

構造物にほぼ平行に入射する不規則波による構造物沿いの波高分布特性

Wave height distribution along structures induced by obliquely incident irregular waves

目見田 哲※ 酒井 哲郎※※  
Tetsu Memita and Tetsuo Sakai

The wave height distribution along reflective structures induced by obliquely incident waves is discussed based on experimental results in a wave basin. The experiment was performed with regular and irregular waves. When the waves with small incident angle don't break, the Mach-stem is formed along the wall and the wave height increases progressively along the wall. The irregularity has no significant effect on the distribution of wave height.

Keywords: obliquely incident waves, Mach-stem, irregularity, wave height distribution

1. まえがき

外海の大水深域での大規模な構造物のように、隅角部を有する構造物に対して平行に近い角度で斜め入射波が作用する構造物前面の波浪場においては、入射角が小さく、かつ構造物に沿っての伝播距離が長いために、構造物沿いの波高増加、波高変動は顕著でかつ複雑になるものと考えられる。

過去にも、構造物への入射角が小さい波浪場における構造物沿いの波高分布、斜め入射波の反射特性についての研究は多くみられる。Wiegel(1964)によると、入射角が $20^\circ$ 以下の周期波による直立壁前面の波浪場においては、Mach-stemが形成されることが実験的に確認されている。Berger and Kohlhasse(1976)は、規則波が作用する直立壁前面の波高分布について実験結果と計算結果(ヘルムホルツ方程式)を比較検討し、マッハ反射が発生しstem波が形成される波浪場での波高分布は回折現象として説明できるとしている。また森屋ら(1995)は、直立壁に斜め規則波が作用しstem波が形成されている波浪場を対象として、実験値との比較検討によって、構造物沿いの波高分布については回折散乱波および非線形性を考慮できるブシネスク方程式が十分適用可能であるとしている。

しかし、隅角部を有する構造物への入射角が小さい波浪場を対象とした構造物沿いの波高分布および斜め入射波の反射特性に及ぼす入射波の不規則性についてはまだ検討されていない。

当研究では、隅角部を有する構造物に対してほぼ平行に近い角度(約 $10^\circ$ )で斜め入射波が作用する波浪場を対象として、規則波および単一方向不規則波を用いた水理模型実験を実施し、構造物前面での波浪場特性について検討するとともに、構造物沿いの波高分布特性に対する入射波の不規則性の影響について評価する。

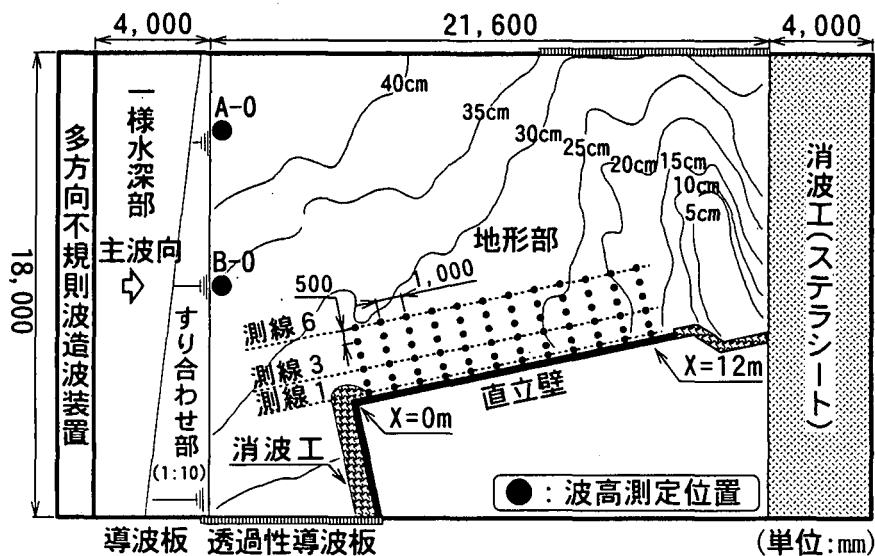


図-1 地形と構造物の模型平面図

※ 正会員 関西電力(株) 総合技術研究所 (661-0974 尼崎市若王子3-11-20)  
 ※※ 正会員 京都大学工学研究科 土木工学専攻

## 2. 実験装置と条件

### (1) 実験装置と模型

当研究では、構造物（直立壁）の前面近傍の波浪場を対象とする。地形と構造物の模型平面図を図-1に示す。直立壁に平行に近い角度（約 $10^\circ$ ；直角入射を $90^\circ$ とする）で斜め入射波が作用し、直立壁前面においては入射波、直立壁からの反射波および隅角部からの回折散乱波が共存する波浪場となる。

平面水槽内には60枚の造波板（幅30cm/枚）から成る多方向不規則造波装置が設置されている。造波装置前面より約4m離れた位置から約18m×約22mの範囲に地形モデルを設置した。入射波が地形モデルに到達するまでにエネルギーが拡散することを防止するため、造波装置の両端から導波板を設置しているが、直立壁からの反射波が導波板で再反射することの防止のために一部については透過性導波板とする。直立壁は入射波の主波向方向と約 $10^\circ$ 傾斜させた角度で設置し、天端高は当研究での波浪条件においては越波現象が生じない高さとした。

### (2) 波浪条件

波浪条件を表-1に示す。実験波は規則波（ケース1R, 2R, 3R, 4R, 5R）および単一方向不規則波（ケース1U, 2U, 3U, 4U, 5U）とし、周波数スペクトルはBretschneider - 光易型とする。直立壁沿いでの砕波位置を目視で確認したところ、ケース1, 2については直立壁沿いでの砕波は発生しなかった。一方、ケース3, 4, 5については各々隅角部より約10m, 約7m, 約5m付近で砕波が発生していることが確認できた。

### (3) 波高分布測定位置

直立壁前面での波高計測位置を図-1に示す。構造物沿いでの波高の連続的な変化および構造物前面での反射波の形成の有無についても把握するために、直立壁に平行に6つの測線を設け、各測線での波高分布を計測する。測線の間隔は0.5m, 同一測線内での測定ポイントの間隔は1.0mとする。なお、計測時間は約7分、サンプリングタイムは0.025sec間隔とする。

表-1 波浪条件

ケース	1U	1R	2U	2R	3U	3R	4U	4R	5U	5R
波の種類	単一方向 不規則波	規則波	単一方向 不規則波	規則波	単一方向 不規則波	規則波	単一方向 不規則波	規則波	単一方向 不規則波	規則波
波高 (cm)	2.5		5.0		7.5		10.0		14.1	
周期 (sec)	1.73		0.89	1.12	1.73					
			1.34							
			1.73							

## 3. 実験結果

構造物沿いおよび構造物前面での波高分布特性を示す。前者では斜め入射波の発達（隅角部から離れるにつれて、波高が連続的に増加すること）、後者では反射波の形成について主に検討する。

### (1) 構造物沿いの波高分布特性

直立壁沿いの波高分布特性について、入射波の波高を変化させて単一方向不規則波および規則波ごとに比較検討する。なお、波高比は地形開始部（B-0; 図-1参照）での波高との比率で表す。

単一方向不規則波について、各波浪条件（ケース1U~ケース5U）での直立壁沿いの波高比分布（測線1）を図-2に示す。いずれの波浪条件においても、隅角部から離れるにつれて波高が連続的に増加する傾向がみられ、ケース1U, 2Uでは、隅角部から最も離れた付近（X=12m付近）において地形開始部での波高の約2.5倍にも増加する。入射波の波高の大きいケース3U, 4U, 5Uでは、隅角部から離れるにつれて波高増加が顕著でなくなる傾向があるが、これは斜め入射波が砕波することの影響であり、砕波限界波高に達するまでは各波浪条件ともに斜め入射波が同様に発達していくことが確認できる。

なお、単一方向不規則波の波浪場での斜め入射波の発達における地形の影響（屈折、浅水変形）を把握するために、構造物がない波浪場（地形あり）での測線1に対応する位置での波高比分布（ケース4U, 5U）についても図-2に示すが、ここでは碎波が発生せず、隅角部から離れるにつれての波高増加もみられない。よって、直立壁沿いでの斜め入射波の発達において地形の影響はないものと考えられる。

次に、規則波についての波高比分布（測線1）を図-3に示す。碎波が発生する大まかな位置についても図中に示す。各波浪条件ともに碎波限界波高に達するまでは波高比が次第に増加する傾向がみられ、ケース1R, 2Rでの隅角部から最も離れた付近（X=12 m付近）においては、不規則波同様に、地形開始部での波高の約2.5倍にも増加する。隅角部から離れるにつれて波高が連続的に増加する単一方向不規則波と比較すると、部分的な波高の増減がややみられるが、これは、規則波の波浪場では構造物前面での地形の影響が部分的にあらわれたものと考えられる。

## (2) 構造物前面の波高分布特性

ここでは、直立壁沿い（測線1）での碎波の有無によって直立壁前面の波高分布特性が大きく異なることについて述べる。

まず、直立壁沿いで碎波が発生しない波浪場としてケース2U, 2Rでの波高比分布を図-4に示す。直立壁沿いで斜め入射波が発達すると同様、測線2, 3においても波高が増加する傾向が確認できる。また、直立壁前面から半波長離れた海域（測線4付近）において波高が小さい傾向が確認でき、直立壁前面で反射波が形成されているものと考えられる。

次に、直立壁沿いで碎波が発生する波浪場としてケース5U, 5Rでの波高比分布を図-5に示す。直立壁沿いで碎波が発生する海域においては、直立壁前面から半波長離れた海域で波高が小さい傾向がみられず、直立壁前面で反射波が形成されていないものと考えられる。

これ以外のケース1, 3, 4の波浪場についても、直立壁沿いでの碎波の有無によって、上記（ケース2またはケース5）と同様の特性が確認できる。

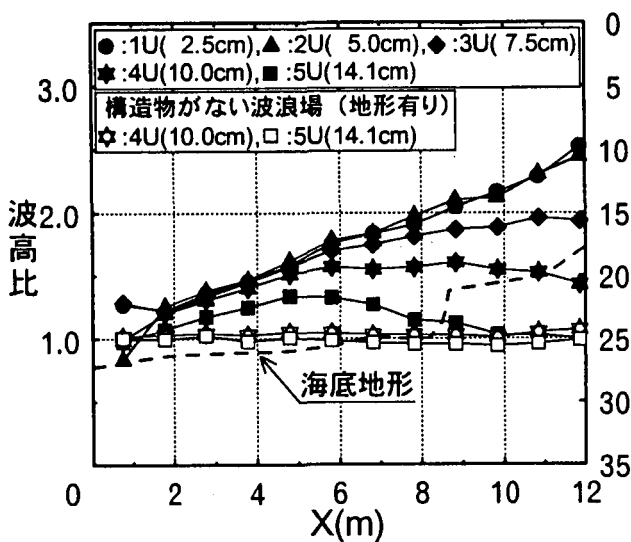


図-2 直立壁沿いの波高比の変化  
(単一方向不規則波；測線1)

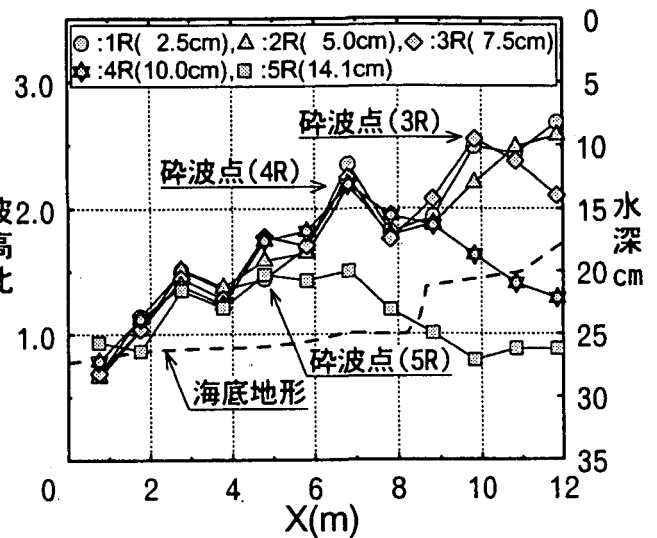


図-3 直立壁沿いの波高比の変化  
(規則波；測線1)

#### 4. 考察

##### (1) 構造物沿いの波高分布特性における入射波の不規則性の影響

構造物沿い（測線1）の波高分布（空間分布）について、規則波と単一方向不規則波の波浪場を比較し、入射波の不規則性の影響について検討する。ここでは、隅角部からの回折散乱波、stem波の形成、碎波が斜め入射波の発達（構造物沿いの波高が隅角部から離れるにつれて連続的に増加していくこと）および斜め入射波の反射特性に及ぼす影響を考慮した検討が必要と考えられる。

各波浪条件（ケース1～ケース5）ごとに規則波、単一方向不規則波での波高比分布（測線1）を図-6に示す。入射波の方向分散性が小さい波浪場においては、規則波、単一方向不規則波のいずれにおいても、碎波が発生する波高に達するまでは回折散乱波の影響によって隅角部から離れるにつれて波高が連続的に増加する。構造物沿いで碎波が発生しない波浪場（ケース1U, 1R, 2U, 2R）において、隅角部から最も離れた $X=12$  m付近（入射波の隅角部付近での波長の約5倍に相当する距離）での波高は地形開始部での波高の約2.5倍に増加する。

規則波と単一方向不規則波での波高分布を比較すると、両者の波高比はほぼ等しく、入射波の不規則性の影響がほとんどあらわれない。単一方向不規則波を異なる周期の規則波の重ね合せと考え、単一方向不規則波の波浪場においては波高の空間分布が平滑化されるために、規則波での波高分布と比較するとピーク値は小さくなることが予想できる。この相違については、造波水槽で再現可能な $X=12$  m付近では伝播距離が短く、規則波、単一方向不規則波ともに波高がピーク値に達していないために両者での違いが現れないことによると考えられる。ただし、この現象においては入射波の不規則性よりも方向分散性が支配的要因となっている可能性、つまり方向分散性の小さい規則波、単一方向不規則波では1波、1波の波峰が直線上に長く連なっているために、類似の波高分布特性を示した可能性も考えることができる。

入射波高が大きく、構造物沿いで碎波が発生する波浪場（例えばケース5U, 5R）においては、上述の波高分布特性とは大きく異なる。規則波、単一方向不規則波のいずれの波浪場においても斜め入射波の発達がみられず、碎波が発生する海域（ $X > 6$  m付近）では波高が低下していく傾向がみられる。この海域では碎波によって反射波が低減されるために、入射波と反射波の合成による波高増加もほとんどないものと考えられる。ここでも、規則波と単一方向不規則波での波高分布（空間分布）を比較すると、入射波の不規則性の影響はほとんどあらわれない。

なお、ケース3, 4での一部の海域（ケース3； $X=10$  m、ケース4； $X=7$  m付近）については、規則波での波高分布において単一方向不規則波の波浪場よりも波高比が大きくなる傾向がみられる。これは、碎波の影響つまり単一方向不規則波の波浪場においては波群のなかで波高の大きい波の碎波が発生しているが、規則波においては碎波が発生していないことによると考えられる。

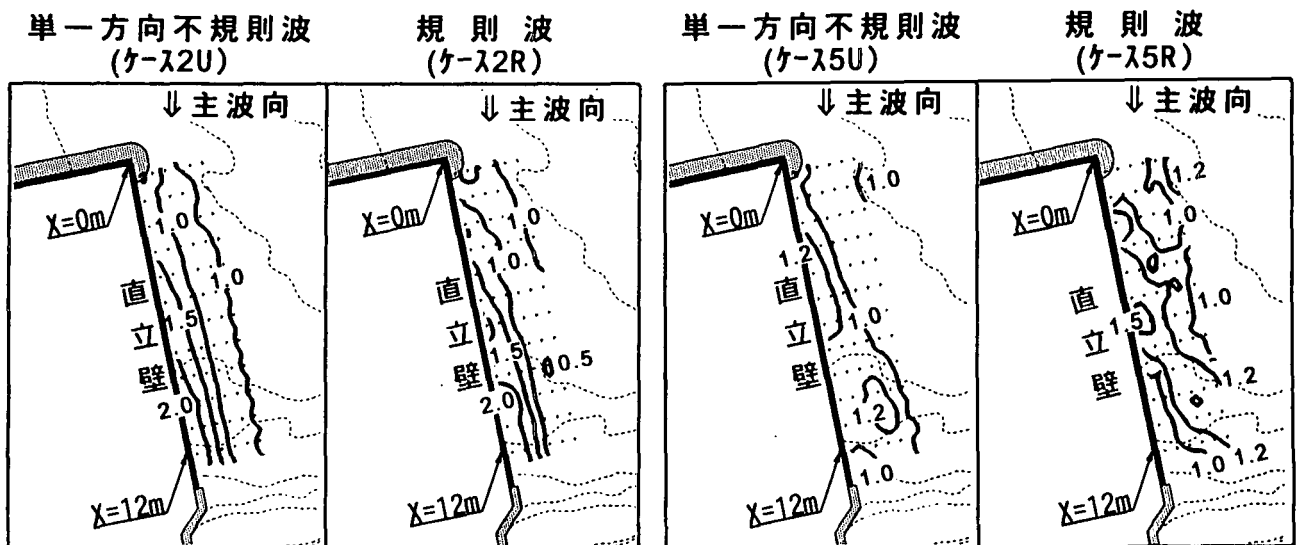


図-4 波高比分布図（直立壁沿いで碎波なし）  
（ケース2U, 2R；波高5.0 cm, 周期1.73sec）

図-5 波高比分布図（直立壁沿いで碎波が発生）  
（ケース5U, 5R；波高14.1cm, 周期1.73sec）

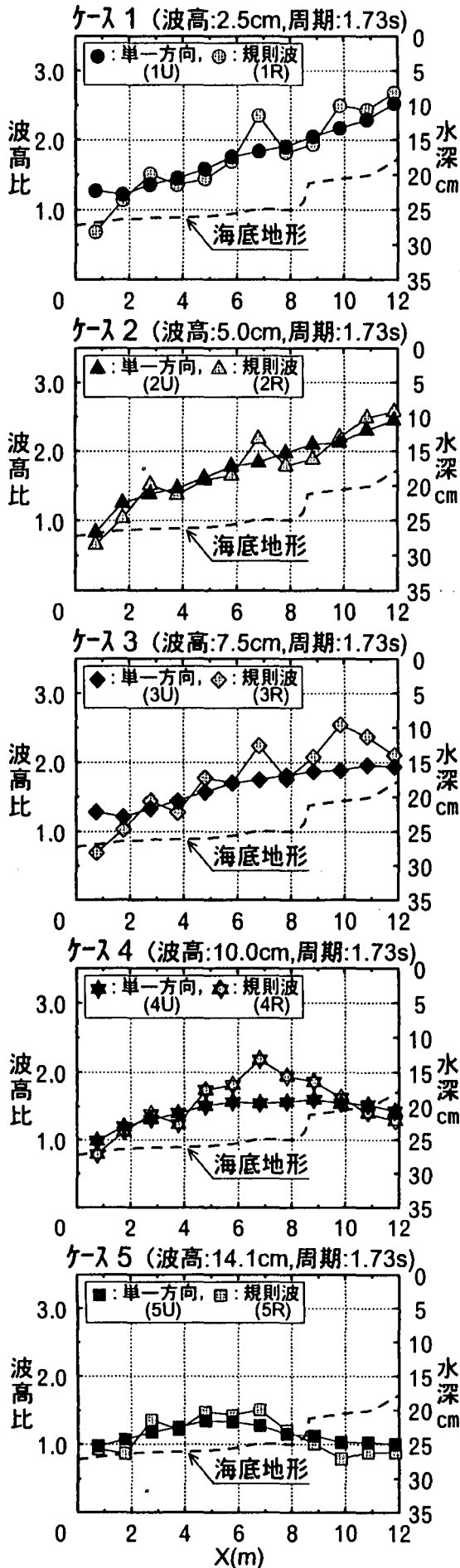


図-6 直立壁前面波高比の変化における規則波と単一方向不規則波の比較 (測線1; ケース1~ケース5)

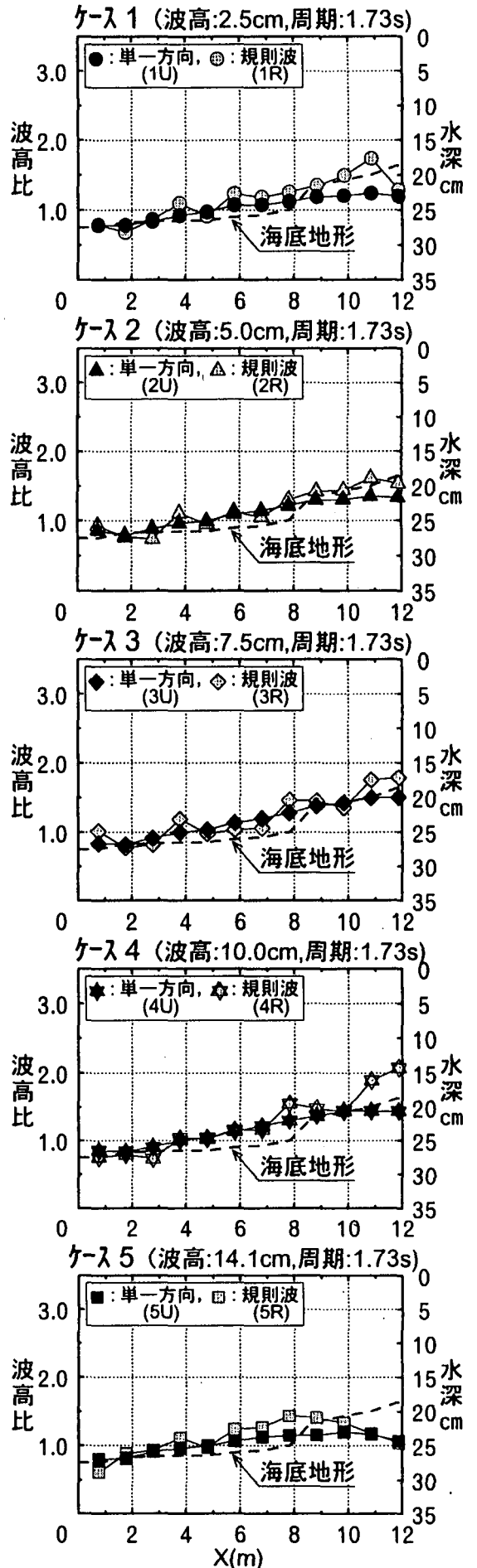


図-7 直立壁前面波高比の変化における規則波と単一方向不規則波の比較 (測線3; ケース1~ケース5)

## (2) 構造物前面でのstem波の形成と波浪場特性

入射波の方向分散性が小さい波浪場においては、構造物にほぼ平行に入射した場合、碎波波高に達するまでは構造物に沿ってstem波が形成されていることが実験水槽において確認できる。

stem波が形成されている波浪場での波高分布特性を把握するために、構造物沿い(測線1)からやや離れた測線3での波高比分布(ケース1~ケース5)を図-7に示す。これより、構造物沿いで碎波が発生しない波浪場においては、構造物沿い(測線1)のみでなく構造物からやや離れた海域(測線3)でも波高の連続的な増加が確認できる。全体的に、測線3での波高増加は構造物沿い(測線1)と比較すると顕著でない傾向がみられる。しかし、ケース5U, 5Rでの隅角部から離れた海域( $X=8\sim 10\text{m}$ 付近)のように、構造物沿いで碎波が発生しているが測線3の海域では碎波が発生していない波浪場においては、碎波によって構造物からの反射波が低減されていることも影響し、測線3付近での波高が構造物沿いでの波高よりも大きくなる傾向がみられる。

## (3) 入射波の周期の影響

ここでは、斜め入射波の発達における入射波の周期の影響について検討する。

ケース2U, 2R(波高5.0 cm, 周期1.73sec)と波高が等しく、周期が短い(0.89sec, 1.12sec, 1.34sec)波浪場での構造物沿いおよび測線3での波高比分布を図-8, 9に示す。これより、入射波の周期が短い波浪場においても、構造物沿い(測線1)では隅角部から離れるにつれて波高が次第に増加する傾向が確認できる。但し、周期が長い波浪場(ケース2U, 2R)と比較すると、入射波の波長に対する伝播距離が長い波浪場であるにもかかわらず波高比は小さくなる。これは、入射波の周期が短い波浪場においては、非線形性が小さくなることと関連している可能性が考えられる。

また、入射波の周期が短い波浪場での測線3付近の海域では、反射波が形成されることによる波高低下が確認できる。

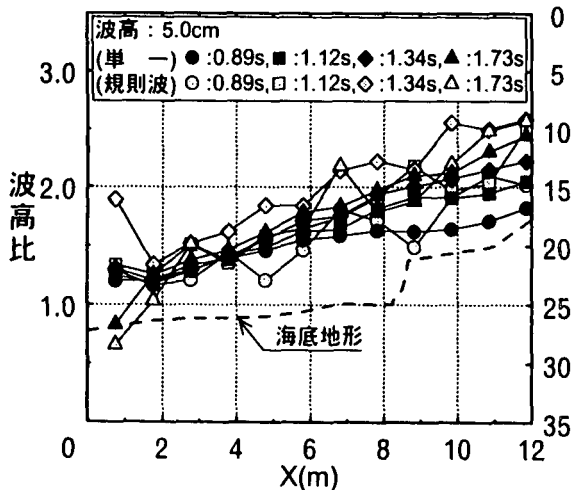


図-8 直立壁前面波高比に及ぼす周期の影響  
(測線1)

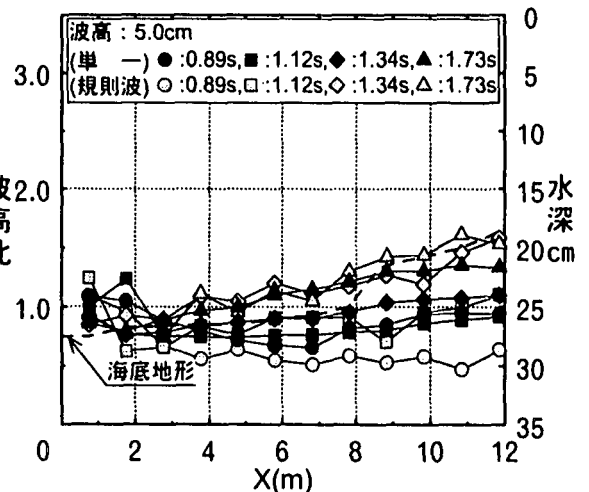


図-9 直立壁前面波高比に及ぼす周期の影響  
(測線3)

## 5. あとがき

隅角部を有する構造物への入射角が小さい波浪場を対象とした水理模型実験を実施し、波浪条件の異なる構造物前面での波浪場特性を比較検討し、入射波の不規則性について考察した。今後、多方向不規則波を用いた水理模型実験および数値解析(三井の方法)を併せて検討することによって、入射波の多方向性の影響および数値解析手法の適用性について検討する予定である。

最後に、計測にあたっては(株)日本工業試験所 内西 博氏の協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

## 参考文献

- Wiegel, R. L. (1964) : Water wave equivalent of Mach-reflection, Proc. 9th Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 82-102.
- Berger, U. and S. Kohlhase (1976) : Mach-reflection as a diffraction problem, Proc. 15th Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 796-814.
- 森屋陽一・菊地正行・松立博樹・水口優(1995) : 浅海域における周期波のマッハ反射について, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 6-10.