

# 港湾・漁港施設の設計手法に関する検討について

港湾空港部 港湾建設課 水口 陽介  
岩田 真  
農業水産部 水産課 林 誉命

港湾・漁港施設の設計では、関係する各技術基準をもとに、安全性、利用性等施設に求められる性能を満足させ、かつ、経済性、施工性、維持管理性等において最適な断面諸元を決定する。一方、既存施設の延命化や施設の目的の多様化、性能設計体系の導入、公共事業予算の縮減や環境への配慮等の社会情勢など、設計への要請が変化し、複雑化する中で種々の課題が生じている。本報は、港湾・漁港施設の設計に関する諸課題への取り組みについて報告するものである。

キーワード：設計・施工、矢板式係船岸、既設改良、性能設計

## 1.はじめに

港湾・漁港施設の設計は、「港湾の施設の技術上の基準」（以下、港湾基準）及び「漁港・漁場の施設の設計の手引き」をはじめ、関係する各技術基準に基づき行っている。これら技術基準に記述のない、あるいは地域特有の事項等については、模型実験による検証や各種の文献等を参考とするほか、これまでの経験や実績に照らして判断することも多くある。こうした技術基準や知見をもとに、安全性、利用性等施設に求められる性能を満足させ、かつ、経済性はもとより、施工性、維持管理性等においても最適となるよう十分に検討、比較の上、最終的な断面諸元を決定する。

港湾・漁港ではこれまで、港の拡充の経過において防波堤や岸壁を中心とした多くの施設が建設され、これとともに設計理論や手法等が確立、整備されてきた。一方、近年、施設ストックの増大とともに老朽化施設が増加しており、今後、こうした既存施設の延命化や改良を積極的かつ効率的に実施していくことが重要な課題となっている。また、屋根付岸壁に代表されるように、防波堤や岸壁といった基幹施設の高質化等、施設の整備目的が多様化している。

平成19年4月、港湾基準は全面的な見直しが行われ、従来の仕様規定型設計法に代わって性能規定型設計法が導入された。施設に求められる性能のみを規定し、結果に至るプロセスを規定しない性能規定型への移行に伴い、自由な発想に基づく設計法の導入等、多様な創意工夫が可能となり、コスト縮減の取り組みの進展等が期待されている。

厳しい財政状況の下、公共事業予算が縮減する中で、低コストで高品質な施設をより一層追求していくことが

求められている。また、施設の建設や改良に際しての環境への配慮（環境負荷の低減）といった社会的要請もある。

本報では、港湾・漁港施設やその設計を取り巻く情勢や諸課題に対する取り組みについて報告する。

## 2.検討項目の選定

港湾・漁港施設の設計は、関係する各技術基準をもとに、利用性や施工性等において最適な断面諸元を決定している。しかしながら、自然条件や現地条件の不一致に起因するものをはじめ、設計と施工に不整合が生じる場合がある。一方、各技術基準に記述のない事項等についてはこれまでの経験や実績に照らして判断することが多い。また、今後、老朽化施設が増加していく中で、既存施設を有効的に活用していくことも重要である。

こうした諸課題の解決に向けて、「既設改良」、「性能設計」、「設計・施工」の3つの視点のもと、以下の取り組みを行うこととした。「既設改良」では、既存施設を有効的に活用していくための検討として、既設構造物の前面に新設堤体を築造する場合の土圧に関する検討を行う。「性能設計」では、経験的に用いている設計方法の検証として、矢板式係船岸における控え工の許容変形量に関し、施設に求められる要求性能の観点からの検討を行う。「設計・施工」では、施設の施工段階で発生している課題の1つである矢板式係船岸の上部工下端の高さに関し、今後の検討に向けた前段として、現場実態を把握するためのアンケート調査を行った。

### 3. 既設構造物の前面に新規の構造物を築造する場合の土圧に関する検討

#### (1) 検討目的

係留施設の改良において、既設構造物の前面に新規の構造物を築造する場合がある。この場合の新設堤体に作用する土圧は、図-1 に示すように、既設堤体の天端から引いた主動崩壊線が新設堤体に交わった位置よりも深い部分で一定とする考え方がある。背後の既設堤体が安定している状態では、既設堤体との間に介在する土塊のみが主動土圧として施設堤体へ作用すると考えられるためである。

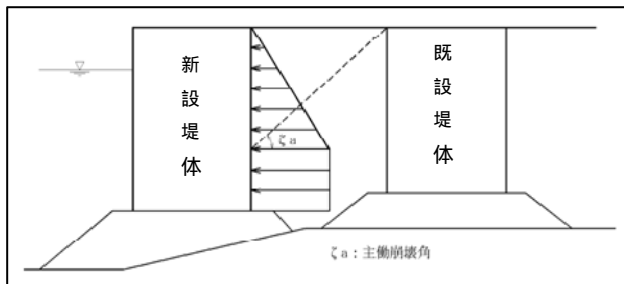


図-1 既設堤体が安定している場合の新設堤体に作用する土圧分布の模式図

しかし、実際の地震時における土圧は、土の非線形挙動や壁体と土の相互作用など難しい問題を含んでおり、既設堤体がどのように挙動するかといった問題も含め、技術的な根拠が明確となっていない。このため、安全側をみて、既設堤体の効果を無視し、通常の主動土圧を考慮する方法が採用される場合が多い。この既設堤体による新設堤体への土圧低減効果を見込むことが出来れば、新設堤体の幅が縮小でき、前面に築造する新設構造物のコスト縮減が図られることとなる。

#### (2) 検討方法等

##### a) 検討方法

一般の構造物に対する地震時の照査では、地震力を静的な外力に置き換えて、力の釣り合いの問題として検討している。しかし、実際の地震時における埋土や構造物の挙動は非常に複雑であり、加えて、本検討課題では既設堤体の挙動による影響の問題もある。このため、基礎地盤や埋土、既設堤体を含めた地盤 - 構造物系全体の挙動について解析可能な動的詳細解析によって検討を行うこととした。なお、動的詳細解析によって算定される地震時の土圧や動水圧は応答解析の結果として得られるものであり、土圧理論上から計算される土圧とは異なる。このため、既設堤体による効果を地震後の新設堤体の残留変位において評価を行うこととした。

##### b) 解析モデルの設定

動的詳細解析は、有限要素法に基づく有効応力解析プログラム FLIP<sup>1)</sup> (以下、動的解析) を用いる。この手法

は重力式係船岸等への適用性が過去の被災事例などにより確認されており、港湾施設の耐震性能照査において多く使用されている。動的解析の解析条件を表-1 に示す。新設堤体の諸元は、既設構造物の前面に新規の構造物を築造したこれまでの事例等を勘案の上水深-5.0mとし、部分係数法に基づき算定した。図-1 に示した考え方は、既設堤体が安定している (既設堤体背後の土圧を受け持てる) と見なせる場合において採用している。このため、既設堤体は十分安定するように設定した。照査用震度を算定する際の許容変形量は、重力式係船岸のレベル1地震動に対する標準値である 10cm として設定した。

地盤モデルを図-2 に示す。動的解析の結果は地盤条件の設定によって大きく左右される。ここでは、比較的一様な地盤条件である T 港を想定して設定した。なお、液状化は発生しない条件としている。

表-1 解析条件

構造形式	重力式 (捨石マウンド)
設計水深	-5.0m
照査用震度(khk)	0.14
許容変形量(Da)	10cm
L1地震動(基盤最大加速度)	147.88Gal

	標高(m)	N値	湿潤密度(γ)	内部摩擦角(φ)
埋土(気中)	3.0	3	18.0	32.0
	0.6			
埋土(水中)	-5.0	3	10.0	31.0
第1砂質土	-5.0	11	10.0	32.0
	-14.5			
粘性土	-14.5	16	7.8	33.0
第2砂質土	-20.1	48	10.0	34.0
	-27.9			
工学的基盤	-27.9	48	10.0	

図-2 動的解析に用いる地盤モデル図

##### c) 検討ケース

検討ケースの設定条件及び堤体幅を表-2 に、動的解析における解析モデルを図-3~5 に示す。

検討ケースは、新設堤体の背後に既設堤体が存在しない場合と、背後に既設堤体が存在する場合に、土圧低減効果を見込まない及び見込むという計3ケースを設定した。なお、既設堤体と新設堤体との距離は、土圧低減効果が期待出来るよう、主動崩壊角を考慮して 4m と設定した。

表-2 各検討ケース毎の設定条件及び堤体幅

検討ケース	設定条件		堤体幅(m)	
	既設堤体	土圧低減	新設	既設
1	無	無	7.3	—
2	有	無	7.3	8.0
3	有	有	6.6	8.0



図3 モデル断面（検討ケース1）

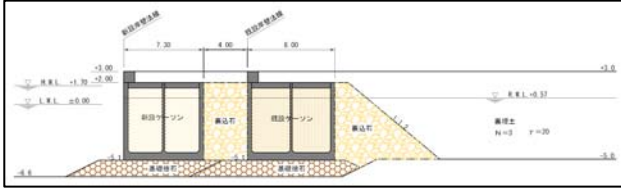


図4 モデル断面（検討ケース2）

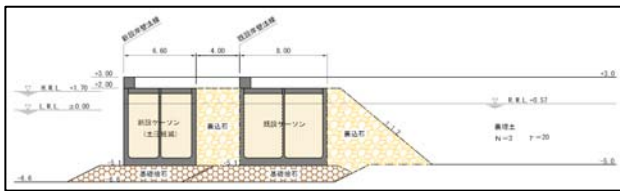


図5 モデル断面（検討ケース3）

### (3) 検討結果

各検討ケースの動的解析結果を表-3 に示す。なお、変位については新設堤体前面の上部工天端位置の値を示している。

表-3 各検討ケースの動的解析結果（変位）

検討ケース	最大変位(cm)	残留変位(cm)
1	7.31	5.37
2	5.10	3.32
3	5.78	3.96

検討ケース1は、背後に既設堤体が無い標準的なケースであり、新設堤体の幅は通常地震時土圧により決定している。発生した残留変位は5cm程度となり、照査用震度を算定する際に設定した許容変形量である10cm以下となった。

検討ケース2では、新設堤体の背後に既設堤体が存在するが、新設堤体の諸元には既設堤体による土圧の低減効果を考慮していない。つまり、新設堤体の幅を算定する際の土圧はケース1と同じ（よって堤体幅も同じ）となるが、動的解析モデルにおいて既設堤体を設定（考慮）している点が異なる。ケース1と比較すると残留変位が3cm程度と小さくなり、既設堤体の効果によって残留変位が抑制されたことが分かる。

検討ケース3は、図-1に示した既設堤体による土圧の低減効果を見込んで新設堤体の諸元を設定したケースである。ケース2に比べ新設堤体の幅が70cm小さくなった。堤体幅が小さくなった分、残留変位はケース2に比べ若干大きくなったものの、ケース1よりは小さく、許

容変形量として設定した10cm以下となり、施設の供用に影響を及ぼす程の被害は発生しない（耐震性能を満足している）結果となった。

地盤をはじめとした諸条件が変われば当然得られる結果も異なるが、今回の検討結果から、条件によっては、安定した既設堤体の前面に新設堤体を築造する場合に土圧の低減効果を考慮して新設堤体の断面諸元を決定できることが分かった。今後、個々の施設の設計段階においてこうした検討を行うことで、コスト縮減が図られる可能性が示された。

## 4. 矢板式係船岸における控え工の許容変形量の検討

### (1) 検討目的

矢板式係船岸の変位抑制を目的として、控え工の変位を規定する方法が経験的に用いられてきた。控え工の変位は前面の矢板の変位に直接影響を与えるためである。一方、平成19年に性能規定型へ改訂された港湾基準では、岸壁の要求性能として「自重、土圧、レベル1地震動等の作用による損傷等が、当該岸壁の機能を損なわず継続して使用することに影響を及ぼさないこと」（使用性）が定められている。すなわち、わずかな修復により速やかに所要の機能が発揮できる程度の損傷（変位）を許容している。設計実務においては施設の許容変形量に対応した震度（照査用震度）を用いることで間接的に変形量を評価している。矢板式係船岸におけるレベル1地震動に対する許容変形量の標準値は15cmとされている。15cm程度の変位では、矢板や控え工等の部材は降伏に達しない。<sup>2)</sup>また、控え工の変位も含めた施設全体としての変位が15cm以下であれば、供用に影響を及ぼさないものとして設定されている。

これまでの控え工の変位を規定する方法では、控え工の部材の断面性能を上げる必要があることから建設コストは大きくなる。しかしながら、過去の被災事例等を踏まえて用いられてきた規定を除外し、控え工を既往よりもスリムとすることは、施設の要求性能の確保に懸念が残る。このため、矢板式係船岸における控え工の変位の規定について検討を行うこととした。

### (2) 検討方法等

#### a) 検討方法

第3章に記した土圧低減の検討と同様に、有効応力解析プログラムFLIP（動的解析）を用いて矢板式係船岸の変位に着目した検討を行う。なお、今回は矢板式係船岸を対象とするため、築堤解析の利用により初期状態の再現が可能な4段階法を用いている。

#### b) 解析モデルの設定

本検討における動的解析の解析条件を表-4に示す。

本検討では、近年の施工事例等を勘案の上控え工を直杭式とし、設計水深（壁高）によって照査用震度の大き

さが異なることを踏まえ、2段階の設計水深において検討を行うこととした。なお、今後控え矢板式についても検討を行う予定としている。

地盤モデルは第3章同様に、比較的一様な地盤条件であるT港を想定して設定した。(図-6)

表-4 解析条件

構造形式	矢板式係船岸(控え直杭式)	
設計水深	-5.5m	-10.0m
照査用震度(khk)	0.11	0.15
許容変形量(Da)	15cm	
L1地震動(基盤最大加速度)	147.88Gal	

	標高(m)	N値	湿潤密度(γ)	内部摩擦角(φ)
埋土(空中)	3.4	5	18.0	33.0
	1.3			
埋土(水中)	-5.0	5	10.0	31.0
第1砂質土	-15.0	10	10.0	32.0
第2砂質土	-30.0	10	10.0	33.0
第3砂質土	-50.1	20	10.0	32.0
工学的基	-50.1	50	10.0	

図-6 動的解析に用いる地盤モデル図

c)検討ケース

既述した2段階の設計水深毎に控え工の変位規定の条件から表-5に示す4つの検討ケースを設定した。

表-5 検討ケースと各種設定条件

検討ケース	設計水深(m)	控え工の変位規定
1-1	-5.5	規定する
1-2		規定しない
2-1	-10.0	規定する
2-2		規定しない

各検討ケースの堤体諸元は、部分係数法に基づき設定した。なお、ケース1-1及び2-1における控え工の許容変形量は、これまで慣用的に用いてきた、表-6に示す直杭式の値を使用した。

表-6 控え工の許容変位量

控え工の形式	常時	異常時
矢板式	1cm	1cm
直杭式	2cm	3cm

検討ケース1、2における各部材の照査結果を表-7、8に、それぞれの断面図を図-7~10に示す。部材照査の結果から、本體工は、ケース1では鋼矢板、ケース2では鋼管矢板構造を採用した。図-7と図-8、図-9と図-10を見比べると、変位の規定の有無によって控え工の諸元が大きく異なることが分かる。

表-7 部材の照査結果(検討ケース1)

部位	項目	検討ケース1-1(変位を規定する)		検討ケース1-2(変位を規定しない)	
		SP-IIIw(SY295)	238.8≤295	SP-IIIw(SY295)	238.8≤295
本體工	降伏応力				
	根入れ長	L=15.50m	-13.50m	L=15.50m	-13.50m
タイ材	降伏応力	φ48mm(HT690)	425.6≤440	φ48mm(HT690)	425.6≤440
	長さ	c.t.c.=2.40m	L=15.30m	c.t.c.=2.40m	L=14.60m
腹起し	降伏応力	[-250×90×90×13](SS400)	200.1≤235	[-250×90×90×13](SS400)	200.1≤235
	変位	φ900×t9(SKK400)	1.77≤2.0	φ600×t9(SKK490)	4.886
控え工	降伏応力	(SKK400)	138.7≤235	(SKK490)	291.6≤315
	根入れ長	L=14.20m	-12.20m	L=13.10m	-11.10m

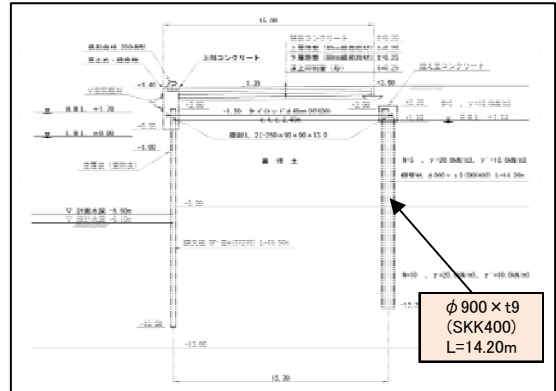


図-7 モデル断面(検討ケース1-1)

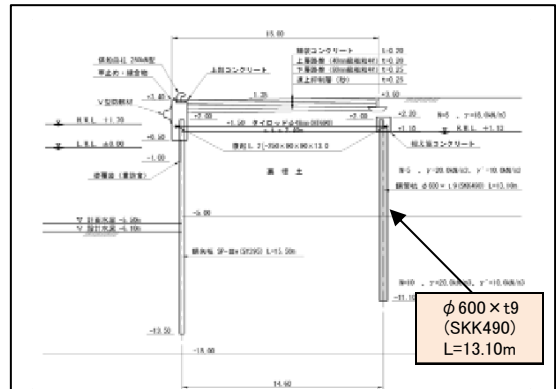


図-8 モデル断面(検討ケース1-2)

表-8 部材の照査結果(検討ケース2)

部位	項目	検討ケース2-1(変位を規定する)		検討ケース2-2(変位を規定しない)	
		φ1000×t11(SKY490)L=25.80m	305.0≤315	φ1000×t11(SKY490)L=25.80m	305.0≤315
本體工	降伏応力				
	根入れ長	(SKY490)L=25.80m	-23.80m	(SKY490)L=25.80m	-23.80m
タイ材	降伏応力	φ75mm(HT690)	408.9≤440	φ75mm(HT690)	408.9≤440
	長さ	c.t.c.=2.496m	L=25.10m	c.t.c.=2.496m	L=23.60m
腹起し	降伏応力	[-380×100×10.5×16](SS400)	191.7≤235	[-380×100×10.5×16](SS400)	191.7≤235
	変位	φ1300×t14(SKK400)	1.98≤2.0	φ900×t11(SKK490)	7.06
控え工	降伏応力	(SKK400)	121.4≤235	(SKK490)	291.5≤315
	根入れ長	L=19.70m	-17.70m	L=17.50m	-15.50m

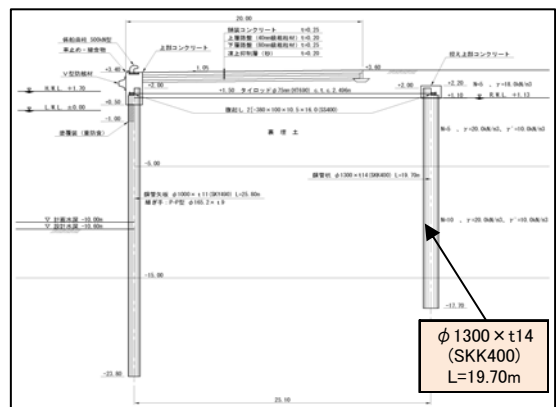


図-9 モデル断面(検討ケース2-1)



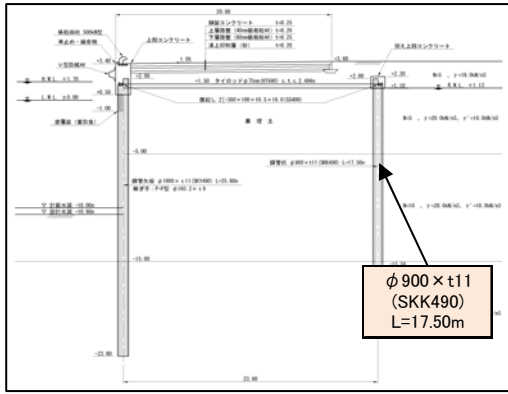


図-10 モデル断面 (検討ケース2-2)

(3) 検討結果

解析結果の一例として、検討ケース 1-1 の動的解析後のモデル図を図-11 に示す。施設の前面側及び天端部に変位が発生している状況が分かる。

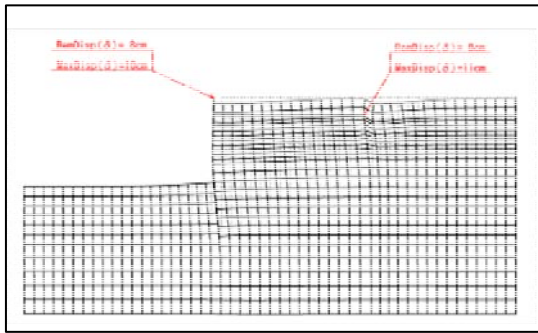


図-11 動的解析結果のモデル図

各検討ケースにおいて本体工及び控え工に発生した変位を表-9 に示す。

検討ケース 1-1 及び 1-2 の本体工の残留変位に着目すると、ケース 1-1 に比べ、控え工の変位を規定しないケース 1-2 では 12cm 程度と大きくなっている。しかし、許容変量として設定した 15cm 以下には納まる結果となった。検討ケース 2-1 と 2-2 の比較も同様である。なお、ケース 1 と 2 を見比べると、設計水深の深い(壁高の高い)ケース 2 の方が残留変位が小さいが、これは本体工が鋼管矢板であるために剛性が高いことによるものと考えられる。また、控え工の変位に着目すると、いずれの検討ケースにおいても、本体工の変位に追従する形で本体工と同程度の変位が発生することが分かった。

表-9 各検討ケースにおける発生変位量

検討ケース	構造	最大変位(cm)	残留変位(cm)
1-1	前面矢板	10.44	7.77
	控え直杭	10.90	8.40
1-2	前面矢板	15.14	12.18
	控え杭	15.20	12.45
2-1	前面鋼管矢板	8.08	5.24
	控え杭	8.20	5.61
2-2	前面鋼管矢板	9.34	6.54
	控え杭	9.31	6.76

第 3 章での検討と同様に、本検討においても諸条件が変われば得られる結果も異なるが、今回の検討結果から、条件によっては、控え工の変位を規定しなくても施設の供用に影響を及ぼすような被害は発生しないことが分かった。

今後は異なる地盤条件や同様に変位を規定していた控え矢板式の場合等について引き続き検討を行う必要があると考えている。

5. 矢板式係船岸の上部工下端の高さに関する検討

(1) 検討目的

矢板式係船岸における上部工下端の高さは、±0.0m～平均水面(以下、M.S.L.)の範囲で設定するケースが多い。小型船に供される係船岸等、利用上から天端(上部工上端の高さ)を低くする必要がある場合や防舷材等の附属工設置の都合、矢板の防食の観点等、上部工下端を高くし難い要因も多くある。

一方、施工者からは、潮位や風波の影響により上部工の施工に支障がある、潮待ち等の対応に苦慮しているといった意見が多く聞かれ、改善を要望されている。

施工性に対する考慮も設計を行う上で重要な検討事項である。このような設計と施工の隔たりといった課題を検討していく前段として、実態把握のためのアンケート調査を行った。その概要について報告する。

(2) 施工実態の把握調査の概要

矢板式係船岸の上部工の下端高さを検討するにあたり、現場実態を目的として、約90社の建設業者に対してアンケート調査を行った。

アンケート調査の対象施設は港湾・漁港における矢板式係船岸とし、主な項目は矢板式係船岸の施工経験、施工時に発生した問題、上部工下端の高さ、上部工の施工時期等とした。

アンケート調査により得られた回答数は45件で、そのうち港湾・漁港における矢板式係船岸の施工経験が「ある」という回答数は21件であった。

(3) 施工実態の把握調査の結果

施工経験が「ある」との回答を得た 21 件のうち、潮位等の影響による支障の有無という問いに対して、「支障があった」との回答は 17 件であった。一方、「支障はなかった」との回答であった 4 件は、今回の検討対象としている一般的な矢板式構造ではなく、上部工下端の高さが M.S.L.よりも高い事例等であった。これを踏まえると、一般的な矢板式係船岸では多くの場合で上部工の施工に支障があることが分かった。また、施工時に発生した問題の内容としては、「上部工下端の高さが低いため、上部コンクリートの打設時などに潮待ちが必要となった」、「潮待ち等のために夜間作業を行う必要が生じ

る」といった工程管理や「コンクリート打設時の漏洩対策や鉄筋の防食対策が必要」といった品質管理に関して課題があるという回答で主であった。

次に、施工を行った施設の上部工下端の高さに関する回答を図-12に示す。「支障があった」事例において上部工下端の高さは±0.0m～+0.5mであった。また、今回の調査結果の中で上部工下端の高さを M.S.L.以上に設定している事例はなかった。

上部工の施工時期に関する回答を図-12に示す。「支障があった」事例において第3～4四半期に施工を行ったという回答が多かった。

各海域毎の潮位の特徴を把握するために、日中(7:00～19:00)に潮位が M.S.L.より8時間以上低くなる日数を気象庁の潮位データからとりまとめた結果を図-13に示す。海域毎に日中に潮位が M.S.L.よりも低くなる日数は異なるが、特に太平洋においては全体的に日数が少なかった。また、アンケート結果にて事例が多かった第3～4四半期に着目すると、オホーツク海及び太平洋では日中に潮位が M.S.L.よりも低くなる日数が特に少なく、上部工の施工が秋～冬期となる場合は、支障が発生する可能性が高いと推測される。

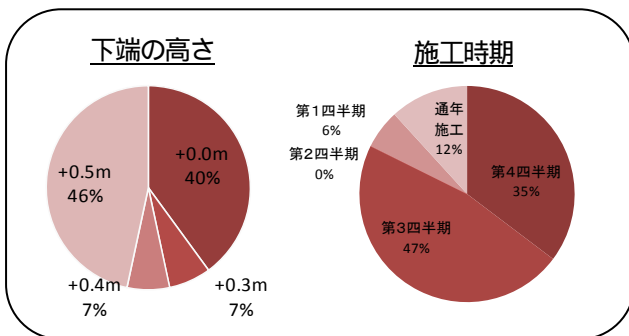


図-12 支障があった上部工下端の高さ及び施工時期

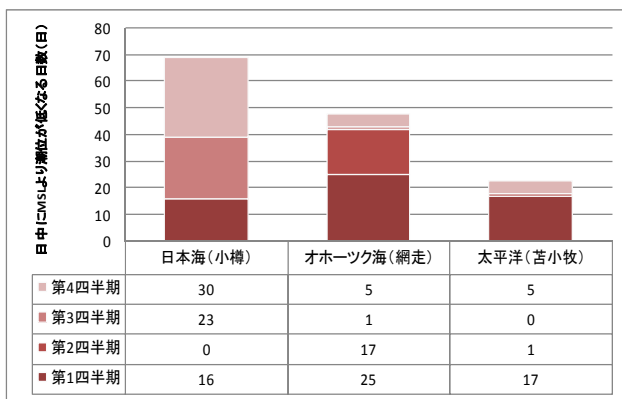


図-13 四半期別における各海域の潮位とMSLの関係

今回の調査結果から、矢板式係船岸の上部工下端の高さに関して施工上の課題があることがあらためて明らかとなった。今後、アンケート結果についてさらに詳しく分析した上で、設計、施工両面からの対応策について検討を行っていく。設計面では、例えば、上部工下端の高さを高くした場合の構造やコストへの影響についての検討を考えている。

## 6. おわりに

本報では、港湾・漁港施設の設計に関する諸課題への取り組みとして、3項目の検討等を行い、以下の結果を得た。

(1) 既設構造物の前面に新規の構造物を築造する場合、既設堤体が安定した状態であれば、地震時に生じる新設堤体の変位が抑制されることを確認した。条件によっては、既設堤体による土圧低減効果を考慮して新設堤体の断面諸元を決定できることが分かった。

(2) 矢板式係船岸における控え工(直杭式)の変位量を規定しない条件で設計を行うと、規定した場合に比べて施設に生じる残留変位は大きくなるが、許容値である15cm以下の変位に納まることを確認した。条件によっては、控え工の変位を規定しないことで、規格が小さくなりコスト縮減につながる可能性がある。

(3) 矢板式係船岸の上部工下端の高さに関して、施工上の課題があることがあらためて明らかとなった。なお、今後、設計、施工両面からの対応策について検討を行っていく。

本報では、港湾・漁港施設に生じている各種課題に対する取り組みについて報告したが、今回の項目以外にも課題はまだ存在している。また、設計に求められる要求は、今後、より一層複雑化していくと思われる。

今後も求められる各種要請に対し設計段階からも検討していくことが、引き続きなお重要である。

## 参考文献

- 1) 港湾構造物設計事例集、平成19年3月、(財)沿岸技術研究センター P5-3
- 2) 港湾の施設の技術上の基準・同解説、平成19年7月、(社)港湾日本港湾協会 P994