

北海道の港湾における第一線防波堤の 設計事例解析

北海道開発局 港湾空港部 港湾建設課 ○川口 拓也
佐藤 功坪

港湾構造物の設計にあたっては、安定性や経済性、施工性など様々な要因を考慮する必要がある。一方で港湾技術者の担い手不足や気候変動を考慮した設計の導入などに伴い、設計の適否判断に苦慮する事態が生じている。本稿は、北海道内の第一線防波堤について構造諸元、照査結果等の事例解析を実施し、防波堤の設計を行う際の留意点を取りまとめた。

キーワード：第一線防波堤、港湾構造物の設計、事例解析

1. はじめに

港湾構造物の設計にあたっては、各構造形式の特性を考慮し、配置条件、自然条件、利用条件、重要性、施工条件、経済性、工期、材料入手の難易、維持管理の難易など様々な要因について比較検討する必要がある。また、令和6年4月には気候変動の影響を考慮した設計法の実装に向けて、港湾の施設の技術上の基準¹⁾の細目を定める告示の改正が行われた。この改正に伴い、今後の港湾施設の設計においては、将来の気候変動の影響を考慮した外力により設計を行う必要がある。さらに、津波に対して粘り強い構造の検討や、新たな技術の開発によって設計が可能となった新構造形式導入の検討など、港湾構造物の設計は時代の変化に伴って多岐にわたるものになっている。一方で、港湾技術者の担い手不足や、熟練技術者の不足によってこれまで培われた技術が伝承されず、知識や経験が不足していることで設計の適否判断に苦慮する事態が生じている。

そこで、本稿では北海道内の第一線防波堤について、構造諸元や安定性照査結果の事例解析を実施することで、防波堤の設計を行う際の留意点を取りまとめた。

2. 事例解析の対象施設及び解析方法

事例解析の対象施設は北海道内の港湾における第一線防波堤とし、サンプル数は115件である。また、同施設内で複数の断面が設定されている際には設計最大波高が最も大きい断面を解析対象としている。なお、防波堤の構造形式としては、重力式、杭式、浮式、軟弱地盤着底

式が想定されるが、道内の港湾における第一線防波堤の構造形式では杭式、浮式、軟弱地盤着底式の採用事例は確認できなかったため、本稿では重力式防波堤を対象として事例解析を実施した。

事例解析は、港名、施設名、構造形式、本体構造、基礎構造、構造物設置水深、設計有義波高、設計最大波高、堤体幅、本体工高さ、本体工設置水深、背後盛石の有無、摩擦増大マットの有無、断面決定要因（滑動、転倒、支持力、端趾圧、円弧すべり）とそのときの安定性照査結果をサンプルごとに整理した一覧表を作成して実施した。

防波堤の設計においては、形状寸法として堤体幅を仮定する必要があることから、本稿では、防波堤の安定に必要な堤体幅を事例解析から推定するとともに、断面決定要因について考察することで防波堤の設計を行う際の留意点を取りまとめた。

3. 事例解析結果及び考察

(1) 現状分析

本節では北海道内にて整備された第一線防波堤の構造諸元及び断面決定要因の特徴を把握するための現状分析結果を示す。

a) 度数分布

図-1に防波堤の構造形式分布を示す。グラフ上の数字はサンプル数である。図より、構造形式は、消波ブロック被覆堤、混成堤、傾斜堤・重力式特殊防波堤、直立堤の順に多いことがわかる。分布の割合としては、消波ブロック被覆堤が全体の約4分の3を占めており、混成堤が

約4分の1を占めている。傾斜堤と重力式特殊防波堤はそれぞれ一件ずつあり、直立堤の分布は確認できなかった。

図-2に対象サンプルを設計最大波高 H_{max} で階層分けした度数分布を示す。横軸の設計最大波高の値は下限値以上上限値未満を示しており、縦軸は該当するサンプルを積み上げた値である。なお、グラフでは防波堤の構造形式別（混成堤、直立堤、傾斜堤、消波ブロック被覆堤、重力式特殊防波堤）に色を分けて示している。

構造形式ごとの分布状況に着目すると、混成堤の分布のピークは設計最大波高が6.0m以上8.0m未満の範囲にあり、消波ブロック被覆堤のピークは8.0m以上10.0m未満の範囲にあることがわかる。このことから、混成堤は設計最大波高が8.0m未満の場合に採用されることが多く、消波ブロック被覆堤は設計最大波高が8.0m以上の場合に採用されることが多いと考えられる。なお、直立堤、傾斜堤、重力式特殊防波堤については採用事例が少ないが、設計最大波高が4.0m未満の場合には採用されている事例が確認できることから、設計最大波高が4.0m未満の場合には、これらの構造形式も採用対象になりうると考えられる。

図-3は構造形式別に背後盛石または摩擦増大マットの設置（以降、滑動抵抗補強と記載）の有無で区別してサンプルを積み上げたグラフである。グラフ上の数字はサンプル数である。

滑動抵抗補強の有無に着目すると、滑動抵抗補強を実施している事例は全体の約20%であった。構造形式別では混成堤においては30%弱の実施が確認でき、消波ブロック被覆堤においては20%弱の実施が確認できた。混成堤での実施割合が消波ブロック被覆堤より多い理由については、防波堤前面に波圧低減効果をもたらす消波ブロックが設置されていないため、堤体に作用する波圧が

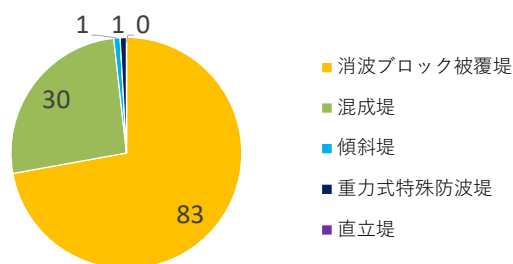


図-1 防波堤構造形式分布

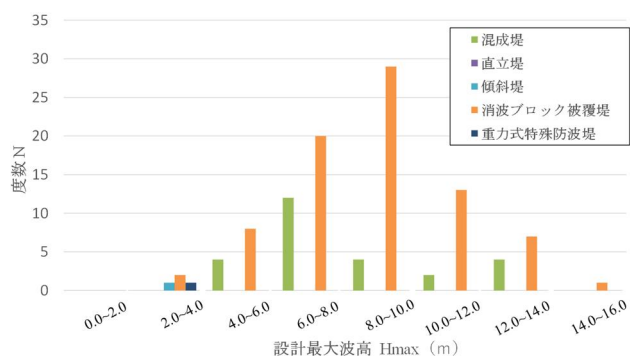


図-2 設計最大波高別度数分布

大きくなり滑動抵抗の補強が必要になる場合が多くなるためと推察される。なお、直立堤、傾斜堤、重力式特殊防波堤については採用事例が少ないこともあり、滑動抵抗補強を実施している事例は確認できなかった。

図-4は本体工構造形式別に対象サンプルを本体工設置水深 h で階層分けした度数分布を示す。横軸の本体工設置水深の値は下限値以上上限値未満を示しており、縦軸は該当するサンプルを積み上げた値である。なお、グラフでは本体工の構造形式別（ケーソン、場所打ちコンクリート、ケーソン+場所打ちと記載）、ブロック、捨石）に色を分けて示している。

構造形式ごとの分布状況に着目すると、ケーソンの分布のピークは本体工設置水深が8.0m以上10.0m未満の範囲にあり、10.0m以上の水深帯においても分布が確認できる。一方、その他の構造形式については、多くが8.0m未満の範囲に分布しており、10.0m以上の水深帯においては分布が確認できなかった。これは、設置水深が大きいほど堤体の体積が大きくなり、場所打ちコンクリートやブロック、捨石の場合は施工に費用を要するため、設置水深が大きいほどプレキャストで施工されるケーソンの方が経済的に優位になるためである。このことから、本体工設置水深が8.0m以上となる場合にはケーソン構造を採用するほうが経済的になる場合が多いと考えられる。

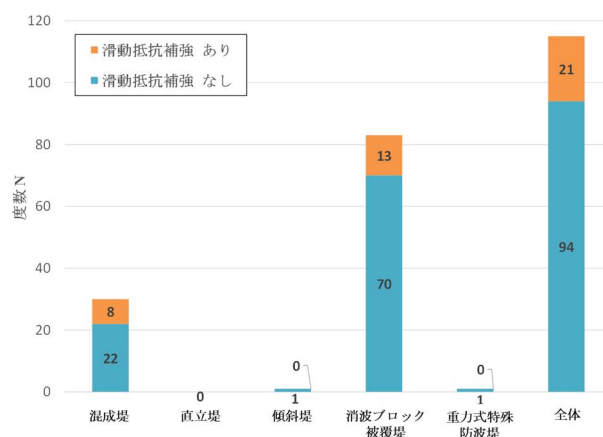


図-3 滑動抵抗補強の有無

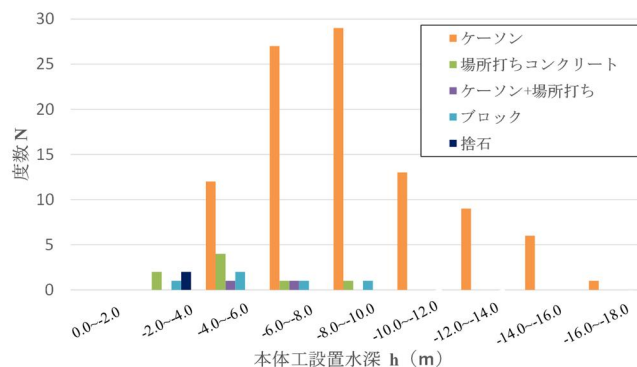


図-4 本体工設置水深別度数分布

b) 断面決定要因

図-5に断面決定要因を示す。図より、断面決定要因は、支持力、滑動、転倒・円弧すべり、端趾圧の順に多いことがわかる。断面決定要因別の分布については、支持力で決定している断面は51%、滑動で決定している断面は43%、転倒・円弧すべりで決定している断面はそれぞれ3%であった。なお、港湾の場合、偏心傾斜した作用に対する支持力の検討を簡易ビショップ法で照査しており、端趾圧により断面が決定している事例は確認できなかった。このことから、本稿において断面決定要因を論述するうえでは滑動、転倒、支持力、円弧すべりを考察対象とする。

(2) 設計断面を評価する際の留意点

本節では、防波堤の設計断面を評価する際に留意が必要な点を提案するために実施した事例解析の考察を行う。

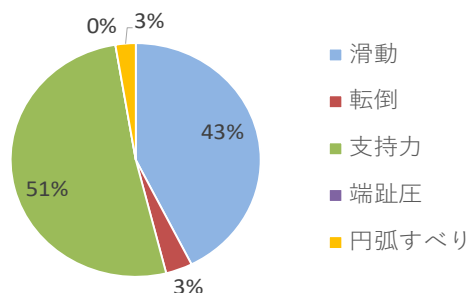


図-5 断面決定要因

なお、現状分析の結果より、直立堤、傾斜堤、特殊防波堤は採用事例が極めて少ないことから、本検討では混成堤、消波ブロック被覆堤について考察を行う。

a) 断面が安定するために必要な堤体幅

本項では、断面が安定するために必要な堤体幅のボーダーラインを提案するための考察を行う。

図-6、図-7はそれぞれ混成堤、消波ブロック被覆堤について、設計最大波高 H_{max} ごとに本体工高さ H と堤体幅 B の関係を示したグラフである。図中のプロットは断面決定要因ごとに色わけしている。なお、本稿における堤体幅と本体工高さの定義は図-8の通りとし、フーチングがある構造の場合はフーチングを除いた最大の幅を、既設本体工に水中コンクリート等で腹付け改良を行っている場合は改良後の最大の幅を堤体幅と定義し、基礎捨石天端面から本体工天端までの高さを本体工高さとして定義した。また、図中の原点を通る直線は本体工高さに対して必要な堤体幅のボーダーラインを示している。直線の設

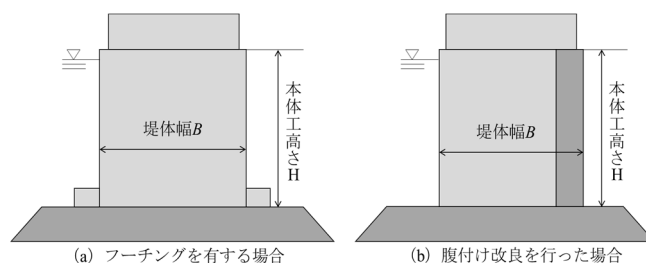


図-8 堤体幅 B と本体工高さ H の定義

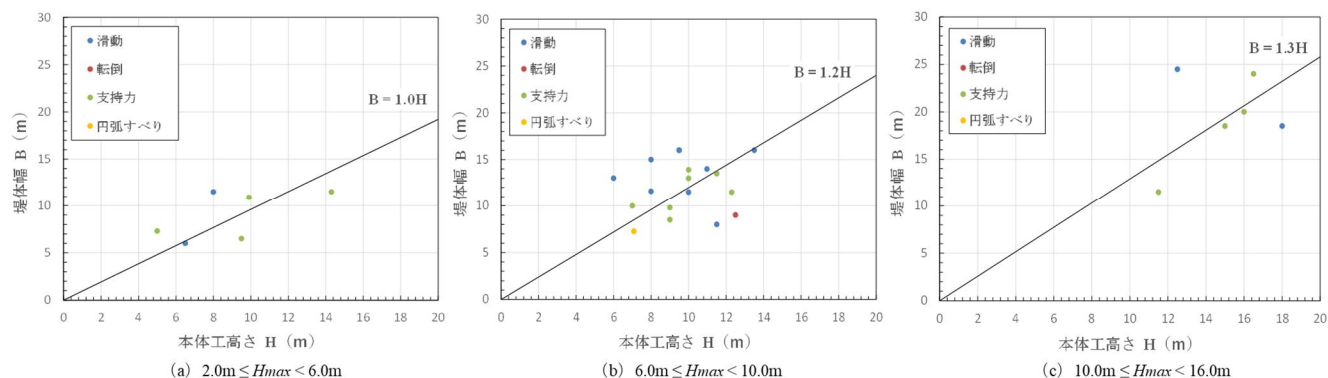


図-6 混成堤における本体工高さ H と堤体幅 B の関係

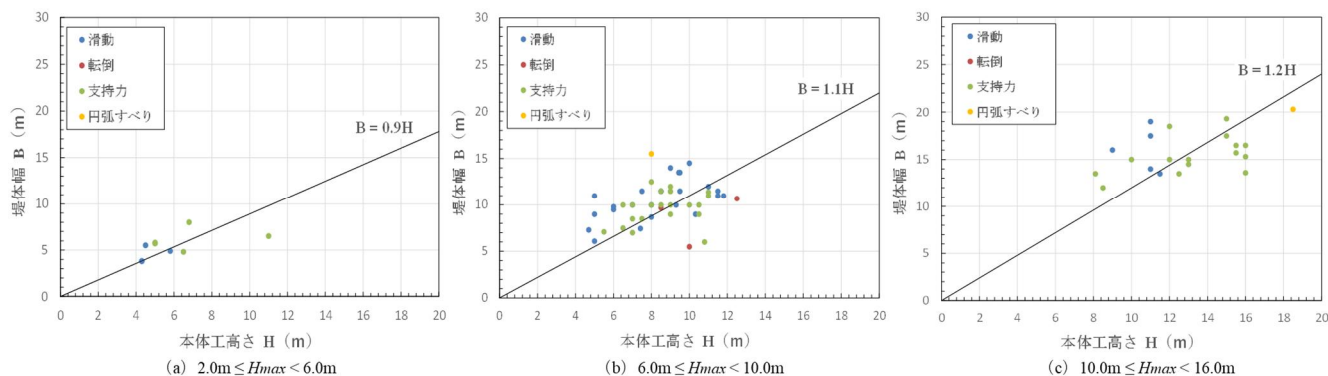


図-7 消波ブロック被覆堤における本体工高さ H と堤体幅 B の関係

定においては本体工高さと堤体幅の相関係数が0.9以上を満足するように設定した。

図-6より、設計最大波高が大きいほどボーダーラインの傾きが大きいことから、設計最大波高は堤体幅を決定するうえで重要なパラメータとなる。また、堤体幅は、 $2.0\text{m} \leq H_{\text{max}} < 6.0\text{m}$ の場合は本体工高さの1.0倍以上、 $6.0\text{m} \leq H_{\text{max}} < 10.0\text{m}$ の場合は本体工高さの1.2倍以上、 $10.0\text{m} \leq H_{\text{max}} < 16.0\text{m}$ の場合は本体工高さの1.3倍以上必要となっており、これらの値が、混成堤が安定するために必要な堤体幅の指標となる。このことから、混成堤の設計断面を図-6に当てはめた結果がボーダーラインを下回る位置にプロットされる場合は、構造の安定性に注意を要する。

また、図-7についても図-6と同様、設計最大波高が大きいほどボーダーラインの傾きが大きいことがわかる。このため、防波堤の構造形式に関わらず設計最大波高は堤体幅を決定するうえで重要なパラメータとなる。また、堤体幅は、 $2.0\text{m} \leq H_{\text{max}} < 6.0\text{m}$ の場合は本体工高さの0.9倍以上、 $6.0\text{m} \leq H_{\text{max}} < 10.0\text{m}$ の場合は本体工高さの1.1倍以上、 $10.0\text{m} \leq H_{\text{max}} < 16.0\text{m}$ の場合は本体工高さの1.2倍以上必要となっており、これらの値が、消波ブロック被覆堤が安定するために必要な堤体幅の指標となる。このことから、消波ブロック被覆堤の設計断面を図-7に当てはめた結果がボーダーラインを下回る位置にプロットされる場合は、構造の安定性に注意を要する。

さらに、図-6と図-7の設計最大波高ごとのボーダーラインの傾きを比較すると、すべてのグラフにおいて消波ブロック被覆堤の傾きが混成堤の傾きに対して1割程度小さい値となっている。このことから、設計最大波高の大小に関わらず消波ブロック被覆堤を採用する場合は混成堤を採用する場合に比べて堤体幅を1割程度小さくできると考えられる。

b) 本体工高さと堤体幅の比が断面決定要因に及ぼす影響

図-6、図-7について、断面決定要因に着目すると、設計最大波高の大小に関わらず、支持力で決定している断面はボーダーライン近傍に分布していることがわかる。一方、滑動で決定している断面はボーダーラインを上回る位置に分布している傾向が確認できる。このことから、本体工高さと堤体幅の関係がボーダーライン近傍になる場合には断面が支持力で決定するケースが多く、堤体幅がボーダーラインより大きい場合には断面が滑動で決定するケースが多いと推察できる。また、転倒で決定している断面はいずれもボーダーラインを下回る位置に確認できることから、堤体幅がボーダーラインより小さい場合には断面が転倒で決定するケースがあることに注意を要する。なお、円弧すべりで決定する断面は、地盤条件が粘性土層の場合のみ照査していることもあり、明確な傾向は確認できなかった。

c) 設計最大波高・構造形式が断面決定要因に及ぼす影響

図-6、図-7いずれのグラフにおいても、転倒で決定している断面は設計最大波高が $6.0\text{m} \leq H_{\text{max}} < 10.0\text{m}$ の範囲に

分布していた。さらに、防波堤の構造形式に着目すると、全サンプル中、断面が転倒で決定していたのは4件であり、そのうち3件が消波ブロック被覆堤に分布していた。このことから、設計最大波高が $6.0\text{m} \leq H_{\text{max}} < 10.0\text{m}$ の範囲であり、かつ防波堤の構造形式が消波ブロック被覆堤の場合は断面が転倒で決定する可能性があるため注意が必要である。

d) 滑動抵抗補強実施の有無が断面決定要因に及ぼす影響

図-9は滑動抵抗補強を実施している断面における断面決定要因の分布を示したグラフである。

図より、分布の割合としては、支持力が71%、滑動が19%、転倒が10%となっており、滑動抵抗補強を実施している断面においては円弧すべりで決定している断面は確認できなかった。本グラフの特徴として、転倒に着目すると、サンプル全体の転倒で決定している断面は図-5より3%であったのに対し、滑動抵抗補強を実施している断面では10%となっており、3倍以上の分布割合となっている。これは、滑動抵抗補強を実施することにより堤体幅を小さくすることができるため、転倒に対して厳しくなる傾向であると推察できる。このことから、滑動抵抗補強を実施する場合には、断面が転倒で決定するケースがあることに注意を要する。

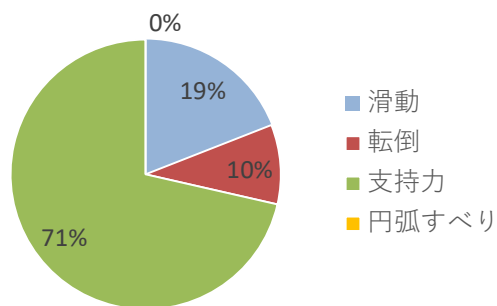


図-9 滑動抵抗補強実施断面における断面決定要因

4. まとめ

本稿では、防波堤の設計を行う際の留意点を取りまとめるため、北海道内の港湾における第一線防波堤を対象とした設計事例解析を実施した。本稿で得られた結論は以下のとおりである。

- (1) 防波堤の構造形式について、混成堤は設計最大波高が8.0m未満の場合に採用されるケースが多く、消波ブロック被覆堤は設計最大波高が8.0m以上の場合に採用されるケースが多い。なお、設計最大波高が4.0m未満の場合には直立堤、傾斜堤、重力式特殊防波堤についても採用対象となるケースがある。

- (2) 防波堤本体工の構造形式について、本体工設置水深が8.0m以深となる場合にはケーソン構造を採用するほうが経済的になる場合が多い。
- (3) 混成堤の堤体幅について、 $2.0\text{m} \leq H_{\max} < 6.0\text{m}$ の場合は本体工高さの1.0倍以上、 $6.0\text{m} \leq H_{\max} < 10.0\text{m}$ の場合は本体工高さの1.2倍以上、 $10.0\text{m} \leq H_{\max} < 16.0\text{m}$ の場合は本体工高さの1.3倍以上必要となっており、これらの値が、混成堤が安定するために必要な堤体幅の指標となる。
- (4) 消波ブロック被覆堤の堤体幅について、 $2.0\text{m} \leq H_{\max} < 6.0\text{m}$ の場合は本体工高さの0.9倍以上、 $6.0\text{m} \leq H_{\max} < 10.0\text{m}$ の場合は本体工高さの1.1倍以上、 $10.0\text{m} \leq H_{\max} < 16.0\text{m}$ の場合は本体工高さの1.2倍以上必要となっており、これらの値が、消波ブロック被覆堤が安定するために必要な堤体幅の指標となる。
- (5) 断面決定要因について、本体工高さ H と堤体幅 B の関係が堤体が安定するボーダーライン近傍になる場合には断面が支持力で決定する場合が多く、堤体幅がボーダーラインより大きい場合には断面が滑動で決定する場合が多い。なお、堤体幅がボーダーラインより小さい場合には断面が転倒で決定する場合があるため注意が必要である。
- (6) 設計最大波高が $6.0\text{m} \leq H_{\max} < 10.0\text{m}$ の範囲であり、かつ防波堤の構造形式が消波ブロック被覆堤の場合は断面が転倒で決定する可能性がある。加えて、滑動抵抗補強を実施する場合には、断面が転倒で決定する割合が高くなるため注意が必要である。

5. おわりに

本稿の事例解析結果により、防波堤の安定に必要な堤体幅を推定するとともに、防波堤の設計を行う際の留意点を明らかにすることができた。ただし、本解析では港湾の第一線防波堤を解析対象としていることから、港内に設置される防波堤や、漁港における防波堤の設計については、今後さらなる解析や検討が必要である。

参考文献

- 1) (公社) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2018.