

# 長大護岸における沿い波を考慮した 必要天端高の検討

細野 ひかる<sup>1</sup>・小川 尚希<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 中部地方整備局 名古屋港湾空港技術調査事務所 技術開発課  
(〒457-0833 名古屋市南区東又兵衛町 1-57-3)

常滑沖にて施設整備を進めている名古屋港新土砂処分場について、約 4km と護岸延長が長いことから、波が急角度で入射することによる「沿い波」が発生し、増大した波高による越波の影響が懸念された。ここで発生する越波と、その影響を考慮した適切な天端高を設定するため、名古屋港湾空港技術調査事務所の平面水槽を用いた水理模型実験を実施した。本論文では、当該現象を定量的に評価した結果について記述する。

キーワード 水理模型実験、護岸、急角度入射波、越波流量、沿い波、天端高

## 1. はじめに

名古屋港では、ポートアイランドに築堤を整備して、港内で発生する浚渫土砂を仮置きしていたが、令和4年時点で築堤高さが18mまでになり、これ以上の嵩上げが困難な状況である。名古屋港の今後の更なる港湾整備により将来的に発生する浚渫土砂やポートアイランドに積み上がった土砂を処分するため、図-1 のとおり、中部国際空港（セントレア）沖に新土砂処分場埋立護岸の建設を進めている。

当該護岸は、西側護岸延長が約4kmと長く、急角度入射波が来襲することが想定され、これにより護岸に沿って発達する波（当該事象を以下「沿い波」と記載）が発生し、増大した波高による越波の影響が懸念された。一般的に、護岸の天端高は本稿 2. に示す算定方法により決定することとなっているが、既往の知見では沿い波を定量的に評価することが難しい。そこで、これらの影響を考慮するため、名古屋港湾空港技術調査事務所の平面水槽を用いた水理模型実験により、適切な護岸天端高を設定することとした。本論文では、当該実験の結果から、長大護岸における沿い波によって発生する現象について、定量的に評価した結果を報告する。

## 2. 港湾基準<sup>1)</sup>に基づく越波流量及び天端高の算定方法



図-1 新土砂処分場埋立護岸の配置

### (1) 越波流量算定図に基づく算定方法

天端高の設定においては、護岸により背後地を越波から防護する目的から、護岸背後の埋立地に影響を与えない越波流量（許容越波流量）以下となる天端高としなければならない。この照査に用いる越波流量は、護岸の構造、周辺地形等を考慮して、適切な算定方法又は水理模型実験により算定することとされている<sup>2)</sup>。越波流量の算定に用いられている評価手法として、合田ら<sup>3)</sup>が、不規則波による水理模型実験や越波計算を行い、越波流量算定図(図-2)を提示しており、この越波流量算定図を用いて越波流量を推定することができる。

しかし、この方法は波の護岸に対する直角入射時における越波流量を算出するものであり、護岸等施設に対

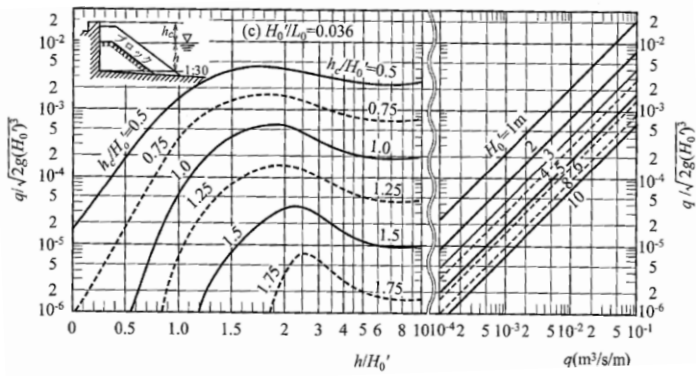


図-2 越波流量算定図<sup>2)</sup>

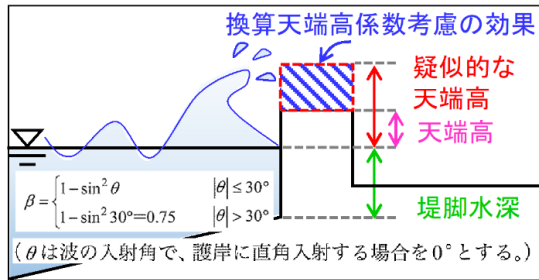


図-3 換算天端高係数の効果イメージ

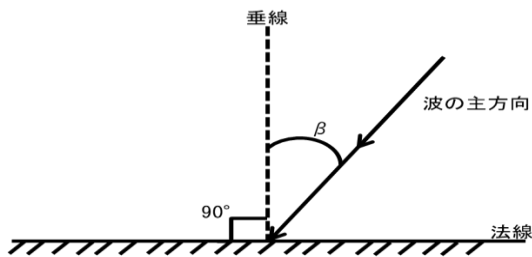


図-4 波の入射角 $\beta$ のとりかた

して波向が変化した場合の越波流量の変化を直接的に算出できない。そのため、施設に対して波向が変化する場合は、入射波向の違いに対する換算天端高係数という指標を用いて、実際の天端高を疑似的な天端高へ換算し、越波流量を補正して算出する。(図-3)

ここで、波の入射角 $\beta$ は、図-4に示すとおり、波の主方向と護岸法線の垂線が成す角度として定義することになっている<sup>1)</sup>。

## (2) 許容越波流量の設定方法

許容越波流量は、護岸の背後状況に応じて設定する必要がある。永井ら<sup>3)</sup>は護岸の背後地の重要度を考慮した規則波による実験結果から表-1のような許容越波流量を提示している。なお、当該護岸では、護岸からの土砂流出を防止する観点から、設計条件として、許容越波流量を $0.02\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ と設定している。

表-1 背後地の重要度からみた許容越波流量 ( $\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ )

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| 背後に人家、公共施設等が密集しており、特に越波・しぶき等の浸入により重大な被害が予想される地区 | 0.01程度    |
| その他の重要な地区                                       | 0.02程度    |
| その他の地区                                          | 0.02~0.06 |

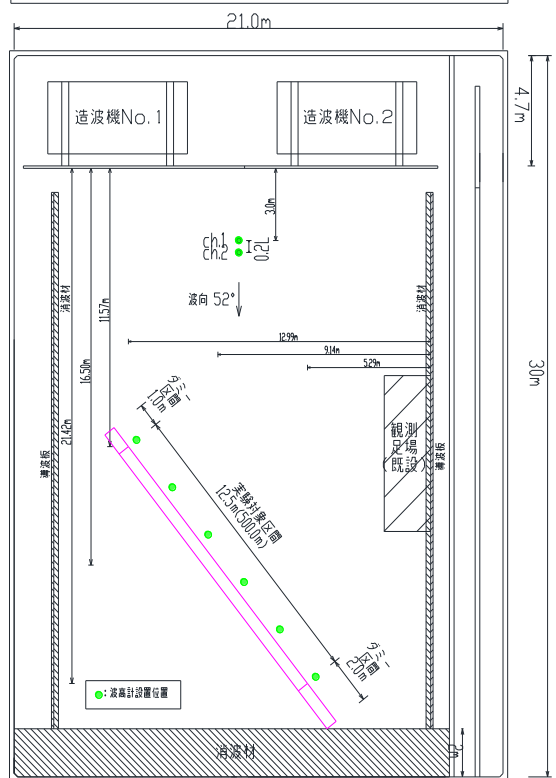
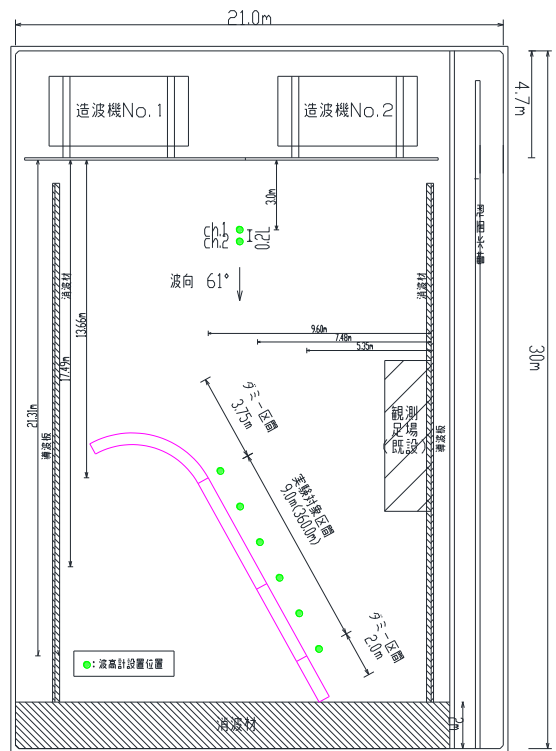


図-5 平面水槽及び模型の配置

## 3. 実験内容

### (1) 実験装置

実験は、名古屋港湾空港技術調査事務所が所有する長さ30m、幅19m、深さ1.2mからなるピストン型単一方向不規則波造波装置(位置制御)が設置された平面水槽において、実験模型を縮尺1/40で配置して実施した。

(図-5)

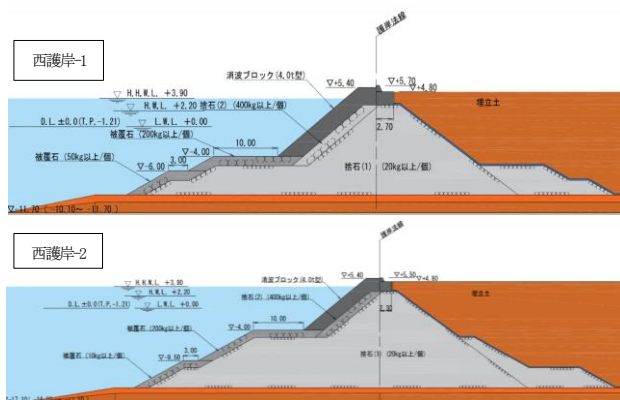


図-6 護岸断面図

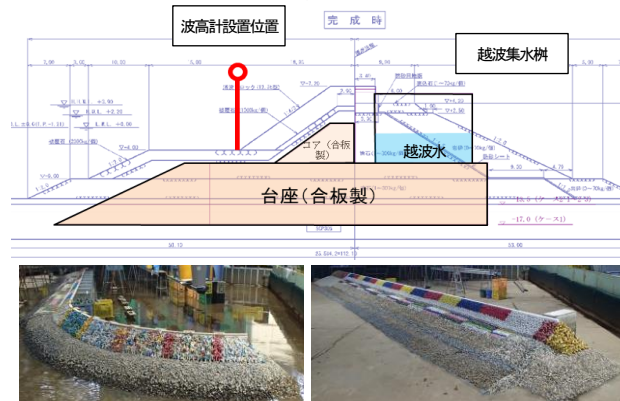


図-7 護岸模型のイメージ及び写真

## (2) 実験条件

実験対象護岸の断面図は図-6 に示すとおりである。当該護岸では、既設空港護岸同様に浅場を設置して藻場造成を行うことから、護岸前面に水深 D.L.-4.00m 幅 10m の”小段”を設けることとなっている。実験区間は、波が 61 度で入射する西護岸-1 (護岸延長：360m) 及び波が 52 度で入射する西護岸-2 (護岸延長：500m) を対象とした。

実験対象護岸の内側は、現地では遮蔽された領域となるが、模型背後へ波が回折して回り込むことにより、実験結果に影響を与えることが懸念された。

また、模型と平面水槽の壁面が近接する領域では、反射波により実験結果に影響を与えることが懸念されたことから、これらを回避するため、両端にダミー区間を設けるとともに、反射波の影響を軽減させるため、平面水槽の壁面に消波材を設置した。

なお、不規則波においては、統計上、660 波造波すれば、最高波高  $H_{max}=1.8 \times H_{1/3}$  の波が発生するといわれている。これを受け、実験では、700 波以上を造波させ、越波流量が過小とならないようにした。

また、波群により結果がばらつくため、波群数は 3 波群 (繰り返し回数 3 回) とし、データ解析にあたっては、3 波群の平均を用いた。

表-2 実験ケース一覧表

【基本ケース】

| ケースNo. | 潮位<br>D.L.+(m)    | 波浪条件(構造物前波) |        |       |        | 天端高<br>(m) | 実験水深<br>(m) | 小段幅<br>(m) | 入射角<br>(°) |    |    |
|--------|-------------------|-------------|--------|-------|--------|------------|-------------|------------|------------|----|----|
|        |                   | 波の種類        | 現地スケール |       | 模型スケール |            |             |            |            |    |    |
|        |                   |             | 波高(m)  | 周期(s) | 波高(cm) | 周期(s)      |             |            |            |    |    |
| 1      | 3.9<br>(H.H.W.L.) | 50年確率波      | 不規則波   | 2.71  | 7.5    | 6.78       | 1.19        | +5.50      | -17.1      | 10 | 52 |
| 2-1    |                   |             |        |       |        |            |             |            | 10         |    |    |
| 2-2    |                   |             |        | 2.97  | 7.5    | 7.43       | 1.19        | +5.70      | -12.8      | 5  | 61 |
| 2-3    |                   |             |        |       |        |            |             |            | 15         |    |    |

【対策ケース】

| ケースNo. | 潮位<br>D.L.+(m)    | 波浪条件(構造物前波) |        |       |        | 天端高<br>(m) | 実験水深<br>(m) | 小段幅<br>(m)     | 入射角<br>(°) |    |    |
|--------|-------------------|-------------|--------|-------|--------|------------|-------------|----------------|------------|----|----|
|        |                   | 波の種類        | 現地スケール |       | 模型スケール |            |             |                |            |    |    |
|        |                   |             | 波高(m)  | 周期(s) | 波高(cm) | 周期(s)      |             |                |            |    |    |
| 1      | 3.9<br>(H.H.W.L.) | 50年確率波      | 不規則波   | 2.71  | 7.5    | 6.78       | 1.19        | +6.50<br>+7.00 | -17.1      | 10 | 52 |
| 2-1    |                   |             |        |       |        |            |             | +6.20          | 10         |    |    |
| 2-2    |                   |             |        | 2.97  | 7.5    | 7.43       | 1.19        | +6.42<br>+6.70 | -12.8      | 5  | 61 |
| 2-3    |                   |             |        |       |        |            |             |                | 15         |    |    |

## (3) 実験ケース

実験は、表-2 に示すとおり、基本ケース及び対策ケースに分けて実施した。各ケースの詳細は以下のとおりである。

### a) 基本ケース

基本ケースは、港湾基準に基づく算定方法により、越波流量を算定し、許容越波流量以下となる天端高で実施した。なお、基本ケースは、天端高 2 種類 (+5.5m, +5.7m)，小段幅 3 種類 (5m, 10m, 15m) を組み合わせた条件で実施した。

### b) 対策ケース

基本ケースによる実験結果から、許容越波流量を超える傾向であったことから、対策ケースとして、基本ケースから天端高を嵩上げて実施した。なお、対策ケースは、天端高 5 種類 (+6.2m, +6.42m, +6.5m, +6.7m, +7.0m)，小段幅 3 種類 (5m, 10m, 15m) を組み合わせた条件で実施した。

## (4) 実験方法

実験は、以下の手順で実施した。

- ① 波は急角度で入射するため、回折波、沿い波、消波ブロックの影響で、越波流量は護岸の延長方向に沿って変動することが予測された。そのため、図-8 のとおり越波水量を測定するための越波集水樹を間口 30cm に小分けして護岸背後に配置し、護岸の延長方向における越波流量の変動を詳細に把握できるようにした。
- ② 越波流量の分布は前面波高に支配されることから、護岸前面に波高計を 6 台設置して重複波高を測定し、越波分布特性の考察に活用した。また、造波板前面において、入射波高を求めるための波高計を 2 台設置した。(図-5)
- ③ 造波終了後、越波集水樹に集水した越波水の量を計測し、越波水量を把握した。

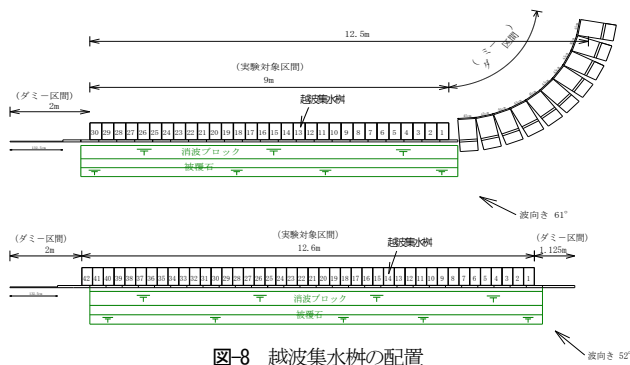


図-8 越波集水桝の配置

- ④ 計測した越波水量は、越波集水桝毎に越波流量  $\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$  に換算し、許容越波流量  $0.02\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$  を指標として評価した。

## 4. 実験結果

### (1) 実験結果一覧

実験結果一覧を表-3に示す。

基本ケースでは、いずれの場合も許容越波流量  $0.02\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$  を超える結果となった。一方、対策ケースでは、いずれの場合も許容越波流量程度に収まる結果となった。

### (2) 越波流量の平面分布特性

#### a) 入射角 52 度の特性

入射角 52 度における越波流量の平面分布特性について考察した。図-9 において、波高比分布に着目すると、 $X/L=2.0$  付近及び  $X/L=5.5$  付近の2箇所で見られる。なお、 $X/L$  は、模型左側を起点とした各越波集水桝までの距離  $X$  と波長  $L$  の比で表す相対距離である。

また、越波流量に着目すると、いずれの天端高の場合も波高比分布に近似した分布を示しており、越波流量は前面波高に支配されていることがわかる。

一方、各々の天端高について、越波流量の平面分布特性に着目すると、天端高+5.5m ( $hc=1.6\text{m}$ ) では、越波流量は  $q=0.018 \sim 0.065\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$  となっており、ほとんどのエリアで許容越波流量  $0.02\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$  を上回る結果となった。

なお、天端高を嵩上げし、対策ケースとして実験を行った結果については、天端高+7.0m ( $hc=3.1\text{m}$ ) とした場合、いずれのエリアで許容越波流量  $0.02\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$  を下回る結果となった。また、天端高+6.5m ( $hc=2.6\text{m}$ ) とした場合は、一部のエリアで  $0.02\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$  をわずかに超えるものの、概ね許容値を満足する結果となった。

#### b) 入射角 61 度の特性

入射角 61 度における越波流量の平面特性について考察した。図-10 において、波高比分布に着目すると、 $X/L=2.5$  付近及び  $X/L=5.6$  付近の2箇所で見られ

表-3 実験結果一覧

| 項目   | ケース1<br>(小段幅10m)<br>入射角52° |       |       |       | ケース2-2<br>(小段幅5m)<br>入射角61° |       |       |       | ケース2-1<br>(小段幅10m)<br>入射角61° |       |       |       | ケース2-3<br>(小段幅15m)<br>入射角61° |       |       |       | 備考    |           |
|------|----------------------------|-------|-------|-------|-----------------------------|-------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|-------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|      | 天端高<br>(m)                 | 形状    | 波群1   | 波群2   | 波群3                         | 平均    | 波群1   | 波群2   | 波群3                          | 平均    | 波群1   | 波群2   | 波群3                          | 平均    | 波群1   | 波群2   |       | 波群3       |
| 5.50 | 半無限                        | 0.054 | 0.067 | 0.072 | 0.064                       |       |       |       |                              |       |       |       |                              |       |       |       |       | 基本<br>ケース |
| 5.70 | 半無限                        |       |       |       |                             | 0.056 | 0.045 | 0.059 | 0.053                        | 0.039 | 0.040 | 0.054 | 0.044                        | 0.045 | 0.035 | 0.055 | 0.045 |           |
| 6.20 | 半無限                        |       |       |       |                             |       |       |       |                              | 0.019 | 0.020 | 0.024 | 0.021                        | 0.013 | 0.016 | 0.017 | 0.016 | 対策<br>ケース |
| 6.42 | 半無限                        |       |       |       |                             |       | 0.016 | 0.013 | 0.018                        | 0.016 |       |       |                              |       |       |       |       |           |
| 6.50 | 半無限                        | 0.026 | 0.019 | 0.018 | 0.021                       |       |       |       |                              |       |       |       |                              |       |       |       |       | 対策<br>ケース |
| 7.00 | 半無限                        | 0.017 | 0.014 | 0.011 | 0.009                       |       |       |       |                              |       |       |       |                              |       |       |       |       |           |

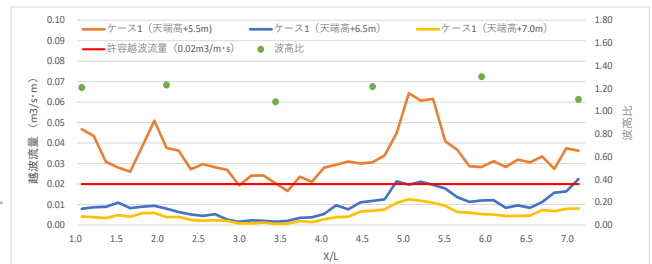


図-9 越波流量の平面分布特性 (入射角 52 度)

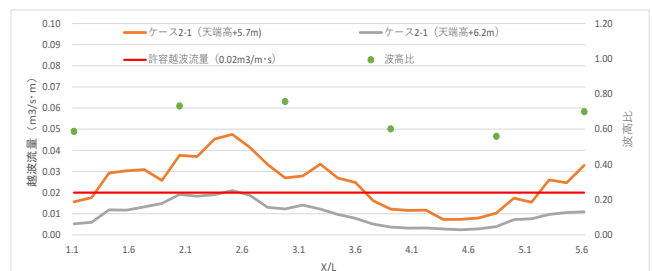


図-10 越波流量の平面分布特性 (入射角 61 度)

る。

また、越波流量に着目すると、いずれの天端高の場合も波高比分布に近似した分布を示しており、こちらについても越波流量は前面波高に支配されるということがわかる。

一方、各々の天端高について、越波流量の平面分布特性に着目すると、天端高+5.7m ( $hc=1.8\text{m}$ ) の実験では、越波流量は  $q=0.01 \sim 0.05\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$  の範囲にあり、 $X/L=4 \sim 5$  付近を除き、許容越波流量  $0.02\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$  を上回る結果となった。

なお、天端高を嵩上げし、対策ケースとして天端高+6.2~6.42m ( $hc=2.3 \sim 2.52\text{m}$ ) とした実験を行った結果、いずれのエリアも概ね、許容越波流量  $0.02\text{m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$  を下回る結果となった。(図-10 は小段幅 10m の場合のみ掲載)

### (3) 入射角及び護岸延長の違いによる越波流量特性

入射角及び護岸延長の違いによる越波流量特性について考察した。図-11 は、小段幅 10m の条件での入射角及び護岸延長の違いによる越波流量の平面分布を示したものである。

越波流量の平面分布の傾向に着目すると、ピークの位置は実験ケース毎に異なっていることがわかる。既往の論文<sup>4)</sup>によれば、護岸延長や入射角によって波高分布が異なることが示されており、本実験での違いも同様の要因によるものと考えられる。

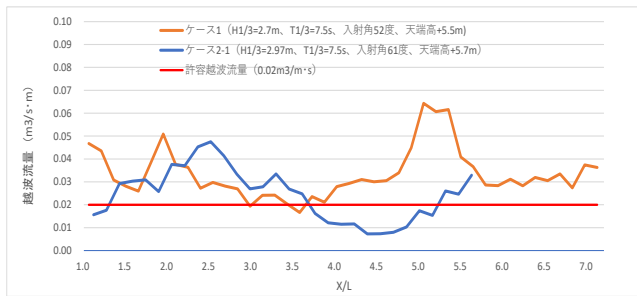


図-11 入射角・護岸延長の違いによる越波流量特性（小段幅 10m）

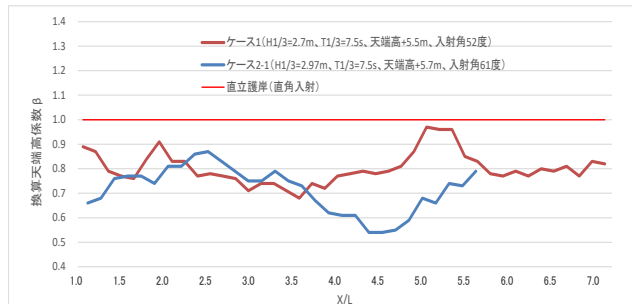


図-12 入射角・護岸延長の違いによる換算天端高係数の特性（小段幅 10m）

また、越波流量のピーク値をみると、入射角 52 度の場合は約  $0.065 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$ 、入射角 61 度の場合は約  $0.05 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$  と、前者がより高い結果となった。

#### a) 換算天端高係数による越波流量特性の考察

ここで、両者は波高及び天端高が異なり、越波流量からは入射角及び護岸延長の違いによる越波流量特性の比較ができないため、直立護岸に対する換算天端高係数  $\beta$  を算定して評価した。なお、換算天端高係数とは、得られた越波流量から直立護岸とした場合の天端高を求め、実験天端高との比として求めたもので、値が大きいほど越波流量が多くなりやすいと評価されるものである。

図-12 に示す換算天端高係数を確認すると、入射角 52 度では  $\beta=0.7 \sim 1.0$  弱、入射角 61 度では  $\beta=0.5 \sim 0.9$  弱の範囲であり、入射角 52 度の方が高くなっている。

#### b) 既往の論文を踏まえた越波流量特性の考察

既往の論文<sup>5)</sup>において、入射角  $0 \sim 45$  度の範囲での越波流量特性が示されている。（図-13）これによれば、越波流量は入射角 20 度強で最小となるが、入射角 45 度にかけて増加することが示されており、沿い波の影響が指摘されている。

本実験の結果では、ピーク越波流量は入射角 52 度 > 入射角 61 度の関係となった。そのため、既往の論文も踏まえると、越波流量は入射角 20 度強で最小であるが、入射角 52 度付近でピークとなり、入射角 61 度にかけて再び低下すると推察される。なお、入射角 52 度の越波流量が入射角 61 度の越波流量を上回る要因としては、「斜め入射による沿い波の発達」と「入射角 61 度に比べ、入射波の護岸法線直角成分が強まる」といった 2 つの要素が噛み合ったためであると推察される。

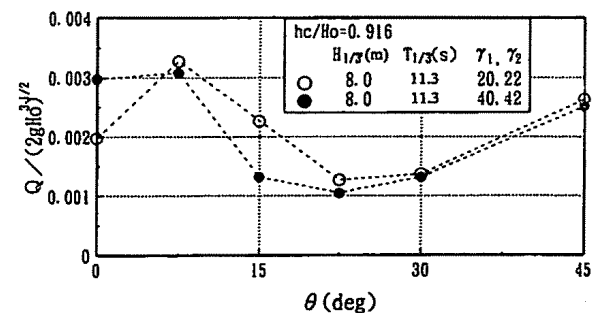


図-13 入射角と越波流量の関係<sup>5)</sup>

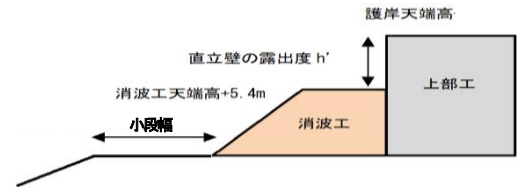


図-14 直立壁の露出度  $h'$

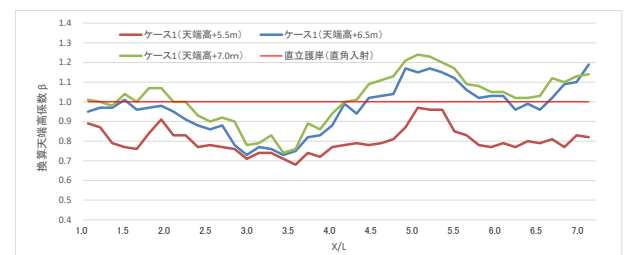


図-15 天端高の違いによる換算天端高係数の特性（入射角 52 度）

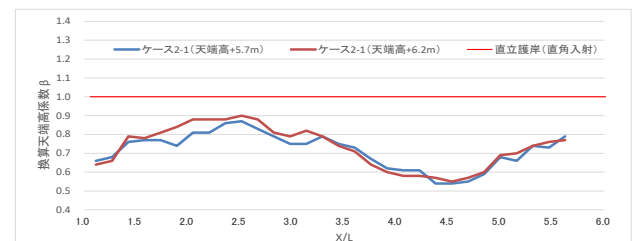


図-16 天端高の違いによる換算天端高係数の特性（入射角 61 度）

#### (4) 護岸形状（護岸天端高と消波工天端高の差）による越波流量への影響

対策ケースの実験にあたり、天端高の嵩上げは護岸の上部工に限定したことから、天端高を嵩上げすることで消波工天端高（+5.4m）との差が広がり、図-14 に示す直立部の露出度  $h'$  が大きくなる結果となった。そのため、護岸天端高と消波工天端高の差が広がることによる越波流量への影響について考察した。

図-15 及び図-16 は、入射角 52 度及び入射角 61 度の場合について、天端高と越波流量の関係を換算天端高係数  $\beta$  として示したものである。これをみると、いずれも天端高が高い（護岸天端高と消波工天端高の差が広がる）ほど  $\beta$  が大きくなる傾向であり、越波流量の制御効果が低下することを示している。

この要因として、直立部の露出度  $h'$  が大きくなることで、護岸前面での反射や擾乱が発生しやすくなり、越波の制御効果が低下するためであると考えられる。

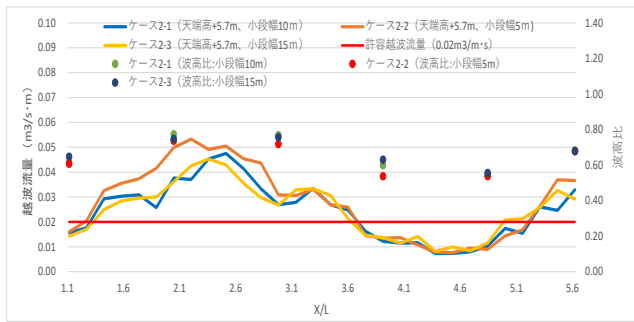


図-17 小段幅の違いによる越波流量の平面分布特性

表-4 許容断面条件

| ケースNo. | 潮位<br>D.L.+ (m)<br>(H.H.W.L.) | 波高(m)     | 周期(s)     | 入射角<br>(°) | 小段幅<br>(m) | 天端高<br>(m) |      | 越波流量<br>(m³/m・s) |
|--------|-------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|------------|------|------------------|
|        |                               | $H_{1/3}$ | $T_{1/3}$ |            |            | D.L.上      | hc   |                  |
| 1      | 3.9<br>(H.H.W.L.)             | 2.71      | 7.5       | 52         | 10         | +6.50      | 2.60 | 0.021            |
| 2-1    | 3.9<br>(H.H.W.L.)             | 2.97      | 7.5       | 61         | 10         | +6.20      | 2.30 | 0.021            |
| 2-2    |                               |           |           |            | 5          | +6.42      | 2.52 | 0.016            |
| 2-3    |                               |           |           |            | 15         | +6.20      | 2.30 | 0.016            |

#### (5) 小段幅の違いによる越波流量への影響

小段幅の違いによる越波流量特性について考察する。図-17は、入射角 61 度の条件で、小段幅の違い (5～15m) による越波流量の平面分布を示したものである。

波高比分布をみると、位置によってわずかな差があるものの、ピーク付近 ( $X/L=2.1$  付近) の波高比はほぼ同程度となっている。

また、越波流量をみると、分布形状は小段幅による明瞭な違いはみられないが、ピーク越波流量は違いがみられ、小段幅 5m で最も多く、小段幅 10m と 15m はそれほど大きな差はないものの、前者がやや上回る結果となっている。

ここで、小段の相対水深は  $h/H_o' = 2.5 \sim 2.7$  の範囲であり、マウンド上での砕波は  $H_{max}$  を除き、ほとんど発生しない領域となる。そのため、小段幅が狭いほど越波流量が増加する主な要因は、水深の深いエリアが護岸に近づくことで、相対的に、波速が速いまま波が護岸前面に到達するためであると推察される。

#### (6) 許容越波流量を概ね満足する条件

これまでの実験結果を踏まえ、許容越波流量  $0.02 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{s}$  を概ね満足する天端高を表-4 に示した。入射角 52 度の条件では天端高を +6.5m ( $hc=2.6\text{m}$ ) に設定し、入射角 61 度の条件では天端高を +6.2～6.42m ( $hc=2.3 \sim 2.5\text{m}$ ) に設定することで、概ね全エリアにおいて、許容越波流量以内に抑えることができた。

なお、実験において、護岸天端高と消波工天端高の差が大きくなる場合、越波流量が増加する傾向であることが判明している。そのため、現地での施工においては、護岸天端高と消波工天端高を揃えることで、越波流量はさらに下回ることが予測されるとともに、設定した天端高は十分な高さが確保されているものと推察される。

## 5. 主要な結論

本実験により得られた主要な結論については、以下の通りである。

- ① 護岸前面の波高は入射角により、固有の分布を有し、入射角 52 度、入射角 61 度ともに、沿い波の発達や回折の影響で、二山のピーク (波高増大エリア) が現れ、越波流量も当該エリアで高まる。
- ② 越波流量は入射角 52 度で多くなる。この要因は、「斜め入射による沿い波の発達」と「61 度に比べ、入射波の護岸法線直角成分が強まる」といった 2 つの要素が噛み合ったためであると推察される。
- ③ 越波流量は、護岸形状 (護岸天端高と消波工天端高の差=直立壁露出度  $h'$ ) の影響を受け、 $h'$  が大きくなるほど、越波制御効果は低下しやすい。この要因は、直立壁露出度が増えることで護岸前面での反射による擾乱が高まるためであると推察される。
- ④ 越波流量は、小段幅が狭いほど増加しやすい。ここで、小段の水深は砕波がほとんど起きない領域であることから、小段幅が狭いほど越波流量が増加する主な要因は、水深の深いエリアが護岸に近づくことで、相対的に、波速が速いまま波が護岸前面に到達するためであると推察される。
- ⑤ ①～④までの結果、実験対象エリアすべてにおいて、許容越波流量を満足する天端高は、入射角 52 度で +6.5m、入射角 61 度で +6.2～6.42m となった。前者は机上の計算による想定断面より 1.0m、後者は 0.5～0.7m 程度の嵩上げが必要という結果となった。

謝辞：本論文の執筆に当たり、ご指導・ご協力頂いた方々に深く感謝し、御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 港湾の施設の技術上の基準・同解説、日本港湾協会(2018)。
- 2) 合田良実、岸良安治、神山豊：不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究、港湾技術研究所報告、第 14 巻、第 4 号、pp3～44、1975。
- 3) 永井 莊七郎、高田 彰：海岸堤防の越波におよぼす消波堤の効果、第 11 回海岸工学講演会講演集、pp279～286、1964。
- 4) 合田良実、吉村知司、伊藤正彦：島堤による波の反射および回折に関する研究、港湾技術研究所報告、第 10 巻、第 2 号、pp3～52、1971。
- 5) 平石哲也、望月徳雄、佐藤一央、丸山晴広、金澤剛、榎本達也：護岸越波量における波の多方向性の影響、港湾技術研究所報告、第 35 巻、第 1 号、pp39～64、1996。