

水理模型実験による防波堤反射波低減構造の検証

北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 非会員 ○豊島愛莉
 北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 非会員 伊賀浩之
 北陸地方整備局 新潟港湾空港技術調査事務所 非会員 早田泰子

1. はじめに

敦賀港では荷役障害の事例が確認されており、荷役稼働のさらなる安定性向上のため、港内静穏度の確保が求められている。要因のひとつとして、防波堤等からの反射波の影響による港内擾乱が考えられている。

そこで、反射波低減構造に改良した断面を対象とし、二次元造波水路を用いて反射波実験及び安定実験を行った。なお、既往の実験より、M.S.L.時に消波ブロック天端高が静水面と一致する没水型反射波対策工断面が反射率低減に有効であることを確認している。ただし、目標反射率 0.3 に対し余裕があったことから、既往の実験断面を元に、より経済的な断面を得ることを目的とし、実験を行った。

検討施設は図-1 に示すとおり、敦賀港の川崎・松栄地区防波堤を対象とした。

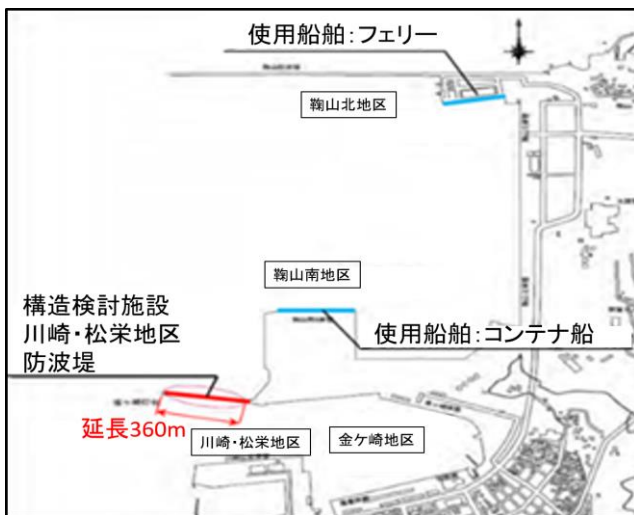


図-1 検討対象施設位置図

2. 実験条件

1) 実験施設、実験縮尺及び海底勾配

実験は、長さ 59.0m、幅 1.25m の二次元造波水路を使用し、仕切り板により幅 0.8m とした水路で行った。

実験縮尺は、現地断面規模を考慮し、1/25(歪み無し)とした。フルード相似則にしたがって、模型縮尺より各諸量の計算した結果を表-1 に示す。

現地の測量結果より、海底勾配が 1/153 であったため、本実験も同様の 1/153 とした。

表-1 実験縮尺 (フルード相似則)

| 諸元 | 対象物理量 | 縮尺 | 例示 | |
|--------|---------------|----------------------|---------|-----------|
| | | | 現地 | 模型 |
| 長さ L | 波高・波長・水深・模型寸法 | 1/25 | 0.42m | 1.68cm |
| 時間 T | 周期・波の作用時間 | $1/\sqrt{25}=1/5.0$ | 10.0s | 2.00s |
| 速度 L/T | 波速・流速 | $\sqrt{25/25}=1/5.0$ | 0.5m/s | 0.10m/s |
| 質量 F | ブロック・石材質量等 | $1/25^3=1/15,625$ | 1.84t/個 | 117.76g/個 |

2) 潮位条件及び波浪条件

潮位条件については、反射波実験における潮位は M.S.L. (+0.2m) を基本とし、一部のケースで潮位を H.W.L. (+0.5m) に変更し、潮位変化に対する反射率の違いを把握した。安定実験における潮位は L.W.L. ($\pm 0.0m$) とした。

実験波浪条件は、表-2 のとおりである。作用させる波浪は全て不規則波とし、反射波実験では 200 波 3 波群を、安定実験では 1,000 波 2 波群を作用させた。

表-2 実験波浪条件

| 実験項目 | 潮位 | 波の種類 | 波浪条件 | | | | | |
|-------|--------------------------------|-------------|-------|-----------|--------|-----------|--------------|------|
| | | | 種類 | 有義波高 H1/3 | | 有義周期 T1/3 | | 作用波群 |
| | | | | 現地(m) | 模型(cm) | 現地(s) | 模型(s) | |
| 反射波実験 | M.S.L.(+0.2m) H.W.L.(+0.5m) | 消波対象波 | 0.42m | 1.68cm | 10.0s | 2.00s | 200波 3波群 | |
| 安定実験 | L.W.L.($\pm 0.0m$) | 不規則波 設計波 | 0.98m | 3.92cm | 12.7s | 2.54s | 1000波 2波群 | |

3) 実験断面条件

実験断面は、没水型反射波対策工断面とし、消波ブロックの天端幅や法尻高を見直して実験を行った。

防波堤構造を選定した際のポイントは「設計波に対して安定した構造」、「反射率 0.3 程度を目標とした低反射構造断面」、「他工事のトンネル掘削で発生した建設発生土(ずり石)の有効活用」の3つである。

反射率の目標値は過年度の検討結果より、本防波堤の反射率を 0.3 に改良するとコンテナ取扱岸壁である鞠山南岸壁の稼働率向上が期待出来るという結果を得たことから設定している。

既設断面と既往の実験断面，そこから対策工を施工し改良を行った断面イメージを図-2に示す。

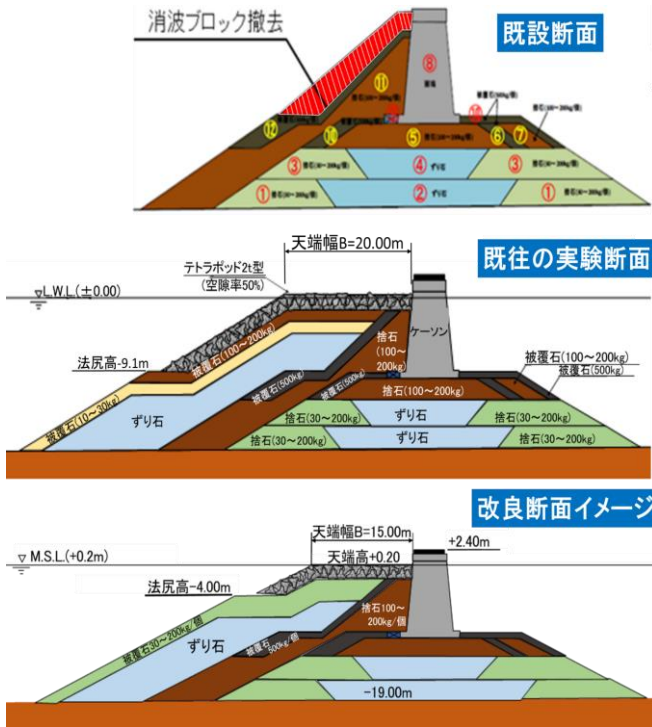


図-2 既設断面・既往の実験断面・改良断面イメージ

4) 実験の流れ

①安定実験

既往の実験断面をベースに，より経済的な断面にするため，天端幅を20mから15mに縮め，ブロック法尻高を-9.1mから-4.0mにあげて，安定を確認した。

②反射波実験

①で安定を確認した断面で反射率を測定したが，①の実験断面では，目標反射率を超過したので反射率を満足させるため，予備実験で最適断面を選定し，選定した断面の安定を確認した。

3. 実験方法

1) 安定実験

挙動検査域は水路幅80cm内の中央40cmを範囲とし，消波ブロック及び被覆石を対象とした。消波ブロックの挙動観察は，波作用前，波作用中及び波作用終了時に行った。消波ブロックの挙動は移動と動揺に大別し，ブロック1/2個以上の移動を被害として扱った。

一方，石材については図-3に示すように，砂面計を用いて波作用前及び波作用終了時に複数測線の断面測定を行い，断面変形量を求め，安定性を評価した。検

査領域は，図-3に示す水路中央部の範囲とし，水路中央を含む5測線の測点ピッチ間隔を2cmにして測定を行った。

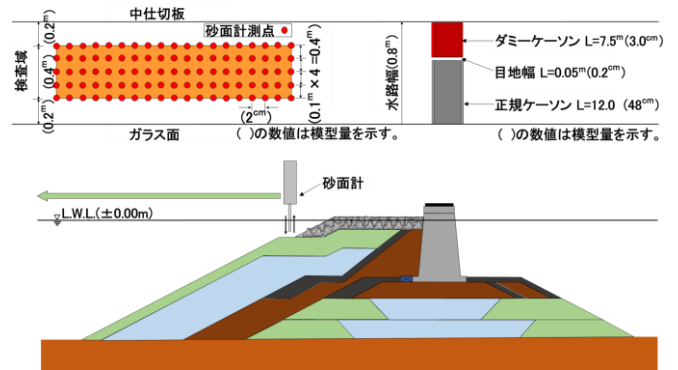


図-3 砂面計配置図及び検査領域図

2) 反射波実験

消波ブロック前面，防波堤前壁面（反射面）より1.5波長の範囲に，サーボ式波高計（1.5波長測点）及び容量式波高計を0.25波長間隔（0.5，0.75，1.0，1.25波長）で各2台設置，計測して有義波高の岸・沖分布を求め，反射面近傍での波高変動を確認した。同時に波の入・反射分離解析を行い，反射率及び反射波高の岸・沖分布を求めた。

反射波実験時の波高測定位置を図-4に示す。

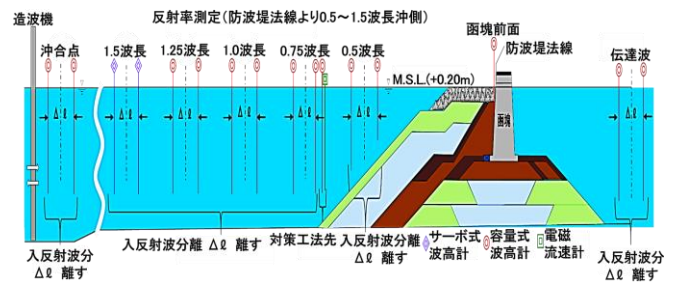


図-4 反射波実験時の波高測定位置

4. 安定実験結果（消波ブロック法尻高検討）

1) 消波ブロック及び被覆石の安定評価

①消波ブロックの安定評価

消波ブロックの挙動は，表-3に示す定義とし，移動及び動揺を確認した。

表-3 消波ブロックの移動と動揺の定義

| 評価 | 挙動の分類 | 挙動の内容 |
|----|-------|--------------------------|
| 安定 | 安定 | 波作用によって動揺しない |
| | 動揺 | 波作用によって揺れ動くが，ほぼ元の位置にある |
| 被害 | 移動 | 波作用によって，元の位置から1/2個以上移動する |

消波ブロックの安定性は被害率をもとに評価した。被害率 (D) は、以下の式 (1) より求める。

$$D = \frac{n}{N_B} \times 100 \quad (1)$$

n は検査領域内で移動したブロック個数、NB は検査領域内のブロックの総数である。本実験では、被害率 1% を安定評価の許容値として、安定性を評価した。

②被覆石の安定評価

被覆石を立方体あるいは球体と仮定し石の直径を求めると、40cm 程度となる。消波ブロックの場合、港湾の施設の技術上の基準・同解説より 1/2 個以上の移動を被害として扱っていることから、被覆石の 1/2 個程度の移動量に相当する ±20cm を安定評価基準値として、安定性を評価した。

2) 安定実験結果

図-5 の断面を基準とし、消波ブロックの法尻高-4.0m としたケースと法尻高-3.0m としたケースを対象に実験を行った。

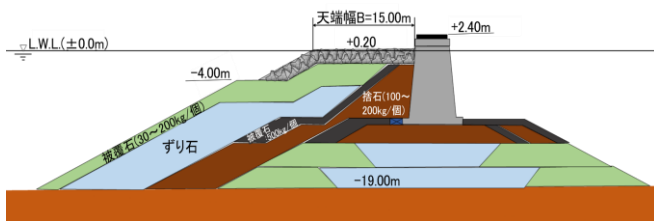


図-5 基準断面

安定実験結果について、表-4 に示す。

消波ブロック法尻高-4.0m では、消波ブロックの被害率は 0% であり、極めて安定であった。被覆石の断面変形量の最大値は、許容変形量である ±20cm 以内に収まっており、安定であった。設計波の作用に対して、消波ブロックおよび被覆石の安定性が確保されることが確認できた。

一方、消波ブロック法尻高-3.0m では、消波ブロックの被害率は 0% であり、極めて安定であった。しかし、被覆石の断面変形量の最大値は、許容変形量である ±20cm を上回り不安定であった。設計波の作用に対して、消波ブロックの安定性が確保されたが、被覆石の安定性が確保されない結果となった。

消波ブロックおよび被覆石の安定性を確保するには、

消波ブロック法尻高を-4.0m とする必要があることがわかった。

表-4 安定実験結果 (法尻高検討)

| 実験断面 | 消波ブロックの耐波安定性 | | 被覆石 (30~200kg/個) の耐波安定性 | |
|----------------------|------------------------------------------------|----------------|------------------------------------------------|-----------------------------|
| | 作用波浪 (設計波) 波高: H1/3=0.98m 周期: T1/3=12.7s | 実験結果 | 作用波浪 (設計波) 波高: H1/3=0.98m 周期: T1/3=12.7s | 実験結果 |
| 消波ブロック 法尻高: -4.0m | 波群: 1 | 被害率D=0.0% | 波群: 1 | 断面変形量の最大値: 約8.0cm (5測線の最大) |
| | 波群: 2 | 被害率D=0.0% | 波群: 2 | 断面変形量の最大値: 約12.0cm (5測線の最大) |
| | 評価 | ○ (安定: D<1.0%) | 評価 | ○ (安定: <±20cm) |
| 消波ブロック 法尻高: -3.0m | 波群: 1 | 被害率D=0.0% | 波群: 1 | 断面変形量の最大値: 約8.0cm (5測線の最大) |
| | 波群: 2 | 被害率D=0.0% | 波群: 2 | 断面変形量の最大値: 約40.0cm (5測線の最大) |
| | 評価 | ○ (安定: D<1.0%) | 評価 | × (不安定: >±20cm) |

5. 反射波実験結果

1) 断面の機能評価

4-2) で選定した断面で反射波実験を行ったところ、目標反射率を超過する結果となったため、小段設置や天端幅拡幅断面を作成し予備実験を行った。(小段: ケーソン側に消波ブロックを積み上げること。)

反射波実験結果(予備実験)は表-5のとおりである。

表-5 反射波実験結果 (予備実験)

| 実験断面 | 消波ブロック断面諸元 | 実験結果 | | | | | |
|-------------------------|------------------|----------|-------|------|----------|-------|------|
| | | 潮位M.S.L. | | | 潮位H.W.L. | | |
| | | 波群 | 反射率 | 実験結果 | 波群 | 反射率 | 実験結果 |
| 比較対象の ベースとなる 実験断面 | 消波ブロック天端幅: 15.0m | 波群 1 | 0.314 | × | 波群 1 | 0.274 | ○ |
| | 消波ブロック天端高: +0.2m | 波群 2 | 0.320 | × | 波群 2 | 0.282 | ○ |
| | 消波ブロック法尻高: -4.0m | 波群 3 | 0.318 | × | 波群 3 | 0.283 | ○ |
| | 小段有無: 無し | 平均 | 0.317 | × | 平均 | 0.280 | ○ |
| 小段設置 断面 | 消波ブロック天端幅: 15.0m | 波群 2 | 0.299 | ○ | 波群 2 | 0.250 | ○ |
| | 消波ブロック天端高: +0.2m | 波群 3 | 0.299 | ○ | 波群 3 | 0.250 | ○ |
| | 消波ブロック法尻高: -4.0m | 平均 | 0.299 | ○ | 平均 | 0.250 | ○ |
| | 小段有無: 有り | 比率 | 94.2% | | 比率 | 89.4% | |
| 天端幅拡幅 断面 | 消波ブロック天端幅: 17.0m | 波群 2 | 0.257 | ○ | | | |
| | 消波ブロック天端高: +0.2m | 波群 3 | 0.258 | ○ | | | |
| | 消波ブロック法尻高: -4.0m | 平均 | 0.258 | ○ | | | |
| | 小段有無: 無し | 比率 | 81.1% | | | | |
| 小段設置 及び天端幅 拡幅断面 | 消波ブロック天端幅: 17.0m | 波群 2 | 0.251 | ○ | | | |
| | 消波ブロック天端高: +0.2m | 波群 3 | 0.252 | ○ | | | |
| | 消波ブロック法尻高: -4.0m | 平均 | 0.252 | ○ | | | |
| | 小段有無: 有り | 比率 | 79.3% | | | | |
| 天端高を 下げた断面 | 消波ブロック天端幅: 15.0m | 波群 1 | 0.274 | ○ | | | |
| | 消波ブロック天端高: -0.1m | 波群 2 | 0.282 | ○ | 波群 2 | 0.311 | × |
| | 消波ブロック法尻高: -4.0m | 波群 3 | 0.283 | ○ | 波群 3 | 0.309 | × |
| | 小段有無: 無し | 平均 | 0.280 | ○ | 平均 | 0.310 | × |
| | 比率 | 88.1% | | 比率 | 110.8% | | |

小段設置時、天端幅拡幅時、天端高を下げたときの全てで要求性能を満足する結果となった。

この中で、最も経済的なのは天端高を下げた断面である。ただし、潮位 H.W.L.の場合に反射率 0.3 を超過する結果となった。

天端高を下げた断面の次に経済的なのがケーソン前面に小段を設置した断面である。潮位 H.W.L.でも反射率は 0.3 以下となり、最適断面であることが確認された。ただし、潮位 M.S.L.の場合に反射率 0.299 とぎりぎりなことから、潮位変動によっては反射率を超過することが考えられる。

一方、天端幅拡幅断面と小段設置及び天端幅拡幅断面は消波ブロック及び被覆石等の投入量が多く、経済的ではない。

2) 選定断面の決定

要求性能を満足し最も経済的な断面は、小段設置断面であるが、反射率は 0.299 と余裕がない。一方、天端高を下げることで反射波低減効果が得られることが確認できた。このため、より確実な反射波対策断面を得るため、小段の設置に加え、天端高を 10cm 下げて +0.10m とした断面について検証することとした。

選定断面について図-6 に示す。

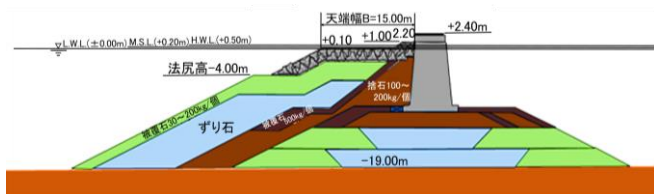


図-6 選定断面

6. 選定断面の総合評価

選定断面の反射波実験および安定実験結果については表-6 のとおりである。

表-6 選定断面の反射波実験および安定実験結果

| 評価項目 | 反射率 | | | | 消波ブロックの耐波安定性 | | | 被覆石 (30~200kg/個) の耐波安定性 | | | | | | | | | | | |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------|------------|----------------------------------------------------------------|-------------------|-----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-----------|-------|------------------------------------|
| | 作用波浪 (消波対象波) | | 実験結果 (M.S.L.) | 作用波浪 (消波対象波) | | 作用波浪 (設計波) | | 実験結果 (L.W.L.) | 作用波浪 (設計波) | | 実験結果 (L.W.L.) | | | | | | | | |
| 選定断面 (消波ブロック 天端幅: 15.00m、 天端高: +0.10m、 小段: 有り) | 波高: $H_{1/3}=0.42\text{m}$ 周期: $T_{1/3}=10.0\text{s}$ | 波群: 1 | 0.248 | 波高: $H_{1/3}=0.42\text{m}$ 周期: $T_{1/3}=10.0\text{s}$ | 波群: 1 | 0.240 | 波高: $H_{1/3}=0.98\text{m}$ 周期: $T_{1/3}=12.7\text{s}$ | 波群: 1 | 被害率D=0.0% | 波高: $H_{1/3}=0.98\text{m}$ 周期: $T_{1/3}=12.7\text{s}$ | 波群: 1 | 断面変形量の 最大値: 約8.0cm (5側線の最大) | | | | | | | |
| | | 波群: 2 | | | | | | | | | | | 0.253 | 波群: 2 | 0.247 | 波群: 2 | 被害率D=0.0% | 波群: 2 | 断面変形量の 最大値: 約12.0cm (5側線の最大) |
| | | 波群: 3 | | | | | | | | | | | | 0.252 | | | | | |
| | 評価 | ○ (要求性能満足; 平均: 0.251<0.3) | | 評価 | ○ (要求性能満足; 平均: 0.245<0.3) | | 評価 | ○ (安定; D<1.0%) | | 評価 | ○ (安定; <±20cm) | | | | | | | | |

1) 選定断面の反射波評価

潮位 M.S.L.における 3 波群平均の反射率は 0.251 となり、最大でも 0.253 のため、要求性能を満足した。潮位 H.W.L.では、0.245 となり反射率 0.3 以下となった。小段の設置とともに、消波ブロック天端高を 0.1m 下げたことにより、反射率を効率よく低減することが出来た。

2) 選定断面の安定評価

選定断面における消波ブロックの被害率は 0.0% であり、極めて安定であった。被覆石の断面変形量の最大値は、許容変形量である ±20cm 以内に収まっており、安定であった。設計波の作用に対する安定性が確保できた。

7. まとめ

選定断面は、要求性能である潮位 M.S.L.時に消波対象波の作用に対して反射率 0.3 以下を満足するとともに、設計波の作用に対して安定性が確保された。また、天端幅を 20m から 15m に縮め、法尻高を -9.1m から -4.0m に上げたことで、消波ブロック投入量を削減できたため、経済性に配慮した断面になっており、現地適用性の高い断面として評価できる。

8. あとがき

今後、現地においても同様の結果が得られ、荷役障害が解消されることを期待しているが、外力条件をコントロールすることはできず、必ずしも実験結果と一致するとは限らないため、引き続き現地のフォローをしていく所存である。