常に多くの研究者が考察をおこなっているが、現在実際に供しうるとき計算式は少ない。波圧についても前章同様部分重複波理論が確立していないので、1) 反射をどのように考慮し取扱うか、2) 実際に多くあらわれる Clapotis と砕波の中間型なる衝突型式をどのように考慮するか、3) 種々なる砕波機構につきどう処理するかなどが問題となるわけである。本報は広範な実験にもとづき実際に利用できる合理的な計算式を誘導した。

(1) 実験の結果

実験の全貌をしめすため代表的な数値の一部を掲げよう（一部省略）。

表-1 波力に関する

番号	模型	h_0	h_f	d/λ	$T_{(s)}$	λ_0	C_0	λ_1	C_f	P	H_0	H_0/λ_0	h_f/λ_0	排波高 H_f a_1 a_2	砕波水深 h_b	H_b/λ_f	h_b/λ_f	B.P. 点位置	波圧 測点数
1.	N-1	40	40	0.20	1.23	200	143	170	140	42	12.5	0.063	0.20	25.0	40	0.147	0.235	模型面	4
		"	"	0.10	2.14	408	182	378	182	"	14.0	0.034	0.098	28.0	"	0.074	0.106	—	"
		"	"	0.08	2.62	486	200	456	200	"	17.0	0.035	0.082	34.0	"	0.075	0.088	—	"
		"	"	0.04	5.09	952	167	902	167	"	12.0	0.013	0.042	24.0	"	0.027	0.044	—	"
		30	30	0.20	1.23	178	143	148	140	"	8.0	0.045	0.169	16.0	30	0.108	0.203	—	"
		"	"	0.10	2.14	345	133	315	133	"	9.0	0.026	0.087	18.0	"	0.057	0.095	—	"
		"	"	0.08	2.62	473	143	443	143	"	9.0	0.019	0.064	18.0	"	0.041	0.068	—	"
		"	"	0.04	5.09	868	143	818	143	"	10.0	0.012	0.035	20.0	"	0.024	0.037	—	"
		20	20	0.20	1.23	163	133	133	130	"	4.0	0.025	0.123	8.0	20	0.060	0.150	模型面	"
		"	"	0.10	2.14	312	118	282	115	"	6.0	0.019	0.064	12.0	"	0.043	0.071	"	"
		"	"	0.08	2.62	384	129	354	126	"	5.0	0.013	0.052	10.0	"	0.028	0.056	"	"
		"	"	0.04	5.09	618	143	568	140	"	5.0	0.008	0.032	10.0	"	0.018	0.035	—	"
2.	N-2	40	40	0.20	1.23	200	143	170	140	42	12.5	0.063	0.20	25.0	40	0.147	0.235	—	4
		"	"	0.10	2.14	408	182	378	182	"	14.0	0.034	0.098	28.0	"	0.074	0.106	模型面	"
		"	"	0.08	2.62	486	200	456	200	"	17.0	0.035	0.082	34.0	"	0.075	0.088	"	"
		"	"	0.04	5.09	952	167	902	167	"	12.0	0.013	0.042	24.0	"	0.027	0.044	—	"
		30	30	0.20	1.23	178	143	148	140	"	8.0	0.045	0.169	16.0	30	0.108	0.203	模型面	3
		"	"	0.10	2.14	345	133	315	133	"	9.0	0.026	0.087	18.0	"	0.057	0.095	—	"
		"	"	0.08	2.62	473	143	443	143	"	9.0	0.019	0.064	18.0	"	0.041	0.068	—	"
		"	"	0.04	5.09	868	143	818	143	"	10.0	0.012	0.035	20.0	"	0.024	0.037	—	"
		20	20	0.20	1.23	163	133	133	130	"	4.0	0.025	0.123	8.0	20	0.060	0.150	—	"
		"	"	0.10	2.14	312	118	282	115	"	6.0	0.019	0.064	12.0	"	0.043	0.071	—	"
		"	"	0.08	2.62	384	129	354	126	"	5.0	0.013	0.052	10.0	"	0.028	0.056	台隅	"
		"	"	0.04	5.09	618	143	568	140	"	5.0	0.008	0.032	10.0	"	0.018	0.035	"	"
3.	N-2'	60	45	0.20	1.51	266 313 555 618 737 780	200 222 222 250 250 250	260 520 730 730	182 222 250	42	19.0	0.071 0.061 0.041 0.037 0.027 0.026	0.169 0.144 0.081 0.073 0.061 0.058	36~39 55~65 33	48 55 60	0.138 ~0.150 0.106 ~0.125 0.045	0.185 0.106 0.082	14.48 13.19 —	3 " "
		"	"	0.10	2.62					"	23.0								"
		"	"	0.08	3.20					"	20.0								"
4.	N-3	40	40	0.20	1.25	200	143	170	140	42	12.5	0.063	0.20	25.0	40	0.147	0.235	—	5
		"	"	0.14	1.60	261	167	231	164	"	15.0	0.058	0.154	30.0	"	0.130	0.173	—	"
		"	"	0.10	2.20	408	182	378	182	"	14.0	0.034	0.098	28.0	"	0.074	0.106	—	"
		"	"	0.08	2.65	486	200	456	200	"	17.0	0.035	0.082	34.0	"	0.075	0.088	—	"
		"	"	0.06	3.45	684	167	644	167	"	14.0	0.021	0.058	28.0	"	0.043	0.062	—	"
		"	"	0.04	5.10	952	167	902	167	"	12.0	0.013	0.042	24.0	"	0.027	0.044	—	"
		30	30	0.20	1.08	160	154	130	151	"	8.0	0.050	0.187	16.0	30	0.123	0.231	—	3
		"	"	0.14	1.38	205	154	175	151	"	14.0	0.068	0.146	28.0	"	0.160	0.171	—	"
		"	"	0.10	1.88	289	154	259	151	"	12.0	0.042	0.104	24.0	"	0.093	0.116	—	"
		"	"	0.08	2.30	385	148	355	145	"	16.0	0.042	0.078	32.0	"	0.090	0.085	—	"
		"	"	0.06	2.98	485	133	445	130	"	14.0	0.029	0.062	28.0	"	0.063	0.067	—	"
		"	"	0.04	4.40	760	160	710	160	"	14.0	0.018	0.040	28.0	"	0.039	0.042	—	"
		20	20	0.14	1.14	143	133	113	130	"	7.0	0.049	0.140	14.0	20	0.124	0.177	—	"
		"	"	0.10	1.51	214	138	184	135	"	8.0	0.038	0.093	16.0	"	0.087	0.109	—	"
		"	"	0.08	1.85	275	133	245	130	"	8.0	0.029	0.073	16.0	"	0.065	0.082	前法上	"
		"	"	0.06	2.43	368	133	328	130	"	8.0	0.022	0.054	16.0	"	0.049	0.061	"	"
		"	"	0.04	3.60	537	148	487	145	"	8.0	0.015	0.037	16.0	"	0.033	0.041	"	"

データー

波圧計位置及び圧力最大最小値 (g/cm ²)																波 圧 最大値	波 圧 最小値	圧力波 形式	a_{uw}/H_0	反射率 %	O_s No.
波圧計 位置 (cm)	Max	Min	波圧計 位置 (cm)	Max	Min	波圧計 位置 (cm)	Max	Min	波圧計 位置 (cm)	Max	Min	波圧計 位置 (cm)	Max	Min							
31.5	0	0	11.5	9.0	0	-1.0	13.5	-1.0	-16.8	7.0	-14.0					13.5	-14.0	D.C	1.18	84.9	5~1 (1)
"	0	0	"	7.0	0	"	15.0	-1.0	"	10.0	-14.8					15.0	-14.0	C	1.02	54.5	5~3
"	0	0	"	12.5	0	"	21.0	-1.0	"	14.0	-16.8					21.0	-16.8	C	1.16	52.8	5~5 (2)
"	0	0	"	11.0	0	"	22.0	-1.0	"	14.0	-1.0					22.0	-1.0	C	1.28	38.0	5~7 (3)
			21.5	0	0	9.0	8.0	0	-6.8	12.0	-10.0	-15.4	5.5	-14.5	12.0	-14.5	C	0.98	61.1		
			"	0	0	"	6.0	0	"	11.0	-13.0	"	8.5	-8.5	11.0	-13.0	C	1.00	54.7		
			"	0	0	"	9.0	0	"	14.0	-8.0	"	9.5	-6.5	14.0	-8.0	C	1.09	48.6		
			"	1.5	0	"	10.2	0	"	26.8	0	"	32.7	0	32.7	0	D	1.32	33.5		
			31.5	0	0	19.0	2.5	0	3.2	24.0	0	-5.4	6.5	-5.5	24.0	-5.5	D	0.92	53.4	5~17 (4)	
			"	0	0	"	2.5	0	"	15.0	0	"	8.0	-7.5	15.0	-7.5	D.C	1.09	48.9		
			"	0	0	"	0	0	"	20.0	0	"	7.5	-5.5	20.0	-5.5	D.C	1.16	41.1		
			"	0	0	"	2.0	0	"	17.0	0	"	12.0	-1.0	17.0	-1.0		1.29	32.5		
31.5	5.0	0	11.5	9.0	0	-1.0	16.0	-1.0	-16.8	8.0	-14.5					16.1	-14.5	C	1.13	85.8	5~4 (5)
"	36.0	0	"	11.0	0	"	19.0	-1.0	"	11.0	-13.0					36.0	(-13.0)	I.D	1.02	58.1	5~6 (6)
"	17.0	0	"	26.0	0	"	27.0	-1.0	"	17.0	-14.0					27.0	(-14.0)	D	1.15	53.0	
"	0	0	"	11.0	0	"	19.0	-1.0	"	11.0	-8.0					19.0	-8.0	C	1.32	37.9	
			21.5	0	0	9.0	7.0	0	-6.8	17.0	-5.0 (箱下)	4.5	-5.0	17.0	-5.0	D	1.03	67.3			5~12 (7)
			"	0	0	"	5.0	0	"	12.0	-10.0					12.0	-10.0	C	1.01	54.4	
			"	0	0	"	11.0	0	"	22.0	0					22.0	0		1.09	48.9	
			"	2.0	0	"	11.3	0	"	20.5	0					20.5	0		1.39	29.5	
			31.5	0	0	19.0	2.5	0	3.2	0	0					0	0	—	1.96	55.6	
			"	0	0	"	2.5	0	"	0	0					0	0	—	1.11	48.6	
			"	0	0	"	0	0	"	5.0	0					5.0	0	D	1.18	41.1	
			"	0	0	"	3.0	0	"	15.0	0					0	0	D	1.39	32.6	
31.5	20.0	0	11.5	72.0	0	-1.0	30.0	-1.0								72.0	-1.0	I	1.18 1.15 1.26 1.28 1.24 1.27	72.1 73.8 46.3 44.0 43.6 41.8	
"	7.0	0	"	17.0	0	"	26.0	-1.0								26.0	-1.0	D			
"	0	0	"	12.0	0	"	19.0	-1.0								19.0	-1.0	C			
33.0	0	0	20.0	0	0	1.0	5.0	-2.0	0.0	14.0	0	-15.0	7.0	-15.0	14.0	-15.0	C-D	1.13	58.0	6~2 (8)	
"	0	0	"	0	0	"	10.0	0	"	15.0	0	"	10.0	-15.0	15.0	-15.0	C-D	1.11	78.1		
"	0	0	"	0	0	"	0	0	"	16.0	0	"	10.0	-12.5	16.0	-12.5	C-D	1.04	58.5		
"	0	0	"	12.0	0	"	0	0	"	22.0	0	"	14.0	16.0	22.0	-16.0	C-D	1.14	54.1		
"	0	0	"	8.0	0	"	0	0	"	21.0	0	"	13.0	-14.0	21.0	-14.0	C-D	1.21	45.5		
"	0	0	"	0	0	"	0	0	"	16.0	0	"	11.0	10.0	16.0	-10.0	C-D	1.32	37.9		
						25.0	0	0	10.0	4.0	0	-5.0	8.0	-5.0	8.0	-5.0	C	1.04	73.5		
						"	5.0	0	"	6.0	0	"	11.0	-5.0	11.0	-5.0	C	1.19	63.1		
						"	0	0	"	7.0	0	"	10.0	-5.0	10.0	-5.0	C	"	61.1		
						"	0	0	"	5.0	0	"	10.0	-5.0	10.0	-5.0	C	1.29	42.3		
						"	0	0	"	4.0	0	"	10.0	-5.0	10.0	-5.0	C	1.26	43.2		
						"	0	0	"	7.0	0	"	11.0	-5.0	11.0	-5.0	C	1.39	33.8		
						30.8	0	0	20.0	0	0	5.0	0	0	0	0	—	1.05	74.0		
						"	0	0	"	0	0	"	0	0	0	0	—	1.09	57.4		
						"	0	0	"	0	0	"	6.0	0	6.0	0	D	1.12	50.9		
						"	0	0	"	2.0	0	"	13.0	0	13.0	0	D	1.27	42.4		
						"	0	0	"	10.0	0	"	13.0	0	13.0	0	D	1.41	32.6		

(2) 実験結果の解析

表-1 にしめすような多くのデータより、1) 垂直最大圧力分布、2) $P_{\max} \sim H_0$ 、3) $P_{\max} \sim H_0/\lambda_0$ 、4) $P_{\max} \sim v^2/2g$ 、5) $P_{\max} \sim T$ 、6) その他衝撃波圧についての種々なる関係などにつき考察し、興味ある結果を得たが、これらについても詳細を省略するが以下に特筆すべきことがらのみを列挙しておこう。

砕波については、1) Minikin のいう Air を水平に圧縮するという現象は一般に生じない。これは特別な場合で、Group I に属する折線捨石のある特定断面形において Steepness の小なる純進行性波が衝突する場合にのみ間々生ずる現象である。ただし実際では波自体の干渉によつて Minikin 現象が生ずることも可能である。

2) 実際上の波圧は複雑な反射波のため振動をとまらう。

3) Group II, III の砕波における最大圧力分布は I に比しその傾向が明瞭である。これは入射波を一律に規正することを証左する。

4) $P_{\max}$ と H_0 , H_0/λ_0 および $v^2/2g$ とのかく関係は一樣増加傾向でなく、それぞれにおいてピークが存在する。これは砕波機構の差によるもので、落下点衝撃では分子運動方向が下向きに巻き込むことなどによる。従来の研究ではこの点を指摘し得ない。

5) Group II, III の台上叩打撃については正負圧が同時に作用することが多い。施工上の注意が喚起される。

つぎに Clapotis 入射については、6) Clapotis とみなされる実際の波についての Group I における垂直最大圧力分布は、一般に Sainflow 式に比しその最大値は大きくなる、など。

以上を要するに、Sainflow や Larras のしめした典型的な連続性および不連続性または衝撃性週期波なるものは、実際にあまり起り得ないと結論することができる。

(3) 堤防にかかる砕波の圧力強度計算式

再度くりかえすごとく、砕波の機構はきわめて複雑で、これを流体力学的に真向からとくことは容易でない。ひるがえつて本実験より得た数 100 枚の圧力波型を、そののみ通覧すると入射衝突状況のいかにかわらず、つまり堤防断面形のいかにかわらず遠観的に砕波衝撃全般をある物理現象とみなしうる。すなわち、永井博士のごとくこれを噴流とみなしてのち、堤防断面ごとの各衝突状態について実験より係数を決定する方法がとられるものとすれば合理的であろう。

$$P_{\max} = \rho C^2 \quad \text{ここに } \rho: \text{密度}, C: \text{波速} \quad (1)$$

これは噴流が直角に壁に衝突した場合の式である。しかるに、堤防断面形状による入射波水分子の運動方向は複雑であるので、主として堤防形状による係数 μ をもちい、 $P_{\max}$ をまず次式のようにおく。

$$P_{\max} = \rho C_0 \mu' C^2 \quad \text{ここに } C_0: \text{常数} \quad (2)$$

一方浅水波理論の第 1 次近似を用いると

$$ka = \tanh kh \quad \text{ここに } a: \text{半波高}, k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

$$\therefore \lambda = \frac{2\pi a}{\tanh kh} \quad (4)$$

いま、堤防形状による入射波の変形する点（主として堤脚部）の水深 $hi (= f(Hi))$ における波長を λ_b でしめせば、堤防形状による係数は

$$\mu' = \frac{2\pi a}{\tanh kh} / \lambda_b \quad (5)$$

しかして $C_0 \mu' = \mu$ なる形に $P_{\max}$ をしめせば

$$\frac{P_{\max}}{w_0} = \frac{\mu \pi h_b H_b}{\lambda_b} \quad (6)$$

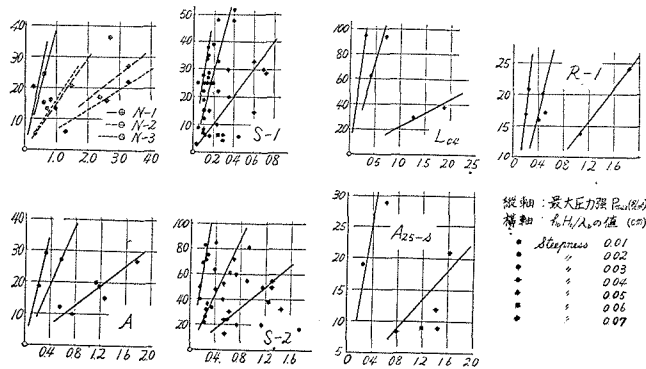
ただし、

$$C \doteq \sqrt{gh_b}, \quad 2a = H_b$$

上式は砕波の最大圧力強度算定式の一般形である。

ゆえに再び実験データによれば、堤防形状ごとにそれぞれの入射状態を分類して 図-4 にしめすごとく、あらゆる場合の係数を決定することができる。表-2 はそれをまとめたものである。なお 図-4 については巻末文献に詳細を説明しているが、当日講演においても言及する。

本法の合理的なことは、図-3 のグラフからも明らかなごとく、Shallowness をある区間固定すれば、その範囲の Steepness において幾つかの入射衝突状態を適宜分類することができるからである。上の式と表によれば、実際のあらゆる場合に適用することができるわけである。なお相似関係については、本実験によれば実際のほぼ 1/3 倍となつてゐることを付言するにとどめる。

図-4 μ の 値表-2 μ の 値

Steepness	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
模 型							
N-1			←16.001→		←12.637→		
N-2			←4.647→		←2.610→		
N-3			←4.934→		←2.101→		
A	←28.743→	←15.343→		←5.061→			
L 0.4	←98.708→	←46.219→		←7.035→			
S-1	←85.689→	←43.799→		←16.393→			
S-2	←96.607→	←34.823→		←13.274→			
A _{2.5-s}	←19.576→			←3.502→			
R-b	←26.643→	←12.923→		←4.138→			

4. 堤防形状と波浪エネルギー実験減殺効果

以上種々なる形状をもつ堤防が波浪に対し、いかなる効力をもっているかについて略述したが、本章では以上のほか本研究で結論を得た諸事項を列挙し、堤防の機能について略述するとともに実際設計に資する。

海岸堤防なるものは外囲のいちじるしい条件の変化、たとえば第一に堤脚水深、波形、波それ自身の干渉、さらには風力など複雑な諸要素によって、そのうける作用力が異なると同時にこれらの外囲の条件はまた堤防断面形状のいかんによつて影響されることを知つた。したがつてわれわれは、堤防なる観念を固定してはならず、つねに最有利な状況におかしめるとく堤防を設計しなければならない。以下そのための重要なことがらを明記しよう。

(1) 砕 波

このテーマ中のもつとも重要なことがらであるが、従来の砕波の研究は無堤時のみについてのもので、あらゆる堤防設置時における砕波の性質についての考察はあまり報告をみない。このことは種々なる堤防形状による異なつた反射率をなす場合の砕波の性質をしらべることを意味し、本研究は冒頭にも記したように詳細に実験してその性質を明らかにした。これによると、一般に砕波水深は無堤時のときのそれより大であるといえる。当然 Group I～III において大きい差異をしめすが、本実験ではほぼ 10～30 % の増加量をみることを特筆して、設計にこれを考慮すべきことを主張する。

(2) 堤防断面形状

1) Group I a) この型に属する折線施工のものにあつては、その形状いかんにより飛沫高にいちじるしい相違があるが、本報で述べた N-1 と A とから類推してよい。概していえば、堤脚部に急激な変化のあるもの

は a_{ur} を大にする。

b. 築堤途中の形状は、水深大なるとき完成断面形状のものより a_u および波圧はともにその値は小さいが、波が越るのでその安定に注意しなければならない。本研究では3種の縮尺の模型で実験し、その安定について論じたがここでは略す。

c. パラペットは水勢をそらすような曲玉状がよい。

d. 相似性関係はほぼ合致するが、実験室の飛沫は時に実際では波として錯覚しがちである。われわれはこれを単に錯覚とせず決壊に対して風や盛土、湿潤についても考慮し、ある程度飛沫の大きいときは安全率をとる方がよいと考える。

2) Group II a. 緩勾配堤ではその有利な性質を利用することが先決で、徒らに法面上に小段などの細工はさけた方がよい。

b. 緩勾配堤のもつとも合理的断面は、 $A_{2.5-c}$ または b のごときもので、この場合前述のパラペットを施工するものが最有利と考える。

3) Group III a. 大階段の長さは $l/h_b \sim H_0/\lambda_0$ (このグラフも省略) によりもとめられるが、あまり長くなると適宜階段の形状を変形すればよい。

b. その手段として、第2段型を採用すれば波力減殺を第一目的とするときは有利である。

c. この Group の形状は、地盤が軟弱なとき破壊沈下防止を目的とする場合の断面形(筆者提唱)に合致し興味ぶかい。要するに適宜適当に堤防に期待する第一目的に沿はしめて設計すればきわめて有利な断面形状となる。

(3) 堤防形状と波浪エネルギーの減殺効果

これを要するに、波浪のもつエネルギーは堤防なる障害物で直接に阻止されるものでなく、堤防の形状によつて波自体に変形が与えられ(主として砕波として)、その擾乱によつて波力を減殺しめるわけである。したがつてできるだけ砕波生成を促進し、堤防直前で波のもつエネルギーが消耗されるような形状であればよいことになり、しかもその上にたつてなるだけ施工経済上に有利な断面形であることが合理的ということになる。ゆえに外囲条件の支配なることをあわせ考慮すると、必らずしもここに将来において唯一の理想断面形態なるものが存在するものではなく、本報 Group I~III の各断面形状は同時に利点と欠点とをもっているもので、そのいずれの形状を選択するかは各現場現場の条件に応じて、本報でのべた性質を考慮に入れて決定されるべきであると考えらる。

9. 結 言

本研究によつて、実際の海岸堤防に入射する波の変形に関する性質を明らかにし、かつ堤防断面形状による波のうちあげ高と波圧強度についてほぼその特質を明瞭ならしめ、ここに実際設計に対しある程度の基準を示し得たものと考えらる。

本報は紙数に制限があり、本研究内容の Summary 程度にしか記述できなかつたがこの詳細は文献を参照されたい。(加藤重一：干拓堤防の形状断面と波浪エネルギーの減殺効果に関する研究、農林省九州農業試験場干拓部、干拓研究報告、第67号、Oct. 1958)

なお、本研究は2次元無風状態についてのみとりあつたついで、入射方向が斜めの場合や屈折回折および風力などの影響を考慮した研究が今後にはぞまれる。

本報で使用した記号のうち、説明しなかつたものは水理公式集(土木学会編)による。