

海岸堤防に作用する不規則波の波力

橋 本 宏*

1. ま え が き

海岸堤防は、陸上への波の侵入を防止するとともに、構造的には、波力や土圧などに対して、安定でなければならない。波力に関しては、これまでも模型実験による検討^{1),2)}がなされてきた。これらはいずれも、波高、周期ともに一定の規則的な波によって、入射波と波力の関係が求められている。しかし、実際の海の波は不規則であって、規則波の成果をそのまま適用するわけにはいかないと考えられる。ここでは不規則波造波水路を使用した模型実験によって、入射波と波力の関係、波力の頻度分布などについて検討した。現在行なわれている規則波の結果を用いる方法の妥当性についても限られた条件ではあるが検討した。

2. 実験方法

模型実験は幅 60 cm、高さ 1.375 m、延長 61 m の不規則波造波装置³⁾を備えた水路で行なった。造波機は油圧ピストンによって造波板を駆動する方式で、与えた波形の波を発生させることができる。造波性能は、周波数で 0.1~3 Hz、有義波高で 0~20 cm の波を起こすことができる。水路に勾配 1/70 の海底を設け、その上に鉛直堤を置いて波力を測定した。

波力の測定は全波力を測定する方法を用いた。ここで使用した波力計は図-1に示すように、真ちゅう製の半径 5 cm、幅 1.5 cm、厚さ 3 mm の2個のリングを受圧板に取付け、リングのひずみを測定する形式のものである。この装置の水中における固有振動数は約 310 Hz であり、100 Hz 程度までは測定できると考えられる。

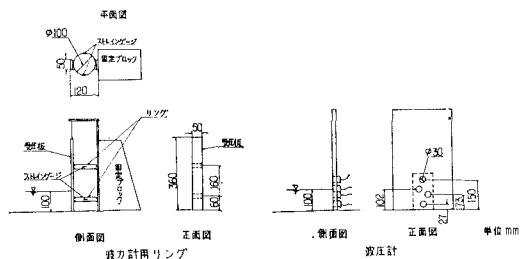


図-1 波力計と波圧計の配置図

堤防前面において、重複波の形成される場合には、波力には高周波成分は含まれていないが、砕波する場合には衝撃的な力が作用し、計器の応答が問題になる。一般の波圧計は応答周波数が高いので、波力計と波圧計による測定値の比較を行なった。使用した波圧計は共和電業製の PW-100 GA と 500 GA で、その応答周波数は 600 Hz とされている。波圧計は図-1のように堤防に4個取付けた。

波力計によって測定した全波力と、波圧計によって測定した値を比較したのが図-2である。波圧計による全波力の計算は、波圧分布を4個の波圧計と、波のうちあげ高から求め、それを積分した。図-2には重複波と砕

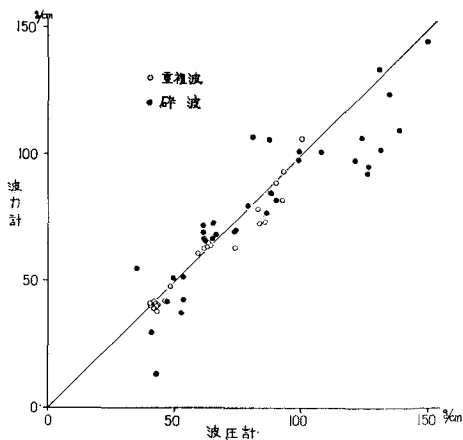


図-2 波力計と波圧計による全波力の比較

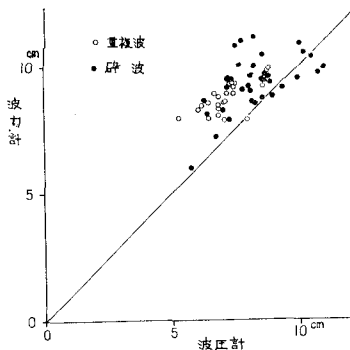


図-3 波力計と波圧計による作用点の比較

波に分けて示してあるが、重複波の場合には、両者はかなり一致している。しかし碎波となる場合には、ばらつきが大きく、また波力が大きくなると波力計の測定値が小さくなる傾向を示している。全波力の作用点について示したのが図-3である。作用点については、波力計による値が1~2cmほど平均して大きくなっている。この原因は不明であった。なおここで述べた比較は波力計と波圧計を水路にならべ、同時記録をとり、同じ時刻の値を比較したものである。海底勾配が緩い場合には、衝撃的な力の作用する機会は少なくなるため、一応この装置で精度をよく測定できると考えられる。

実験はまず必要とするスペクトル形状を持った波を起こして、入射波、うちあげ波形、波力の測定を行なった。実験水路の長さが短いために、堤防による反射波の影響をうけ、測定時間は40sec程度しかとれず、同じ条件の実験を5回行なっている。測定値はデータレコーダに記録し、A-D変換して、スペクトル、波高、うちあげ高、波圧に関する計算を行なった。サンプリング間隔は0.1secとしている。

実験条件は、海底勾配1/70、堤防のり勾配は鉛直、堤脚水深 $h=10$ cm、入射波高 $H_{1/3}=5$ cm と 10 cm、周期1sec と 1.5 sec である。なおスペクトルの形状としては、光易II型を使用している。

3. 実験結果

来襲する波と堤防に作用する波力の関係を解析する場合には、深海における波高、周期と波力との関係を調べるものと、堤防前面における波高と波力の関係を調べるものに分けられる。後者の場合には、実際の計算では堤防前面での波が、どのようなものとなるかをさらに求めなければならない。しかし波高と波力の間には、たとえば広井公式のような簡単な関係があるであろう。ここでは主として、堤防前面の波形と堤防に作用する波力について調べた。なお浅海における波スペクトルと波高変化については、すでに発表⁴⁾してある。

(1) 波高と波力の関係

水深67cmにおける入射波 H_1 、うちあげ R 、波力 P の波形を $H_{1/3}=5$ cm、 $T=1.0$ sec の場合について示したのが図-4である。図で P_I とあるのは上部のリングで測定したものであり、 P_{II} は下部で測定した記録である。入射波はかなり不規則であるが、うちあげや波力はかなり規則的になっている。波形は非対称で、山はとがり、谷は浅く、またうちあげと波力の波形は相似になっている。

一般には不規則な波は、有義波高などで代表され、波力やうちあげについても、同様の考えで代表値で表わすことが便利であろう。まず波高、うちあげ高、波力の分布を調べると、 $H_{1/3}=5$ cm の場合には図-5に、 $H_{1/3}=$

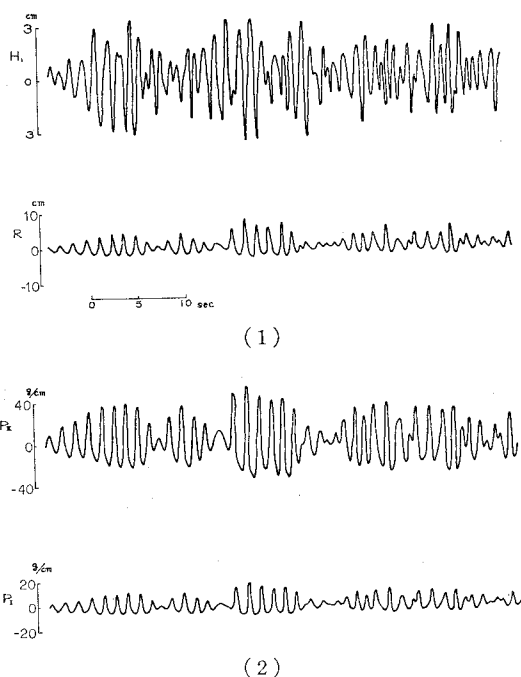


図-4 入射波、うちあげ、波力の波形

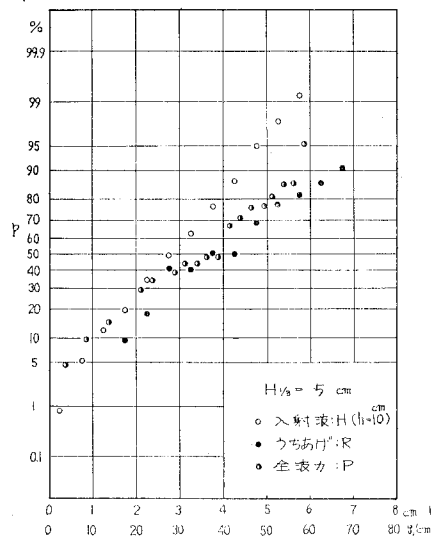


図-5 波高、うちあげ高、波力の分布 ($H_{1/3}=5$ cm)

10 cm の場合は図-6のようになる。波高としてはゼロアップクロス法によって求め、うちあげ高についてはゼロアップクロス法で一波を定義し、静水面から最も高い値をとっている。波力については P_I と P_{II} の記録を電氣的に加え、それからうちあげ高と同様の方法で波力を求めた。この場合は静水圧を除き、正のもののみを示してある。入射波は堤防のない場合の堤防の位置(水深10cm)での記

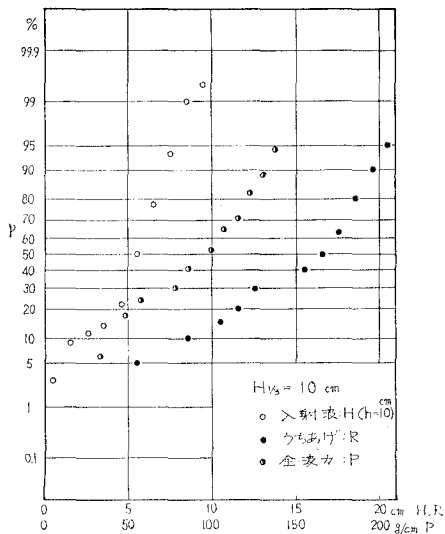


図-6 波高、うちあげ高、波力の分布
($H_{1/3}=10$ cm)

録から求めたものである。

入射波高が 5 cm の場合には、いずれの分布も正規分布に近い。深海ではレーレー分布をしていたものが、浅くなるにしたがって、波高の大きなものの割合は減少する。また分布の幅もせまくなり、平均波高と有義波高、有義波高と 1/10 最大波高の比も 1 に近づく。入射波高が 10 cm の場合には、うちあげ、波力ともに、大きな値の場合が増加している。すなわち、ある高さにそろっていると考えられる。堤脚水深が 10 cm であるため、入射波高が 5 cm の場合には、堤防前面では重複波に、10 cm の場合には碎波になっているために、その違いが 図-5 と 図-6 の間に表われている。

波力についても有義波力 $P_{1/3}$ を求めて示したのが表-1 である。これには入射波、うちあげ R 、波力 P_I , P_{II} , 全波力 $P_I + P_{II}$ およびその作用点 d が示されている。作用点については、図-2 に示すように波圧計による値と一致していないために、数 cm の誤差を含んでいる可能性はある。

碎波帯における波力は、広井公式によれば次のように表わされる。

$$p=1.5wH \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 p は単位面積当りの波力、 w : 水の単位体積重量、 H : 堤防前面における波高である。一般にはこの値が $R=1.25H$ まで作用するとしては全波力が求められている。

波力と波高分布を用いて、平均圧力がどの程度になっているかを示したのが 図-7 である。これは同じ頻度をとる波力と波高の関係を示している。また 表-1 の No. 1~5 の $P_{1/3}$ の平均および No. 6~11 の $P_{1/3}$ の平均値

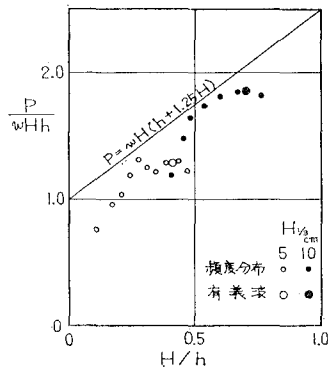


図-7 波高と波力の関係

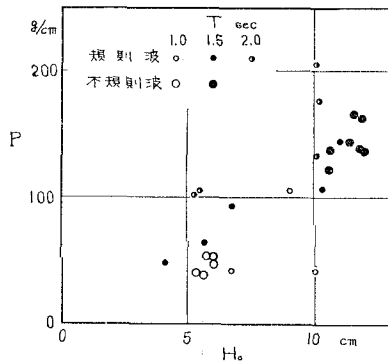


図-8 深海波高と波力の関係

表-1 実験結果

No.	$H_{1/3}$ (cm) ($h=67$ cm)	$T_{1/3}$ (sec)	$R_{1/3}$ (cm)	P_I (g/cm)	P_{II} (g/cm)	$P_I + P_{II}$ (g/cm)	d (cm)	$R_m/R_{1/3}$	$P_{Im}/P_{I1/3}$	$P_{IIm}/P_{II1/3}$
1	5.47	1.13	6.27	12.1	42.1	54.2	9.6	1.57	1.62	1.39
2	5.79	0.99	5.78	9.00	33.9	42.9	9.4	1.43	1.62	1.45
3	5.12	1.12	5.75	7.83	33.1	40.9	9.1	1.25	1.49	1.26
4	5.42	1.06	5.70	11.1	27.3	38.4	10.6	1.33	1.54	1.53
5	5.78	1.11	7.64	11.8	35.6	47.4	10.0	1.39	1.57	1.42
6	10.8	1.48	19.8	37.9	101	139	10.4	1.28	1.63	1.24
7	9.56	1.38	18.4	41.6	96.8	138	10.8	1.33	1.66	1.40
8	10.6	1.52	22.5	50.9	116	167	10.9	1.26	1.70	1.39
9	11.0	1.44	20.3	37.9	99.5	137	10.4	1.25	1.83	1.37
10	10.9	1.67	22.0	52.6	112	164	11.2	1.29	1.60	1.46
11	9.61	1.53	20.4	34.6	88.3	123	10.5	1.29	1.57	

と堤防前面の有義波高 $H_{1/3}$ から求めた関係も合せて示してある。この結果によれば次の関係が成立している。

$$P_{IWH}(h+1.25H)=0.9\sim 1.0\cdots\cdots(2)$$

すなわち広井公式の係数が $0.9\sim 1.0$ 程度となっている。

深海波と波力の関係について、規則波の結果と比較したのが図-8である。不規則波の波高と波力は $H_{1/3}$ と $P_{1/3}$ を使用している。規則波とほぼ一致しているが、 $H_{1/3}=5\text{cm}$ の場合は規則波に比較して大きくなっている。

(2) スペクトルの変化

不規則な波の各周波数成分の変化を調べるために、入射波、うちあげ、波力 (P_I , P_{II} , 全波力) のスペクトルを求めた。図-9 は $H_{1/3}=5\text{cm}$ のときの入射波とうちあげのスペクトルを示し、図-10 は P_I , P_{II} , P_{total} (全波力) のスペクトルを示す。また図-11, 12 は $H_{1/3}=10\text{cm}$ の場合のそれぞれのスペクトルである。

入射波の波高が小さい場合 ($H_{1/3}=5\text{cm}$) には、水深 10cm におけるスペクトル形状に、2次の高周数成分が表われている。したがってうちあげや、波力についても2つのピークを持つ形状をしている。このような高周波成分を含んでいることは、波形がとがっていることに対応している。波力のスペクトルについても P_I と P_{II} では、値としては違っているが、その形状は相似であり、したがって全波力も同じ形をしている。

入射波の波高が 10cm の場合には、堤脚水深が 10cm

であるためにすでに砕波している波がきている。水深の深いところでは、ある幅の1つのピークしか持たなかったものが、浅くなると砕波しエネルギーの損失を生じる。また低周波領域のエネルギーが、非線形性のために増加する。したがってスペクトルの形状としては、ピークのない平らなものに近づく。このような特性は水深 10cm における波形、うちあげ、波力のスペクトルによく表われている。波力のスペクトルで、周波数が $0.2\sim 0.4\text{Hz}$ の間に表われているエネルギーは計算精度の関係もあって、実際にこのような成分があるかどうかは明らかでない。スペクトル計算におけるデータ数は、反射波を除くために300データであって、またラグは50としているために計算精度はあまりよくない。

入射波と波力の間の応答については、さきに述べた式(2)に相当する関係が成立するであろう。ただしこの場合には、波形を比較するために、波高と正の波力のピークとの関係を表わす式(2)とは、係数の値が異なってくるであろう。式(2)に相当するものとして、次のような応答 $A(f)$ を考える。

$$A(f)=\frac{1}{wh}\sqrt{\frac{S_p(f)}{S_f(f)}}\cdots\cdots(3)$$

ここで、 $S_p(f)$ は波力のスペクトル、 $S_f(f)$ は波のスペクトルである。

水深 10cm における $S_f(f)$ と $S_p(f)$ から $A(f)$ を計算した結果を図-13に示す。入射波高が違っても、 $A(f)$

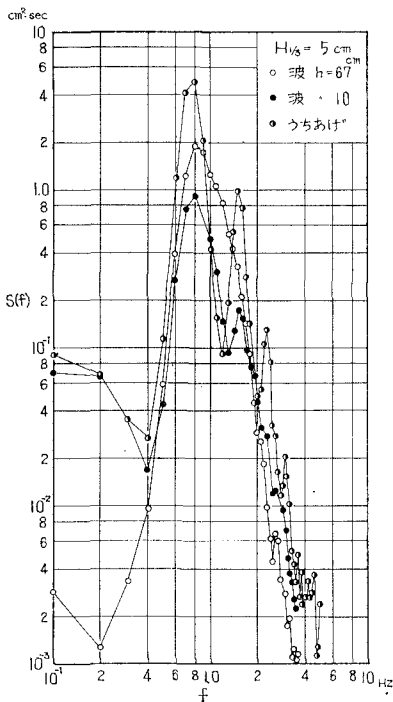


図-9 波とうちあげのスペクトル ($H_{1/3}=5\text{cm}$)

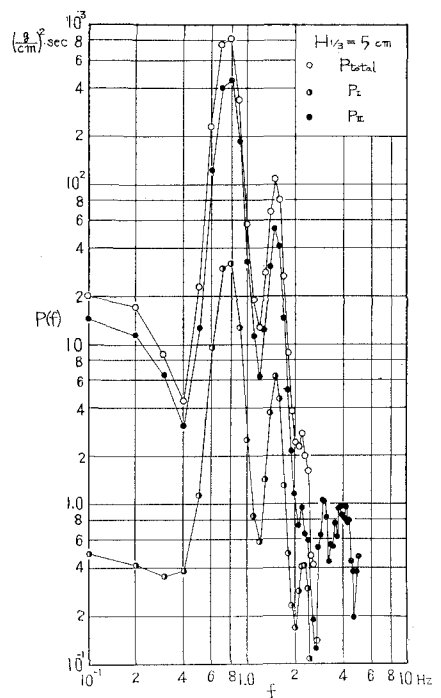


図-10 波力のスペクトル ($H_{1/3}=5\text{cm}$)

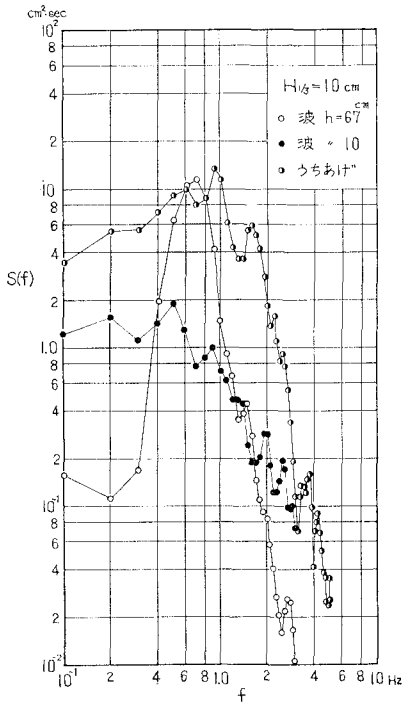


図-11 波とうちあげのスペクトル
($H_{1/3}=10$ cm)

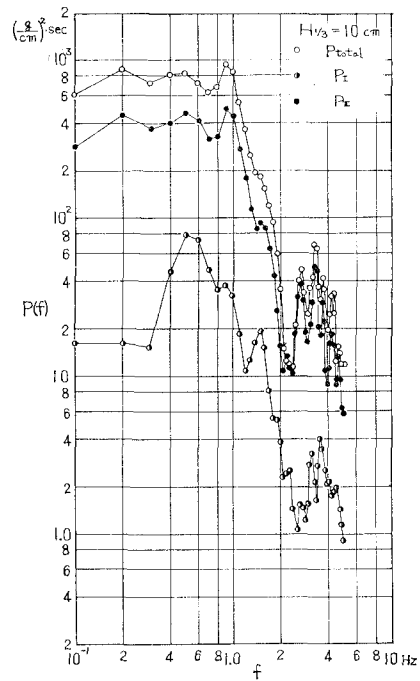


図-12 波力のスペクトル
($H_{1/3}=10$ cm)

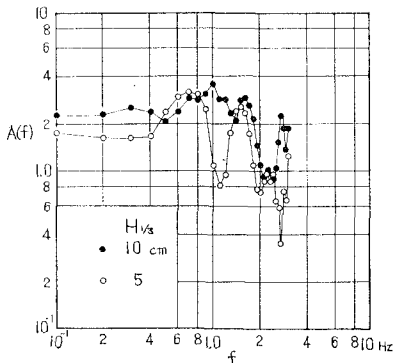


図-13 入射波と波力の応答

はそれほど変わらず3程度であるが、 $H_{1/3}=5$ cm の場合が少し小さい値をとる。うちあげの場合には、入射波高の違いによって応答が大きく変化した、波力ではその差はあまり著しくない。これは衝撃的な力を含んでいないためかもしれない。

4. あとがき

海岸堤防に作用する、不規則な波による波力について、模型実験によって検討を行なった。対象としたのが、緩勾配の海底上に設けられた堤防に作用する砕波の波力であったために、波力の分布幅もせまく、規則波とほぼ同様の結果が得られた。今後は重複波による波力や砕波による衝撃圧について検討する必要がある。

最後に、本実験を行なうに当たり、前海岸研究室長富永正照氏から、有益な助言を頂いたことに対し深く感謝致します。また実験および資料整理を行なって頂いた高松幹夫氏、本間利夫技官に謝意を表します。

参考文献

- 1) 本間 仁・堀川清司・長谷直樹：海岸堤防(護岸)に作用する波圧の分布について、第10回海岸工学講演会講演集、1962
- 2) 富永正照・九津見生哲：海岸堤防に作用する砕波後の波圧、第18回海岸工学講演会論文集、1971
- 3) 富永正照・橋本 宏：造波機による不規則波の発生、第17回海岸工学講演会論文集、1970
- 4) 富永正照・橋本 宏：不規則波の海岸堤防へのうちあげ、第19回海岸工学講演会論文集、1972