

北海道の港湾・漁港における 重力式係船岸の設計事例解析

港湾空港部 港湾建設課 ○杉山 直優
船橋 雄大

港湾・漁港の構造物の設計にあたっては、安定性、経済性、施工性等、様々な要因を考慮する必要がある一方、技術者の経験不足により、設計の適否判断に苦慮する状況が生じている。本稿は、道内の重力式係船岸について構造諸元、照査結果の事例解析を実施し、設計断面を感覚的に評価できる指標を提案するものである。本指標は、設計断面を評価する際に注意が必要な条件としての活用が期待できる。

キーワード：港湾構造物の設計、重力式係船岸、事例解析

1. はじめに

港湾・漁港の構造物の設計にあたっては、安定性、経済性、施工性等、様々な要因を考慮する必要がある。また、気候変動の影響を考慮した設計や、洋上風力発電設備の設置及び維持管理の拠点となる基地港としての設計、津波に対する粘り強い構造、技術開発による採用事例が少ない新たな構造の出現等、港湾構造物の設計の幅は時代の変遷に従って広がっている。一方で、技術者の人手不足、特に、熟練技術者の不足により技術が伝承されず、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状況が生じている。

以上の背景から、設計断面を感覚的に評価できる指標の提案を目的に、本道において採用事例の多い港湾・漁港の重力式係船岸を対象に、構造諸元、安定照査結果の事例解析を実施した。

2. 対象データ及び解析方法

事例解析の対象は、本道における重力式係船岸のうち、標準的な構造として幅広く採用されているケーソン式、場所打ちコンクリート式（以降、場所打ちコンと記載）、直立消波ブロック式（以降、直立消波と記載）を対象とした。サンプル数は港湾143件、漁港120件の計263件である。サンプルは係船岸としての用途に使用される主部の断面のみを対象とし、係留箇所には含まれない取付部や護岸部の断面はサンプルから除いた。ただし、同じ施設であっても断面が異なる（A部、B部のように区別している）サンプルについては別のサンプルとして扱った。

事例解析は、港名、海域、施設名、本体構造、マウンドの有無、土圧低減対策の有無、液状化対策の有無、設計水深、堤体壁高、照査用震度、堤体幅、断面決定要因

とそのときの作用耐力比（永続状態及び変動状態、変動状態は地震時のみを対象）、端趾圧と底面反力の分布幅をサンプルごとに整理した一覧表を作成して実施した。なお、設計年次が古いことで一部のデータについて情報が得られなかったサンプルもあった。また、安定照査手法は設計年次により異なるが、最新の基準¹⁾に則り、照査値 ≤ 1 であれば安定となるように数値を編集している。具体には、平成18年度まで採用された安全率法及び、平成19年度～平成29年度まで採用された部分係数法（耐力作用比）を照査値として設計されたサンプル（これらは、照査値 ≥ 1 であれば安定）について、照査値の逆数を作用耐力比とみなした。

重力式係船岸の設計においては、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、係船岸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設計断面を感覚的に評価できる指標を提案する。

3. 事例解析結果及び考察

(1) 現状分析

本節では本道にて整備された係船岸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に対象サンプルを設計水深 h で階層分けした度数分布を示す。横軸の設計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。例えば、設計水深が4.1mのサンプルであれば4.1m～6.1mの階層に積み上げている。なお、グラフでは本体構造別（ケーソン、場所打ちコン、直立消波）に色をわけて示している。

(a) 港湾の度数分布より、構造別のサンプル数はケ

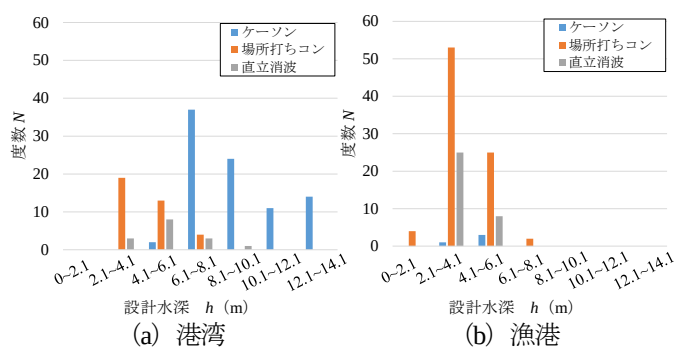


図-1 設計水深別度数分布

ケーソン、場所打ちコン、直立消波の順に多い。ケーソンと場所打ちコンに着目すると、設計水深が6.1m未満の場合は場所打ちが、6.1m以上はケーソンが多くを占めている。また、設計水深が8.1m以上の構造は場所打ちコンの事例が無く、すべてケーソンである。このことから、設計水深が大きくなるほど場所打ちコンよりもケーソンが採用されやすい。これは、設計水深が大きいほど堤体の体積が大きくなり、場所打ちコンの場合は施工にコストを要するため、設計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。

(b) 漁港の度数分布では、場所打ちコン、直立消波、ケーソンの順に多い。港湾とは対照的に、設計水深8.1m以上のサンプルはなく、ケーソンの採用事例が少ない。設計水深ごとに見ると2.1m～4.1mのサンプル数が最も多い。また、設計水深6.1m～8.1mと比較的大きい水深のサンプルも2件あるが、2件ともに計画水深は3.5mであり、地形条件によって設計水深が大きくなっていた。漁港は港湾と比較して設計水深の浅い構造が多いが、これは、対象船舶が異なるためである。

直立消波は港内の静穏度を確保する必要がある場合に採用されるため、港湾・漁港ともに一定数採用されている。また、港湾よりも漁港の方がサンプル数が多いことがわかる。この理由の1つに、漁港の方が港内水域面積が小さく、航跡波などの波浪の影響を受けやすいことが挙げられる。

図-2は場所打ちコンについて設計水深別で示した度数分布であり、港湾と漁港のサンプルを合算したものである。場所打ちコンは1段打ちの構造と多段打ちの構造が見られたため、1段打ちの度数を青色で、多段打ちの度数を橙色で積み上げている。

図より、1段打ちのサンプルは設計水深6.1m未満に、多段打ちのサンプルは設計水深2.1m～8.1mにそれぞれ分布しており、設計水深が小さいほど1段打ちのサンプルが、設計水深が大きいほど多段打ちのサンプルが多く分布している。1段打ちのサンプル数が最も多い階層は設計水深3.1～4.1m、多段打ちのサンプル数が最も多い階層は設計水深5.1～6.1mである。なお、設計水深4.1m～5.1mの階層には1段打ちと多段打ちが混在している。

図-3は地盤改良の有無で区別してサンプルを積み上げ

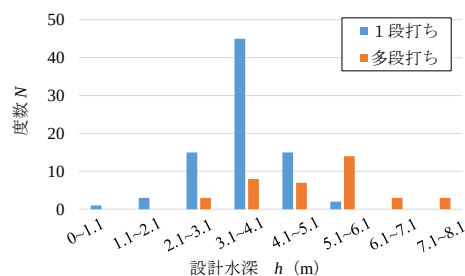


図-2 場所打ちコンの設計水深別度数分布

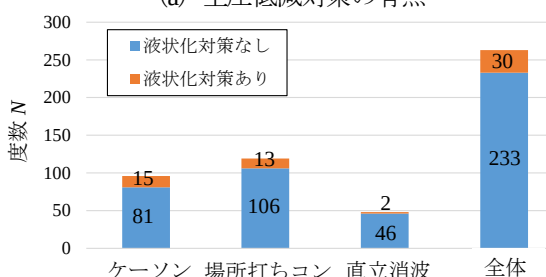
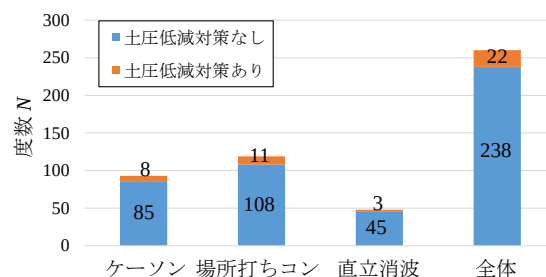


図-3 地盤改良の有無（グラフ内の数字は度数）

たグラフであり、グラフ上の数字はサンプル数である。

(a) 土圧低減対策の有無に着目すると、土圧低減対策を実施しているのは全体の約10%で、構造別ではケーソンと場所打ちコンの割合が同程度であり、直立消波の割合はこれらよりも少ない。土圧低減対策を実施しているサンプルは、22件中21件が改良断面であった。これは、改良断面の設計において最新の基準では安定性が確保されない場合、現場条件等から堤体幅を拡幅できない際に土圧低減対策が実施されていることを示している。なお、土圧低減対策はすべてセメントによる固化改良（22件）であった。

(b) 液状化対策の有無に着目すると、液状化対策を実施しているのは全体の10%強で、構造別ではケーソンが最も割合が多い。液状化対策は置換工法や固化改良、SCPが採用されており、固化改良（15件）、SCP（8件）、置換工法（7件）の順に多い。液状化対策として固化改良が採用されたサンプル15件のうち14件は改良断面であり、土圧低減も目的としていた。

b) 断面決定要因

図-4に港湾・漁港別の断面決定要因を示す。図より、断面決定要因は、港湾、漁港ともに支持力、滑動、転倒、端趾圧、円弧すべりの順に多いことがわかる。港湾、漁港ともに支持力で決定している断面が半数近くある一方

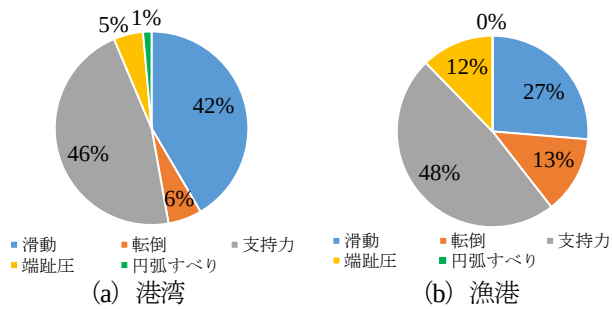


図-4 断面決定要因

で、滑動で決定している断面は港湾で42%、漁港で27%であり、漁港の方が15%少ない。また、漁港は港湾よりも転倒や端趾圧で決定している断面が多い。一方で、円弧すべりについては粘性土地盤の場合にのみ照査対象となることもあり、円弧すべりで決定している断面は極めて少ない。港湾においてわずかに該当するサンプルがあるが、漁港において該当するサンプルはなかった。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、端趾圧を考察対象とする。

(2) 設計断面を感覚的に評価できる指標の提案

本節では、設計断面を感覚的に評価できる指標を提案するために実施した事例解析の考察を行う。なお、特に注釈のない限り港湾、漁港のサンプルを合算して事例解析を実施し、考察を行った。

a) 係船岸の安定照査項目

事例解析結果の考察の前に係船岸の安定照査項目について整理する。図-5に滑動、転倒、支持力、端趾圧による安定照査の概念図を示す。滑動は堤体－基礎間の摩擦力、転倒は堤体前趾まわりのモーメント、支持力は基礎地盤のせん断抵抗、端趾圧は堤体前趾における基礎地盤のせん断抵抗にそれぞれ起因するものであり、外力に対して堤体構造で抵抗するのが滑動及び転倒、外力に対して基礎構造で抵抗するのが支持力及び端趾圧である。

b) 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は照査用震度 k ごとに設計水深 h と堤体幅 B の関係を示したものである。図中のプロットは断面決定要因ごとに色分けしている。なお、本稿における堤体幅の定義は図-7の通りとし、多段打ち構造の場合は最大幅を、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堤体幅と定義した。また、図中の原点を通る直線は設計水深に対して必要な堤体幅のボーダーラインを示している。直線の設定においては統計解析で一般に用いられる有意水準5%を参考に、ボーダーラインを下回るサンプル数が概ね全体の5%以下となるようにした。

図-6より、照査用震度が大きいほどボーダーラインの傾きが大きいことから、照査用震度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、0.05

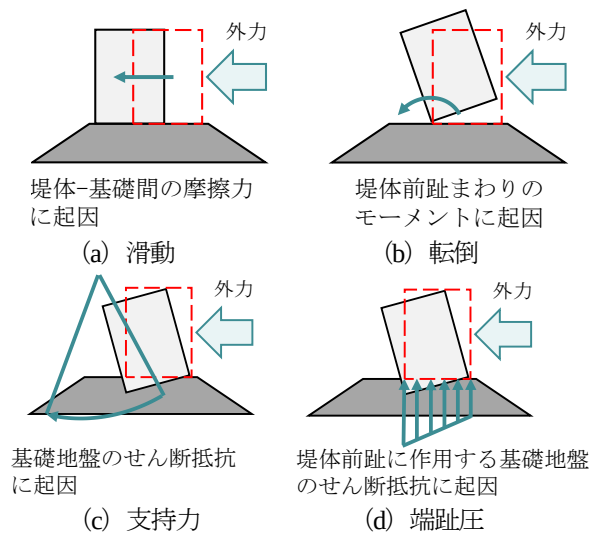


図-5 安定照査の概念図

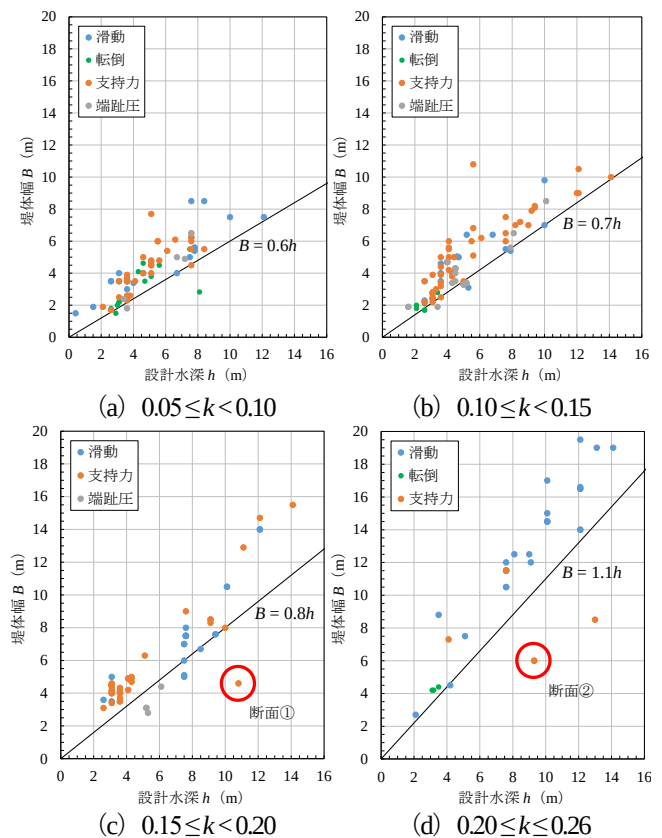


図-6 設計水深 h と堤体幅 B の関係

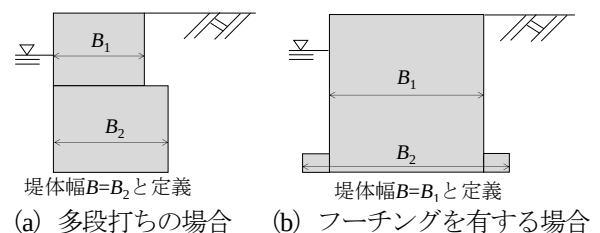


図-7 堤体幅 B の定義

$\leq k < 0.10$ の場合は設計水深の0.6倍以上、 $0.10 \leq k < 0.15$ の場合は設計水深の0.7倍以上、 $0.15 \leq k < 0.20$ の場合は設計水

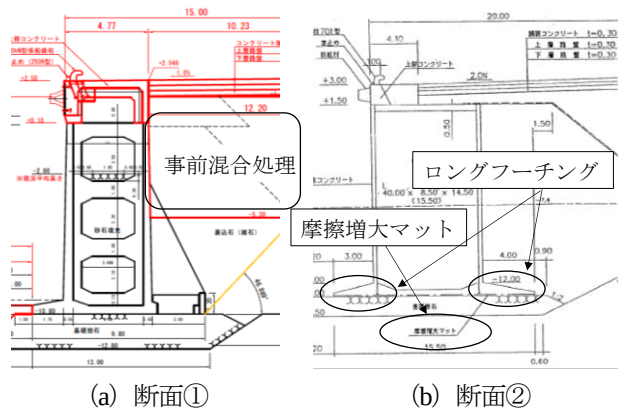


図-8 図-5中に赤枠で示したサンプルの断面図

深の0.8倍以上、 $0.20 \leq k \leq 0.26$ の場合は設計水深の1.1倍以上となっており、これらの値が、堤体が安定するために必要な堤体幅の指標となる。

しかし、図-6中の赤枠で示したプロットのように、ボーダーラインを大きく下回るサンプルも見られる。これらのプロットについて、図-8に示す断面図より、断面①は事前混合処理による土圧低減、断面②は7mのロングフーチングと摩擦増大マットが採用されており、外力の低減や耐力の増大により構造の安定を確保するための対策が取られていた。

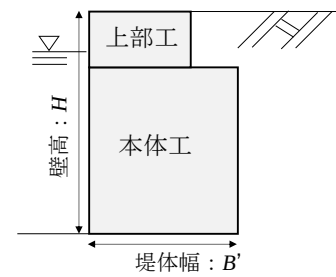
以上より、外力低減対策や耐力増加対策を実施しない標準的な条件での設計断面を図-6に当てはめた結果がボーダーライン近傍に位置する場合は、構造の安定性に注意を要する。

c) 設計水深・照査用震度が断面決定要因に及ぼす影響

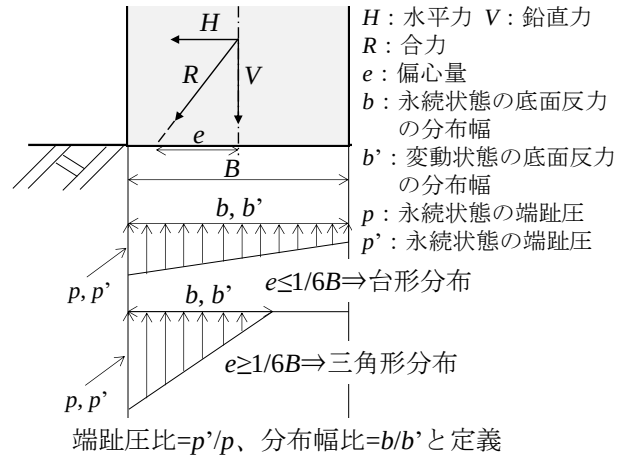
図-6について、断面決定要因に着目すると、 $k < 0.15$ では滑動、転倒、支持力、端趾圧で決定している断面が満遍なく見られるが、 $k \geq 0.15$ では滑動または支持力で決定している断面が多くを占めており、転倒や端趾圧で決定している断面はほとんどないことがわかる。特に、転倒で決定しているサンプルの多くは $h < 6.0\text{m}$ であるとともに、 $k \geq 0.10$ のサンプルに限ると $h < 4.0\text{m}$ にサンプルが集中している。従って、照査用震度が小さいほど、また、設計水深が浅いほど、転倒で決定する断面が多いことがわかる。このことから、図-4に示すように、設計水深が小さい傾向にある漁港の方が港湾よりも転倒で決定する断面の割合が多くなると推察される。

d) 断面決定要因が底面反力に及ぼす影響

本項では、断面決定要因が底面反力に及ぼす影響について考察する。図-9は本項にて定義する堤体幅比 B'/H 、端趾圧比 p'/p 、底面反力の分布幅比 b/b' （以降、単に分布幅比とする）を示したものである。堤体幅比は堤体幅 B' を壁高 H （堤体下端から上部工天端までの高さ）で除した値、端趾圧比は地震時における端趾圧 p' を永続状態における端趾圧 p で除した値、分布幅比 b/b' は永続状態における底面反力の分布幅 b を地震時における底面反力の分布幅 b' で除した値である。なお、堤体幅 B' は、底面反

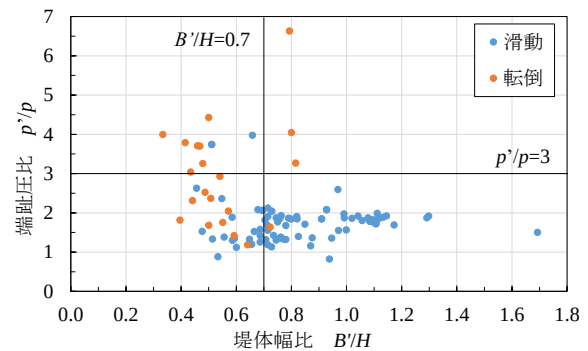


堤体幅比 B'/H と定義
(a) 堤体幅比の定義

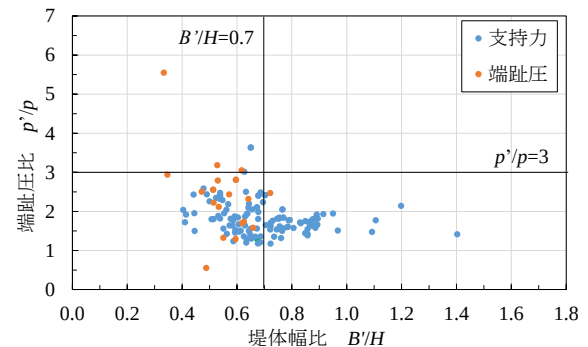


端趾圧比 p'/p 、分布幅比 b/b' と定義
(b) 端趾圧比・分布幅比の定義

図-9 堤体幅比及び端趾圧比・分布幅比の定義



(a) 滑動または転倒で決定する断面



(b) 支持力または端趾圧で決定する断面

図-10 堤体幅比 B'/H と端趾圧比 p'/p の関係

力が作用する範囲を考慮するため、フーチングを含んだ長さ（図-7 (b) 中の B_2 に相当）としている。

図-10に堤体幅比 B'/H と端趾圧比 p'/p の関係を示す。堤体幅比に着目すると、滑動、または支持力で決定する断

面は堤体幅比が約0.4～1.7にかけて幅広く分布している一方で、転倒または端趾圧で決定する断面は堤体幅比が0.7以下の範囲にほとんどのデータが分布している。このことから、堤体幅比が0.7以上であれば転倒や端趾圧で決定する可能性は低く、滑動または支持力が断面決定要因になると示唆される。

端趾圧比に着目すると、滑動及び支持力、端趾圧で決定する断面については、ほとんどのサンプルで端趾圧比が3以下である一方で、転倒で決定する断面は端趾圧比が3以上のサンプルが見られ、最大で7程度になるサンプルもある。このことから、端趾圧比・分布幅比が3以上の断面は転倒で決定すると示唆される。

図-11に分布幅比 b/b' と端趾圧比 p'/p の関係を示す。端趾圧比は「永続に対する地震時の値」であるが、分布幅比と端趾圧比の関係が線形になることを示すために、分布幅比は「地震時に対する永続時の値」とした。一般に地震時の方が永続状態よりも水平方向の外力が増加する。そのため、底面反力の分布幅は小さく、端趾圧の値は大きくなり、分布幅比、端趾圧比ともに1以上になる。また、サンプルがグラフの右上に位置するほど地震時には底面反力の分布幅が小さくなり、端趾圧が大きくなることを示している。

図-11 より、分布幅比が大きくなるほど端趾圧比も大きくなっており、黒実線で記入した $p'/p=1.0*b/b'$ 近傍にサンプルが集中していることがわかる。すなわち、分布幅比と端趾圧比の関係はほぼ1:1（例えば、永続時の分布幅が地震時の2倍 ($b/b'=2$) であれば、地震時の端趾圧は永続時の2倍 ($p'/p=2$) になる。一方で、赤枠や青枠で示すとおり、分布幅比に対して端趾圧比が大きいサンプルも見られる。これらのサンプルは1件を除いて堤体幅比 B'/H が0.7未満であり、壁高に対して堤体幅が小さい傾向にあった。また、赤枠で示したサンプルは照査用震度が0.2以上と大きく、青枠で示したサンプルは照査用震度は大きくないものの、図-12に示す断面図より、H.W.L.=1.6m かつマウンドがない岩着構造であり、残留水位が1.07mと大きかった。このことから、堤体幅が小さく、照査用震度や残留水位が大きい条件では地震時の外力が大きくなるため、分布幅比に対して端趾圧比が大きくなると推察される。

また、係船岸の設計では偏心率（底面反力の分布形状）の規定はないが、擁壁の安定照査²⁾では偏心率が規定されており、永続時の偏心率は堤体底面幅（以下、底面幅とする）の1/6以下（すなわち、台形分布）、地震時の偏心率は底面幅の1/3以下にする必要がある。これを踏まえ、図-13に分布幅が判明しているサンプルについて断面決定要因と永続状態における底面反力の分布形状の関係を示す。図は、各断面決定要因における台形分布及び三角形分布の割合をグラフ、度数を表に示している。

図より、滑動、支持力、端趾圧で決定している断面は台形分布の割合が80%を超えている一方で、転倒で決定

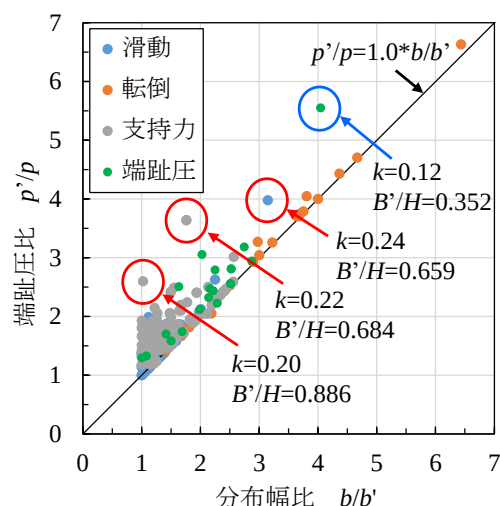


図-11 底面反力の分布幅比 b/b' と端趾圧比 p'/p の関係

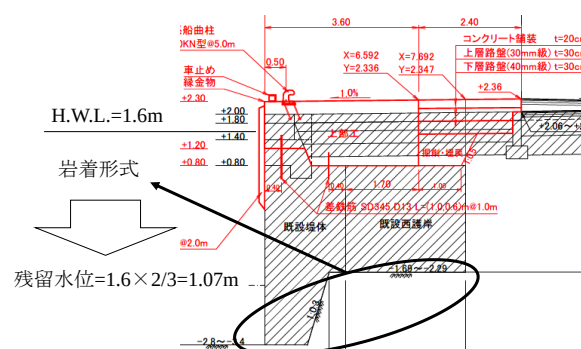


図-12 図-11中に示した青枠のサンプルの断面図

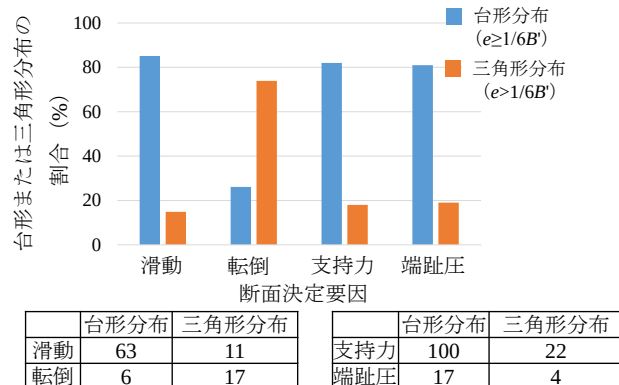


図-13 断面決定要因と永続状態における底面反力の分布形状の関係

している断面の台形分布の割合は30%未満であり、70%を超える断面が三角形分布であった。また、転倒で決定する断面23件について、地震時の偏心率が $B'/3$ 以上となるサンプルを算出したところ18件が該当し、約80%を占める結果となった。以上より、転倒で決定する断面は偏心率が大きくなり、擁壁工の安定照査規定に基づく断面が成立しない可能性が高い。

以上の考察から、転倒で決定する断面は堤体幅比が小さい傾向にあり、①端趾圧比が他の断面よりも大きくなる、②擁壁の安定照査に基づいて偏心率の照査を実施す

ると断面が成立しない可能性が高いと判明した。このことから、転倒で決定する断面は安定性に対する余裕が少ないと考えられる。そのため、設計条件を上回る外力が作用する可能性がないか（例えば、施工時の外力条件が完成時よりも大きくないか等）精査することや、堤体幅の増加等、余裕を持った設計断面を検討することが重要になると考えられる。

e) 設計断面を感覚的に評価可能な指標

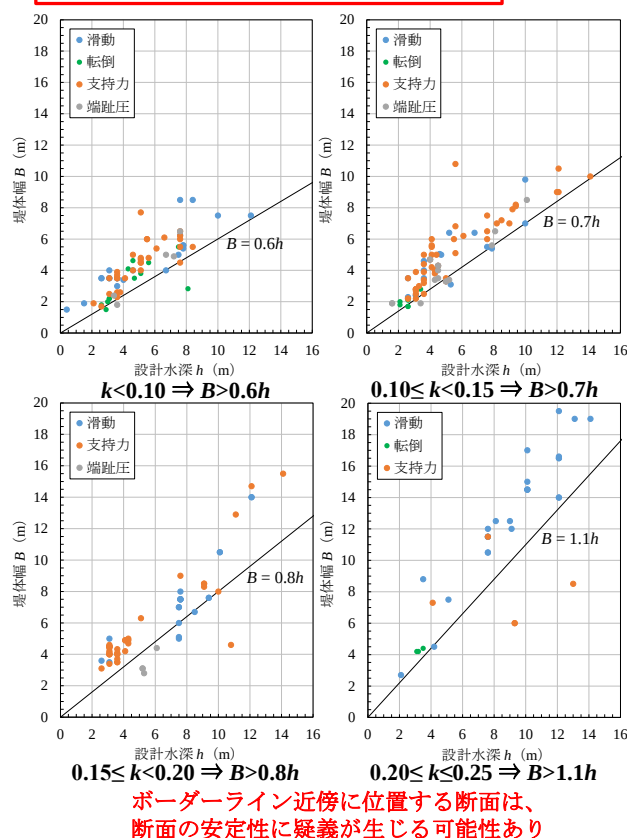
a)～d)にて論述した事例解析の考察をもとに、設計断面を感覚的に評価できる指標を図-14のとおり提案する。本指標は3つの指標から構成される。1つ目は構造が安定するために設計水深に対して必要な堤体幅であり、設計水深と堤体幅の関係がボーダーライン近傍に位置している場合は断面の安定性に疑義が生じる可能性を示している。2つ目は設計水深や堤体幅比等から断面が転倒で決定する可能性を推定する指標であり、転倒で決定する可能性がある場合には設計に注意を要することを示している。3つ目は設計計算で求めた断面をこれまでの設計事例と比較する指標であり、これまでの設計事例と異なる傾向が認められる場合には、設計計算が誤っている可能性を含め注意を要する。本指標は、設計断面を評価する際に注意が必要な条件としての活用が期待できる。

4. まとめ

本稿では、設計断面を感覚的に評価できる指標を提案するために、本道において採用事例の多い港湾・漁港の重力式係船岸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) 堤体幅について、 $0.05 \leq k < 0.10$ の場合は設計水深の0.6倍以上、 $0.10 \leq k < 0.15$ の場合は設計水深の0.7倍以上、 $0.15 \leq k < 0.20$ の場合は設計水深の0.8倍以上、 $0.20 \leq k \leq 0.26$ の場合は設計水深の1.1倍以上となっていた。このことから、これらの値が堤体の安定に必要な堤体幅の指標となる。
- 2) 転倒で決定する断面は① $h < 6.0\text{m}$ または、 $k \geq 0.10$ の場合は $h < 4.0\text{m}$ 、② $B'/H > 0.7$ 、③ $p'/p > 3$ にサンプルが集中していた。このことから、これらの値が転倒で断面が決定する条件の指標となる。
- 3) 分布幅比と端趾圧比の関係は概ね1:1になることが分かった。しかしながら、堤体幅が小さい断面で照査用震度や残留水位が大きい条件では、地震時に作用する外力が大きくなるため、分布幅比に対して端趾圧比が大きくなると推察される。
- 4) 事例解析結果をもとに、設計断面を感覚的に評価できる指標を図-14のとおり提案した。本指標は、①構造が安定するために設計水深に対して確保すべき堤体幅の指標、②設計水深や堤体幅比から断面が転倒で決定する可能性を推定する指標、③設計計算で求めた断面をこれまでの設計事例と比較する指標で構

①断面成立条件：設計水深に対して必要な堤体幅



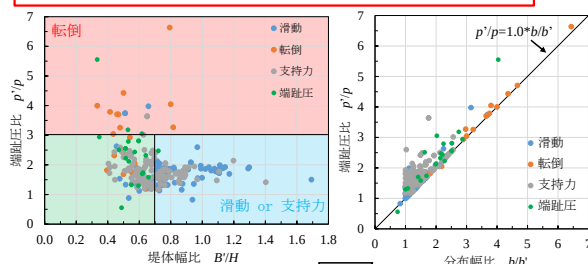
②転倒で決定する可能性の推定

1. $h < 6.0\text{m}$ または、 $k \geq 0.10$ かつ $h < 4.0\text{m}$
2. $B'/H > 0.7$
3. $p'/p > 3$

いずれか1つでも満たす場合は転倒で決定する可能性

転倒で決定する断面は、設計条件を上回る外力が作用する可能性がないか精査したり、堤体幅の増加等、余裕を持った設計断面を検討することが重要！

③設計計算で求めた断面をこれまでの設計事例と比較する指標



これまでの設計事例と傾向が異なる場合は、設計計算に誤りがある可能性

堤体幅比が0.7以上にみかかわらず、端趾圧比が3以上になっていないか？ また、転倒で決定していないか？

分布幅比と端趾圧比の関係が1:1近傍か？ 1:1近傍でない場合、照査用震度や残留水位が大きくなっているか？

図-14 設計断面を感覚的に評価できる指標

成される。本指標は、設計断面を評価する際に注意が必要な条件としての活用が期待できる。

参考文献

- 1) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，2018。
- 2) 日本道路協会：道路土工・擁壁工指針，2012，pp.116-118。