

II-33 港湾模型実験に関する考察(5)

— ひずみ模型に関する基礎的実験 —

北海道工業大学 正員 村 木 義 男
北海道開発局土木試験所 正員 岸 哲 也

ま え が き

波浪に関する模型実験はしゃへい実験、構造物の安定性、漂砂、潮汐、潮流、拡散など多種多様である。これらの模型実験を行うにあたって最も重要なことは主目的となる現象について実物(現地)を実験で相似的に再現しなければならないことである。通常重力が粘性力よりも卓越すると考え、フルード相似則にしたがって無ひずみ模型によってこれらの実験が行われている。しかし、近年港湾が大規模となり、また、広域的な漂砂や汚水拡散の影響評価への需要が高まりつつある中で、広い区域を対象とした模型実験が必要とされる場合がある。そこで、水槽規模の制約から実験の主な現象に着目し、水平縮尺と鉛直縮尺を変えたひずみ模型での実験を行う場合がある。しかしながら、ひずみ模型の無ひずみ模型に対する再現性に関しては実験的に確認された例が少なく理論上の相似則を唯一のよりどころとしている例が多い。

筆者は小型平面水槽を使用し、ある漁港を例にしゃへい実験を行い、無ひずみ模型とひずみ模型との比較をした。¹⁾ さらに、基礎的なものとして水深変化による波高変化を対象とした場合についての比較実験も行ったが、²⁾ その結果予想以上の違いが表われることがわかった。本報告では前回までの実験成果をもとに、一般性を持たせる意味から大型平面水槽を使用し、水深変化による波高変化ならびに屈折現象を対象とし、無ひずみ模型とひずみ模型との比較実験を行ったのでここに報告する。

1. ひずみ模型の相似則

水深変化による波高変化及び屈折現象を対象とした場合のひずみ模型の相似則について示す。ここで現地を添字p、模型を添字mを付けて表わすこととする。

水深変化による波高変化は微小振幅波理論によると

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{1}{2n} \cdot \frac{c_0}{c}} = \left[\left\{ 1 + \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right\} \tanh \frac{2\pi h}{L} \right]^{-1/2} \dots\dots\dots (1)$$

とあらわされる。(1)式を現地と模型で相似とするためには $(h/L)_m = (h/L)_p$ または $h_p/h_m = L_p/L_m$ とすればよいことになる。波長は

$$L = \frac{g}{2\pi} \cdot T^2 \tanh 2\pi h/L$$

であるから

$$\frac{h_p}{h_m} = \frac{L_p}{L_m} = \frac{g/2\pi \cdot T_p^2 \tanh 2\pi (h/L)_p}{g/2\pi \cdot T_m^2 \tanh 2\pi (h/L)_m} = \frac{T_p^2}{T_m^2} \dots\dots\dots (2)$$

$$\therefore T_m = T_p \sqrt{\frac{h_m}{h_p}} \dots\dots\dots (3)$$

鉛直縮尺は h_m/h_p であるから模型の周期の縮尺は鉛直縮尺の平方根にとればよいことになる。波を有限振幅波を考へても波形勾配がさらに加わった関数形で表わされるので、波長を鉛直縮尺にとることによって波形勾配は一致し、ひずみ模型が適用できる。³⁾

屈折現象による波高変化について現地と模型とを相似とするためには、それぞれの対応水深における波速の変化率を等しくしなければならない。波速は

$$c = \frac{L}{T} = \frac{g}{2\pi} \cdot T \tanh 2\pi h/L$$

であらわされる。水深 h_1 から水深 h_2 における波速の変化率は

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{g/2\pi \cdot T_2 \tanh 2\pi (h/L)_2}{g/2\pi \cdot T_1 \tanh 2\pi (h/L)_1} = \frac{\tanh 2\pi (h/L)_2}{\tanh 2\pi (h/L)_1} \dots\dots\dots (4)$$

である。(4)式を現地と模型で相似とするためには $(h/L)_m = (h/L)_p$ とすればよい。したがってこの条件から(2)式および(3)式が導かれ、模型の周期の縮尺を鉛直縮尺の平方根にとることによって屈折現象も相似となる。以上のことからひずみ模型では h/L を現地と模型で等しくする。そのため波の周期の縮尺を鉛直縮尺の平方根にとることによって、水深変化による波高変化及び屈折現象は現地と模型とで相似になる。

2. 実験施設と実験方法

実験は土木試験所港湾実験室の大型平面水槽を使用して行った。模型は図-1に示すように無ひずみ模型で水平縮尺1/200、鉛直縮尺1/200、海底勾配

1/100、ひずみ模型で水平縮尺1/200、鉛直縮尺1/100、海底勾配1/50として製作した。

ここで水路では水深変化による波高変化を、平面ではさらに屈折現象も対象とした場合である。

波の周期は現地スケールで $T_p = 1.2 \text{ sec}$ 、 1.4 sec 、 1.6 sec 、 1.8 sec の4種類とし、沖波波高は $H_0 = 0.6 \sim 3.4 \text{ m}$ の範囲とした。

したがって無ひずみ模型での波の周期は $T = 0.85 \text{ sec}$ 、 0.99 sec 、 1.13 sec 、 1.27 sec で沖波波高は $H_0 = 0.3 \sim 1.7 \text{ cm}$ となる。

ひずみ模型での波の周期は $T = 1.2 \text{ sec}$ 、 1.4 sec 、 1.6 sec 、 1.8 sec

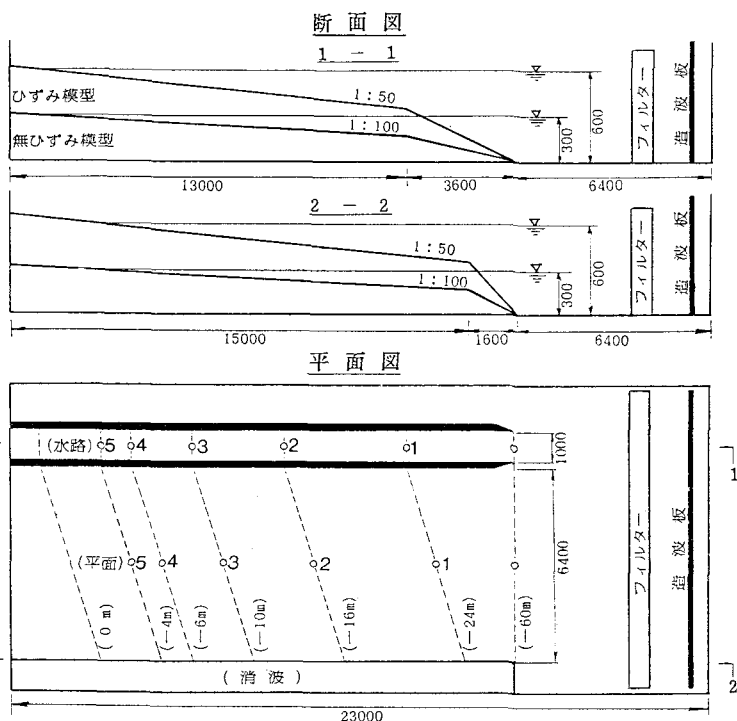


図-1 模型図、測点位置図

で沖波波高は $H_0=0.6\sim 3.4\text{ m}$ となる。測点位置は図-1に示すように水路6点、平面6点でその水深は現地スケールで $h_p=60\text{ m}, 24\text{ m}, 16\text{ m}, 10\text{ m}, 6\text{ m}, 4\text{ m}$ である。計測には容量式波高計を用い、起波後、波高が定常状態になってから5波目までの平均をその測点の波高(H_i)とした。 $h_p=60\text{ m}$ の測点位置での波高を便宜上沖波波高(H_0)とし、各測点での波高比(H_i/H_0)を求め、無ひずみ模型とひずみ模型とを比較した。沖波波高での波峰線方向の場所的変動を極力少なくし、また波形を整えるため造波板前面にフィルターを設置した。

合田によると砕波水深、砕波波高とも海底勾配の影響を受ける。⁴⁾ 無ひずみ模型とひずみ模型の海底勾配の違いから砕波した場合には両模型での相似は保たれず、波高比の違いが大きくなることから、ある測点においてどちらかの模型で明らかに砕波現象が認められた場合には比較しなかった。

3. 実験結果

昭和57年度の報告では沖波の波形勾配 $H_0/L_0=0.027\sim 0.1$ の範囲について実験を行ったが、本報告では使用した造波機の特性上から沖波の波形勾配 $H_0/L_0=0.001\sim 0.015$ と波形勾配の小さい範囲で実験を行ったものである。

水深変化による波高変化のみを対象とした場合について比較する。結果を表-1に示す。表中での値は左側が無ひずみ模型での波高比(H_i/H_0)、右側がひずみ模型での波高比(H_i/H_0)^{*}である。ひずみ模型での波高比と無ひずみ模型での波高比の値の比 $[(H_i/H_0)^*/(H_i/H_0)]$ ；以下波高比率という]を周期毎に図-2-1から図-2-4に示す。図での縦軸には波高比率を、横軸には測点を表わしている。波高比率がどの程度の値であれば無ひずみ模型とひずみ模型との波高比が一致しているかという判断については、波高測定精度、沖波波高の場所的変動を考慮し、波高比率が $100\pm 20\%$ を許容範囲内とした。

$T_p=1.2\text{ sec}$ の場合

合には測点1、測点2、測点3での波高比率は100%にほぼ近い値となり、無ひずみ模型とひずみ模型との波高比はほぼ一致していることがわかる。

測点4、測点5での波高比率は120%以上となり、無ひずみ模型とひずみ模型との波高比の違いが大きくひずみ模型での波高比が大きいことがわかる。

$T_p=1.4\text{ sec}$ の場合には測点1、測点2、測点3での波高比率は許容範囲内にあり、波高比はほぼ一致している。測点4での波高比率は $H_0=3.2\text{ m}$ の場合を除いて許容範囲内にあるが、 $H_0=1.9\text{ m}, H_0=2.5\text{ m}$ では測点1、測点2、測点3

表-1 水路での波高比

$T_p(\text{sec})$	12										14							
$H_0(\text{m})$	1.5		2.1		2.9		3.4		1.3		1.9		2.5		3.2			
H_1/H_0	1.043	1.053	1.088	1.009	1.105	1.003	1.063	1.045	0.957	1.107	1.020	1.021	1.099	1.050	0.918	1.033		
H_2/H_0	0.957	0.921	1.000	0.922	1.083	0.938	1.050	0.992	0.900	1.028	1.010	0.973	1.107	1.055	0.965	1.050		
H_3/H_0	1.014	1.007	1.088	1.060	1.150	1.089	1.169	1.095	0.914	1.099	1.081	1.112	1.198	1.155	1.076	1.278		
H_4/H_0	0.657	0.967	0.824	1.043	0.962	1.161	—	—	0.943	1.017	1.131	0.973	1.176	1.353	1.012	1.430		
H_5/H_0	0.771	1.325	1.108	1.362	—	—	—	—	0.757	1.579	1.161	1.701	—	—	—	—		

$T_p(\text{sec})$	16										18							
$H_0(\text{m})$	1.2		1.8		2.4		3.0		1.1		1.8		2.4		3.0			
H_1/H_0	1.036	1.140	1.165	1.060	0.991	1.115	0.973	1.112	0.813	1.377	1.084	1.173	1.182	1.218	1.191	1.132		
H_2/H_0	0.782	1.033	1.012	1.054	1.061	1.166	0.993	1.122	0.563	1.205	1.042	1.201	1.091	1.276	1.217	1.196		
H_3/H_0	1.127	1.223	1.400	1.201	1.252	1.328	1.190	1.375	0.896	1.434	1.221	1.475	1.388	1.460	1.322	1.500		
H_4/H_0	0.564	1.397	1.024	1.424	1.026	1.676	—	—	0.354	1.648	1.253	2.045	—	—	—	—		
H_5/H_0	0.527	1.727	1.318	1.897	—	—	—	—	0.417	2.236	—	—	—	—	—	—		

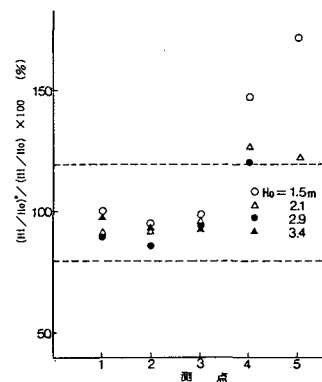


図-2-1 水路での波高比率 ($T_p=1.2\text{ sec}$)

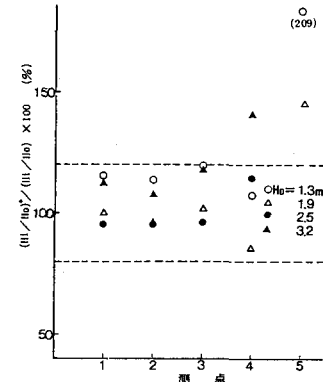


図-2-2 水路での波高比率 ($T_p=1.4\text{ sec}$)

での波高比の一致に比べやや違いが大きいようである。測点5での波高比率は $H_o = 1.3\text{ m}$ では209%、 $H_o = 1.9\text{ m}$ では146%となり、両模型での波高比の違いが大きく、ひずみ模型での波高比が大きくなっている。

$T_p = 1.6\text{ sec}$ の場合には測点1、測点2、測点3での波高比率は $H_o = 1.2\text{ m}$ の場合を除いては許容範囲内となっており

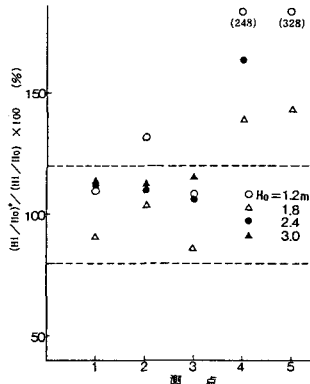


図-2-3 水路での波高比率 ($T_p = 1.6\text{ sec}$)

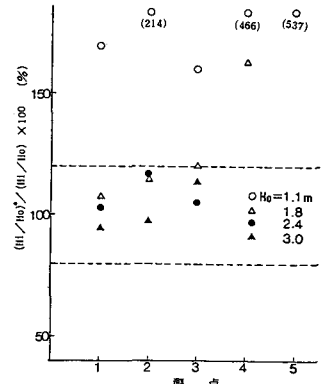


図-2-4 水路での波高比率 ($T_p = 1.8\text{ sec}$)

波高比はほぼ一致していると考えられるが、 $T_p = 1.2\text{ sec}$ 、 $T_p = 1.4\text{ sec}$ の場合に比べるとやや波高比の違いは大きくなっている。測点4、測点5での波高比率は120%以上となり、波高比の違いが大きく、ひずみ模型での値が大きくなっている。特に $H_o = 1.2\text{ m}$ の場合には波形勾配が小さいため、波高比の違いが大きくなったものと考えられる。

$T_p = 1.8\text{ sec}$ の場合には $H_o = 1.1\text{ m}$ を除いては測点1、測点2、測点3での波高比率は許容範囲内となっており、波高比はほぼ一致しているようである。しかし、 $H_o = 1.8\text{ m}$ の測点4での波高比率は160%以上と大きくなっている。 $H_o = 1.1\text{ m}$ の場合には波高比率は160%以上と大きく、これも $T_p = 1.6\text{ sec}$ 、 $H_o = 1.2\text{ m}$ の場合と同様沖波波形勾配が小さいため波高比の違いが大きくなったと考えられる。

以上のことから水深変化による波高変化のみを対象とした場合には波高比率は測点1、測点2、測点3ではおおむね許容範囲内にあり、無ひずみ模型とひずみ模型との波高比はほぼ一致していると考えられる。水深の浅い測点4、測点5での波高比率は120%以上の値となり、ひずみ模型での波高比は大きくなっている。すなわち波が進行し、水深が浅くなるにしたがって無ひずみ模型とひずみ模型との波高比の違いが大きくなる傾向が見られる。

一般的に固定床における波高減衰の原因としては内部粘性によるもの、底面摩擦によるものがあり、減衰効果は底面摩擦の方が大きく、周期が小さくなれば、また海底勾配が緩勾配になれば波高減衰効果は大きくなる。³⁾ 無ひずみ模型ではひずみ模型に比べ周期は小さくなり、また緩勾配となることから、水深の浅い場所については無ひずみ模型の方が波高減衰効果が大きく、波高比はひずみ模型よりも小さな値になったものと考えられる。

図-3は縦軸に沖波波形勾配(H_o/L_o)、横軸に相対水深(h/L_o)をとり、波高比率を許容範囲内と範囲外に分け、水深変化による波高変化を対象とした場合でのひずみ模型の適用範囲を示したものである。なお、図中の破線は岩垣らの示したハイパボリック波の碎波限界である。これによると沖波波形勾配 $H_o/L_o \leq 0.002$ または相対水深 $h/L_o < 0.02$ になると波高比率は許容範囲外となり、ひずみ模型は適用できないと考えられる。また、 $H_o/L_o > 0.002$ であり、 $h/L_o \geq 0.02$ の場合で波高比率が許容範囲外のものはハ

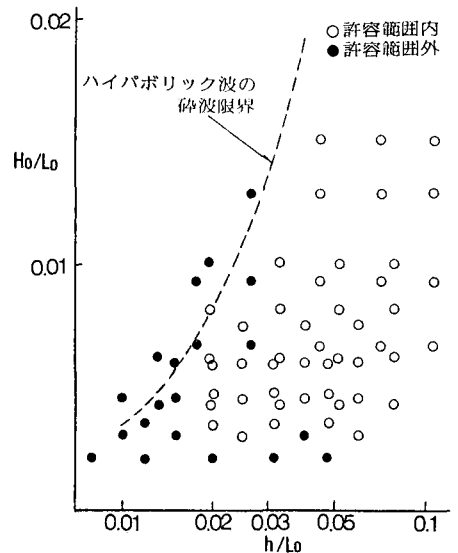


図-3 水路でのひずみ模型の適用範囲

イパボリック波の碎波限界曲線よりも左側にあることから碎波現象によって許容範囲外となったと考えられる。

平面での水深変化による波高変化と屈折現象とを対象とした場合について比較する。結果を表-2に示す。
波高比率を図-4-1から図-4-4に示す。

$T_p = 1.2 \text{ sec}$ の場合には各測点での波高比率は120%以上となり、波高比の違いが大きくなり、ひずみ模型での波高比が大きくなっている。

$T_p = 1.4 \text{ sec}$ の場合には測点1、測点2、測点3での波高比率は許容範囲内となり、波高比はほぼ一致している。測点4での波高比率も $H_o = 1.7 \text{ m}$ を除いて許容範囲内となっている。測点5での波高比率は130%以上となり、波高比の違いが大きくなっている。

$T_p = 1.6 \text{ sec}$ の場合には測点1、測点2では $H_o = 1.1 \text{ m}$ $H_o = 1.9 \text{ m}$ と波高の小さい場合には波高比率が許容範囲内となっているのに対して、 $H_o = 2.5 \text{ m}$ 、 $H_o = 3.0 \text{ m}$ の場合には波高比率が120%以上となり、波高比の違いが大きくなっている。測点3、測点4、測点5での波高比率は120%以上となり、波高比の違いが大きくなっている。

$T_p = 1.8 \text{ sec}$ の場合には各測点での波高比率は80%以下となり、波高比の違いが大きくなっている。
以上のことから水深変化による波高変化と屈折現象を同時に対象とした場合には $T_p = 1.4 \text{ sec}$ の場合の測点1、測点2、測点3での波高比は無ひずみ模型とひずみ模型で比較的一致しているものの、それ以外については波高比の違いが大きいうである。

表-2 平面での波高比

Tp(sec)	1.2								1.4							
	1.0		1.5		2.0		2.6		1.1		1.7		2.2		2.9	
H1/Ho	1.208	1.535	1.241	1.641	1.191	1.639	1.094	1.623	0.860	0.976	0.901	1.062	1.098	1.017	0.978	1.138
H2/Ho	1.038	1.872	1.101	1.718	1.118	1.721	1.122	1.584	1.100	1.071	1.086	1.107	1.333	1.076	1.292	1.104
H3/Ho	1.094	1.977	1.253	1.838	1.291	1.951	1.374	1.784	1.100	1.310	1.123	1.367	1.392	1.330	1.263	1.431
H4/Ho	1.434	2.163	1.557	2.077	1.555	2.175	—	—	1.320	1.532	1.321	1.678	1.520	1.730	1.547	1.747
H5/Ho	1.491	2.942	1.658	2.465	—	—	—	—	1.400	1.889	1.506	2.000	—	—	—	—

Tp(sec)	1.6				1.8			
	1.1		1.9		2.5		3.0	
H1/Ho	0.898	1.107	0.961	1.060	0.885	1.081	0.842	1.080
H2/Ho	1.220	1.243	1.059	1.234	1.015	1.315	1.086	1.332
H3/Ho	1.186	1.452	1.039	1.394	1.069	1.583	1.178	1.591
H4/Ho	1.305	1.522	1.294	1.577	1.246	1.711	—	—
H5/Ho	1.322	1.817	1.353	2.006	—	—	—	—

Tp(sec)	0.6				1.2			
	2.059		1.109		1.769		1.068	
H1/Ho	2.059	1.109	1.769	1.068	2.059	1.109	1.769	1.068
H2/Ho	2.441	1.455	1.954	1.449	2.441	1.455	1.954	1.449
H3/Ho	2.559	1.527	2.246	1.559	2.559	1.527	2.246	1.559
H4/Ho	3.206	1.582	2.708	1.720	3.206	1.582	2.708	1.720
H5/Ho	3.676	1.745	2.785	2.356	3.676	1.745	2.785	2.356

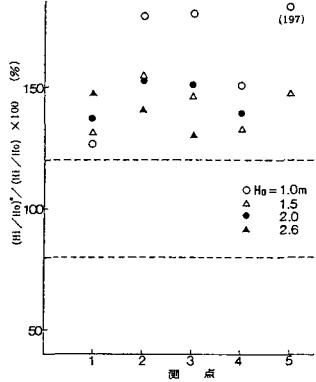


図-4-1 平面での波高比率 ($T_p = 1.2 \text{ sec}$)

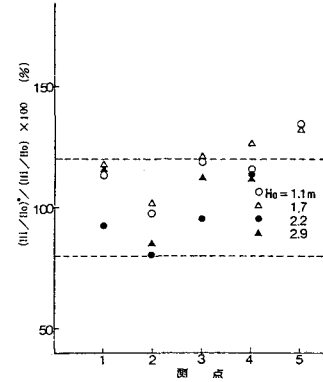


図-4-2 平面での波高比率 ($T_p = 1.4 \text{ sec}$)

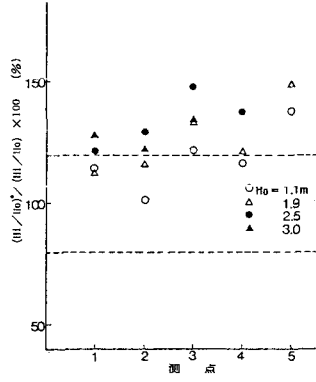


図-4-3 平面での波高比率 ($T_p = 1.6 \text{ sec}$)

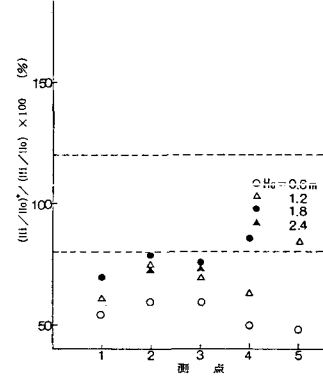


図-4-4 平面での波高比率 ($T_p = 1.8 \text{ sec}$)

4. 結 論

ひずみ模型実験において次のことが結論として得られた。

- (1) 水深変化による波高変化のみを対象とした場合の波高比は無ひずみ模型とひずみ模型とでは測点1、測点2、測点3では比較的良好一致している。しかし、水深の浅い測点4、測点5での違いは大きく、ひずみ模型での波高比が大きくなっている。
- (2) 水深変化による波高変化のみを対象とした場合のひずみ模型の適用範囲は $H_o/L_o > 0.002$ で、 $h/L_o > 0.02$ である。
- (3) 水深変化による波高変化と屈折現象を対象とした場合には $T_p = 1.4 \text{ sec}$ の場合を除いて波高比の違いは大きくなっている。

本報告では波浪の諸現象の中から理論上ひずみ模型が適用できると考えられる水深変化による波高変化と屈折現象を対象とし実験を行ったが、波高比率の許容範囲を割合幅広くとったにもかかわらず、屈折現象をも対象とした場合には無ひずみ模型とひずみ模型での波高比には大きな違いがあった。しかし、水深変化による波高変化を対象とした場合には波高比は比較的良好一致しているものと考えられる。しゃへい実験においてはひずみ模型はごく限定された範囲でしか適用できないものと考えられる。

あ と が き

ひずみ模型実験は小型平面水槽の有効利用という立場から実施され、これまで基礎的なものから段階的に実験をすすめてきた。今回、水深変化による波高変化についてはほぼ適用限界が見い出されたが、屈折現象をも対象とした場合には大きな違いがあり、またその原因についても不明確であることから今後さらに実験を行い、適用範囲を確認したいと考えている。

参 考 文 献

- (1) 村木、岸：土木学会道支部論文集、第37号、P181～P184
- (2) 村木、浜地：土木学会道支部論文集、第39号、P105～P108
- (3) 岩垣、樺木：海岸工学、共立出版
- (4) 合田：土木学会論文報告集、第180号、P39～P49