

構造物沿いの斜め入射波の発達における 入射波の非線形性および方向分散性の評価

目見田 哲*・酒井 哲郎**

1. ま え が き

構造物にほぼ平行に近い角度で斜め入射波が作用する波浪場では波浪条件によって構造物沿いで stem 波が形成されるが、大水深域の大規模な構造物（人工島など）においては斜め入射波の発達（構造物沿いで波高増加）が非常に顕著になる場合が考えられる。

目見田ら（1998）は、隅角部を有する構造物にほぼ平行に斜め入射波が作用する波浪場を対象とし、斜め入射波の発達、および構造物前面での stem 波、反射波の形成において入射波の多方向性の影響が大きいことを把握した。

しかし、水理模型実験で用いた入射波の周期、入射角、方向集中度パラメータ (S_{max}) がいずれも 1 種類であり、stem 波が形成される波浪場の構造物沿いの波高分布において第 1 ピーク付近の分布形状が把握できていない。stem 波が形成される波浪場での斜め入射波の発達のメカニズム（線形の回折現象として説明できるのか、stem 波の形成などの非線形性の影響が大きい現象か？）およびそこでの入射波の方向分散性の影響についてさらに検討していくことが必要である。

規則波の波浪場の斜め入射波の発達においては、回折散乱波および stem 波の形成などによる非線形性がともに影響している。過去の研究の実験結果と数値計算の比較においても入射波の非線形性があまり強くない波浪場は線形の回折現象で説明されているが（Berger ら, 1976）、入射波の浅海アーセル数が大きく非線形性が強い波浪場の構造物沿いの波高分布についてはヘルムホルツ方程式では不十分であり、非線形性を含むブシネスク方程式が適用可能とされている（森屋ら, 1995）。入射波が不規則性、多方向性を有する波浪場においても入射波の非線形性が斜め入射波の発達に大きく影響する可能性が考えられ、斜め入射波の発達については入射波の非線形性、不規則性、方向分散性のいずれも考慮できる評価が必要といえる。

本研究では、単一方向不規則波、多方向不規則波を用

いて波浪条件（波高、周期、入射角、方向分散性）をパラメトリックに変化させた水理模型実験を実施し、構造物沿いの斜め入射波の発達のメカニズム、そこでの入射波の非線形性、方向分散性の影響について評価する。

2. 実験装置と条件

(1) 実験装置と模型

地形と構造物の模型平面図を図-1 に示す。

隅角部付近の stem 波が十分に形成されていない状態からの斜め入射波の発達を把握するために、隅角部には消波工を設置しない。

(2) 造波した実験波の特性検証

単一方向不規則波（ケース 1U, 2U；有義波高が 2.5 cm, 5.0 cm：各々、有義波周期は 0.89 s, 1.12 s, 1.34 s, 1.73 s, 2.00 s の 5 種類）および有義波高、有義波周期の等しい多方向不規則波（ケース 1M, 2M）を用いる。周波数スペクトルは Bretschneider-光易型、多方向不規則波の方向関数は光易型 ($S_{max}=25, 75$) とする。多方向不規則波の造波信号は、エネルギー等分割のダブルサンメーション法によって周波数 1,024 個、波向き 91 個の成分波を合成して計算した。地形開始部付近の造波装置の中心を含む 2 箇所 (A-0, B-0；図-1 参照) に 4 本の波高計で構成された波高計アレイを設置し、ベイズ法を用いて方向スペクトルを算定した。多方向不規則波（ケース 2M；周期 0.89 s, 1.73 s）の方向スペクトルを図-2 に示すが、目標の方向スペクトルを有する実験波がほぼ

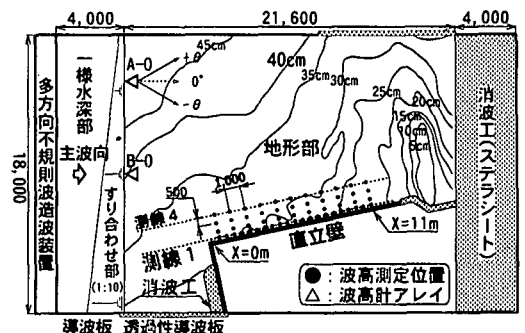


図-1 地形と構造物の模型平面図 (単位: mm)

* 正会員 工修 関西電力(株) 総合技術研究所
** フェロー 工博 京都大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻

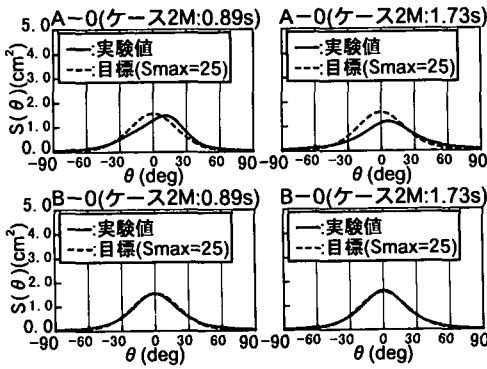


図-2 地形開始部の方向スペクトル
(ケース 2 M; 周期 0.89 s, 1.73 s)

造波できている。なお、他の波浪場についても目標とする方向スペクトルを有する実験波が造波できていることを確認した。多方向不規則波の波浪場について有効造波領域の面から考えると、構造物前面の計測ポイントが造波装置端部から 30° の領域に入っていることから十分に精度の高い評価が可能であると考えられる。また、いずれの波浪条件でも実験水槽の計測範囲において直立壁沿いで碎波が発生していない。

(3) 波高分布計測

構造物沿いの斜め入射波の発達、および構造物前面の反射波の形成について把握するために、構造物に平行な各測線(測線 1~4)での波高分布を計測する。計測時間は約 5 分、サンプリングタイムは 0.025 s 間隔とする。

3. 単一方向不規則波の波浪場での斜め入射波の発達

斜め入射波の発達における入射波の非線形性の影響を把握する際に、入射波の非線形性を示すパラメータとしては浅海アーセル数 ($Us = gHT^2/k^2$) が目安になると考えられるものの、入射波の波高、周期について斜め入射波の発達との関係を個別に把握していくことが必要とい

える。ここでは、単一方向不規則波の波浪場について波高、周期、入射角を変化させて構造物沿いの波高分布を検討する。なお、ケース 2 U (波高 5.0 cm) での入射波の浅海アーセル数を算定すると、周期が 0.89 s の波浪場では $Us \approx 2.5$ 、周期が 2.00 s の波浪場では $Us \approx 12$ となる。

ケース 1 U, 2 U での入射角が 10°, 20° の波浪場(周期が 0.89 s, 1.12 s, 1.73 s)について構造物沿いの波高比分布を図-3 に示す。入射角が 10° と小さい波浪場においては、回折散乱波の影響による波高分布の第 1 ピークが計測範囲に含まれないこともあり、入射波の波高の影響はほとんどあらわれない。これに対して、入射角が 20° の波浪場においては、構造物沿いの伝播距離 (X) が大きい海域で入射波の波高の影響が次第にあらわれる。入射波の波高が大きく非線形性の強い波浪場であるケース 2 U においてはケース 1 U よりも斜め入射波の発達が顕著であり、第 1 ピーク後の波高低下が見られない。図-4 に測線 2 でのケース 1 U, 2 U (周期が 1.12 s) の波高比分布を示すが、伝播距離 (X) が大きい海域においてケース 2 U の波高比がケース 1 U での波高比より大きいことは、stem 波が顕著に形成されていることの影響

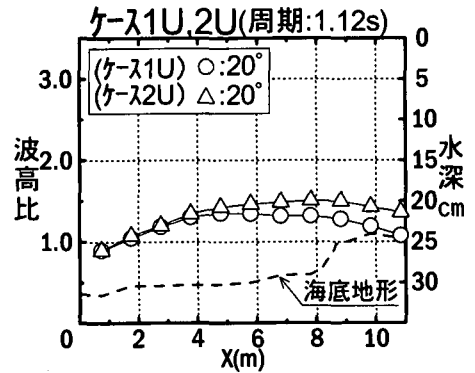


図-4 入射波の波高の影響
(ケース 1 U, 2 U: 周期 1.12 s, 入射角 20°; 測線 2)

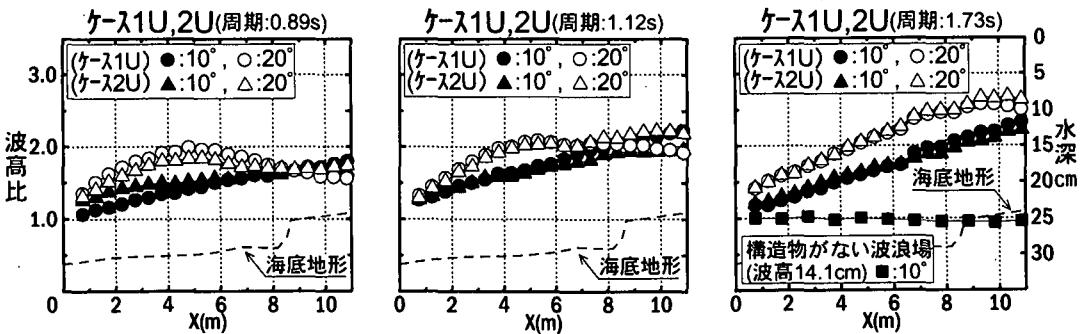


図-3 斜め入射波の発達における入射波の波高の影響 (ケース 1 U, 2 U: 周期 0.89 s, 1.12 s, 1.73 s; 測線 1)

と考えられる。

ここで、単一方向不規則波の波浪場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について測線1に対応する位置の波高比分布(波高 14.1 cm, 周期 1.73 s)を図-3に示すが、ここでは碎波は発生せず、波高増加も見られない。よって、ケース 1 U, 2 U でみられた構造物沿いの斜め入射波の発達は屈折, 浅水変形の影響によるものではないといえる。

図-5にケース 2 U, 入射角 10°, 20°で周期を変化させた際の構造物沿いの波高比分布を示す。いずれの波浪場においても構造物沿いで stem 波形成, 斜め入射波の発達が見られるが、構造物沿いの伝播距離が大きくなるにつれて入射波の周期の影響が顕著にあらわれる。入射角が 20°を例にとると、周期が 0.89 s と短い波浪場での波高分布においては回折散乱波の影響が支配的であり、第 1 ピーク ($X=5$ m 付近)、およびその後の波高低下も明確にあらわれる。これに対して、周期が長い波浪場ほど第 1 ピークでの波高比が大きく、その後も波高低下がみられない。同一データ(入射角は 10°)について隅角部からの距離 (X) を入射波の波長 (L) で無次元化したものを図-6に示す。周期が長い波浪場ほど波高比が大きいたことが顕著であり、斜め入射波の発達は線形の回折現象としては説明しきれず、入射波の浅海アーセル数が大きく非線形性の強い波浪場であることが大きく関連しているものと考えられる。

4. 多方向不規則波の波浪場での斜め入射波の発達

多方向不規則波の波浪場の斜め入射波の発達における入射波の非線形性(波高, 周期)の影響、および $S_{max}=75$ の波浪場での斜め入射波の発達が $S_{max}=25$ および単一方向不規則波の波浪場のいずれに近い特性を示すかに

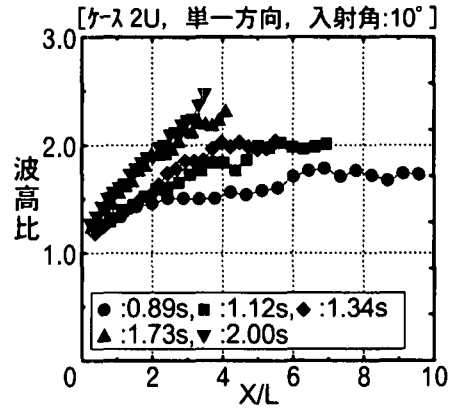


図-6 入射波の周期の影響 (X を波長で無次元化) (ケース 2 U : 入射角 10° ; 測線 1)

ついて考察する。

図-7にケース 2 (周期は 0.89 s, 1.12 s, 1.34 s), 図-8に波高 1.5 cm, ケース 1, ケース 2 (周期はすべて 1.73 s) の構造物沿いの波高比分布を示す。

$S_{max}=25$ の波浪場は、いずれの波高, 周期においても単一方向不規則波の波浪場とは異なり, stem 波の形成, 斜め入射波の発達は見られない。入射波の波高, 周期が大きいケース 2 M (波高 5.0 cm), 周期 1.73 s の波浪場について考えると、隅角部位置での入射波の浅海アーセル数が約 16 と大きいにもかかわらず、斜め入射波の発達が見られない。これは、stem 波の形成などの非線形性の影響があらわれず、回折現象が波高分布の支配的要因となるために、入射波の方向分散性による回折波成分の位相のずれによって波高分布(空間分布)が平滑化された結果と考えられる。

$S_{max}=75$ の波浪場においては入射波の非線形性、特に、周期の影響が大きい。ケース 2 M を例にとると周期が短い波浪場(0.89 s, 1.12 s, 1.34 s)では斜め入射波の

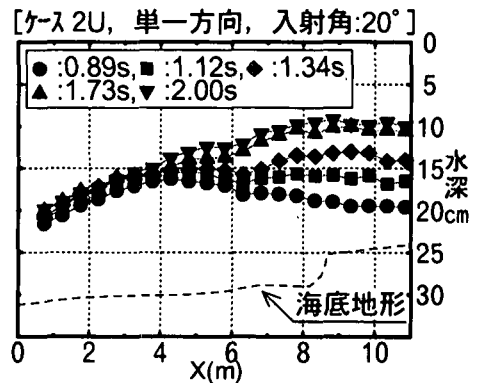
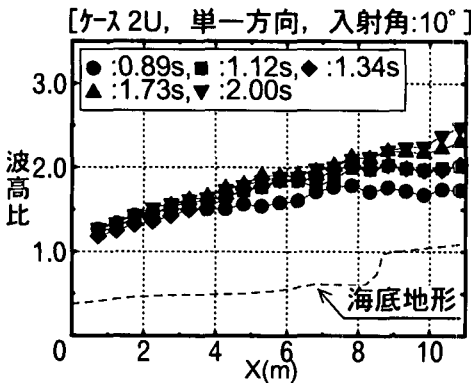


図-5 斜め入射波の発達における入射波の周期の影響 (ケース 2 U : 入射角 10°, 20° ; 測線 1)

発達は見られず、 $S_{max}=25$ の波浪場と比較しても構造物沿いの波高分布はほとんど等しい(図-7参照)。これに対して、周期が長い波浪場(1.73s)では $S_{max}=25$ の波浪場と傾向が異なり、入射波が方向分散性を有していても、単一方向不規則波の波浪場と同様に斜め入射波の発達が見られる(図-8参照)。実験水槽においても、構造物沿いの伝播距離が大きくなるにつれてstem波が次第に形成されて波高が増加していく状態が観察できた。

図-9にケース2U、2M(周期0.89s, 1.34s, 1.73s)の構造物沿いの1/10最大波($H_{1/10}$)での波高比分布を示す。ここでも $H_{1/3}$ と同様の傾向を示し、単一方向不規則

波、および周期が長い多方向不規則波($S_{max}=75$)においては、隅角部から離れるにつれて、波高が増加する。

ケース2U、2M(周期1.73s)の波浪場について、ヘルムホルツ方程式を解く三井の方法(三井ら, 1967)による規則波での構造物沿いの波高分布を不規則波の成分波ごとに計算し、合成して算定した結果を実験値とともに図-10に示す。実験値が計算値より大きくなることから、単一方向不規則波、 $S_{max}=75$ での斜め入射波の発達は線形の回折現象として説明しきれず、構造物沿いのstem波の形成などによる非線形性の影響があらわれているものと考えられる。

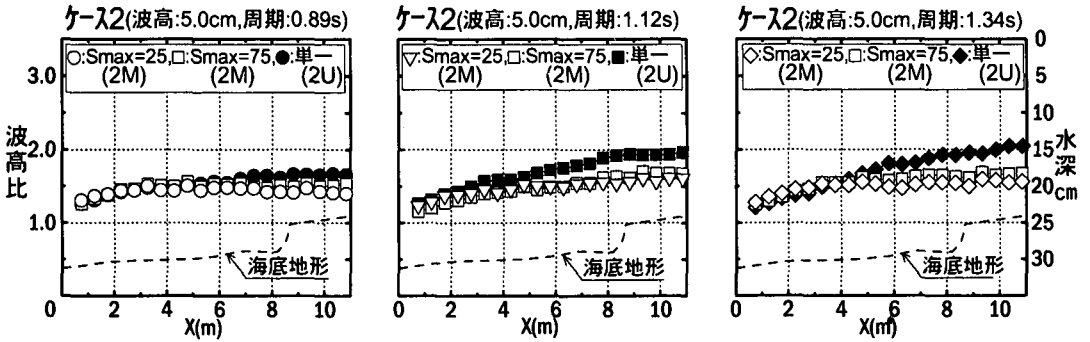


図-7 斜め入射波の発達における入射波の方向分散性の影響 (ケース2: 周期0.89s, 1.12s, 1.34s)

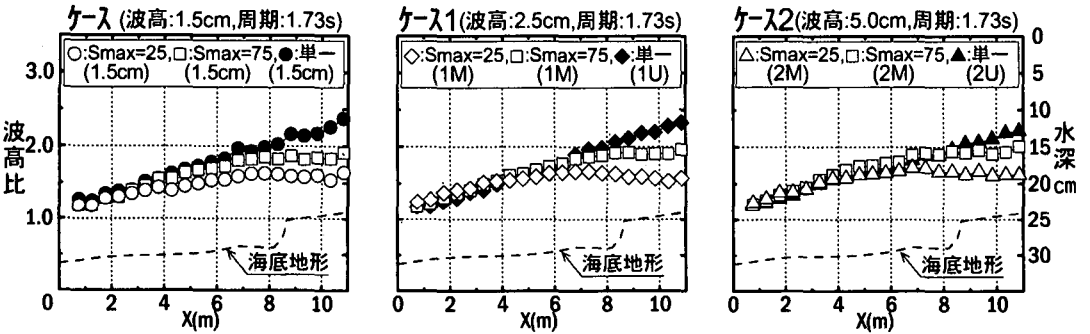


図-8 斜め入射波の発達における入射波の方向分散性の影響 (波高1.5cm, 2.5cm, 5.0cm: 周期1.73s)

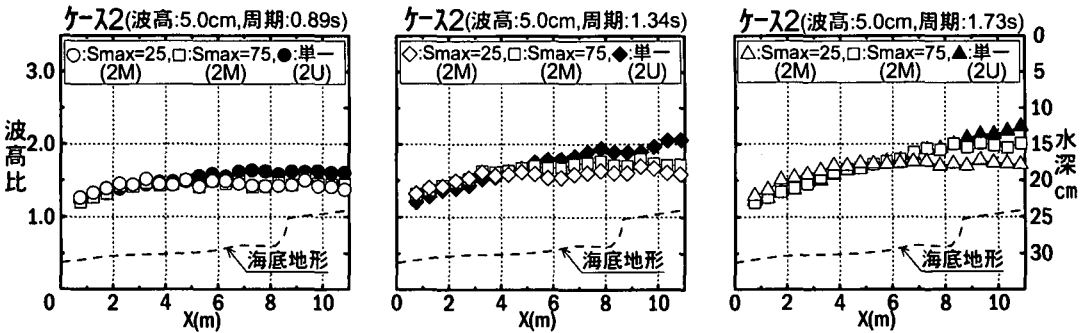
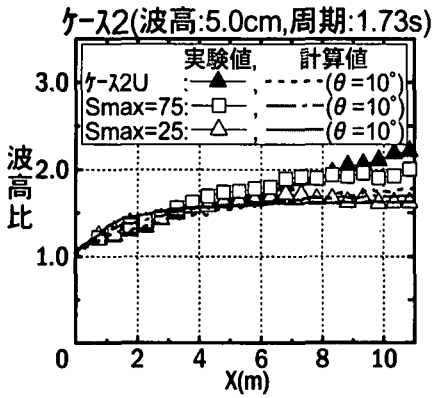
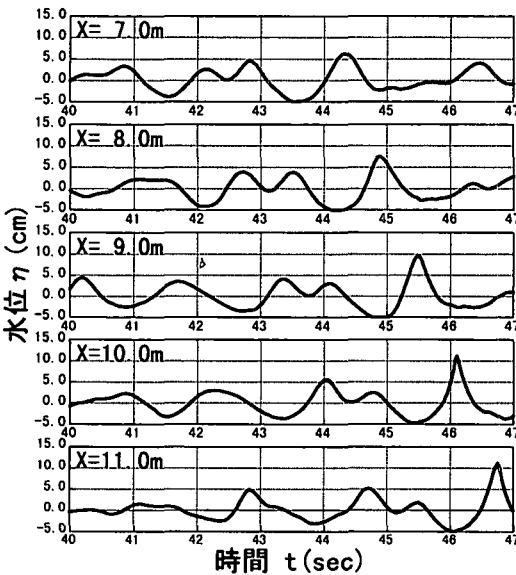


図-9 斜め入射波の発達 ($H_{1/10}$) における方向分散性の影響 (ケース2: 周期0.89s, 1.34s, 1.73s)



図一〇 三井の方法の適用性 (ケース2 ; 周期 1.73 s)



図一〇 $S_{max}=75$ の水位の時間変化 (ケース2 M ; 周期 1.73 s)

斜め入射波の発達が見られたケース2 M ($S_{max}=75$), 周期 1.73 s の波浪場について構造物沿いの水位の時間変化 ($X=7\sim 11$ m) を図一〇に示す。特定の入射波については構造物沿いの波高が連続的に増加していくことが示されている。

5. 結 語

本研究では、構造物沿いに斜め入射波が発達する波浪

場における入射波の非線形性、方向分散性の影響について考察した。その結果、斜め入射波の発達においては入射波の非線形性(波高, 周期), 方向分散性がともに影響する。

単一方向不規則波の波浪場においては、いずれの波高, 周期についても構造物沿いで stem 波の形成, 斜め入射波の発達が見られる。特に、入射波の波高が大きく, 周期が長い波浪場, いいかえれば浅海アーセル数が大きい波浪場ほど回折散乱波の影響のみでなく, stem 波の形成などの非線形性の影響があらわれて, 構造物沿いの伝播距離が大きい海域での斜め入射波の発達が顕著となる。

方向分散性が小さい多方向不規則波の波浪場 ($S_{max}=75$) においても, 周期が長い場合は, 入射波が方向分散性を有していても, 構造物沿いの伝播距離が大きくなるにつれて stem 波が次第に形成されて斜め入射波の発達がみられる。三井の方法との比較からも, 線形の回折現象としては説明しきれず, 構造物沿いの stem 波の形成などの非線形性の影響があらわれているといえる。

これに対して, $S_{max}=25$ の波浪場ではいずれの波高, 周期においても斜め入射波の発達は見られない。これは stem 波形成などの非線形性の影響がないこと, 入射波の方向分散性による回折波成分の位相のずれによって波高分布が平滑化されたことによる結果と考えられる。

今後, 構造物沿いで stem 波が形成される波浪場での碎波特性, 越波特性について水理模型実験を実施し, 考察をすすめることが必要と考える。

最後に, 計測にあたっては, (株)日本工業試験所 内西 博氏, 数値計算にあたっては(株)ニュージェック 殿最浩司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

三井 宏・村上仁士 (1967): 海岸構造物不連続部の波高分布について(第2報), 第14回海岸工学講演会論文集, pp. 53-59.
 目見田哲・酒井哲郎 (1998): 構造物沿いに stem 波が形成される波浪場における入射波の不規則性, 多方向性の影響, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 246-250.
 森屋陽一・菊地正行・松立博樹・水口 俊 (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.
 Berger, U. and S. Kohlhasse (1976): Mach-reflection as a diffraction problem, Proc. 15th Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 796-814.