

資料-5-①

**第2回 富山湾における『うねり性波浪』
対策検討技術委員会 資料**

**「うねり性波浪」による
被災要因とメカニズムについて**

平成 20 年 3 月 27 日
国土交通省 北陸地方整備局
新潟港湾空港技術調査事務所

第2回 富山湾における「うねり性波浪」対策検討技術委員会 資料

「うねり性波浪」による被災要因とメカニズムについて

～ 目 次 ～

| | |
|--------------------------|----|
| 1. 北防波堤の被災メカニズムの検討..... | 1 |
| 1.1 まとめ..... | 1 |
| 1.2 現設計の考え方..... | 2 |
| 1.3 被災波の検討および設計波の検証..... | 6 |
| 1.4 消波ブロックの安定性の検討..... | 12 |
| 1.5 堤体の安定性の検討..... | 13 |
| 1.6 北防波堤の被災メカニズム..... | 15 |

1. 北防波堤の被災メカニズムの検討

1.1 まとめ

平成 19 年 2 月 23~24 日に来襲した波浪（以下、被災波）に対して、

- ①被災メカニズムのイメージは、図 1.1-1 に示すとおりと想定できる。
- ②B,D 区間では、消波ブロック重量のランクアップが必要である。
- ③B,C,D 区間すべて滑動安全率を確保するための対策（例：捨石ストッパー）が必要である。

北防波堤の被災メカニズムのイメージ図

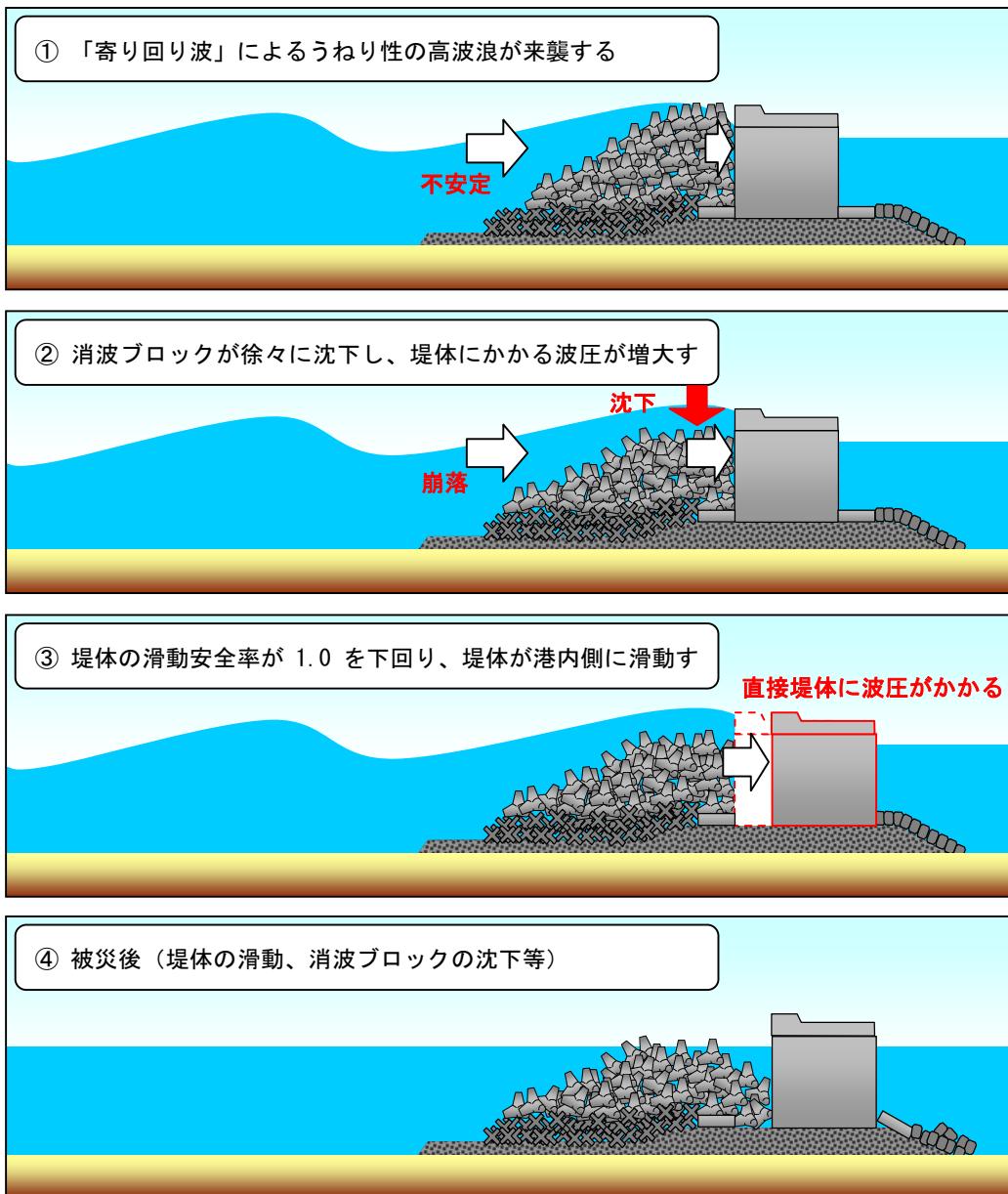


図 1.1-1 北防波堤の被災メカニズム（イメージ図）

1.2 現設計の考え方

北防波堤の被災要因を検討するにあたり、現設計の考え方について整理した。

(1) 北防波堤の設計区間

被災のあった B～D・D' 区間と被災のなかったその両隣の A,E 区間の設計条件一覧を表 1.2-1 に示す。また、区間割り平面図を図 1.2-1 に、B～D 区間の構造断面を図 1.2-2 に示す。

表 1.2-1 設計条件一覧

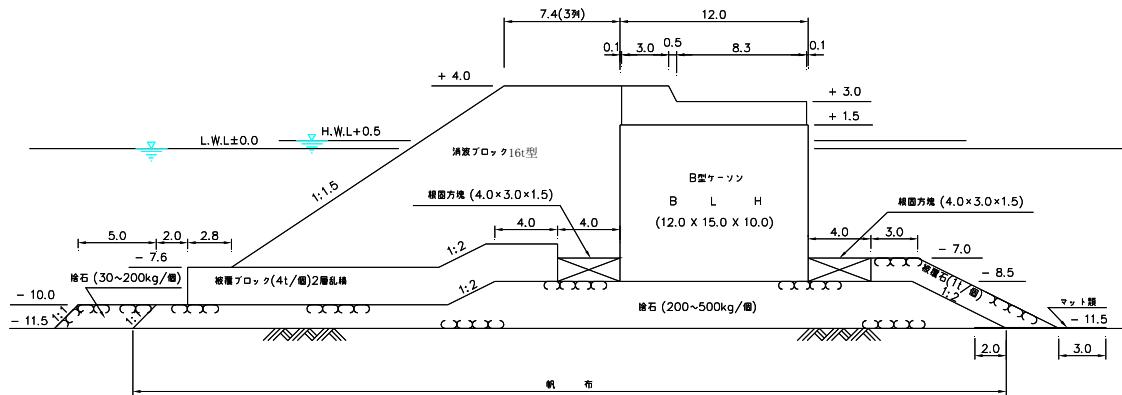
| 区間 | E | D | C | B | A-2 | A-1 |
|----------------------|-------------|------------------|------------------|-------------------|-------------|-------------|
| 区間延長(m) | 240 | 495 | 210 | 150 | 90 | 100 |
| 設計波高 $H_{1/3}$ (m) | 6.4 | 5.8 | 5.3 | 5.3 | 6.0 | 6.0 |
| 設計周期 $T_{1/3}$ (sec) | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 | 12.0 |
| 入射角 β (°) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 設計水深(m) | -10.5 | -10.5 | -10.5 | -11.5 | -12.0 | -13.0 |
| マウンド水深(m) | -8.0 | -8.0 | -8.0 | -8.5 | -9.0 | -10.0 |
| 設計天端高(m) | +4.5 | +4.0 | +4.0 | +4.0 | +4.5 | +4.5 |
| 上部工構造 | 後部 パラペット | 前面 パラペット | 前面 パラペット | 前面 パラペット | 前面 パラペット | 前面 パラペット |
| 消波工構造(t/個) | 32 | 25 | 20 | 20 | 25 | 25 |
| 設計年月 | H9.3 | H2.3 | S63.11 | | H4.10 | |
| 被災状況 | なし | あり (最大4.0m滑動) | あり (最大1.2m滑動) | あり (最大12.0m滑動) | なし | なし |



図 1.2-1 北防波堤の設計区間の区割り (平面図)

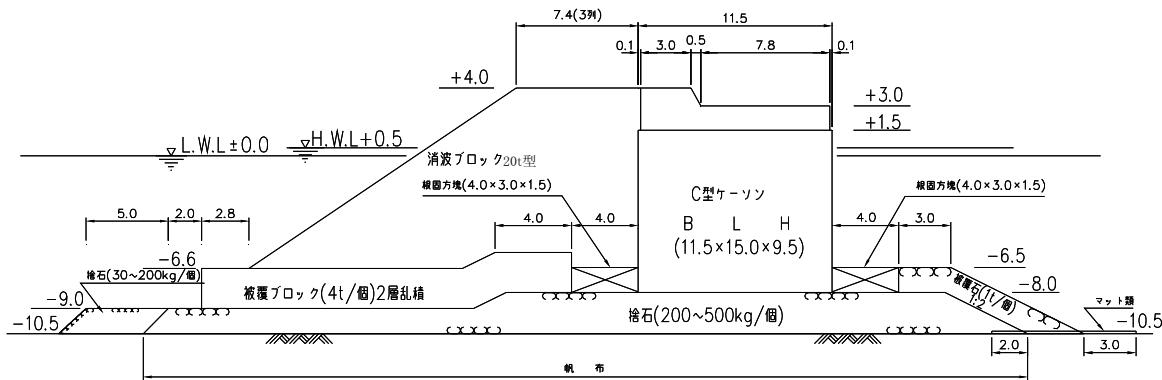
B区間

施工年度:H2, 6



C区間

施工年度:H2, 3



D·D' 区間

施工年度:H4, 5, 8, 9

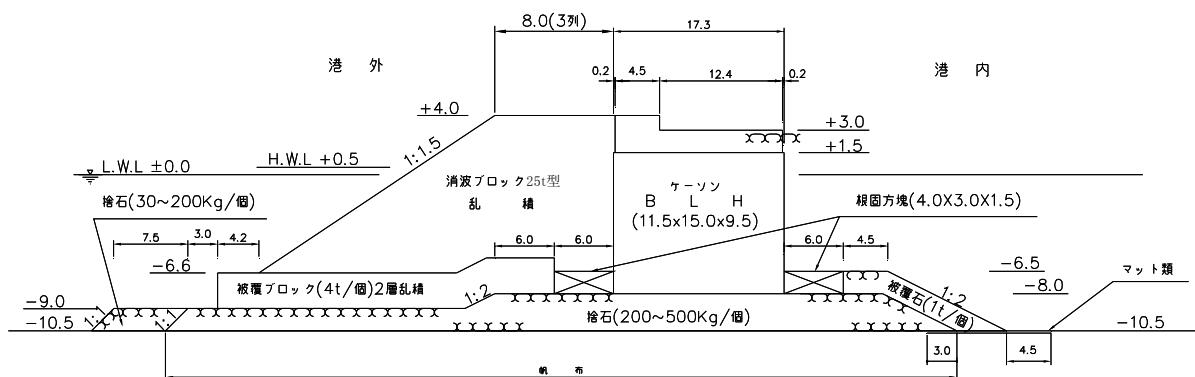


図 1.2-2 構造断面図 (B～D区間)

(2) B・C区間の波浪条件

B・C区間の波浪条件は「あいがめ」の影響を考慮し、図 1.2-3 のフローに基づいて設計波を決定した。なお、推算波は沖波を湾内発生波に換算し、それを湾内発生波にプラスして算出した。

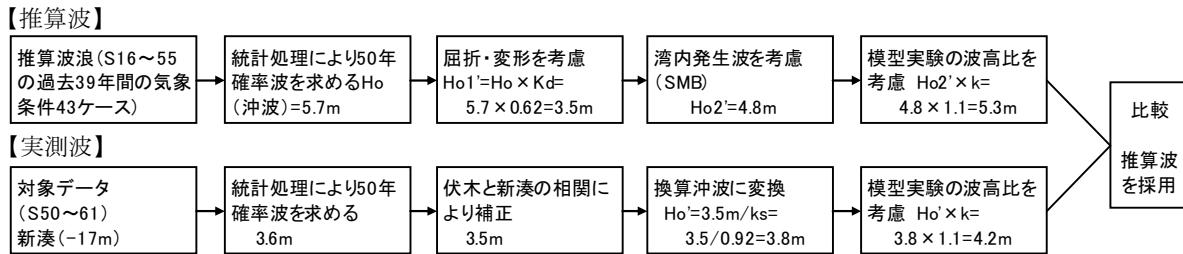


図 1.2-3 B・C区間の設計波の算定フロー

(3) D区間の波浪条件

D区間の波浪条件は「あいがめ」の影響を考慮し、B・C区間と同様に図 1.2-4 のフローに基づき設計波を決定した。なお、推算波は、推算による沖波と湾内発生波をエネルギー合成して算出した。

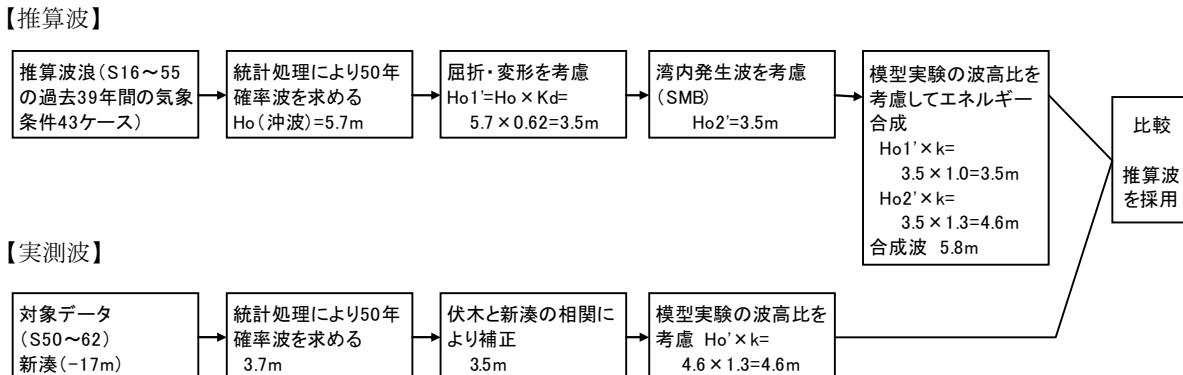


図 1.2-4 D区間の設計波の算定フロー

(4) 寄り回り波の現設計への考慮

次の4点により寄り回り波を現設計に考慮している。

- ① 寄り回り波が発生した時の気象条件も含めて、波浪推算を実施した。
- ② ①をもとにした波浪諸元により水理模型実験を実施した。設計に用いた波高比 (k) は、長周期波 (12,14sec) の実験ケースの結果を含めて算出した。
- ③ 設計に用いる周期を長周期波も考慮して 12sec とした。
- ④ 統計処理した実測波には、寄り回り波も含まれている。

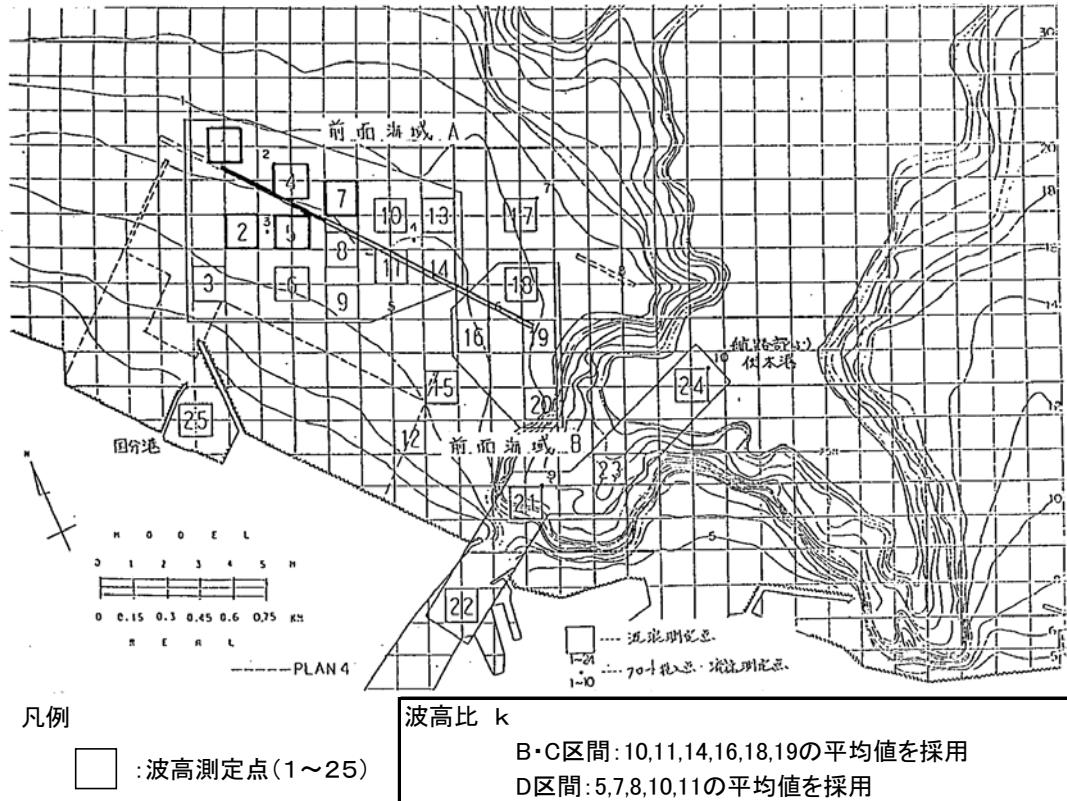


図 1.1-5 昭和 60 年度 伏木地区港内静穏度水理模型実験 メッシュ図

(5) B～D 区間の設計条件のまとめ

B～D 区間の現設計の設計条件は、表 1.2-2 のとおりである。

表 1.2-2 北防波堤の設計条件のまとめ (B～D 区間)

| 設計区間 | B区間 | C区間 | D区間 | 備考 |
|-----------------------|--------|-------|------------|---------------|
| 設計年月 | S63.11 | | H2.3 | |
| (沖波) 波高 $Ho(m)$ | 4.8 | | 3.5 | |
| 波高比 k | 1.1 | | 1.0 & 1.3 | |
| 水理実験区域 | ⑩⑪⑭⑯⑮⑯ | ⑦⑩⑤⑧⑪ | 図 1.1-5 参照 | |
| 設計波高 $H_{1/3}(m)$ | 5.3 | | 5.8 | $Ho \times k$ |
| 最大波高 $H_{max}(m)$ | 9.1 | 8.6 | 8.7 | 波圧算定用 |
| 設計周期 $T_{1/3}(s)$ | 12.0 | | 12.0 | |
| 波圧算定方法 | 合田式 | | | |
| 設計潮位 (m) | +0.5 | | +0.5 | |
| 滑動安全率 | 1.21 | | 1.20 | |
| 入射角 $\beta(^{\circ})$ | 0 | | 0 | |
| 区間延長 (m) | 150 | 210 | 495 | |
| 設計水深 (m) | -11.5 | -10.5 | -10.5 | |
| マウンド水深 (m) | -8.5 | -8.0 | -8.0 | |
| 設計天端高 (m) | +4.0 | +4.0 | +4.0 | |
| 消波天端高 (m) | +4.0 | +4.0 | +4.0 | |
| 堤体幅 (m) | 12.0 | 11.5 | 17.3 | |

1.3 被災波の検討および設計波の検証

被災時の状況を把握するために、ブシネスクモデルにより北防波堤前面における被災波の安定計算に用いる波高（進行波）を算定した。また、同一の条件で設計波についても算定を行った。

(1) 被災波の波浪変形計算

伏木富山港（伏木地区）港外波浪観測地点（マフコタワー）における被災時の最大波高（波高 4.22m、周期 14.2 秒）を入射波条件として、ブシネスクモデルによる波浪変形計算を実施した。その結果を図 1.3-2 及び図 1.3-3 に示す。

(2) 設計波の波浪変形計算

被災波と同様の計算をした場合の北防波堤前面の設計波高を確認するために、最も被害が大きかった B 区間の設計沖波（波高 4.8m、周期 12 秒、SMB 法）を入射波条件として、ブシネスクモデルによる波浪変形計算を実施した。その結果を図 1.3-4 及び図 1.3-5 に示す。

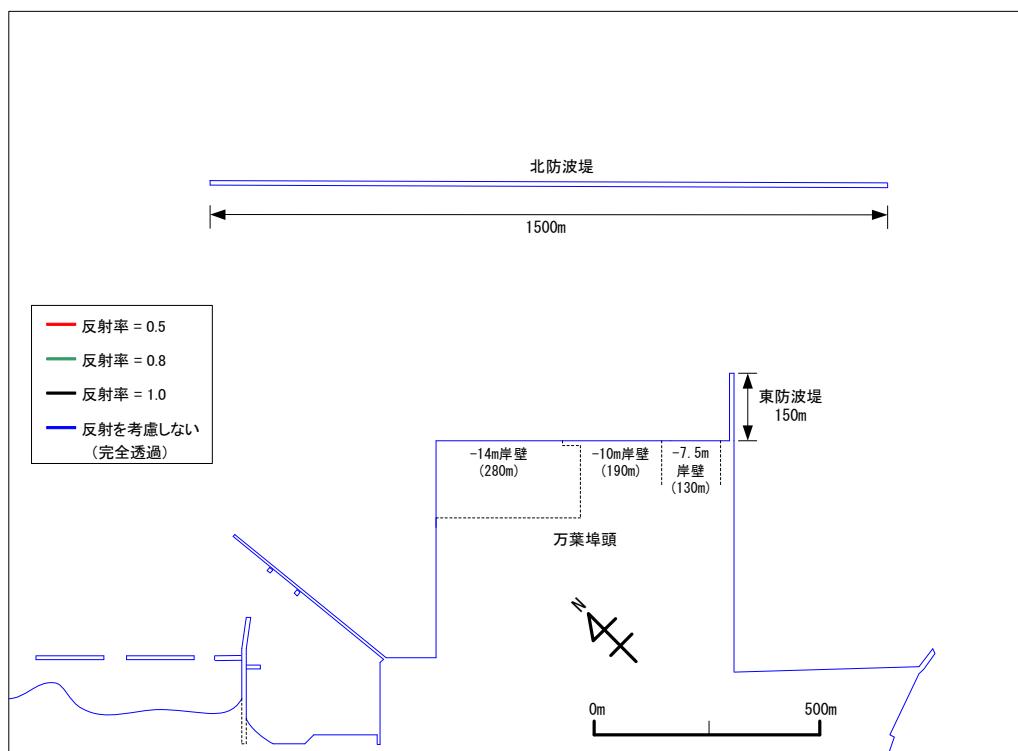


図 1.3-1 港湾構造物条件設定図（北防波堤前面の進行波の算定）

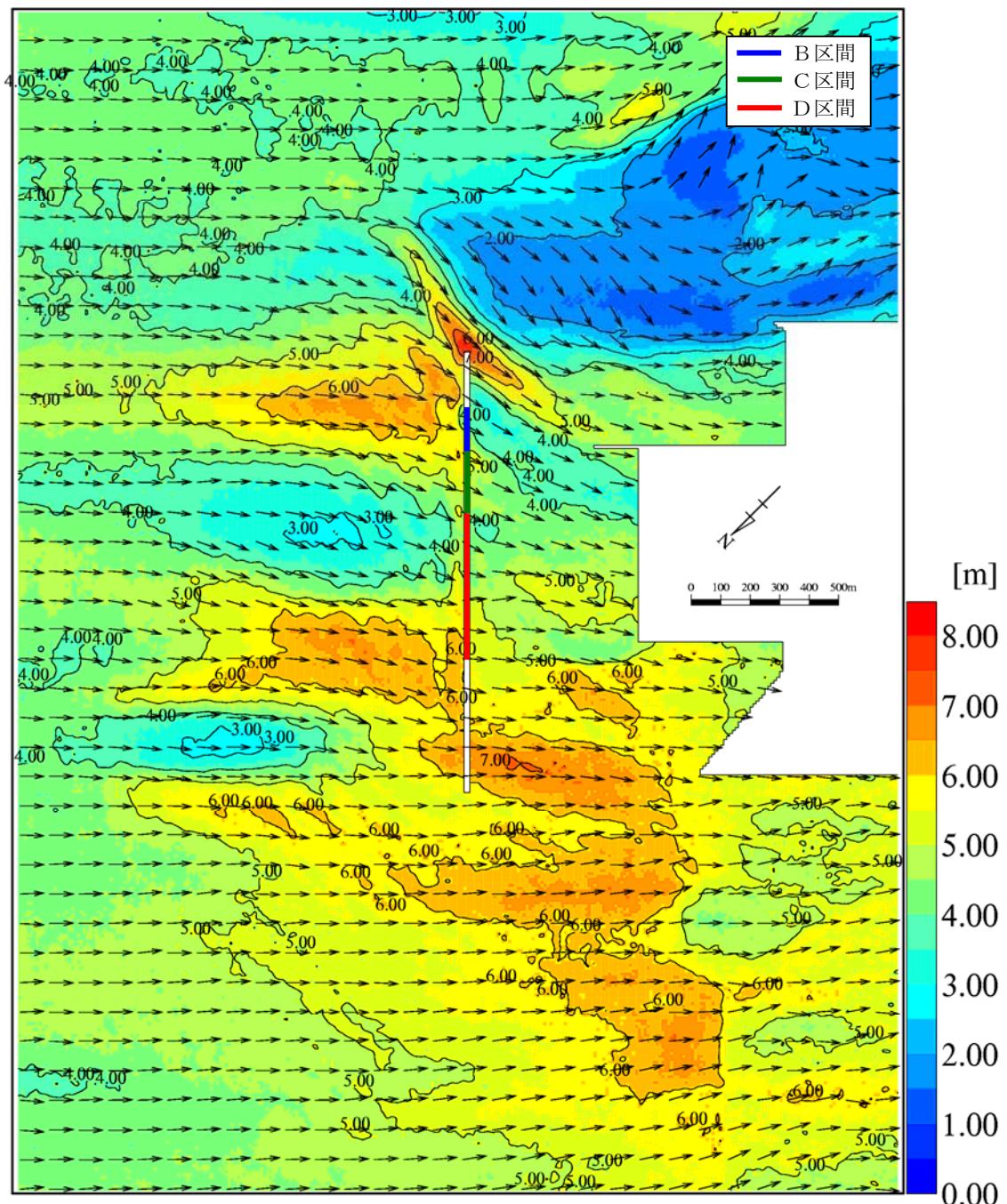


図 1.3-2 被災波の進行波の波浪計算結果（波向 NE）
(構造物は全て完全透過)

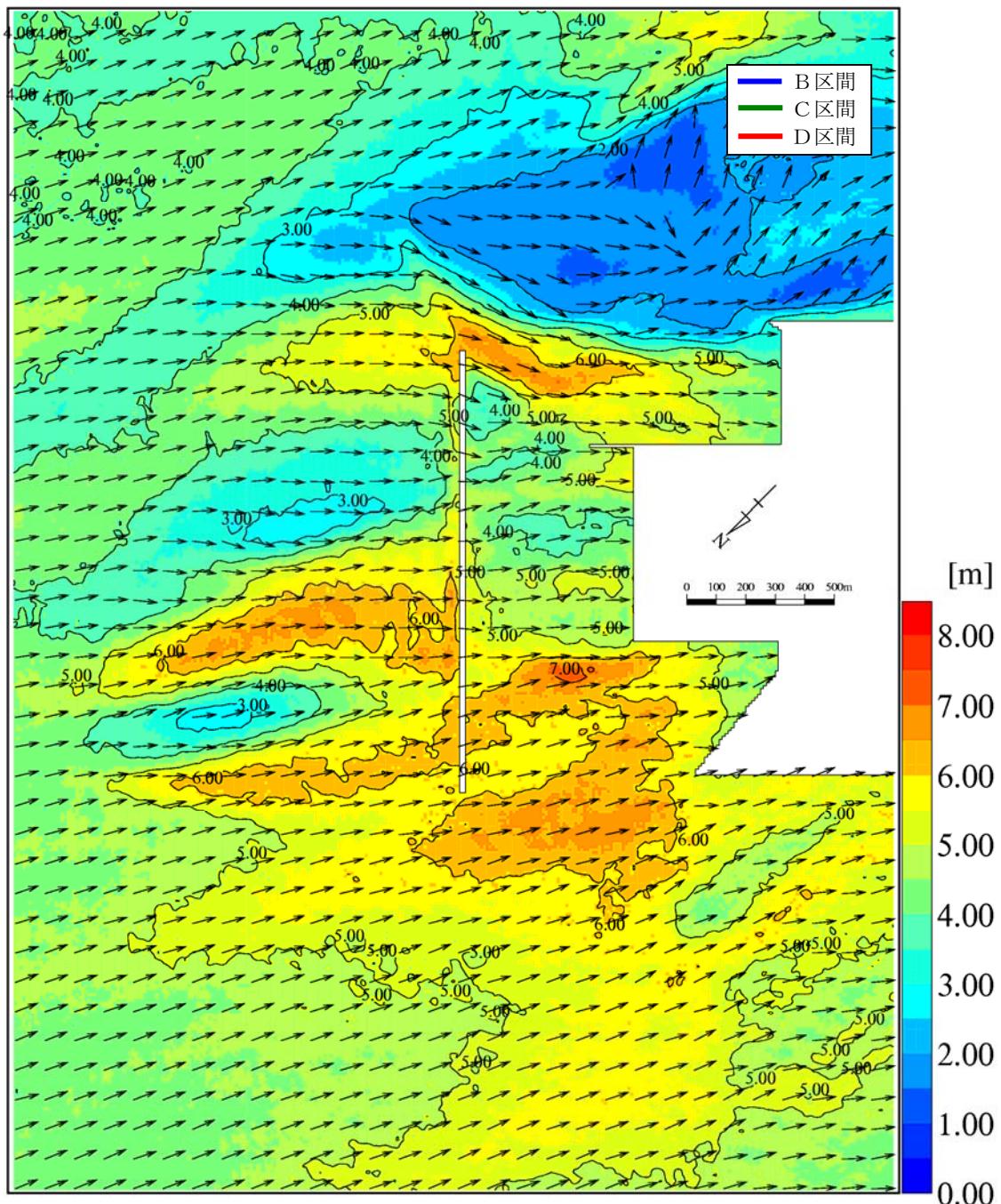


図 1.3-3 被災波の進行波の波浪計算結果（波向 NNE）

(構造物は全て完全透過)

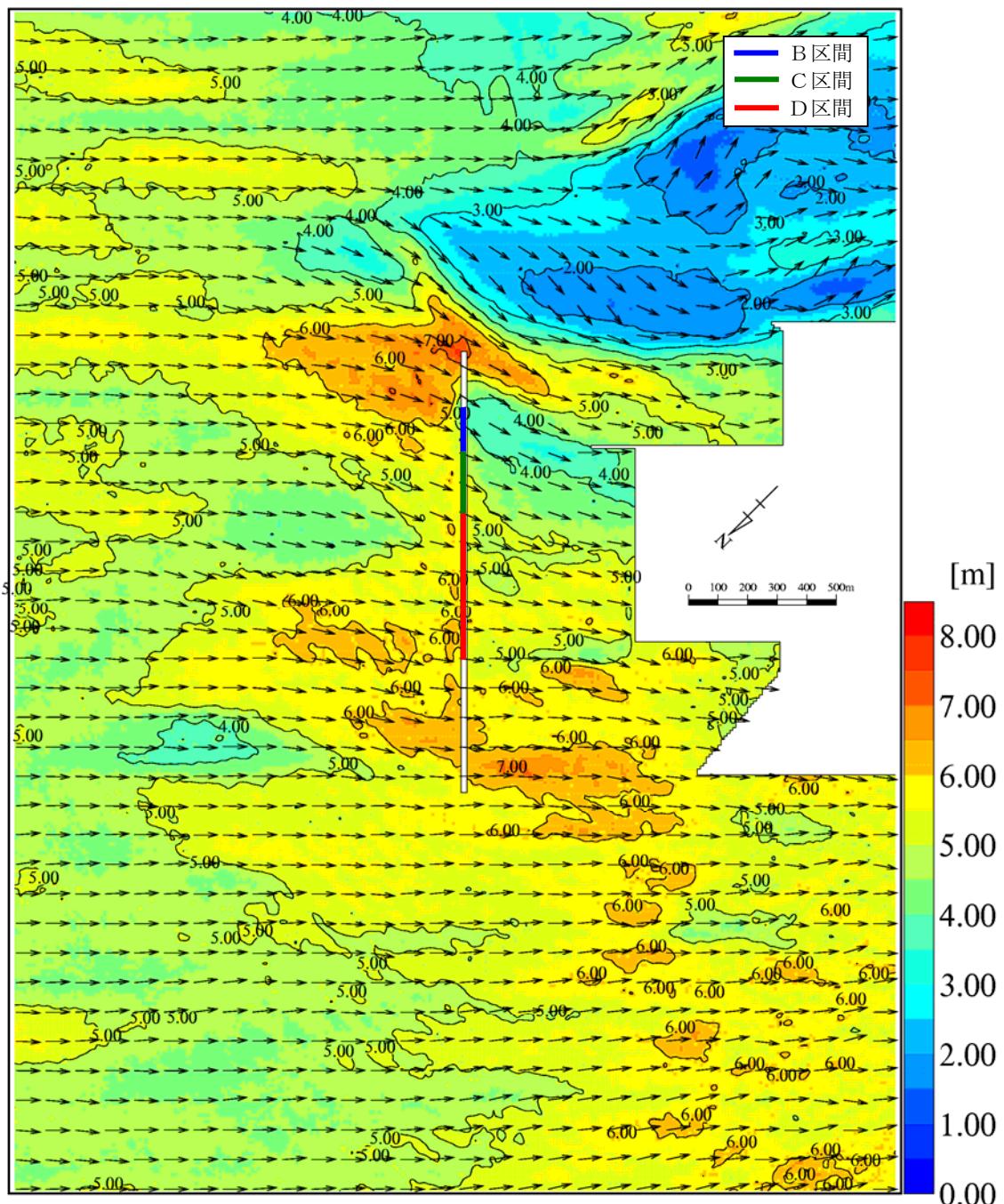


図 1.3-4 設計波(B 区間)の進行波の波浪計算結果 (波向 NE)
(構造物は全て完全透過)

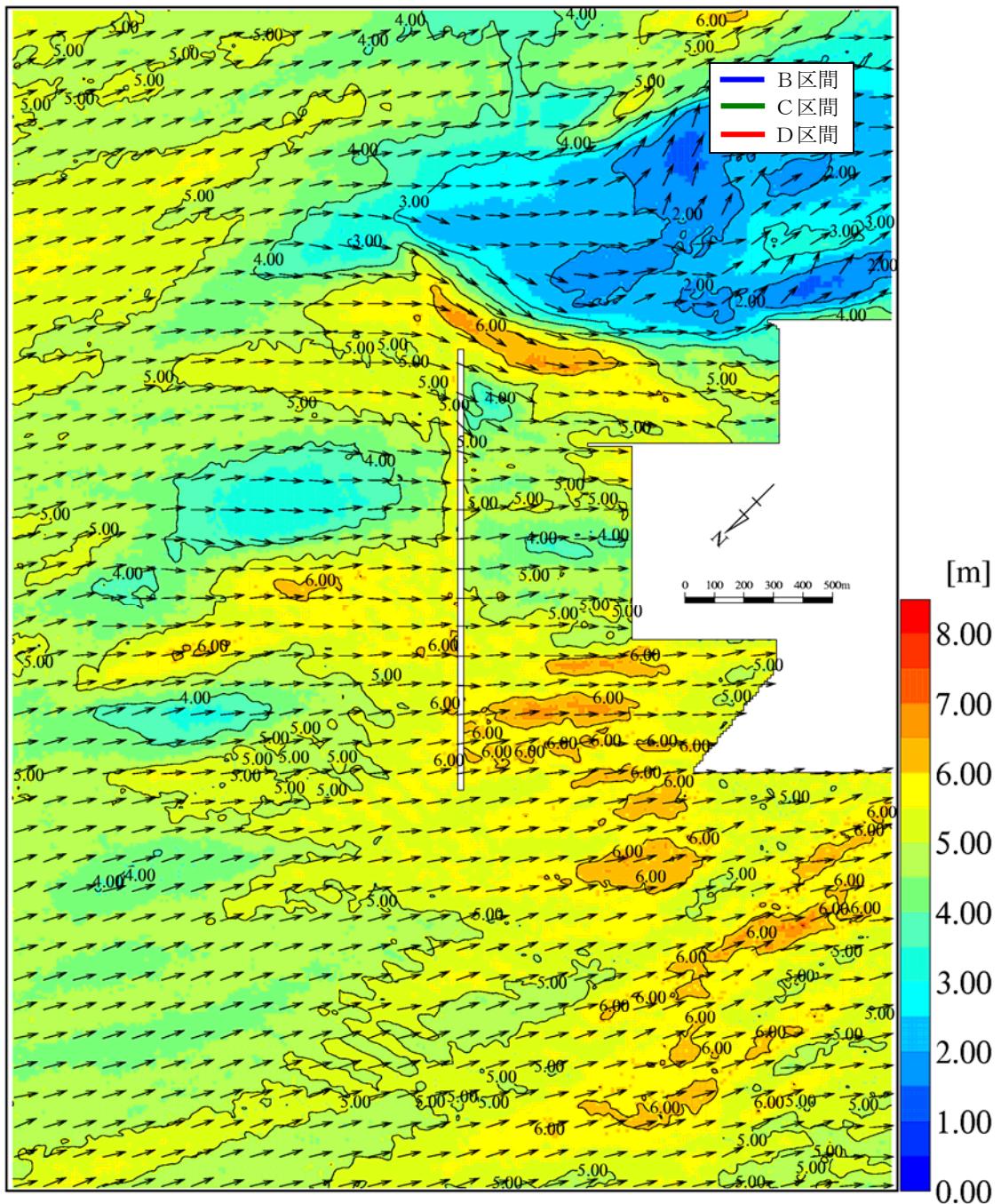


図 1.3-5 設計波(B 区間)の進行波の波浪計算結果 (波向 NNE)

(構造物は全て完全透過)

(3) 波浪計算結果の整理

被災波およびB区間の設計波の入射波諸元を表 1.3-1 に示す。また、設計区間別の平均有義波高の算定結果を表 1.3-2 に、最大波高比の算定結果を表 1.3-3 に示す。

被災波およびB区間の設計波の波浪計算結果から次のことがいえる。

- ・ ブシネスクモデルによる波浪計算結果によると、設計波（周期 12 秒）の波高比が 1.3 前後であるのに対して、被災波（周期 14.2 秒）の波高比は 1.43～1.53 と非常に高い。これは、周期の違いによる屈折および浅水変形の効果によるものと考えられる。
- ・ 北防波堤前面の被災波の波高は、設計波(現設計)の波高を上回っている。したがって、設計波（現設計）を上回る波浪が来襲したことが被災要因のひとつであるといえる。
- ・ 北防波堤前面における現設計（水理模型実験）の波高比は、B・C 区間では 1.1、D 区間では 1.0 と 1.3 を採用している。一方、B 区間の設計波（ブシネスクモデル）の波高比は 1.3 前後であった。

表 1.3-1 入射波の沖波諸元

| | 波 高 | 周 期 | 波 向 | Smax |
|----------|-------|--------|-----|------|
| 被災波 | 4.22m | 14.2 秒 | NE | 75 |
| 設計波(B区間) | 4.80m | 12.0 秒 | NE | 25 |

表 1.3-2 設計区間別の平均有義波高 $H_{1/3}$ (進行波、NE と NNE の大きい方)

| | B区間 | C区間 | D区間 |
|------------|-------|-------|-------|
| 被災波(ブシネスク) | 5.84m | 5.45m | 6.17m |
| 設計波(ブシネスク) | 5.67m | 5.84m | 6.09m |
| 設計波(現設計) | 5.30m | 5.30m | 5.80m |

表 1.3-3 設計区間別の平均波高比 (進行波、入射波を 1 とする)

| | B区間 | C区間 | D区間 |
|--------------|------|------|-------------|
| 被災波(ブシネスク) | 1.38 | 1.29 | 1.46 |
| 設計波(ブシネスク) | 1.18 | 1.22 | 1.27 |
| 設計波(現設計)(実験) | 1.10 | 1.10 | 1.00 & 1.30 |

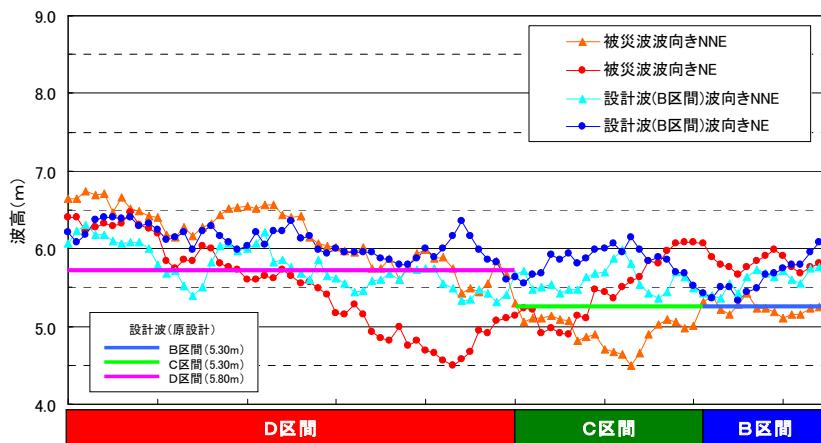


図 1.3-6 北防波堤前面の波高分布特性 (通過波)

1.4 消波ブロックの安定性の検討

被災時における北防波堤の消波ブロックの状況を把握するために、設計波（現設計）に対する消波ブロックの所要重量と被災波に対する消波ブロックの所要重量をハドソン式により算定し、消波ブロックの安定性を検討した。設計波（現設計）と被災波に対する所要重量を表 1.4-1 に示す。

表 1.4-1 ハドソン式による消波ブロックの所要重量（B～D区間）

| 設計区間 | | B区間 | C区間 | D区間 |
|------------------------------|---------------|------|------|------|
| コンクリート密度(g/cm ³) | γ_c | 2.30 | 2.30 | 2.30 |
| 海水密度(g/cm ³) | γ_w | 1.03 | 1.03 | 1.03 |
| 法面勾配 | $\cot \theta$ | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| Kd値 | K_d | 8.5 | 8.3 | 8.3 |
| 被災波(ブジネスク)(m) | H | 5.84 | 5.45 | 6.17 |
| 設計波(ブジネスク)(m) | H | 5.67 | 5.84 | 6.09 |
| 設計波(現設計)(m) | H | 5.30 | 5.30 | 5.80 |
| 被災波(ブジネスク)に対する所要重量(t) | | 19.2 | 16.0 | 23.2 |
| 設計波(ブジネスク) | " | 17.5 | 19.6 | 22.3 |
| 設計波(現設計) | " | 14.3 | 14.7 | 19.2 |

(1) B区間

B区間に於ける現設計の消波ブロック所要重量は 14.3t で、現在 16t 型（実重量 15.77t）が使用されている。一方、設計波（ブジネスク）では、消波ブロックの所要重量は 17.5t、被災波では、消波ブロックの所要重量は 19.2t となり、設計波（ブジネスク）及び被災波とも重量が不足するので、ランクアップが必要である。

(2) C区間

C区間に於ける現設計の消波ブロック所要重量は 14.7t であり、現在 20t 型（実重量 18.40t）が使用されている。一方、設計波（ブジネスク）では、消波ブロックの所要重量は 19.6t、被災波では、消波ブロックの所要重量は 16.0t となり、被災波では現行の 20t 型（実重量 18.40t）で重量が満足するが、設計波（ブジネスク）では、重量が不足するので、ランクアップが必要である。

(3) D区間

D区間に於ける現設計の消波ブロック所要重量は 19.2t であり、現在 25t 型（実重量 23.00t）が使用されている。一方、設計波（ブジネスク）では、消波ブロックの所要重量は 22.3t、被災波では、消波ブロックの所要重量は 23.2t となり、設計波（ブジネスク）では、現行の 25t 型（実重量 23.00t）で重量が満足するが、被災波では、重量が不足するので、ランクアップが必要である。

1.5 堤体の安定性の検討

被災時における北防波堤の堤体の状況を把握するために、北防波堤前面の被災波の波高を用いて、堤体の安定計算を実施し、消波ブロックの状況別に堤体の安定性を検討した。

(1) 消波ブロックが安定している場合

1) 検討ケース

【計算潮位】 2 ケース

現設計の計算潮位である D.L.+0.5m

今回の潮位偏差の最大値である D.L.+0.7m

【消波ブロックの状況】 1 ケース

消波ブロックが安定して機能している場合

2) 検討結果

ブシネスクモデルにより算定した北防波堤前面の被災波の波高を用いて、設計区間ごとに堤体の安定計算を実施した。その計算結果を表 1.5-1 に示す。

消波ブロックが安定して機能している場合であっても、被災波に対する滑動安全率は 1.2 を下回っており、いつ滑動してもおかしくない状況であるといえる。

なお、転倒および基礎の支持力の安全率は十分に高く、堤体の転倒や基礎の被災の恐れは少ないと考えられる。

よって、被災波に対しては、滑動安全率を確保するための対策（例えば捨石ストッパー）が必要である。

表 1.5-1 北防波堤の設計区間ごとの安全率（消波ブロックあり）

| | B区間 | | C区間 | | D区間 | |
|----------------------------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|
| | 潮位+0.5m | 潮位+0.70m | 潮位+0.5m | 潮位+0.70m | 潮位+0.5m | 潮位+0.70m |
| 設計条件 | | | | | | |
| 設計波高 $H_{1/3}$ (m) | 5.84 | 5.84 | 5.45 | 5.45 | 6.17 | 6.17 |
| 最大波高 H_{max} (m) | 9.40 | 9.54 | 8.66 | 8.79 | 8.83 | 8.96 |
| 設計周期 $T_{1/3}$ (s) | 14.2 | 14.2 | 14.2 | 14.2 | 14.2 | 14.2 |
| 安全率(消波あり) | | | | | | |
| 【滑動】 $F_s \geq 1.2$ | 1.088 | 1.051 | 1.145 | 1.103 | 1.112 | 1.072 |
| 【転倒】 $F_s \geq 1.2$ | 1.683 | 1.615 | 1.789 | 1.711 | 1.729 | 1.654 |
| 【基礎の支持力】 $F_s \geq 1.0$ | 1.118 | 1.083 | 1.193 | 1.156 | 1.160 | 1.121 |

(2) 消波ブロックが沈下した場合

今回の被災においては、被災波に対して消波ブロックの所要重量が足りず、不安定であつたことが明らかになっている。被災後の調査でも消波ブロックが沈下していることが確認されており、堤体の滑動よりも先に消波ブロックが沈下した可能性も考えられる。

そこで、最も被害が大きかったB区間について、堤体の滑動よりも先に消波ブロックが沈下した場合を想定した堤体の安全率を検討した。

1) 検討ケース

【計算潮位】 2 ケース

- ・ 現設計の計算潮位である D.L.+0.5m
- ・ 今回の潮位偏差の最大値である D.L.+0.7m

【消波ブロックの状況】 2 ケース

- ・ 消波ブロックが沈下し、水面下のみ消波ブロックがある状態
- ・ 消波ブロックが完全に飛散して消失した状況

消波ブロックが沈下して水面下のみ消波ブロックがある状態の検討は、水面下の部分を消波あり、水面上の部分を消波なしとして各々の波圧を算出し、それを合計して算定した（揚圧力は、消波ありとして算出）。

2) 検討結果

消波ブロックが沈下した場合のB区間の安定計算結果を表1.5-2に示す。

水面上の消波ブロックが水面まで沈下した場合には、安全率は1.0を下回り、被災波により容易に滑動する状態になる。

表1.5-2 B区間における安全率（消波ブロックが沈下した場合）

| | B区間 | |
|--------------------|---------|----------|
| | 潮位+0.5m | 潮位+0.70m |
| 設計条件 | | |
| 設計波高 $H_{1/3}$ (m) | 5.84 | 5.84 |
| 最大波高 H_{max} (m) | 9.40 | 9.54 |
| 設計周期 $T_{1/3}$ (s) | 14.2 | 14.2 |
| 安全率(水面上の消波なし) | | |
| 【滑動】 | 0.888 | 0.857 |
| 参考 安全率(消波なし) | | |
| 【滑動】 | 0.600 | 0.584 |

1.6 北防波堤の被災メカニズム

これまでの検討から、北防波堤の被災について次のようなメカニズムが考えられる。北防波堤の被災メカニズムのイメージを図 1.6-2 に示す。

【北防波堤被災のメカニズム】

- 「寄り回り波」によるうねり性の高波浪が伏木富山港（伏木地区）に来襲する。
- 周期の長い「うねり性波浪」特有の現象により北防波堤前面の波高が高くなる。
- 北防波堤前面で設計波を超える高波浪が発生し、消波ブロックが不安定になる。
- 設計波を超える高波浪が長時間継続し、消波ブロックが徐々に沈下する（図 1.6-1）。
- 消波ブロックの沈下が進むにつれて消波機能が低減し、堤体にかかる波圧が増大する。
- 消波ブロックの沈下がある程度まで進むと堤体の滑動安全率が 1.0 を下回り、堤体が港内側に滑動する。

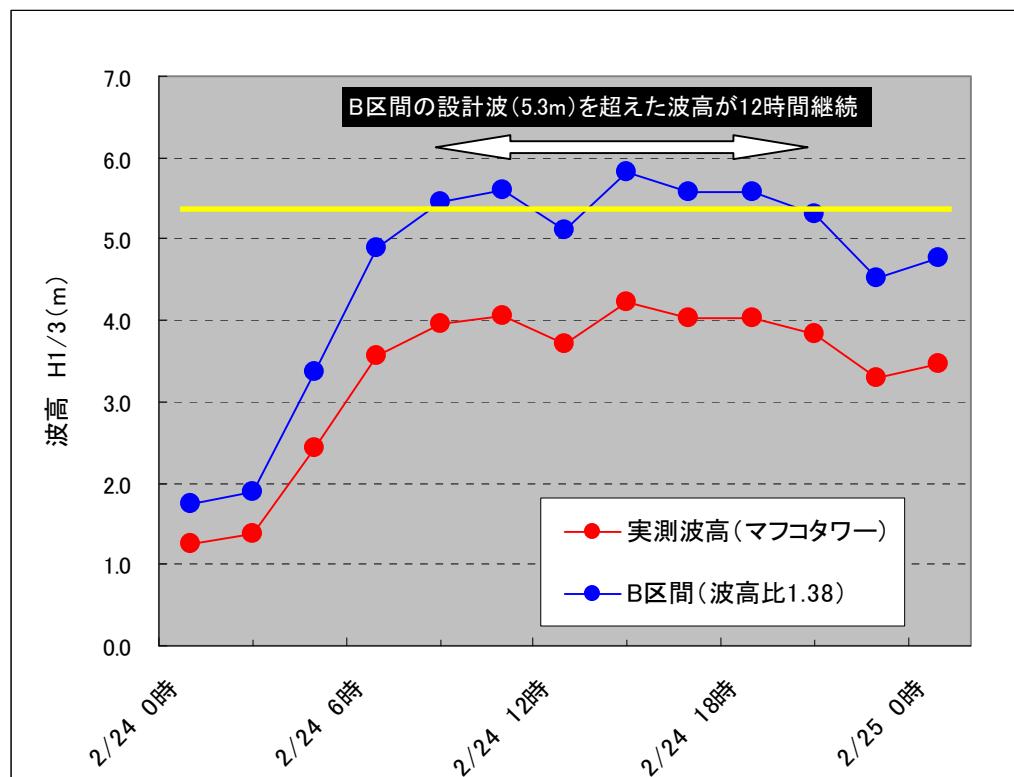


図 1.6-1 マフコタワーおよびB区間前面の波高（波高比 1.43 の場合）