

構造物沿いのステム波の碎波特性

目見田 哲*・酒井 哲郎**

1. ま え が き

構造物に平行に近い角度で入射波が作用する波浪場においては, 構造物沿いにステム波 (Mach-stem) が形成される場合が考えられる。

ステム波の発達による構造物前面の波高増加, それにともなう碎波の発生については, 構造物の越波量増加および構造物の安定性に直結する可能性を含む問題といえる。

海岸構造物の耐波設計 (越波, 消波工の安定性など) において, ステム波の形成の影響を検討した例はあまり見られない。構造物にほぼ平行に波高の大きい波が入射し, 構造物沿いの伝播距離が非常に長く, かつ碎波が発生しにくい大水深域に位置するといった, ステム波の発達による波高増加が顕著になるための必要条件を満たす構造物が多くなかったためと考えられる。

現在, 耐波設計の品質向上という目的に加えて, 構造物をできる限りスリムに設計して建設コストを低減するという面からも, 構造物に斜め入射波が作用する場合の波浪現象 (碎波, 越波など) について, さらに精度高く評価することが必要とされつつある。そこでは, 構造物にほぼ平行に波が入射し, 構造物沿いにステム波が形成

される波浪場についても, 精度高く評価することが要求される。

ステム波の発達特性においては, 入射波の非線形性および方向分散性の影響が大きい。入射波の非線形性が大きく, 方向集中度が高い波浪場 (単一方向不規則波, $S_{max}=75$ の多方向不規則波) においては, ステム波が発達し, 構造物沿いの波高増加が非常に顕著になることが水理模型実験によって示されている (著者ら, 1999)。

本研究においても, 隅角部を有する構造物 (直立壁) に斜め入射波が作用する際の構造物前面を対象とする。多方向不規則波 ($S_{max}=25, 75$) 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, 構造物沿いに形成されるステム波の碎波特性について検討する。特に, 構造物沿いの碎波の発生に及ぼすステム波の形成の影響, そこでの入射波の方向分散性の影響について考察する。

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。隅角部を有する直立壁を主波向と 10° (直角入射を 90° とする) の角度で設置する。また, 単一方向不規則波については, 直立壁を主波向と 55° の角度で設置した模型に

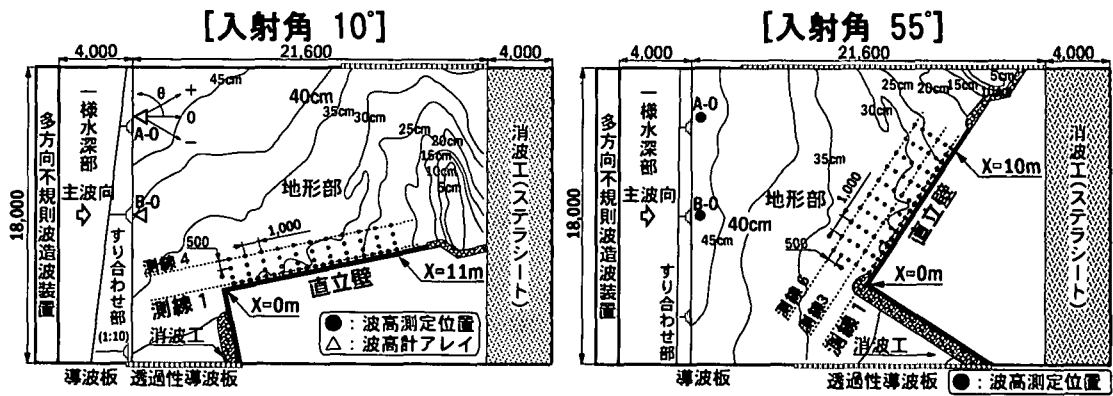


図-1 地形と構造物の模型平面図 (入射角 $10^\circ, 55^\circ$; 単位 mm)

* 正 会 員 工 博 関西電力(株) 総合技術研究所
** フ ェ ロ ー 工 博 京都大学教授 工学研究科土木工学専攻

についても水理模型実験を実施する。

(2) 造波した実験波の特性検証

波浪条件を表-1に示す。

3種類の単一方向不規則波(ケース1U~3U; 各々、有義波高が7.5 cm, 10.0 cm, 14.1 cm, 有義波周期はすべて1.73 s), 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($S_{\max}=25, 75$), 主波向は造波装置と直角方向とした。ケース1U(波高7.5 cm)について入射波の浅海アーセル数($U_s=gHT^2/k^2$)を算定すると, $U_s \approx 14$ となり, 非線形性の強い波浪場と考えられる。

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91個の成分波を合成して計算した。

造波した実験波を検定するために, 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, 方向スペクトルを算定した。多方向不規則波(ケース1M)の方向スペクトルをバイズ法(橋本, 1987)により解析し, 図-2に示す。 $S_{\max}=25, 75$ ともに, 目標とする方向

表-1 波浪条件

ケース	1M	1U	2M	2U	3U
波高(cm)		7.5	10.0		14.1
周期(s)		1.73			
入射角(deg)	10°	10° 20°	10°	10° 20° 55°	10° 20° 55°
$S_{\max}$	25 75	—	25 75	—	—

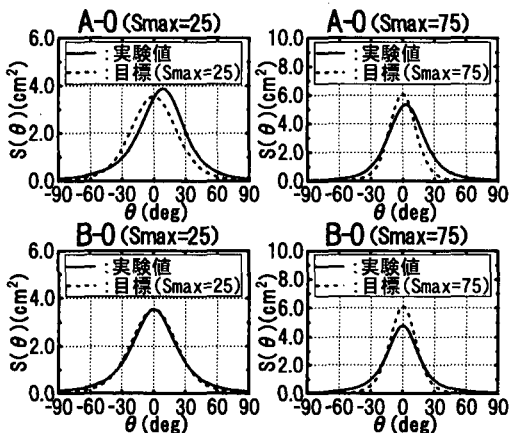


図-2 地形開始部の方向スペクトル
(ケース1M; $S_{\max}=25, 75$)

スペクトルを有する実験波がほぼ造波できていることが確認できる。なお, 他の実験波についても目標の実験波が造波できていることを確認した。

ここで用いる $S_{\max}=25, 75$ の多方向不規則波の方向スペクトル分布は $\pm 30^\circ$ (主波向を 0°) の範囲に波高にして9割以上に相当するエネルギーが分布する。有効造波領域の面から考えると, 隅角部および直立壁前面計測ポイントがともに造波装置端部から 30° の範囲に入っているため, 十分に精度の高い評価が可能といえる。

(3) 波高分布計測

構造物前面のSTEM波の発達, 碎波にともなう波高分布を把握するために, 構造物に平行な各測線(測線1~測線4)の波高分布を計測する。

なお, 計測時間は約5分とし, サンプルングタイムは0.025 s間隔とする。

3. STEM波が形成される場合の碎波特性 (単一方向不規則波)

構造物沿いにSTEM波が形成される単一方向不規則波を対象として, 構造物沿いの波高増加, それにともなうSTEM波の碎波特性について考察する。ここでは, 構造物への入射角が大きく(入射角 55°), STEM波が形成されない波浪場についても比較・検討する。

入射角が 10° の場合にSTEM波の碎波が発生する波高, 周期(ケース1U~3U)について, 入射角 $10^\circ, 20^\circ, 55^\circ$ の構造物沿いの波高比分布を図-3に示す。また, 構造物沿いの碎波が発生せず, 入射角が $10^\circ, 20^\circ$ の場合に回折散乱波およびSTEM波の形成によって構造物沿いの波高増加が顕著に見られた波浪場(波高5.0 cm, 周期1.73 s)の波高比分布(著者ら, 1999)についても併せて示す。なお, 波高比は地形開始部(B-0; 図-1参照)の波高との比で表す。

入射角が 55° の場合, 構造物沿いにSTEM波が形成されないことが実験水槽において確認できた。ここでは, 入射波の波高が最も大きいケース3Uについても, 構造物沿いの碎波が発生しない。入射波, 反射波, および回折散乱波の影響によって, 構造物沿いの波高比は2.0付近の値を変動する。

さらに, 構造物なし(地形のみ)の波浪場においても, 波高, 周期がケース2U, 3Uと同一で, 入射角 10° に対応する波向の入射波の碎波が発生しない。測線1に対応する位置の波高比分布を図-3に示すが, 屈折, 浅水変形による波高増加も見られない。

これらに対し, 入射角 $10^\circ, 20^\circ$ の場合, 構造物沿いに形成されるSTEM波の碎波が発生する。ケース1U, 2Uにおいては, 構造物沿いの伝播距離(X)が大きくなるにつれて碎波の頻度が高くなるために, 碎波が発生しない場

合(波高5.0 cm)と比較すると構造物沿いの波高増加が顕著でなくなる。さらに、碎波の頻度が高くなるケース3Uにおいては、 $X=5\text{ m}$ 付近を中心に碎波が発生し、伝播距離が大きい海域での波高低下が見られる。入射角 55° の場合と比較して構造物沿いの波高比が小さいにもかかわらず碎波が発生する。

これらより、入射角 10° 、 20° の構造物沿いの碎波の発生にはステム波の形成が大きく関連しているものと考えられる。ステム波が形成される場合、入射波と反射波が干渉し、構造物と垂直方向に波峰(Mach-stem)が形成され、構造物沿いの伝播距離が大きくなるにつれて、構造物前面の波高が増加していく。この場合、入射波と反射波の干渉によって、波高の大きい入射波が構造物に平行に作用する状態に近くなるために、ステム波が形成されていない場合と比較すると、構造物沿いの碎波が発生しやすいものと考えられる。

ちなみに、ステム波の形成によって構造物沿いの碎波が発生しやすくなる傾向については、Janら(1998)による規則波を用いた水理模型実験でも報告されている。ここでは、直立壁前面(一様水深)を対象としている。入射角 45° 、 60° の場合に斜め重複波が形成されて碎波が発

生しない入射波(波高, 周期)についても、入射角 30° の場合、直立壁沿いに形成されるステム波が碎波する例が報告されている。

4. 多方向不規則波の波浪場におけるステム波の碎波特性

多方向不規則波($S_{\max}=25, 75$)の波浪場のステム波の発達特性、そこでの碎波特性について検討する。

多方向不規則波の碎波機構については、規則波や単一方向不規則波の碎波機構と異なるかという本質的な課題すら未解明といえる(許ら, 1999)。

ここでは、多方向不規則波の碎波機構について論じることはできないが、入射波が方向分散性を有する波浪場($S_{\max}=25, 75$)における構造物沿いのステム波の発達、それにともなう碎波の発生について、波高分布特性からの考察をすすめる。

ケース1M($S_{\max}=25, 75$)、1Uについて、構造物沿い(測線1)および測線2, 3の波高比分布を図-4に示す。ここでは、計測海域内($0 < X < 11\text{ m}$)において構造物沿いの碎波がほとんど発生していないことが実験水槽で確認できた。

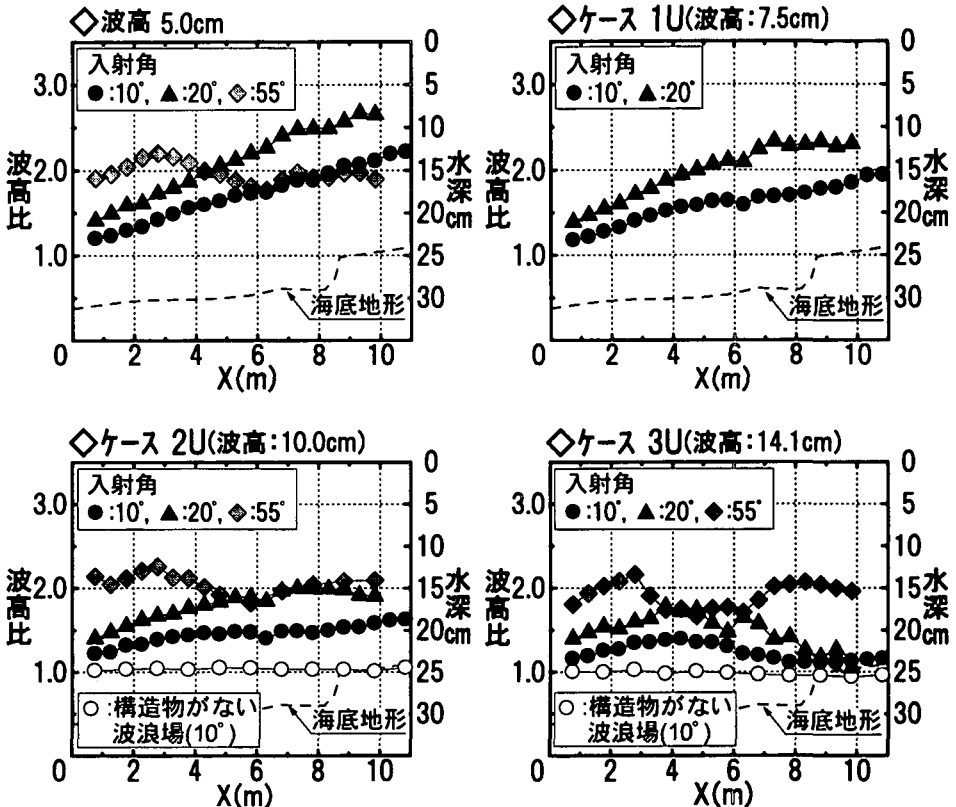


図-3 構造物沿いの波高分布における入射角の影響(波高5.0 cm, ケース1U, 2U, 3U; 測線1)

単一方向不規則波、および方向集中度が高い多方向不規則波 ($S_{max}=75$) においては、ステム波が発達し、隅角部から離れるにつれて構造物沿い (測線 1) の波高増加が顕著となる。入射波が方向分散性を有する $S_{max}=75$ の場合についても、単一方向不規則波の場合と波高分布がほぼ等しくなる。

これに対して、 $S_{max}=25$ の場合、ステム波が形成されない。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構造物沿いの波高増加が見られず、構造物沿いの砕波も発生しない。

構造物沿いに形成されたステム波は、構造物前面において入射波と反射波の波峰が一体化された状態とも考えることができる。よって、ステム波の発達による波高増加について考察するためには、構造物沿い (測線 1) のみでなく、構造物前面の海域 (測線 2, 3), いいかえれば、規則反射において入射波と反射波の波峰が分離している海域にも注目するべきである。図-4 に示すように、この海域では、 $S_{max}=25$ と比較して、 $S_{max}=75$ および単一方向不規則波の波高分布が全体的にかなり大きい。ステム波の形成によって、測線 2, 3 の位置においても入

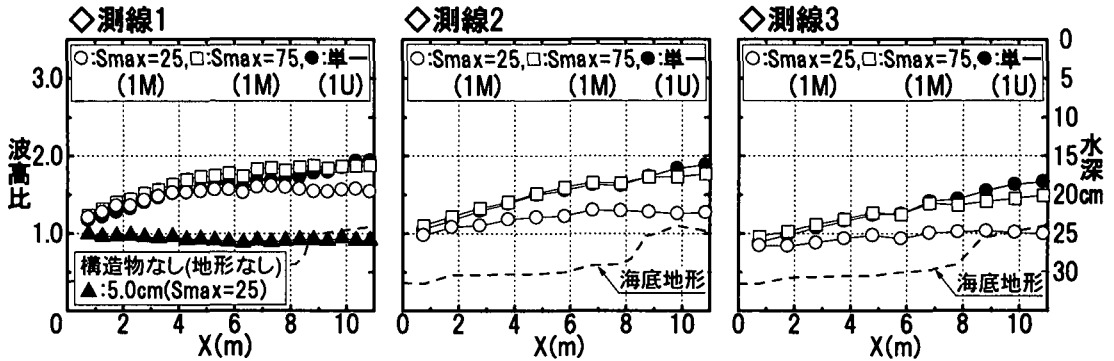


図-4 ステム波の発達における入射波の方向分散性の影響 (ケース 1: 測線 1, 2, 3)

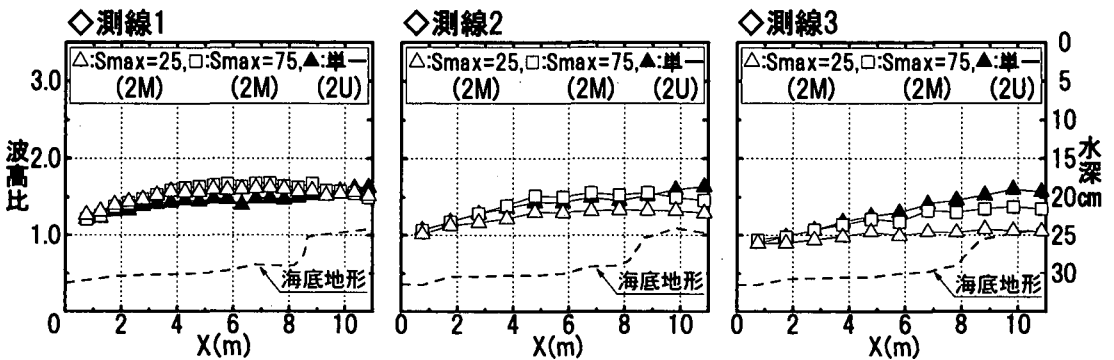


図-5 ステム波の砕波における入射波の方向分散性の影響 (ケース 2: 測線 1, 2, 3)

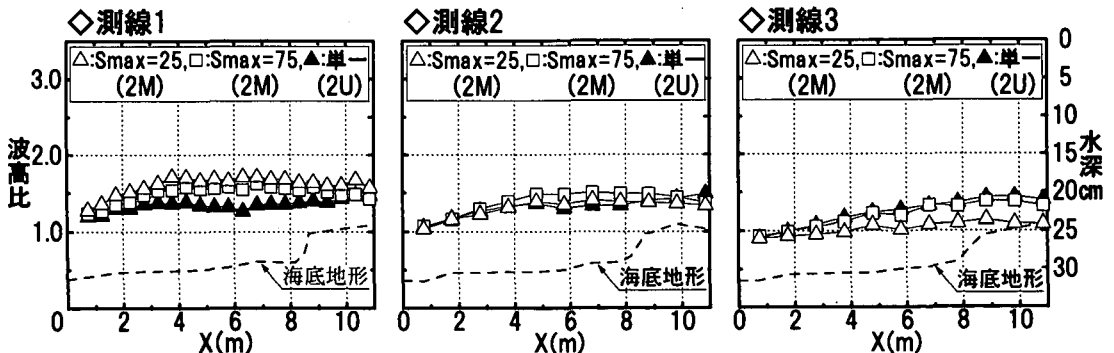


図-6 ステム波の砕波における入射波の方向分散性の影響 ($H_{1/10}$) (ケース 2: 測線 1, 2, 3)

射波と反射波の波峰が一体化した状態であるために、ステム波が形成されない $S_{\max}=25$ の場合と比較すると、波高がかなり大きくなるものといえる。

また、構造物、地形がともになく、一様水深の場合の波高 5.0 cm, $S_{\max}=25$ の波高比分布 (測線 1) についても併せて示す。ここでは、 $X=11$ m 付近においても波高比がほぼ 1.0 を示しており、これからも、計測海域が有効造波領域に位置することが確認できる。

次に、ケース 2M ($S_{\max}=25, 75$), 2U について、構造物沿い (測線 1) および測線 2, 3 の波高比分布を図-5 に示す。

$S_{\max}=75$ の場合、単一方向不規則波と同様、構造物沿いに形成されたステム波の碎波が発生する。その結果、構造物沿い (測線 1) の波高増加が見られない。ステム波の碎波状況を実験水槽で観察すると、構造物沿いでは $X=8\sim 10$ m 付近を中心に碎波が発生する。最初に、波高が最も高い構造物沿い (測線 1) の碎波が発生し、さらに浅い海域になると、構造物前面においても、連続的に碎波が発生する。これに対し、 $S_{\max}=25$ の場合、ステム波は形成されず、構造物沿いの碎波は発生しない。

$S_{\max}=75$, 単一方向不規則波の測線 3 においては、測線 1 と傾向が異なる。伝播距離が大きくなるにつれて波高増加が見られ、 $S_{\max}=25$ の場合と比較すると全体的に波高が大きい。これは、構造物沿い (測線 1) のステム波の碎波が開始した時点では、測線 3 付近では碎波が発生せずにステム波が形成されていることの影響といえる。

図-6 に、ケース 2 について、構造物沿い (測線 1) および測線 2, 3 の波高比分布 ($H_{1/10}$) を示す。なお、波高比は地形開始部 (B-0; 図-1 参照) の波高との比で表す。ここでも、 $S_{\max}=75$, 単一方向不規則波の測線 3 において、ステム波が形成されることの影響によって、伝播距離が大きくなるにつれて波高増加が見られる。

なお、ステム波がさらに発達した状態では、ステム波の幅が広くなり、構造物前面 (測線 1, 2, 3) の波高がほぼ等しくなるものと考えられる。入射波の波高、周期がケース 1, 2 と異なり、ステム波がさらに発達した状態で碎波が発生する波浪場においては、構造物前面の碎波がほぼ同時に発生するものと考えられる。

5. 結 語

本研究では、構造物沿いのステム波の形成にともなう碎波の発生、そこでの入射波の方向分散性の影響について考察した。

$S_{\max}=75$ および単一方向不規則波といったステム波が形成される波浪場においては、入射波と反射波が干渉し、構造物と平行に波峰 (Mach-stem) が進行しつつ、伝播距離が大きくなるにつれて構造物前面の波高が増加する。ここでは、入射波と反射波の干渉によって、波高の大きい波が構造物に平行に入射する状態に近くなるために、構造物がない場合やステム波が形成されない場合と比較すると、構造物沿いの碎波が発生しやすくなる。このことは、構造物の建設前に入射波が碎波しない海域であっても、同一の入射波によって、構造物沿いに形成されるステム波が碎波する可能性を示している。このようなステム波の碎波特性は、斜め入射波が作用する海域の大規模な海岸構造物の耐波設計において、非常に重要な特性といえる。

今後、構造物沿いに発達するステム波の碎波波高について、さらに水理模型実験による検討が必要である。構造物がない波浪場やステム波が形成されずに入射波と反射波が共存する波浪場における碎波波高との関係について、定量的なレベルで把握す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、池田博和氏、渡辺 博氏の協力を得たことを記して、謝意を表します。

参 考 文 献

- 許 東秀・岩田好一朗・水谷法美 (1999): 多方向不規則波の碎波限界とその検討課題, 多方向不規則波と沿岸構造物の相互作用に関するワークショップ講演集, pp. 78-85.
- 橋本典明 (1987): ベイズ型モデルを用いた方向スペクトルの推定, 港研報告, 第 26 巻, 第 2 号, pp. 97-125.
- 目見田哲・酒井哲郎 (1999): 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, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 226-230.
- Jan, C. D. and M. C. Lin (1998): Bed forms generated on sandy bottom by oblique standing waves, J. Wtrwy., Port, Coastal, and Ocean Eng., ASCE, Vol. 124, No. 6, pp. 295-302.