

図-1 地形と構造物の模型平面図(直立壁 $L=9\text{m}$:単位 mm)

は4mの2種類として、各々の先端部水深を $h=45$ cm, 30 cmとする。直立壁は越波が発生しない高さとする。

波浪条件として、 $H_{1/3}=2.5$ cm, 5.0 cm, 10.0 cm, $T_{1/3}=1.5$ s, 2.0 s, 入射角 22.5° , 45° (直角入射を 90° とする), 周波数スペクトルは Bretschneider- 光易型, 方向関数は光易型 ($S_{\max}=25, 75$) とする。造波装置に直角方向の波向が入射角 22.5° に相当する。造波した実験波を検定するため、地形開始部付近に造波装置の中心を含む2箇所 (A-0, B-0) に波高計アレイを設置し、波高、周波数スペクトル、方向スペクトルを算定した。

構造物沿いにステム波が発達する場合、斜め入射波の入射角によって、構造物前面に形成される波峰のパターンが2つに大別される (Wiegel, 1964)。入射波と反射波の2つの波峰に加えて、構造物に垂直方向にステム波が形成されるパターンのみでなく、入射角がさらに小さい場合、反射波の波峰が形成されず、ステム波が構造物沿いに進行する。孤立波を用いた Perroud (1957) の研究によると、後者パターンが発生するのは入射角が 20° より小さい時であり、前者パターンは、入射角が $20^\circ \sim 45^\circ$ とされている。また、ステム波の碎波限界波高についても、両者のパターンは異なる特性を示し、規則波を用いた平面実験において、後者の碎波限界波高が小さくなる (著者ら, 2004)。今回、両パターンを把握するため、入射角を 22.5° および 45° とする。

(2) 直立壁周辺海域の海浜流場への影響

さらに、異なる波浪場を対象として、岬を含む湾内の海浜流場についても検討した。地形と構造物の模型平面図を図-2に示す。直立壁の長さ (L) を8m, 先端部水深を35 cmとする。造波装置と直角方向に直立壁を設置し、越波が発生しない高さとする。波浪条件として、 $H_{1/3}=10.0$ cm, 12.0 cm, $T_{1/3}=1.5$ s, 2.0 s, 入射角 22.5° , 周波数スペクトルは Bretschneider- 光易型とする。

3. ステム波の碎波現象と海浜流場への影響

直立壁沿いの伝播距離が長い波浪場 ($L=9$ m) を対

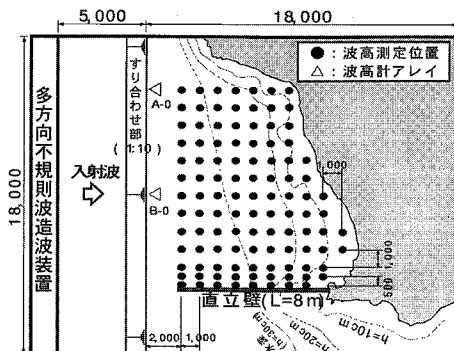


図-2 地形と構造物の模型平面図(直立壁 $L=8$ m:単位 mm)

象とする。直立壁前面で発達するステム波の急勾配斜面部における挙動と海浜流場への影響を評価する。

(1) 急勾配斜面部におけるステム波の碎波特性

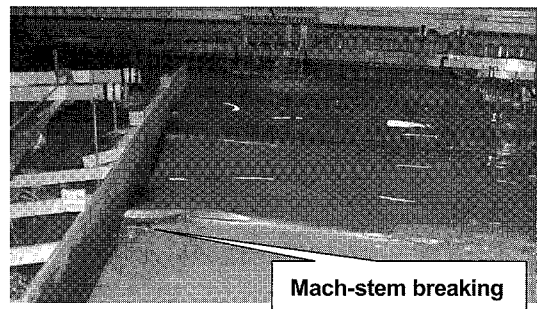
急勾配斜面部の水深が浅くなる海域においてステム波の碎波が発生する。代表的な例として、規則波 ($H=10$ cm, $T=1.5$ s, 入射角 22.5°) について、写真-1に波浪場全体とステム波が碎波する部分を示す。入射角 22.5° の場合、(a)の写真に見られるように、反射波が形成されないタイプのステム波が発達する。(b)の写真に見られるように、斜め重複波の碎波と大きく異なり、Plunging 型かつ上部が前面にとびだす激しい碎波が発生する。

(2) ステム波の発達による直立壁前面の波高増加

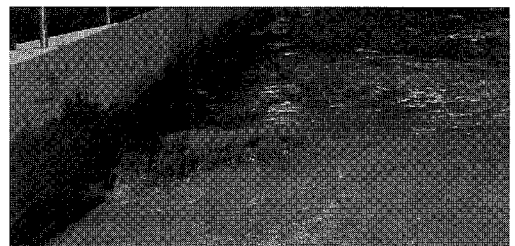
単一方向不規則波 ($H_{1/3}=2.5$ cm, 5.0 cm, 10.0 cm, $T_{1/3}=1.5$ s: 入射角 22.5° , 45°) の直立壁沿い (測線1) の波高比分布を図-3～図-5に示す。

入射角 22.5° の場合、浅い海域の波高増加が顕著であり、図-3に見られるように、碎波直前には波高比が3.0に近い値となる。これは、反射波の波峰が形成されず、直立壁沿いに次第に発達するステム波が浅い海域に達した時、単一進行波の状態に近いために、浅水変形の影響が大きく現れたと考えられる。図-4においても、先端部からの距離 (X) が5, 6 m 付近の波高増加が顕著に見られるが、これも同様に説明できる。

これに対して、入射角 45° の場合、ステム波とともに



(a) 波浪場全体



(b) ステム波の碎波部分 ($X=6$ m付近)

写真-1 直立壁前面の波浪場
(規則波: $H=10$ cm, $T=1.5$ s, 入射角 22.5°)

反射波が形成される波浪場となるが、図-3においても、浅い海域の顕著な波高増加が見られない。

直立壁沿いの波高増加については、ステム波の発達のみによるものでなく、回折散乱波の影響も含まれている。例えば、図-3～図-5のいずれについても、先端部付近においては、入射角 45° の方が波高が大きい。これは、回折散乱波の影響による波高分布特性と説明できる。

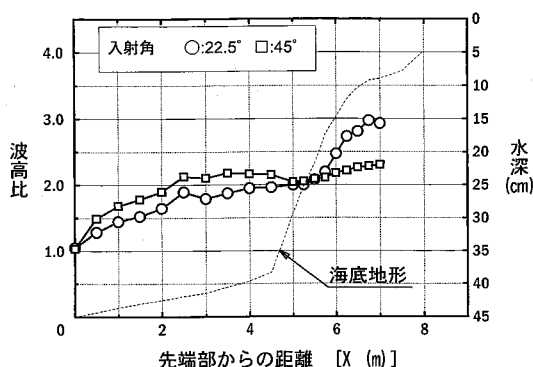


図-3 直立壁沿いの波高分布
(単一方向不規則波: $H_{1/3}=2.5\text{cm}$, $T_{1/3}=1.5\text{s}$)

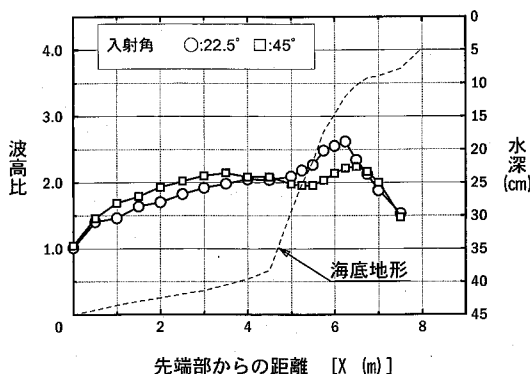


図-4 直立壁沿いの波高分布
(単一方向不規則波: $H_{1/3}=5.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.5\text{s}$)

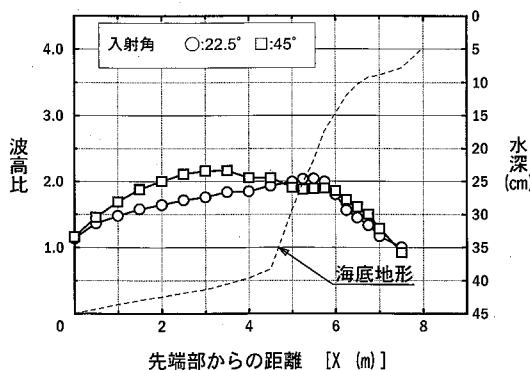


図-5 直立壁物沿いの波高分布
(単一方向不規則波: $H_{1/3}=10.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.5\text{s}$)

(3) 海浜流場への影響

単一方向不規則波 ($H_{1/3}=5.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.5\text{s}$, 入射角 22.5°) の直立壁前面流速ベクトル分布を図-6に示す。ここでは、図-4において波高比がピーク値2.6を示した、水深10cm付近よりも浅い海域で、ステム波の激しい碎波にともない、直立壁沿いに岸向きの流れが顕著に発達する。水深10cm付近よりも深い海域では、図中、上側からの流れが直立壁にぶつかった後、直立壁沿いに沖向きの流れが発生する。

単一方向不規則波 ($H_{1/3}=5.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.5\text{s}$, 入射角 45°) の直立壁前面流速ベクトル分布を図-7に示す。入射角 45° の場合、ステム波の碎波にともない岸向きの流れが発生する傾向が見られるが、ステム波の浅水変形による波高増加、および碎波による波高低下が小さく、入射角 22.5° の場合と比較すると流速が小さい。

これらに対し、図-3に波高分布を示した単一方向不規則波 ($H_{1/3}=2.5\text{cm}$, $T_{1/3}=1.5\text{s}$, 入射角 22.5° , 45°) のように、斜め入射波の波高が小さく、浅い海域においてステム波の碎波が発生しない場合、直立壁沿いに岸向きの海浜流が発達しない。

単一方向不規則波 ($H_{1/3}=10.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.5\text{s}$, 入射角 22.5°) においても、ステム波の碎波にともない、直立壁沿いに岸向きの流れが顕著に発生する。さらに、ステム波が顕著に発達し、ステム波の幅が広がるために、直立壁沿いのみでなく、側線2の浅い海域においても岸向きの流れが発生する。

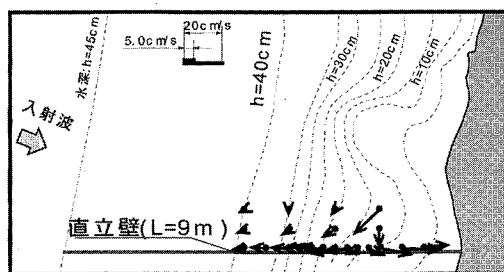


図-6 直立壁前面流速ベクトル分布
(単一方向不規則波: $H_{1/3}=5.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.5\text{s}$, 入射角 22.5°)

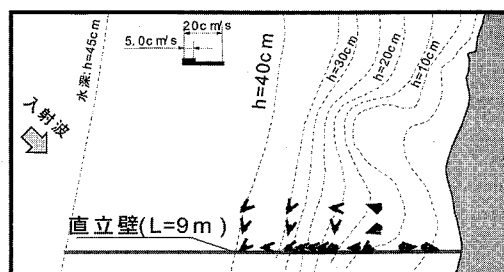


図-7 直立壁前面流速ベクトル分布
(単一方向不規則波: $H_{1/3}=5.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.5\text{s}$, 入射角 45°)

4. 多方向性の影響

海域構造物の実設計においてステム波をどう評価すべきかにあたっては、斜め入射波が多方向性を有する場合のステム波の挙動について把握すべきである。

多方向不規則波 ($H_{1/3}=5.0$ cm, $T_{1/3}=1.5$ s, $S_{max}=25, 75$) の直立壁沿いの波高比分布を図-8に示す。ピーク波向を 22.5° とする。ここでは、急勾配斜面において、斜め入射波の方向集中度が大きくなるために、急勾配斜面で形成されたステム波の浅水変形による波高増加、およびステム波が激しく碎波する現象がともに確認できた。

図-4における単一方向不規則波 (入射角 22.5°) の波高分布と比較して、ピーク付近の値が小さい。これには、多方向性がステム波の発達特性に与える影響のみでなく、碎波限界波高に与える影響、および回折散乱波による波高増加への影響がいずれも含まれている。

多方向不規則波 ($H_{1/3}=5.0$ cm, $T_{1/3}=1.5$ s, 入射角 22.5° , $S_{max}=25$) の直立壁前面流速ベクトル分布を図-9に示す。ここでも、急勾配斜面の浅い海域における碎波にともない、直立壁沿いに岸向きの流れが発生する。

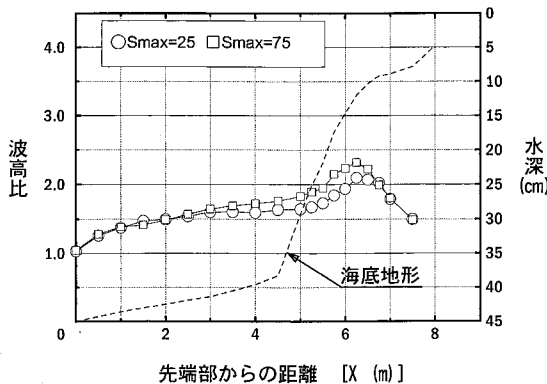


図-8 直立壁沿いの波高分布
(多方向不規則波 ($S_{max}=25, 75$): $H_{1/3}=5.0$ cm, $T_{1/3}=1.5$ s)

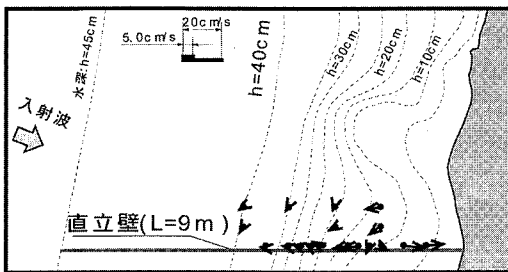


図-9 直立壁前面流速ベクトル分布
(多方向不規則波 ($S_{max}=25$): $H_{1/3}=5.0$ cm, $T_{1/3}=1.5$ s)

5. 直立壁の長さの影響

先端部からの伝播距離が短い場合、ステム波が浅い海域に達した時点でステム波が十分に発達していない可能性が考えられる。ここでは、直立壁が短い波浪場 ($L=4$ m) を対象とする。前節までの長い直立壁と同位置に、先端側を短くした直立壁を設置する。

単一方向不規則波 ($H_{1/3}=5.0$ cm, $T_{1/3}=1.5$ s, 入射角 $22.5^\circ, 45^\circ$) の直立壁沿いの波高比分布を図-10に示す。横軸は、長い直立壁 ($L=9$ m) の先端部からの距離で表す。

図-4に示した、 $L=9$ mの場合と比較すると、入射角 22.5° の時に波高増加が顕著に見られない。これは、先端部からの伝播距離が短いために、ステム波が浅い海域に達した時点で十分に発達していないことに加えて、回折散乱波による波高増加が十分でないことも要因といえる。入射角 22.5° の直立壁前面流速ベクトル分布を図-11に示す。ステム波の碎波にともない、岸向きの流れが発生する。しかし、 $L=9$ mの場合と比較すると、岸向きの流速がかなり小さくなる傾向が見られる。

一方、入射角 45° の場合、 $L=9$ mの場合と比較しても、ピーク値となる付近の波高に大きな違いは見られない。入射角 45° の直立壁前面流速ベクトル分布を図-12に示す。ここでも、碎波にともなう岸向きの流れが発生する。 $L=9$ mの場合と比較しても、岸向きの流速が小さくなる傾向は見られない。

直立壁が短い場合 ($L=4$ m), 入射角 22.5° と比較して、入射角 45° の場合に、波高のピーク値が大きく、岸向きの流れも顕著に発生する。これには、入射角が大きく、反射波をとまなうパターンのステム波の碎波限界波高が、反射波を形成しない時の碎波限界波高より大きいことも影響していると考えられる。

直立壁の長さによって、海浜流がより顕著に発達する

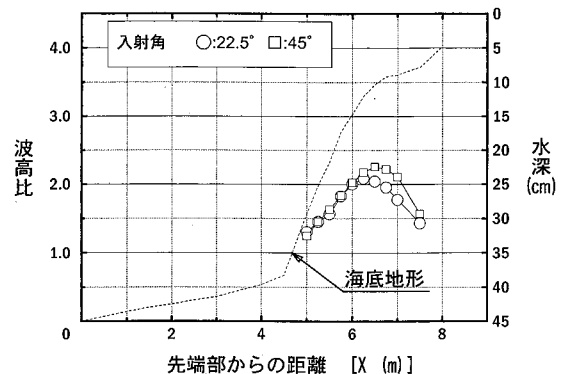


図-10 直立壁沿いの波高分布
(単一方向不規則波: $H_{1/3}=5.0$ cm, $T_{1/3}=1.5$ s)

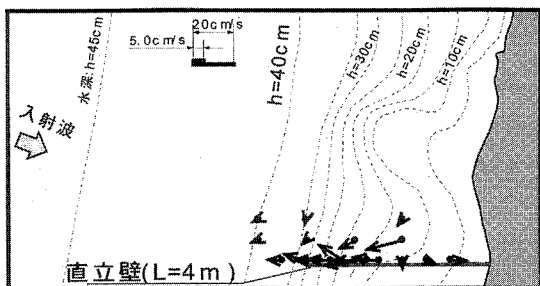


図-11 直立壁前面流速ベクトル分布
(単一方向不規則波: $H_{1/3}=5.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.5\text{s}$, 入射角 22.5°)

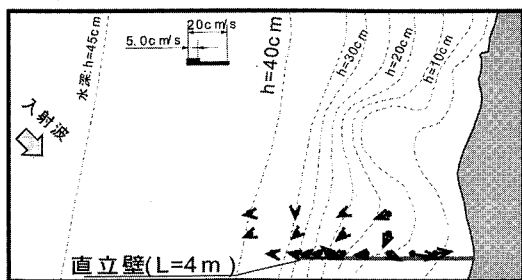


図-12 直立壁前面流速ベクトル分布
(単一方向不規則波: $H_{1/3}=5.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.5\text{s}$, 入射角 45°)

入射角が変化したことに注意を要する。

6. 構造物周辺海域の海浜流特性

ステム波の碎波現象が顕著になると構造物周辺海域の海浜流場にも影響を与える可能性が考えられる。本節では、図-2に示した波浪場を対象とし、単一方向不規則波を用い、周辺海域の海浜流特性を検討する。単一方向不規則波 ($H_{1/3}=10.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.5\text{s}$, 入射角 22.5°), 直立壁前面海域の流速ベクトル分布を図-13に示す。

ここでは、水深 30 cm 付近よりも浅い海域で直立壁

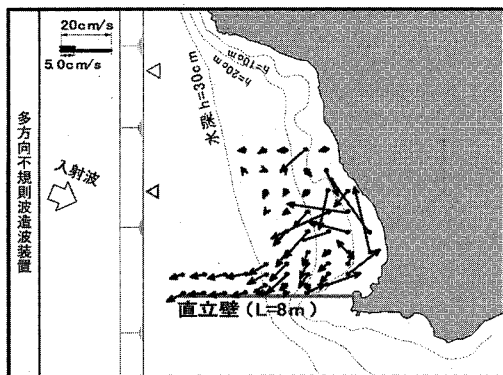


図-13 直立壁前面海域の流速ベクトル分布
(単一方向不規則波: $H_{1/3}=10.0\text{cm}$, $T_{1/3}=1.5\text{s}$, 入射角 22.5°)

沿いにステム波の碎波が発生しており、先端部から 2 m 付近において波高比がピーク値の 1.7 となる。ステム波の碎波にともない、直立壁沿いに岸向きの流れが発生し、湾内への海浜流が発達する。これが、図中、上側からの海浜流と湾内でぶつかることによって、その付近の離岸流発生につながると考えられる。

7. 結 論

直立壁前面に発達するステム波の挙動、特に、急勾配斜面部における波高増加、碎波現象および海浜流場への影響に注目し、水理模型実験によって検討した。

直立壁沿いの伝播距離が長く、単一方向不規則波が小さい入射角で作用する場合、ステム波の影響が大きく現れる。ここでは、反射波が形成されないパターンのステム波が発達するが、それが急勾配斜面部の浅い海域で、単一進行波の浅水変形、碎波変形に近い挙動を示す。直立壁前面の波高増加が顕著になるとともに、単一進行波の碎波に近い激しい碎波が発生し、直立壁沿いに岸向きの海浜流が発達する。この現象は、周辺海域の海浜流場にも影響を与えることが確認できる。

先端部からの伝播距離が短い波浪場、入射角がやや大きいために反射波が共存するパターンのステム波が発達する波浪場、および斜め入射波が多方向性を有する波浪場のいずれにおいても、ステム波の碎波によって、直立壁沿いに岸向きの海浜流が発生する。

今後、構造物沿いのステム波の発達過程、および碎波過程について、内部特性も含めて考察することが必要と考えられる。

最後に、計測にあたっては、(株)日本工業試験所 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

- 合田良実(1970): 碎波指標の整理について, 土木学会論文報告集 第180号, pp. 39-49.
- 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, 海工論文集, 第46巻, pp. 226-230.
- Abernethy, R. and G. Olliver (2002): Effects of modelling long and short crested seas on overtopping of a long, vertical-faced breakwater, Proc. 28th ICCE, ASCE, pp. 2299-2311.
- Memita, T. and T. Sakai (2004): Estimation of Mach-stem breaker height along structures, Proc. 29th ICCE, ASCE, pp. 642-653.
- Memita, T. (2005): Wave overtopping on long vertical structures due to Mach-stem development, Proc. 3rd APAC.
- Perroud, P.H. (1957): The solitary wave reflection along a straight vertical wall at oblique incidence, IER Rept., Univ. of Calif., Berkeley, 99-3, 93p.
- Wiegel, R.L. (1964): Water wave equivalent of Mach-reflection, Proc. 9th ICCE, ASCE, pp. 82-102.