

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of
National Institute for Land and Infrastructure Management

No.1021

March 2018

重力式係船岸の増深改良を事例とした 改良工法検討の検証（その1）

田端優憲・宮田正史・水谷崇亮・松村聡・鍵本慎太郎

Verification of basic concepts of reformation design of existing mooring facilities based
on reformation construction methods of gravity type mooring facilities

Masanori TABATA, Masafumi MIYATA, Takaaki MIZUTANI, Satoshi MATSUMURA,
Shintaro KAGIMOTO

国土交通省 国土技術政策総合研究所

National Institute for Land and Infrastructure Management
Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Japan

重力式係船岸の増深改良を事例とした改良工法検討の検証（その1）

田端優憲*・宮田正史**・水谷崇亮***・松村 聡****
・鍵本慎太郎*****

要 旨

既存係留施設の改良設計は、既存構造物の活用と追加構造物の利用を計画することが多く、新規施設の設計に比べて複雑な断面となり、考慮すべき事項が多い。改良設計を円滑に進めるために、前報（国総研資料No.996）では、「改良工法選定の基本的な考え方」および改良工法の性能評価を行うための検討手順を「改良設計の基本的な考え方」として示している。

本検討では、「改良工法選定の基本的な考え方」および「改良設計の基本的な考え方」に基づき、既存の重力式岸壁の増深改良を具体事例として、改良工法の候補選定および改良断面の性能評価の基礎検討を行い、これら2つの基本的な考え方の妥当性の確認および改善点の抽出を行った。

キーワード：既存施設，重力式係船岸，改良設計，改良工法，工法選定

* 港湾研究部 港湾施設研究室 交流研究員（株式会社日本港湾コンサルタント）
** 港湾研究部 港湾施設研究室 室長
*** 港湾空港技術研究所 基礎工研究グループ グループ長
**** 港湾空港技術研究所 基礎工研究グループ 研究官
***** 港湾空港技術研究所 基礎工研究グループ 研究員

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 国土交通省国土技術政策総合研究所
電話：046-844-5019 Fax：046-842-9265 e-mail: ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

Verification of basic concepts of reformation design of existing mooring facilities based on reformation construction methods of gravity type mooring facilities

Masanori TABATA*

Masafumi MIYATA**

Takaaki MIZUTANI***

Satoshi MATSUMURA****

Shintaro KAGIMOTO*****

Synopsis

Reformation design of existing mooring facilities results in structures that are more complicated than the design of new facilities. The NILIM No. 996 technical note shows “the basic concept of reformation construction methods selection” and “reformation design of existing mooring facilities” as examination procedures for evaluating performance.

In this study, a trial study was carried out on the case of deepening gravity mooring facilities based on these concepts. Furthermore, confirmation of the validity of the concepts and discovery of improvements of the concepts was carried out.

Key Words: existing port facility, gravity mooring facility, reformation design, reformation method, select reformation method

* Visiting Researcher, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM
(Japan Port Consultants, Ltd.)

** Head, Port Facilities Division, Port and Harbor Department, NILIM

*** Head, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department, PARI

**** Researcher, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department, PARI

***** Researcher, Foundations Group, Geotechnical Engineering Department, PARI

National Institute for Land and Infrastructure Management

Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5019 Fax : +81-46-842-9265 e-mail: ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp

目 次

1. はじめに	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 本資料の構成	1
2. 重力式係船岸の増深改良工法の選定	3
2.1 試験検討の条件設定	3
2.2 検討対象構造物の前提条件の整理	4
2.3 改良工法の候補選定	5
2.4 改良工法選定の基本的な考え方に対する改善点	13
3. A工法の性能評価の基礎検討	14
3.1 本章の位置づけ	14
3.2 想定断面の作成	14
3.3 設計上の課題の抽出	15
3.4 構造系の挙動の推定例	17
3.5 構造ユニットの挙動の推定と性能評価例	18
3.6 構造系の性能評価の着目点	20
3.7 改良設計の基本的な考え方に対する改善点	21
4. おわりに	22
4.1 改良工法選定の基本的な考え方の検証結果	22
4.2 改良設計の基本的な考え方の検証結果	22
4.3 今後の課題	23
謝辞	23
参考文献	23
付録A 既存構造物（ケーソン）の静的安定検討	24
付録B 選定した工法（A工法）の静的安定検討	26

1. はじめに

1.1 研究の背景と目的

既存係留施設の改良設計は、既存構造物の活用と追加構造物の利用を計画することが多く、新規施設の設計に比べて複雑な断面となり、考慮すべき事項が多い。このような場合、改良工法の選択肢は多くなり、設計者は時間の制約の中で合理的な改良断面を選定する必要がある。

田端ら¹⁾は多くの改良工法の中から最適な工法を選定するための手掛かりとなる基本的な考え方（以下「改良工法選定の基本的な考え方」という）、改良設計を円滑に進めるための検討手順、改良断面の性能を評価するための確認項目を「改良設計を進める上で設計者が持つべき共通認識としての改良設計の基本的な考え方」（以下「改良設計の基本的な考え方」という）として提案している。

本検討では、この「改良工法選定の基本的な考え方」と「改良工法の基本的な考え方」に基づく改良工法の検討のことを改良工法検討と呼称している。図-1.1に「改良設計の基本的な考え方」のフロー図を示す。また、表-1.1に本検討で用いる用語の定義を示す。これらの用語は、田端らの資料¹⁾で用いられている用語である。

本研究の最終的な目的は、「改良工法選定の基本的な考え方」および「改良設計の基本的な考え方」に基づき、既存の異なる構造形式の係船岸の増深改良を具体事例として、改良工法の選定および改良断面の性能評価を行い、これらの基本的な考え方の妥当性を確認し、その結果に基づき改善点を整理することにある。具体的には、図-1.1中の「性能評価の進め方」における①～⑤の手順に従い検討を行い、検討手順または性能評価の確認項目の妥当性および改善点を整理することを最終的な目的としている。これにより、改良設計の実務をさらに円滑に進めるための環境整備を行うことができると考えている。

本検討では、その端緒として、既存の重力式係船岸の増深改良を具体事例として取り上げて「改良工法選定の基本的な考え方」の妥当性の確認を行い、その上で抽出された増深改良工法のうち1工法（A工法とする）を取り上げて「改良設計の基本的な考え方」に基づく性能評価の妥当性の確認を行い、これらの過程で得られた改善点を報告（その1）としてまとめるものである。なお、様々な工法に対して検証を行う必要があるため、次報では本検討とは異なる工法を取り上げて検証を行う。

1.2 本資料の構成

本資料の構成は図-1.2に示すとおりである。

2章では、改良設計の対象となる重力式係船岸の断面条件、改良のための設計条件（増深量等）や施工時の制約条件等を、過去の設計事例を基に設定する。そのうえで、「改良工法選定の基本的な考え方」に則り、改良目的に合致する工法を抽出する。本検討では、本検討の条件下で適用の可能性がある6工法を抽出した。2章の内容は、「性能評価の進め方」（図-1.1）における手順①から②の「改良工法の候補選定」までの検討結果である。

3章では、抽出した6工法の中から、A工法（図-1.3）を対象として、「改良設計の基本的な考え方」を適用し、A工法の性能評価の基礎検討を行う。具体的には構造系と構造ユニットの挙動を推定し、推定した挙動に対して、定量的な検討を行う前に行うべき性能評価として、施設の性能を確保するために検討すべき項目の考察や実務における検討を行う際の着目点の考察を行う。この検討の過程において「改良設計の基本的な考え方」に対する課題と改善すべき事項を抽出する。A工法は、重力式岸壁の前面の海中部に鋼管矢板（または鋼矢板）を新たに設置し、矢板の前面を掘削し、増深する工法である。

まず、各々の工法に対し既往の知見に基づいた静的な外部安定性照査から想定断面を作成する（図-1.1の手順②の後半）。次に、想定断面を用いて様々なパターンの破壊モードを抽出した上で、本改良工法に対する設計上の課題の抽出を行う（図-1.1の手順③）。設計上の課題に対応し、構造ユニット（本工法の場合、既存の重力式岸壁と新設の矢板構造の2つの構造ユニット）ごとの挙動の推定と推定した挙動に対応して性能を確保するための評価方法を考察する（図-1.1の手順④）。最後の手順として、手順④で考察した評価を行うために重要な構造系の確認事項を示す（図-1.1の手順⑤）。以上の結果に基づき、「改良設計の基本的な考え方」に対する課題と改善すべき事項をまとめる。

4章では、以上の検討結果から得られた内容をまとめ、「改良工法選定の基本的な考え方」および「改良設計の基本的な考え方」の各々について、両者の検証結果を提示する。

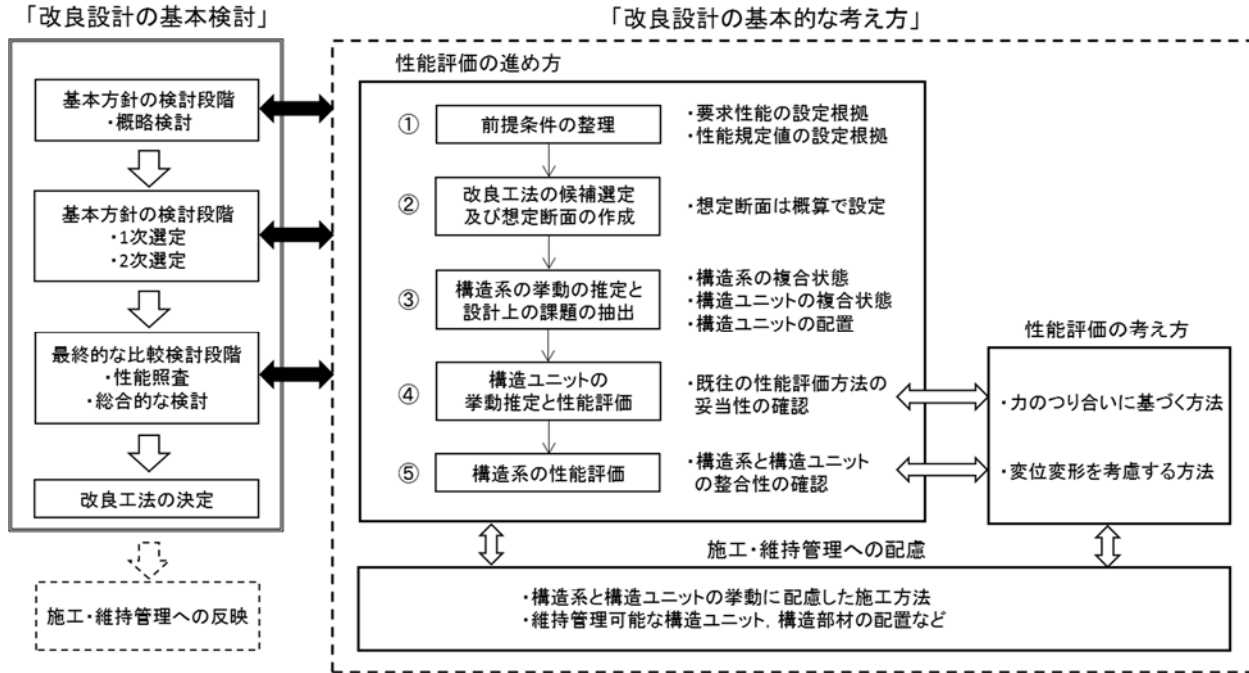


図-1.1 改良設計の基本的な考え方の位置づけと概要

表-1.1 用語の定義

安定性向上メカニズム	既存構造物の安定性を向上させる要因となる原理。
工法選定の基本的な考え方	安定性向上メカニズムから改良工法を網羅的に抽出し、各種の制約条件を明確に設定したうえで制約条件と改良工法を関連付けることで効率的に工法の絞り込みを行うという考え方。
構造ユニット	既存構造物や追加した構造物。
構造系	既存構造物や追加した構造物が共存した状態の構造物全体。
一般化した課題	改良断面において構造物の構成部材、各構造物の組み合わせや位置関係に着目して抽出された設計者が確認すべき改良工法に関する設計上の8つの課題。
性能評価	異なる構造ユニットが複合した構造系の全体挙動をどのように捉え、適切な設計法にどのように落とし込むかという高度かつ総合的な性能の評価。
改良設計の基本的な考え方	図-1.1のフロー図の点線枠で示される考え方で、設計者が複数の工法を公平に評価できるように、共通して認識すべき事項。

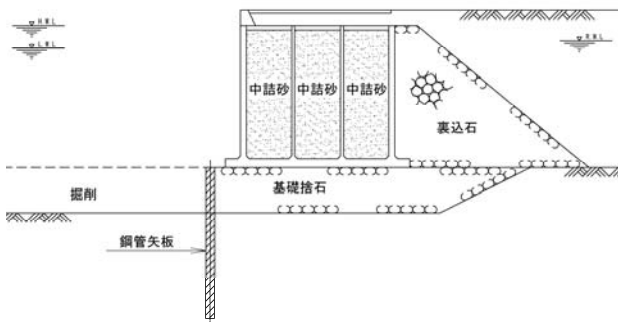


図-1.3 A工法概念図

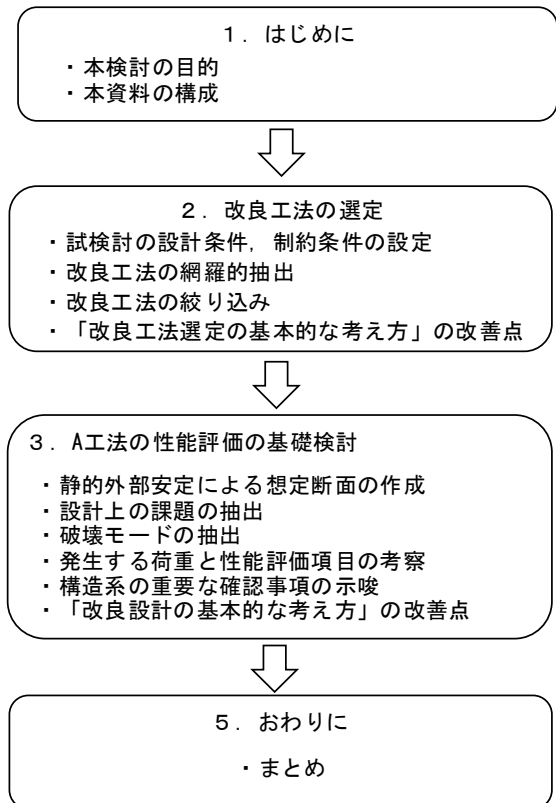


図-1.2 本資料のフロー

2. 重力式係船岸の増深改良工法の選定

2.1 試験検討の条件設定

(1) 本節の位置づけ

本節では、改良工法に関する試験検討を行うための既存構造物の条件設定を行う。既存構造物の条件は既往の改良設計事例を参考に設定する。

(2) 設計条件

a) 構造形式

本検討は特定の施設を事例とした検討ではないため、設計条件については過去の事例を基に条件を設定する。

既存重力式係船岸の構造形式、天端高、計画水深等の基本条件は田端らの資料¹⁾で収集した設計事例(112事例)の内、重力式係船岸の増深改良事例(15事例)を基に設定する。過去の事例の中で重力式係船岸の構造形式はケーソン式を採用している例が多いことから(9事例)、構造形式はケーソン式を採用する。さらに、ケーソンにはフーチングを設ける例が多かったため(7事例)、本検討で扱う断面にもフーチングを設けるものとする。

b) 安定性の検討方法

既存構造物となるケーソンの性能規定値は平成19年度版の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」²⁾に示されているが、改良工法によっては、新たに構造物を追加するものもあり、それらの性能規定値は明確に定められていないものも多い。このため、本検討では平成11年度版の「港湾の施設の技術上の基準・同解説」²⁾に従い、以降の安定性の検討を行う。

c) 自然条件、荷重条件

重力式係船岸の増深設計事例から天端高、設計水深、上載荷重、潮位、設計震度は過去の重力式係船岸の増深改良の15事例の平均値を参考に設定する。設定した基本条件を表-2.1に示す。

表-2.1 基本条件一覧

項目	事例の平均値	設定値	
天端高	+ 2.7	+ 3.0	(m)
計画水深	- 8.8	- 9.0	(m)
設計水深		- 9.1	(m)
上載荷重	18.0	20.0	(kN/m ²)
潮位(H.W.L.)	+ 1.3	+ 1.5	(m)
潮位(L.W.L.)	±0.0	±0.0	(m)
設計震度	0.15	0.15	

d) 捨石マウンド

重力式係船岸の増深改良事例では、捨石マウンド厚の平均値は約2.2mであり、原地盤を掘り込み、捨石を投入している事例が多い。しかし、重力式係船岸の改良工法には、マウンドを固化して増深する工法³⁾もあり、マウンド厚が薄い場合は適用できない。このような工法も適用できるように、マウンド厚は増深改良事例よりも大きくとることにした。具体的には、捨石マウンド厚はマウンド下の原地盤の地盤強度に依らず、基礎の支持力を確保できる厚さを設定する。マウンド厚の設定方法は、簡易ビショップ法により安定検討を行い、地震時の安全率1.0を超える円弧の最大深さに対して、さらに2.0mの余裕をとる。マウンド肩幅は、設定したマウンド厚に対して、最小となる幅を設定する。また、マウンドの勾配は、1:2とする。

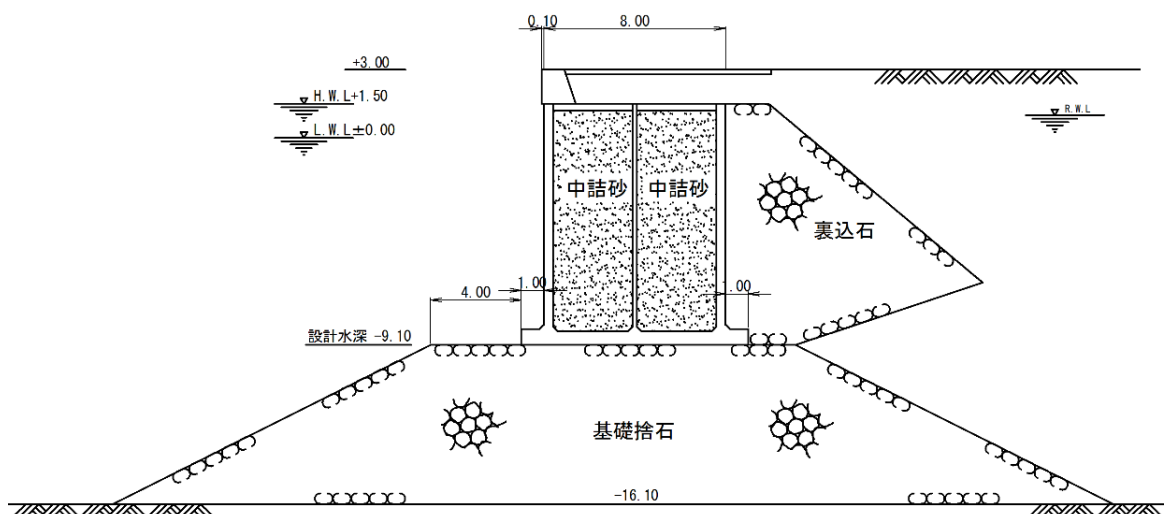


図-2.1 既存構造物断面図

e) 既存構造断面

a), b), d)から既存の断面図を設定する．ケーソンの規格はH10.6m×B8.0m×L16.0m，マウンド肩幅4.0m，マウンド厚7.0mと設定する．図-2.1に本検討の対象とする既存構造物の断面図を示す．ケーソンの規格に関する安定計算結果は(4)に後述し，付録Aに詳細を示す．

(3) 増深量

田端ら¹⁾は過去の設計事例から改良前後の水深変化についてその変化量をまとめている．これによると重力式係船岸の増深改良事例では増深量1.0m以下の増深が多い（図-2.2）．しかし，矢板式係船岸および栈橋の増深改良事例では増深量は1.0m～4.0mであり，2.0mの増深事例が多くなっている（図-2.3）．

この重力式係船岸の増深量1.0m以下の事例が多いことは，重力式係船岸において2.0m以上の増深が行いたくても適用できる工法が少ないことが要因の一つであると考えられる．

本検討で参照する「改良設計の基本的な考え方」は設計法の確立されていない工法に対しても適用できるため，増深量は矢板式係船岸，栈橋で事例が多かった2.0mとする．

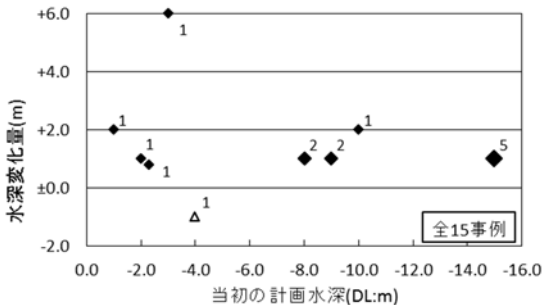


図-2.2 重力式係船岸改良前後の水深変化（増深量）

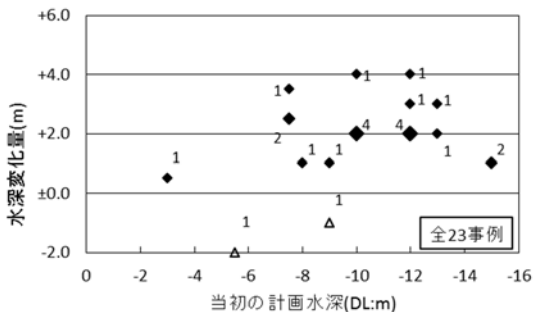


図-2.3 矢板式係船岸，栈橋の改良前後の水深変化（増深量）

(4) 既存施設の静的安定検討

既存構造物（ケーソン）の滑動，転倒，偏心傾斜荷重による基礎の支持力に関する静的安定検討結果を表-2.2に示す．検討の詳細は付録Aに示す．既存構造物（ケーソン）は，地震時の基礎の支持力照査により，断面の形状が決定している．ケーソンの断面幅の具体的な決定方法は以下に示すとおりである．まず，ケーソンの断面幅を滑動・転倒により仮設定する．ただし，この場合，ケーソン海側で大きな底面反力が発生し，マウンドの肩幅が非常に大きくなる場合があり，そのような場合にはケーソンの底面幅を拡げている．今回のケーソン断面幅は，この手順で決まっている．このため，表-2.2に示すとおりケーソンの滑動・転倒の安全率には若干の余裕がある．その他，円弧すべりによる静的安定検討を行う必要があるが，後述する各工法の性能評価では様々な地盤の強度を想定した評価を行うため，ここでの検討は行わない．

表-2.2 既存構造物（ケーソン）の静的安定検討結果

検討項目	常時		地震時	
	L.W.L.	H.W.L.	L.W.L.	H.W.L.
滑動安全率	3.08 $\geq$ 1.2	3.71 $\geq$ 1.2	1.11 $\geq$ 1.0	1.08 $\geq$ 1.0
転倒安全率	5.99 $\geq$ 1.2	7.19 $\geq$ 1.2	2.08 $\geq$ 1.1	2.01 $\geq$ 1.1
偏心傾斜荷重 (基礎の支持力)			1.04 $\geq$ 1.0	

2.2 検討対象構造物の前提条件の整理

(1) 本節の位置づけ

本節では，図-1.1に示した考え方の①「前提条件の整理」として，制約条件の整理と既存構造物（ケーソン）の増深時の安定性を確認する．なお，本来であれば要求性能や性能規定値の根拠についても整理し，田端らの資料¹⁾で示されている一覧表を作成すべきである．しかし，本検討では試検討として後述する性能評価で様々な要求性能を想定した検討を行うため，一覧表の作成は行っていない．

(2) 施工時・工法選定時の制約条件

既存係留施設の改良設計を行う際には，既存施設の利用状況や供用開始までの期間，クレーンや建築物等の支障物などにより様々な制約条件が設けられることがある．代表的な制約の項目としては1) 前面海域に関する制約，2) 時間の制約，3) 構造物上の制約，4) 構造物背後域の制約が挙げられる．

本検討では過去の改良設計事例において制約条件となり，工法選定の段階において大きな影響を与えたと考え

られる条件を抽出し設定する。本検討の制約条件は、上述した代表的な制約の項目から以下のものを設定する。

- 1) 岸壁前面の航路・泊地が狭隘であるため、法線の前出しは極力行わない。
- 2) 埋め立てを伴う工法は採用しない。
- 3) 施設は供用しながらの施工とする。
- 4) エプロン背後には建築物が存在する。

(3) 既存構造物（ケーソン）の増深時の安定性

図-2.1の断面図に対して、2.0mの増深（前面基礎マウンドの掘削）を行った際（図-2.4）の静的安定検討の結果を表-2.3に示す。

本検討は設計震度を用いるため、設置水深の変化による地震時の荷重の変化はないものとして検討を行う。このため、主働土圧による荷重に変化が生じないことからケーソンの滑動、転倒に関する安全率に変化はない。

増深による安全率の変化としては、前面の基礎捨石マウンドを掘削するため、基礎マウンドの支持力が低下し、偏心傾斜荷重による基礎の支持力の安全率が1.0を下回る。この際、基礎マウンドの安定検討における円弧すべりの最小円弧は増深を行ったマウンド掘削面の下端を通る場合に最小の安全率となっている（図-2.5）。改良工法の選定では、この結果を踏まえて基礎の安定性を向上させる工法を選択する必要がある。

表-2.3 既存構造物（ケーソン）の増深後の静的安定検討結果

検討項目	常時		地震時	
	L.W.L.	H.W.L.	L.W.L.	H.W.L.
滑動安全率	3.08 $\geq$ 1.2	3.71 $\geq$ 1.2	1.11 $\geq$ 1.0	1.08 $\geq$ 1.0
転倒安全率	5.99 $\geq$ 1.2	7.19 $\geq$ 1.2	2.08 $\geq$ 1.1	2.01 $\geq$ 1.1
偏心傾斜荷重 (基礎の支持力)			0.79 $\geq$ 1.0	

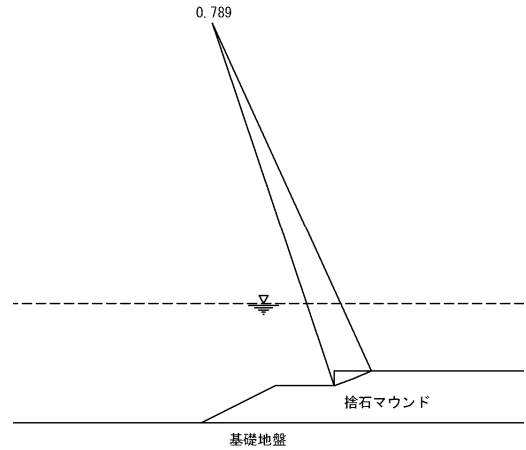


図-2.5 偏心傾斜荷重による基礎の支持力計算結果（増深後）

2.3 改良工法の候補選定

(1) 本節の位置づけ

本節では図-1.1に示した考え方の②「改良工法の候補選定及び想定断面の作成」の内、改良工法の候補選定を行う。

(2) 増深改良事例で用いられている工法

既存係留施設の改良事例によると、重力式係船岸の増深改良事例で用いられている手法は以下の3つの手法がある。

- ①法線の前出しを伴い、既存構造物の前面に構造物を新設する。
- ②既存構造物を撤去し、構造物を新設する。
- ③ケーソンに作用する荷重を低減し、前面のマウンドを掘削する。

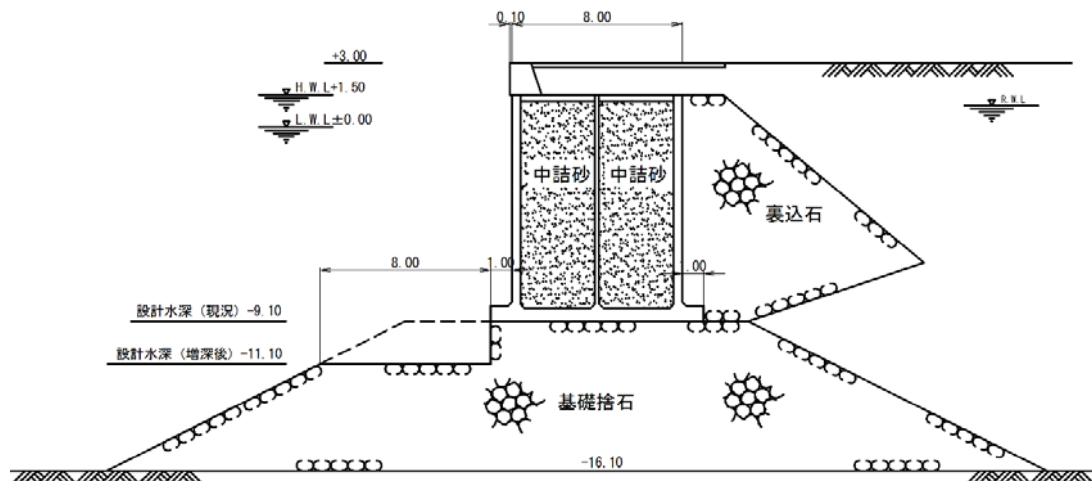


図-2.4 前面マウンド掘削後の断面図（無対策）

過去の改良設計事例では重力式係船岸の増深改良では①、②といった「既存構造物を利用しない工法」が用いられることが多く、③のように「既存構造物を利用する工法」は数が少ない。図-2.6に「既存構造物を利用する工法」の例を示す。この例では、ケーソン背後の裏込土を軽量混合処理土に置き換え、主働土圧を低減することで底面反力や水平力を低減し、前面のマウンドを1.0m程度掘削した際の安定性を確保している。

なお、この他の増深工法もある。例えば、前面マウンドを緩いスロープ状に掘削（増深）し、これと同時にケーソンの上部工に防舷材の台座を海側に突き出るように新たに設置し、防舷材の受圧面を海側に移動させて法線を前出しする工法がある。このような設計・施工上の軽微な工夫により増深を行うこともあるが、本検討では既存構造物や基礎の安定性を向上させる工法に限定して検討を行う。

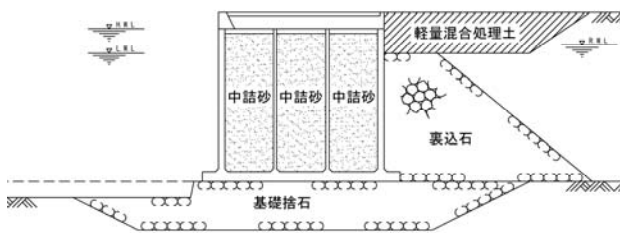


図-2.6 既存構造物を利用する工法の増深事例

(3) 改良工法の網羅的抽出

上述するように過去の改良設計事例では採用される工法は限られているが、「改良工法選定の基本的な考え方」では多種多様な工法を網羅的に抽出したうえで、工法の適用性を確認し、絞り込んでいくことで最適な工法の選定が可能となる。

田端らの資料¹⁾では安定性メカニズム毎に改良工法が抽出されており、重力式係船岸の改良工法として28工法がまとめられている。本検討ではこのG-1工法～G-28工法を基に検討を行う。図-2.8～図-2.11に田端らの資料¹⁾の抜粋を掲載する。本検討ではこの28工法の中から選定するが、この28工法以外にも適用できる可能性のある工法は存在し得るため、実際の検討では、最新の知見を調べるとともに新たな工法が創り出せないかについても考察すべきである。

(4) 安定性向上メカニズムの適用性

a) 重力式係船岸の安定性向上メカニズム

重力式係船岸の安定性向上メカニズムを整理し、各安定性向上メカニズムが本検討で設定した断面への安定性向上に効果があるか確認する。

既存係留施設の静的安定検討の結果から増深を行う際に、偏心傾斜荷重による基礎の支持力が不足しているため、ケーソンから基礎に伝わる底面反力、水平力といった荷重を減少させる、または基礎地盤の支持力自体を増加させる必要がある。

重力式係船岸の安定性向上メカニズムは以下に示すものが挙げられる。

- ①主働土圧の低減
- ②ケーソン重量増加による滑動・転倒抵抗力の増加
- ③摩擦抵抗力の増加
- ④基礎支持力の増加
- ⑤ケーソン支持による滑動・転倒抵抗力の増加
- ⑥他構造物による抵抗力の負担
- ⑦新設構造物による荷重の負担
- ⑧既存構造物の用途の変更

①～⑥までの安定性向上メカニズムは「既存構造物を利用する工法」であり、既存のケーソンや基礎マウンドに対して効果を与えるものである。図-2.7に「既存構造物を利用する工法」の安定性向上メカニズムの概念図を示す。⑦、⑧は「既存構造物を利用しない工法」であり、既存構造物を荷重に対する抵抗として見込まない、または護岸として利用するなど、新たに構造物を設置する工法となる。

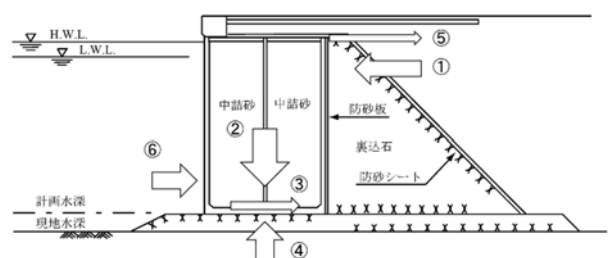


図-2.7 重力式係船岸の安定性向上メカニズム¹⁾
（既存構造物を利用する改良工法）

b) 主働土圧の低減

主働土圧の低減を行うとケーソンに作用する荷重が低減される。この結果、基礎地盤に作用する水平力および鉛直力（底面反力）が低減されるため、基礎の支持力に対する安定性の向上に効果がある。この効果はG-1工法～G-5工法全てにおいて同様の効果が期待できる。

c) ケーソン重量増加による滑動・転倒抵抗力の増加

ケーソンの重量を増加させると、ケーソンから基礎地盤へ作用する鉛直荷重が増加するため、基本的に基礎の支持力に対する安定性の向上に効果はない。しかし、G-8～G-10工法に関してはケーソンの底面幅が増加することから、底面反力の分布幅が変化し、基礎の支持力に対する安定性の向上に効果がある場合がある。

d) 摩擦抵抗力の増加

ケーソン底面に摩擦増大マットなどを敷設すると、ケーソンと基礎マウンドとの間における最大摩擦抵抗力を増加させることができるが、基礎の支持力に対する安定性を向上させる効果は期待できない。

e) 基礎支持力の増加

基礎支持力の増加は基礎マウンドや基礎地盤の強度を増加させるものであるため、基礎の支持力に対する安定性を向上させる効果がある。

f) ケーソン支持による滑動・転倒抵抗力の増加

ケーソン支持による滑動・転倒抵抗力の増加は、ケーソンに控え工やグラウンドアンカーを設置することにより、地震時など大きな荷重が発生した場合に、抵抗力が発生するため、ケーソンに対する水平荷重を低減させる効果がある。このため、基礎の支持力に対する安定性を向上させる効果がある。ただし、グラウンドアンカーは鉛直力を増大させる効果もあるため、基礎マウンドへの鉛直荷重が増大し、基礎の支持力に対する安定性が向上しない可能性もあることから、注意が必要である。

g) 他構造物による抵抗力の負担

他構造物による抵抗力の負担には複数の工法が挙げられ、それぞれの工法が有する効果は異なる。G-17, G-18, G-20のように前面に矢板を打設する、またはG-22のように捨石マウンドを固化するといった、基礎に作用する荷重に対して抵抗を発揮できる工法であれば、基礎の支持力に対する安定性の向上に効果がある。

h) 新設構造物による荷重の負担

新設構造物による荷重の負担では、法線の前出しなどを行って、基礎の支持力を含めて、安定性を確保できる構造を新たに設置する。このため、既存構造物に対する基礎の安定性については、検討を省略することができ、全ての工法が基礎の支持力に対して安定性に効果がある。

i) 既存構造物の用途の変更

既存構造物の用途の変更では、係留施設から護岸や控え工として用途が変更され、増深を行う係留施設は法線の前出しを伴って新設されることになる。よって、既存構造物に対して増深の影響はないことが多い。既存構造物に対する基礎の安定性については、検討を省略することができ、全ての工法が基礎の支持力に対して安定性に効果がある。

j) 各安定性向上メカニズムの適用性

表-2.4に各安定性向上メカニズムに対する偏心傾斜荷重による基礎の安定性向上への適用性、また各工法における本検討での適用性を整理する。

①主働土圧の低減、④基礎支持力の増加、⑤ケーソン支持による滑動・転倒抵抗力の増加、⑦新設構造物による荷重の負担、⑧既存構造物の用途の変更、は偏心傾斜荷重による基礎の支持力の安定性を向上させる効果があるため、全ての工法が適用可能である。③摩擦抵抗力の増加は偏心傾斜荷重による基礎の支持力の安定性を向上させる効果がないため、本検討では適用できない。②ケーソン重量増加による滑動・転倒抵抗力の増加、⑥他構造物による抵抗力の負担では、工法により適用可能なものと適用不可であるものがある。

表-2.4 基礎の安定性向上への適用性

安定性向上メカニズム	本検討に対する適用性 (基礎の支持力増加)	工法番号	工法の適用性
①主働土圧の低減	○	G-1	○
		G-2	○
		G-3	○
		G-4	○
		G-5	○
②ケーソン重量増加による滑動・転倒抵抗力の増加	× (工法によっては適用可能)	G-6	
		G-7	
		G-8	○
		G-9	○
		G-10	○
③摩擦抵抗力の増加	×	G-11	
		G-12	
④基礎支持力の増加	○	G-13	○
		G-14	○
⑤ケーソン支持による滑動・転倒抵抗力の増加	○	G-15	○
		G-16	○
⑥他構造物による抵抗力の負担	○ (工法によっては適用可能)	G-17	○
		G-18	○
		G-19	
		G-20	○
		G-21	
		G-22	○
⑦新設構造物による荷重の負担	○	G-23	○
		G-24	○
⑧既存構造物の用途の変更	○	G-25	○
		G-26	○
		G-27	○
		G-28	○

安定性向上 メカニズム	主働土圧の低減		
工法番号	G-1	G-2	G-3
概念図			
概要	裏込石を撤去し、主働土圧を低減する。撤去部分の背後に土留めが必要となる。	裏込石などを撤去した後に軽量混合処理土にて置換することにより、主働土圧低減を図る。	裏込石などを撤去した後に水砕スラグにて置換することにより、主働土圧低減を図る。
工法番号	G-4	G-5	
概念図			
概要	裏込石などを撤去した後に事前混合処理土にて置換することにより、主働土圧低減を図る。	ケーソン背面の裏込等にセメント系の固化材を攪拌・混合し地盤を固化させることにより、主働土圧を低減する。	
安定性向上 メカニズム	ケーソン重量増加による滑動・転倒抵抗力の増加		
工法番号	G-6	G-7	G-8
概念図			
概要	中詰め材を置換、改良してケーソン重量を増加させ、滑動抵抗力を増加する。	上部コンクリートを増設し、構造物の重量を増加させ、滑動抵抗力を増加する。	ケーソン背後に打設したコンクリートとケーソンを一体化させることにより、構造物の重量を増加させ、滑動抵抗力を増加する。
工法番号	G-9	G-10	
概念図			
概要	ケーソン前面に打設したコンクリートとケーソンを一体化させることにより、構造物の重量を増加させ、滑動抵抗力を増加する。	ケーソンのフーチングを拡幅することにより、主に転倒抵抗力を増加、または地盤反力を低減する。	

図-2.8 重力式係船岸の改良工法(1)¹⁾

安定性向上 メカニズム	摩擦抵抗力の増加	
工法番号	G-11	G-12
概念図		
概要	摩擦増大マットをケーソン底面に敷設することにより、ケーソン底面摩擦を増加する。	アンカーに初期張力を導入することにより、ケーソンの接地圧を大きくし、摩擦抵抗を増加する。
安定性向上 メカニズム	基礎支持力の増加	
工法番号	G-13	G-14
概念図		
概要	ケーソン基礎部の地盤改良により、基礎地盤の支持力・液状化強度を増加する。	基礎捨石マウンドを拡幅し、基礎マウンドの支持力を増加する。
安定性向上 メカニズム	ケーソン支持による滑動・転倒抵抗力の増加	
工法番号	G-15	G-16
概念図		
概要	ケーソン背後に控え杭を設置し、既存とタイ材で結び、滑動抵抗力、転倒抵抗力を増加する。	ケーソン上部から斜めにグラウンドアンカーを設置し、滑動抵抗力、転倒抵抗力を増加する。

図-2.9 重力式係船岸の改良工法(2) ¹⁾

安定性向上 メカニズム	他構造物による抵抗力の負担		
工法番号	G-17	G-18	G-19
概念図			
概要	前面に矢板を打設し、タイ材で既設ケーソンと接続することにより、滑動抵抗力を増加する。	前面に矢板を打設し、既設ケーソンとの間にコンクリートを打設し、一体化させることにより、滑動抵抗力を増加する。	既設ケーソン直前面に根固矢板を打設し、既存と水中部で接合することにより、滑動抵抗力を増加する。
工法番号	G-20	G-21	G-22
概念図			
概要	既設ケーソン前面に自立鋼管矢板を打設して掘削することにより、増深を行う。	鋼管杭を既設ケーソン内部に打設することにより、滑動抵抗力を増加する。	捨石マウンドの一部を改良・固化して掘削することにより増深を行う。
安定性向上 メカニズム	新設構造物による荷重の負担		
工法番号	G-23	G-24	
概念図			
概要	既設ケーソンの前面に重力式構造物を新設し、主働土圧は新設した重力式構造物が受け持つ。	既設ケーソンの前面に控え杭式矢板を新設し、主働土圧は新設した矢板が受け持つ。	

図-2.10 重力式係船岸の改良工法(3)¹⁾

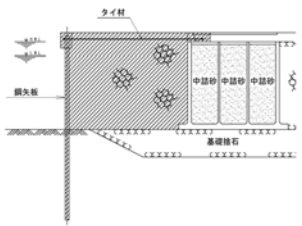
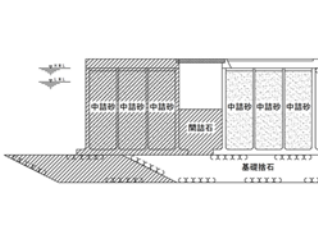
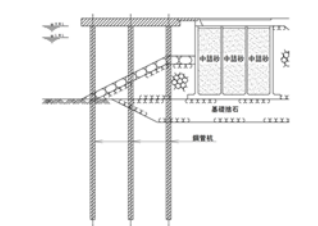
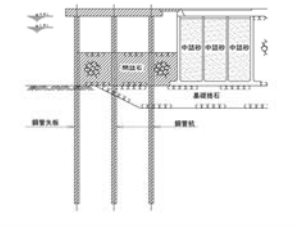
安定性向上 メカニズム	既存構造物の用途の変更		
工法番号	G-25	G-26	G-27
概念図			
概要	既設ケーソンの前面に矢板を設置し、既設ケーソンを控え工として利用する。主働土圧は矢板が受け持つ。	既設ケーソンの前面にケーソンを新設し、間詰石が既設ケーソンの変位を抑制する。	既設ケーソンの前面に棧橋、捨石マウンドを新設し、既設ケーソンはマウンドの受働抵抗力を受ける。
工法番号	G-28		
概念図			
概要	既設ケーソンの前面に土留め機能付きの棧橋を新設し、既設ケーソンは間詰石から受働抵抗を受ける。		

図-2.11 重力式係船岸の改良工法(4)¹⁾

(5) 制約条件による工法の絞り込み

表-2.4で整理したとおり、重力式係船岸の増深改良が可能となる工法は複数存在するが、これらを制約条件により絞り込むことで当該プロジェクトにおける適用性の低い工法を除外することが出来る。制約条件による工法の絞り込みの結果を表-2.5に示す。2.1の(2)で設定した以下の制約条件をそれぞれ制約条件1)～4)とする。

制約条件1)では、大きな前出しを伴う工法は使用できない。このため、既存構造物前面に構造物を新設する安定性向上メカニズム⑦、⑧の場合、堤体幅が広がるため、法線の移動量が大きくなり適用性は低いと判断できる。ただし、杭本数の少ない栈橋（G-27, G-28）や矢板（G-24）については、法線の前出し幅を比較的小さくすることが可能である場合があり、適用の可能性は残る。

制約条件2)では土砂や中詰石、構造物が海水面以上に達するような工法は採用できない。このため、既存構造物前面に重力式構造物や矢板を設置し、既存構造物との間を間詰めするような工法（G-17, G-18, G-23～G-26）は適用できない。また、G-9工法についてもコンクリートを天端面まで上げる工法であるため、埋め立てが必要となり、適用できない。

制約条件3)に関しては、施工中にも岸壁上が利用可能とする必要があるため、陸上からの施工を必要とする工法（G-8, G-13, G-24）の適用性は低くなる。

制約条件4)では、岸壁背後での施工が不可能であるため、裏込土の置換（G-1～G-5）や控え工（G-24）などの構造物の新設ができない。また、G-8工法についても背後を掘削してコンクリートを打設する必要があるため適用できない。

表-2.5 制約条件による工法の絞り込み

安定性向上 メカニズム	工法番号	制約条件			
		1)	2)	3)	4)
①主働土圧の低減	G-1	○	○	○	
	G-2	○	○	○	
	G-3	○	○	○	
	G-4	○	○	○	
	G-5	○	○	○	
②ケーソン重量増加 による滑動・転倒 抵抗力の増加	G-8	○	○		
	G-9	○		○	○
④基礎支持力の増加	G-10	○	○	○	○
	G-13	○	○	○	○
⑤ケーソン支持による 滑動・転倒抵抗力の増加	G-14	○	○	○	○
	G-15	○	○		
⑥他構造物による 抵抗力の負担	G-16	○	○		
	G-17	○		○	○
	G-18	○		○	○
	G-20	○	○	○	○
⑦新設構造物による 荷重の負担	G-22	○	○	○	○
	G-23			○	○
⑧既存構造物の 用途の変更	G-24	△			
	G-25			○	○
	G-26			○	○
	G-27	△	○	○	○
	G-28	△	○	○	○

工法の絞り込みの結果、G-10, G-14, G-20, G-22, G-27, G-28の工法が、本検討で適用の可能性があると判断される。

(6) 抽出した工法の概要

a) G-10工法

図-2.12にG-10工法の概念図を示す。G-10工法は、フーチングを新たに設置、または既存のフーチングを拡幅させて基礎に作用する底面反力の分布幅を広げ、基礎に作用する荷重を低減させる工法である。本工法の詳細は田端らの資料¹⁾を参考にできる。

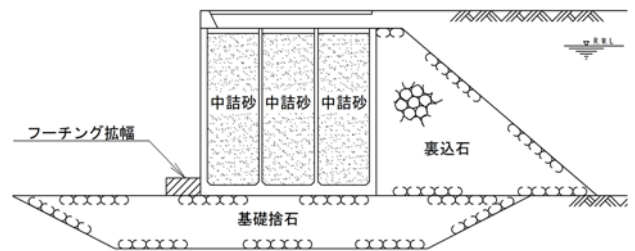


図-2.12 G-10工法概念図

b) G-14工法

図-2.13に工法の概念図を示す。G-14工法は捨石マウンドを拡幅して基礎の支持力を増加させる工法である。本工法の詳細は田端らの資料¹⁾を参考にできる。

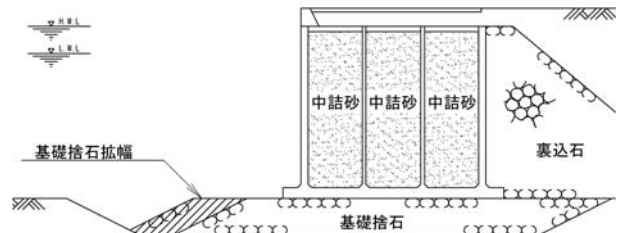


図-2.13 G-14工法概念図

c) G-20工法

図-2.14に工法の概念図を示す。G-20工法はケーソン前面にマウンド鋼管矢板を打設し、その前面を掘削することで増深を行う工法である。本工法の詳細は田端らの資料¹⁾を参考にできる。

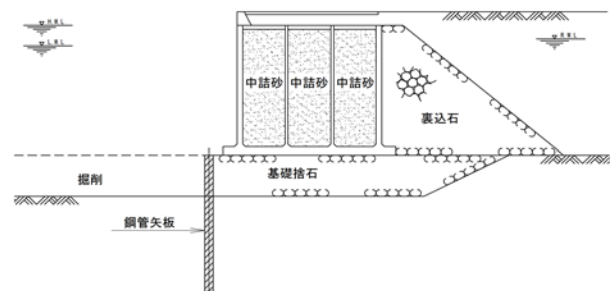


図-2.14 G-20工法概念図

d) G-22工法

図-2.15に工法概念図を示す。G-22工法は、ケーソン下のマウンドを一部固化して前面を掘削することによって増深を行う工法である。本工法の詳細は田端らの資料¹⁾を参考にできる。

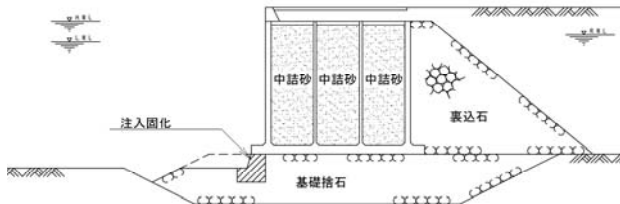


図-2.15 G-22工法概念図

e) G-27工法

図-2.16に工法概念図を示す。G-27工法は、ケーソン前面に栈橋を新設し、ケーソンは土留め護岸として利用する工法である。本検討では前出し幅に制限が設けられていることから、田端らの資料¹⁾で示されているような栈橋の前出しは行えない。このため、図-2.16に示すような幅の極端に短い栈橋を検討する必要がある。

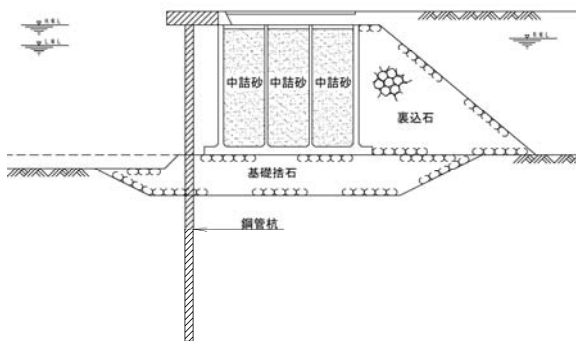


図-2.16 G-27工法概念図

f) G-28工法

図-2.17に工法概念図を示す。G-28工法は、ケーソン前面に土留め付栈橋を新設し、ケーソンは土留め護岸として利用したうえで、ケーソン前面に間詰石を設置し、間詰石から受働抵抗を受けることによりケーソンの安定性を確保する工法である。本検討では前出し幅に制限が設けられていることから、田端らの資料¹⁾で示されているような土留め付栈橋の前出しは行えない。このため、図-2.17に示すような幅が極端に短い土留め付栈橋を検討する必要がある。

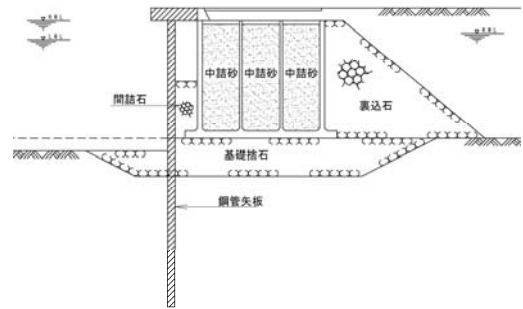


図-2.17 G-28工法概念図

2.4 改良工法選定の基本的な考え方に対する改善点

本検討では、田端ら¹⁾の提案した「改良工法選定の基本的な考え方」に則り、重力式係船岸の2.0mの増深改良を目的として選定候補となる改良工法を抽出した。この結果、本検討の改良目的と制約条件下において適用できる可能性がある6工法を抽出することができた。このことから、改良設計における工法選定の手掛かりとして「改良工法選定の基本的な考え方」は有効であることが示唆された。以上のことから、本検討における「改良工法選定の基本的な考え方」の検証では改善点は抽出されなかった。

ただし、留意点として2.3の(2)に前述した、前面を緩いスロープ状に掘削し、防舷材を用いて法線を前出しするような、設計・施工上の工夫によって増深できる場合もあるため、常に工法選定の間口を拡げ、工法の漏れがないように留意する必要がある。

3. A工法の性能評価の基礎検討

3.1 本章の位置づけ

（1）本章の概要

本章では、2章で抽出した6工法の中から代表としてG-20工法（以下、A工法と呼称。）について、工法の性能評価の基礎検討を行う。以下、性能評価の基礎検討の位置づけと具体的な検討内容を説明する。

（2）性能評価の内容

田端ら¹⁾は改良設計で行うべき性能評価を以下のように示している。『「改良設計の基本的な考え方」は複雑な断面構成となることが多い改良断面に対して、構造計画の検討、設計法の構築、施工方法の検討、維持管理への配慮事項などについて、設計者が複数の改良工法を公平に評価できるように、設計者が共通して認識すべき事項をまとめたものである。なお、これらの総合的な検討を行う際には、挙動の異なる構造ユニットが複合した構造系の全体挙動をどのように捉え、適切な設計法にどのように落とし込むべきかという高度かつ総合的な性能の評価が必要である。本提案では、この高度かつ総合的な性能の評価のことを性能評価としている。なお、性能評価は、所与の性能照査手法に基づき所与の限界値と応答値の比較による単なる性能の照査（性能照査）とは異なる概念として取り扱っている。』¹⁾

つまり、改良設計の性能評価では、構造断面の挙動を考えた総合的な性能の評価や複数の工法を公平に評価することが必要である。このため、改良設計の実務を行う上では、数値解析や既存手法に基づく力のつり合いで施設の性能を評価することが一般的であるが、これらの定量的な検討を行う前にどのような定量的な検討を行うべきかという、構造断面の総合的な（定量的ではない定性的な）性能の評価を行うことが非常に重要となる。

（3）性能評価の基礎検討

本章では、この定量的な設計方法の検討に移行する前に実施すべき、構造断面を俯瞰した総合的な性能評価をA工法に関して試行的に行う。これを性能評価の基礎検討と称している。

本章では、この試行的な検討の結果から、定量的な検討を行う前に行うべき性能評価として、施設の性能を確保するために検討すべき項目の考察や実務における検討を行う際の着目点の考察を行う。この検討の過程において「改良設計の基本的な考え方」に対する妥当性の確認と改善すべき事項を抽出する。

本章の内容は、A工法の性能評価として完結したものではなく、検討の各段階やその際に求められる検討の精度に応じて繰り返し性能評価を行っていく必要がある。その際には数値解析や模型実験による挙動の確認や力のつり合いに基づく検討による定量的な検討が必要となる。

3.2 想定断面の作成

（1）本節の位置づけ

本節では図-1.1に示した考え方の②改良工法の候補選定及び想定断面の作成の内、想定断面の作成を行う。

（2）A工法の概要

A工法はケーソン前面のマウンドに鋼管矢板を打設し、前面を掘削することで増深を行う工法である。鋼管矢板は施工の制限から、若干ケーソンから離れた位置に打設するため、場合によっては岸壁の上部工の張り出しが必要となる。

（3）想定断面の作成方法

工法の性能評価を行うにあたり、まずは既存構造物（ケーソン）の標準断面に対し、A工法を用いた場合の想定断面を作成する。断面の想定は既往の知見に基づいて行い、マウンド前面の鋼管矢板の静的安定検討を行い設定する。

A工法に関する標準的な設計法は現在、確立されていない。よって、本検討では設計法を仮定して検討を行う。

マウンド前面の鋼管矢板に作用する荷重として、矢板背後のマウンドの主働土圧、ケーソンの鉛直力、ケーソン背後の主働土圧により発生する水平力がある。主働土圧や上載荷重に関する荷重の知見はあるものの、ケーソンの底面反力である三角形分布または台形分布の上載荷重、または離れた位置に発生する水平力に対する検討は従来の矢板の検討では行われていない。

本検討では、ケーソンの底面反力、水平力がマウンド中を伝わり、地中応力として鋼管矢板に作用すると考える。図-3.1に底面反力に対する地中応力分布、図-3.2に水平力に対する地中応力分布を示す。また、図-3.3に矢板に作用する荷重の概念図を示す。

本検討は試検討としてこれらの荷重を仮定して検討を行うが、実際の改良設計では設計法の適合性を慎重に評価する必要がある。

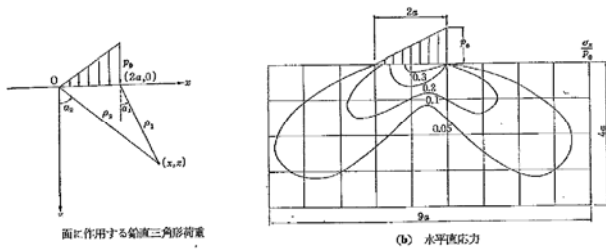


図-3.1 底面反力による地中応力⁴⁾

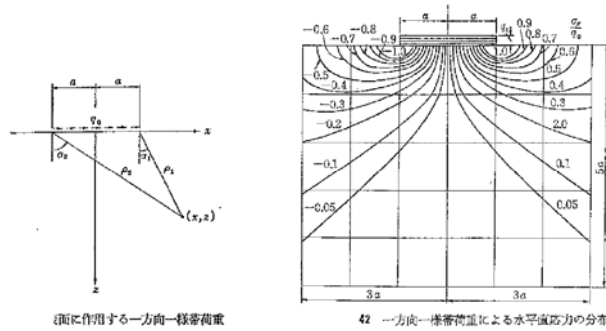


図-3.2 水平力に対する地中応力⁴⁾

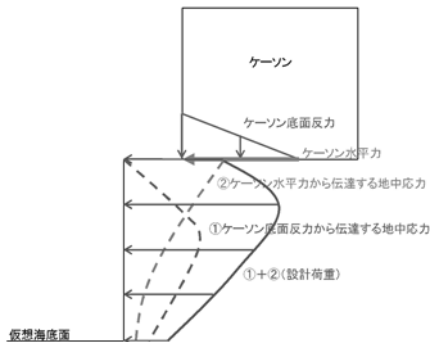


図-3.3 ケーソンからの底面反力・水平力により発生する矢板背後の土圧増分の分布概念図

本検討におけるケーソンと矢板の離隔は2.00mと仮定する。その際の地震時のケーソンの底面反力、水平力の値は以下ようになる。

地中応力合力（底面反力） $P=92.24 \text{ (kN/m)}$

地中応力合力（水平力） $P=206.47 \text{ (kN/m)}$

これらの荷重が地中応力分布の重心に集中荷重として矢板に作用するものとして安定検討を行う。

後の検討では基礎地盤の圧密沈下等の考察も行うが、想定断面の作成では、基礎地盤が一律の砂地盤（ N 値5、内部摩擦角 $\phi = 30^\circ$ ）と想定して検討を行う。安定検討の結果、この荷重に耐えうる一般製品の鋼管矢板の最小規格は $\phi 900 \times t15$ であり、必要矢板長は19.5mである。

鋼管矢板の検討の内容は付録Bに示す。

(4) 想定断面の作成

検討した鋼管矢板の規格に基づき、図-3.4に示す想定断面を設定する。

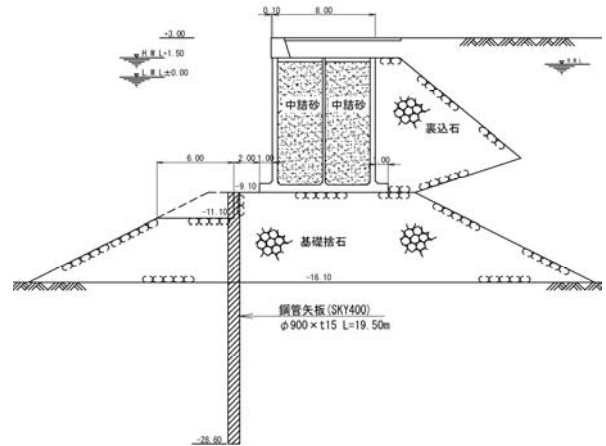


図-3.4 A工法想定断面図

3.3 設計上の課題の抽出

(1) 本節の位置づけ

本節では図-1.1に示した考え方の③構造系の挙動の推定と設計上の課題の抽出の内、設計上の課題の抽出を行う。

(2) 設計上の課題の抽出

a) 一般化した設計課題の概要

設計上の課題は、田端ら¹⁾により提案された表-3.1を参考に抽出する。同表に示すとおり、一般化した課題は、設計者が改良設計を行う上で着目すべき点を基にした3つの分類（Ⅰ～Ⅲ）と、さらに細分化した8つの設計課題により構成されている。ただし、全ての改良工法の設計上の課題がこの8つの設計課題に分類できない場合も考えられるため、実務においては田端ら¹⁾の提案している一般化した課題以外にも設計上の課題がないか、幅広い視点から設計上の課題を確認すべきである。

以下、これらの設計課題が、A工法の性能評価を進める上で考慮すべき課題に該当するか否かについて、上述の分類ごとに考察する。なお、本検討では表-3.1中、灰色で示した課題が該当する。

表-3.1 一般化した設計上の課題

着目点を基にした課題	一般化した設計課題
Ⅰ. 構造系の複合状態に関する課題	Ⅰ-1. 構造形式が複合した構造系の挙動に関する課題
	Ⅰ-2. 柔、剛構造が複合した構造系の挙動に関する課題
	Ⅰ-3. 新旧構造が複合した構造系の挙動に関する課題
Ⅱ. 構造ユニットの複合状態に関する課題	Ⅱ-1. 構造部材の複合した構造ユニットの挙動に関する課題
Ⅲ. 構造ユニットの配置に関する課題	Ⅲ-1. 構造ユニットの並列配置に関する課題
	Ⅲ-2. 構造ユニットの直列配置に関する課題
	Ⅲ-3. 構造ユニットの近接配置に関する課題
	Ⅲ-4. 残置物の影響に関する課題

b) 構造ユニットの分類

A工法では、既存構造物であるケーソンを1つの構造ユニットとして捉えることができる。また、追加するマウンド土留矢板を1つの新しい構造ユニットとして捉えることができる。A工法における構造ユニットの分類を図-3.5に示す。

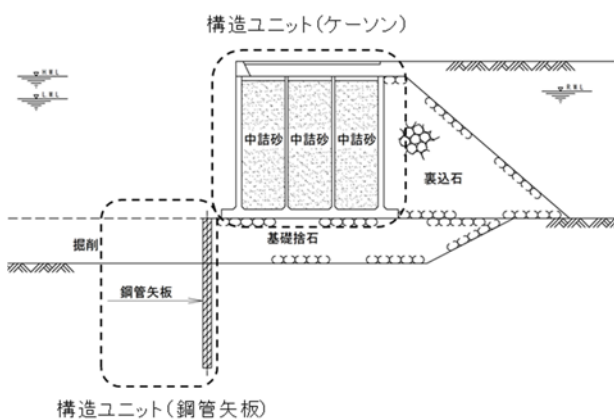


図-3.5 A工法の構造ユニット

c) 構造系の複合状態に関する課題（分類Ⅰ）

①設計課題Ⅰ-1

A工法におけるマウンド土留矢板は、一般にいう矢板式係船岸とは期待される性能や作用する荷重が異なることが考えられる。その場合、重力式係船岸と矢板式係船岸といった異なる構造形式の複合した状態とはいえない。従って、A工法の性能評価に対して、設計課題Ⅰ-1は該当しない。

②設計課題Ⅰ-2

ケーソンは矢板に比べ比較的硬い構造であり、矢板はケーソンに比べ比較的柔らかい構造である。このため、A工法の性能評価にあたっては、柔、剛構造の複合した構造系の挙動に関して注意する必要がある。すなわち、ケ

ーソンと鋼管矢板の2つの構造ユニットの剛性差が比較的に大きいことにより、構造ユニットの変形挙動に差異が生じる。このため、構造系の挙動を慎重に推定し、想定していない脆性的な倒壊などが発生しないかに留意する必要がある。従って、A工法の性能評価に対して、設計課題Ⅰ-2は考慮すべき課題である。

③設計課題Ⅰ-3

A工法では、既存のケーソンに対して新しく構造を追加しているため、新旧の構造が複合している状態にある。このため、A工法の性能評価にあたっては、新旧構造が複合した構造系の挙動に関する課題に注意する必要がある。具体的な課題の内容は、ケーソンと鋼管矢板に作用する荷重と抵抗、または強度の際により、構造ユニットの変形挙動に差異が生じる。このため、構造系の全体挙動を慎重に推定し、想定していない脆性的な倒壊などが発生しないかに留意する必要がある。従って、A工法の性能評価に対して、設計課題Ⅰ-3は考慮すべき課題である。

d) 構造ユニットの複合状態に関する課題（分類Ⅱ）

①設計課題Ⅱ-1

A工法は、ケーソンと鋼管矢板の2つの構造ユニットが分離した構造であり、構造ユニットが連結・接合した構造ではない。従って、A工法の性能評価に対して、設計課題Ⅱ-1は該当しない。

e) 構造ユニットの配置に関する課題（分類Ⅲ）

①設計課題Ⅲ-1

本設計課題である構造ユニットの並列配置とは、ケーソンの補強工法の場合、既存ケーソン1函に対して2箇所以上の陸側グランドアンカー（構造ユニット）でケーソンを陸側に同時に引っ張るなど、構造ユニット（グランドアンカー）同士が並列関係にある状態を指す。A工法では、ケーソンと鋼管矢板の2つの構造ユニットは並列関係ではない。従って、A工法の性能評価に対して、設計課題Ⅲ-1は該当しない。

②設計課題Ⅲ-2

本設計課題である構造ユニットの直列配置とは、A工法の場合、ケーソン1函に対し、2つ以上の控え杭が直線的にタイ材で接続されているなど、構造ユニット（控え杭）同士が直列関係の配置にある状態を指す。A工法はこのような状態ではないため、A工法の性能評価に対して設計課題Ⅲ-2も該当しない。

③設計課題Ⅲ-3

A工法では、既存のケーソンと新設する鋼管矢板は近接しているため、構造ユニットの近接配置に関する課題が

懸念される。具体的には、ケーソンと鋼管矢板の近接程度（離隔や相対的な位置関係）や両者の間の間詰め材料の剛性や強度等が、ケーソンと鋼管矢板との間での応力の伝達状況や地震作用を受けた際の壊れ方に及ぼす影響に留意する必要がある。従って、A工法の性能評価に対して、設計課題Ⅲ-3は考慮すべき課題である。

④設計課題Ⅲ-4

本設計課題である残置物とは、既存構造物前面に新たに構造物を設置し、設計上、荷重に対して既存構造物の耐力を期待しない構造物のことを示している。A工法では、ケーソン背後の主働土圧に対して、ケーソンの耐力を期待している。従って、A工法の性能評価に対して、設計課題Ⅲ-4は該当しない。

3.4 構造系の挙動の推定例

(1) 本節の位置づけ

本節では図-1.1に示した考え方の③構造系の挙動の推定と設計上の課題の抽出の内、構造系の挙動の推定を行う。

(2) 構造系の挙動の推定

a) 本検討の内容

改良設計の実務では、構造系の挙動の推定として作成した想定断面を基に、構造系がどのような挙動を示すか検討し、構造全体の破壊モードを網羅的に抽出する必要がある。

本検討では、特に重要と考えられる構造系の挙動を抽出し、例示している。このため、全ての破壊モードを提示しているわけではない。

b) 静的安定性照査項目に着目した挙動の推定

構造系の挙動の推定として、A工法の破壊モードについて検討を行う。a)では、静的安定検討で検討する項目に着目し、破壊モードを想定する。具体的には、ケーソンでは滑動、転倒、基礎の破壊の3つの照査項目があり、これらの照査項目に対応して構造ユニットが変位すると仮定し、破壊モードを想定する。鋼管矢板では、矢板の根入れ、矢板応力および矢板変位の3つの照査項目があり、同様にこれらの照査項目に対応した破壊モードを想定する。

図-3.6に、構造ユニットの静的安定性照査項目に着目した場合の破壊モードの例を示す。ケーソンの滑動による変位を考えた場合、ケーソンのみが動き、鋼管矢板は変位しないことが考えられる（破壊モード(1)）。A工法の構造ユニットは近接しているため、一方の構造ユニッ

トが変形した場合にはもう一方の構造ユニットの荷重や変形に影響することになるが、剛性や断面性能が異なるため、どのような挙動を示すのかは、性能評価を行うことにより確認する必要がある。

一方、鋼管矢板が変形する場合は、背後のマウンドが変形しケーソンも同時に変位を起こす可能性が高い（破壊モード(2)）。

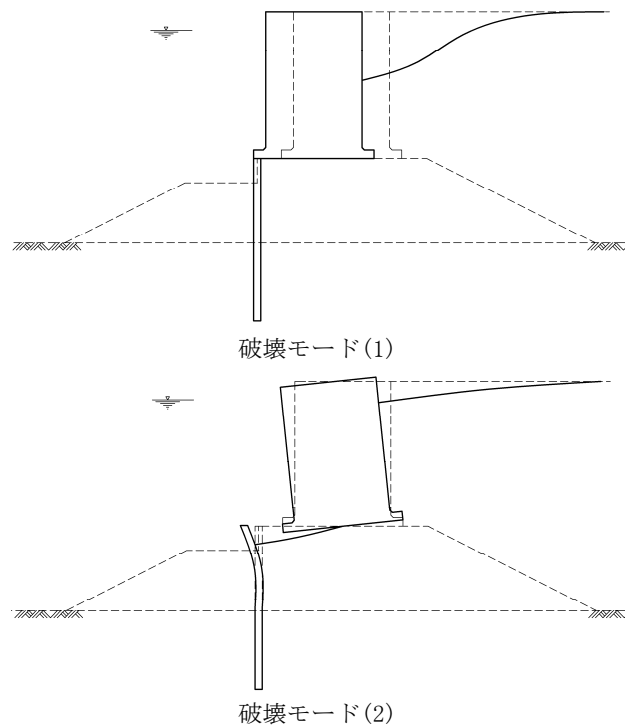


図-3.6 構造ユニットに着目した破壊モード

c) 地盤の変形を考慮した挙動の推定

①検討の位置づけ

b)では、各構造ユニットに作用する想定荷重に対して、各構造ユニットが単純に変位・変形する破壊モードを想定した。この場合、基礎マウンドや基礎地盤の変形は無視している。しかしながら、実際には、基礎捨石マウンドの圧縮沈下や基礎地盤の圧密による不同沈下などによる地盤のわずかな変形は容易に発生しうる。この地盤変形により、2つの構造ユニットの安定性を急激に損なうことがあってはならない。

以上のことから、c)では施工時、常時、地震時の各段階で発生する地盤変形を想定し、それによる構造系の挙動や破壊モードを推定する。

②想定する地盤変形

各段階で想定すべきと考えられる地盤変形を表-3.2に示す。施工時は、矢板打設時にケーソン下のマウンドが

乱れてしまう、または前面マウンドの掘削時などにマウンドの法肩が崩れてしまうなどの可能性がある。常時は、経年変化による圧密沈下、または船舶の接岸などによる洗掘が生じる可能性がある。地震時は、液状化による沈下や地盤の側方流動、地震による直接的なマウンドの変状が発生する可能性がある。

表-3.2 各検討段階における地盤の変形

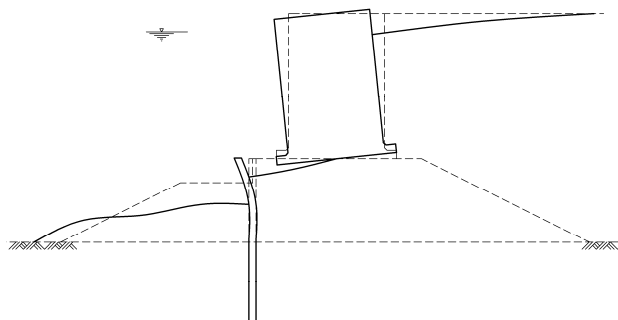
	施工時 (施工完了時)	常時 (終年時)	地震時
沈下		○	○
不等沈下		○	○
側方流動			○
洗掘		○	
マウンドの変状	○		○

③構造系の破壊モードの検討

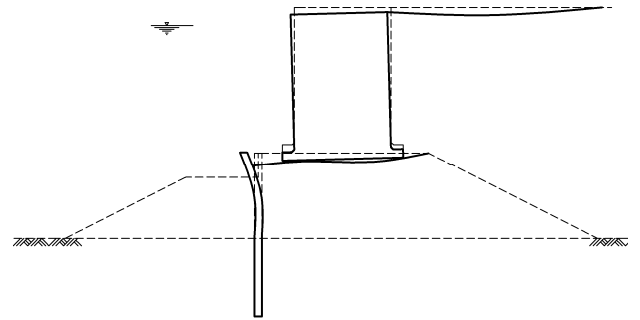
図-3.7に地盤の変形を考慮した際の破壊モードの例を示す。

常時における洗掘を考える場合、鋼管矢板前面のマウンド法肩が崩れる可能性があり、鋼管矢板の受働土圧による抵抗が減少し、各構造ユニットが変位・変形を起こす可能性がある（破壊モード(3)）。また、施工時の鋼管矢板のマウンドへの打設により、マウンドに乱れが生じ、ケーソンが変位を起こす可能性がある（破壊モード(4)）。経年による粘性土の圧密、地震時における液状化を考える場合は沈下または不等沈下が発生する可能性があり、特にケーソンが沈下を起こすような場合には矢板への荷重に変化が起こる可能性がある（破壊モード(5)）。地震時には地震による直接的なマウンドの変状が起こり、計画時の鋼管矢板とケーソンの離隔によってはケーソンが変位し、鋼管矢板と接触する可能性がある（破壊モード(6)）。

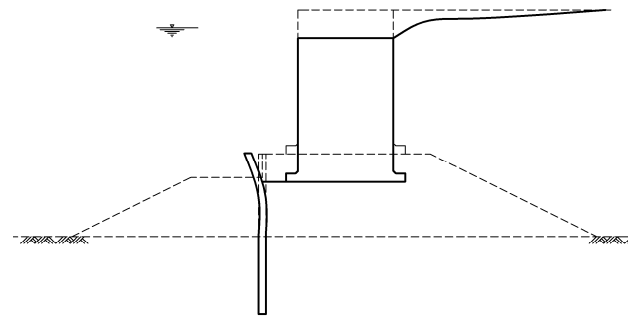
このように考えられ得る破壊モードについて、様々なパターンを構造系の挙動の推定として出来得る限り抽出しておくことが重要となる。



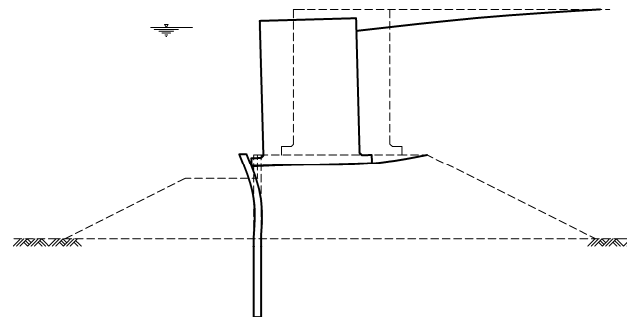
破壊モード(3)



破壊モード(4)



破壊モード(5)



破壊モード(6)

図-3.7 地盤の変形に着目した破壊モード

3.5 構造ユニットの挙動の推定と性能評価例

(1) 本節の位置づけ

本節では、図-1.1に示した考え方の④構造ユニットの挙動の推定と性能評価を行う。

(2) 本検討の内容

本検討では定量的な設計方法の検討に移行する前に実施すべき、構造断面を俯瞰した総合的な性能評価として、3.3で推定した破壊モードに対し、3.2で抽出した設計上の課題を念頭に構造ユニットがどのような荷重を受けるのか、または静的安定検討（想定断面の作成）で設定していた荷重がどのように変化する可能性があるかを推定し、どの部材に対してどの照査項目に対して検討を行う

べきか考察し、例示する。

本検討では、定量的な設計方法の検討として、発生する荷重の定量的な把握や力のつり合いに基づく検討は行っていない。改良設計の実務において、具体的な設計法へ落とし込む場合には、推定した荷重を定量的に把握、または検討段階で定量的に把握できない荷重に対して余裕代を設けるなどして規定値を設定するなど、定量的な性能の評価を行う必要がある。

(3) 構造ユニットに作用する荷重と性能評価

a) 破壊モード(1)

破壊モード(1)は、鋼管矢板の剛性が非常に高く、かつ鋼管矢板の前面地盤が強固（セメント固化改良など）である場合で、設計条件を超える地震が作用した場合に発生する可能性がある。実際には、ケーソンの海側への変位に伴い、鋼管矢板も海側へ変位することが予想されるが、万が一、ケーソンが鋼管矢板の直上に載るようなことがあれば、鋼管矢板は大きな鉛直荷重を支えることができないため、構造系全体が一気に倒壊に到る可能性も否定できない。このような破壊モードは絶対に避けなければならない。

このような破壊モードが発生しうるか否かについては、模型実験や数値解析で評価しておく必要がある。もしくは、この破壊モードを発生させないために、構造計画上の工夫を図っておく必要がある。構造計画上の工夫としては、例えば、鋼管矢板をフーチングの厚さ分マウンド上に突き出しておき、フーチングと鋼管矢板との間に間詰石を投入し、ケーソンが鋼管矢板の直上には移動できないようにしておくなどの方法が考えられる。この際、間詰石を投入することで、ケーソンから作用する荷重が間接的に鋼管矢板に作用することが考えられるが、間詰石を投入する場合か間詰石を投入しない場合のどちらが構造系の変位・変形に大きな影響を与えるかは数値解析等により判断する必要がある。

なお、地震時にケーソンの海側への変位が発生すると、ケーソンと鋼管矢板の離隔が小さくなり、矢板が変形しないと仮定すると、鋼管矢板に作用する地中応力が大きくなる。この荷重増加に対して鋼管矢板の耐力の再評価が必要となる。鋼管矢板の耐力評価にあたっては、ケーソンの地震時の残留変位の推定と、推定される残留変位が発生した場合の鋼管矢板に作用する地中応力の分布形状や増加程度を適切に評価する必要がある。

b) 破壊モード(2)

破壊モード(2)では、破壊モード(1)とは逆に鋼管矢板の剛性が低く、鋼管矢板とケーソンはほぼ同時に変形することを想定している。鋼管矢板の海側への変形によって基礎マウンドも海側に変形し、ケーソンが傾斜することもある。ケーソンの傾斜によって、底面反力分布が変化することから、より大きな地中応力が鋼管矢板に作用する可能性がある。この荷重増加に対して鋼管矢板の耐力の再評価が必要となる。

鋼管矢板に作用する荷重増加の評価にあたっては、ケーソンの地震時の傾斜の推定と、推定される傾斜が発生した場合の鋼管矢板に作用する地中応力の分布形状や増加程度を適切に評価する必要がある。

c) 破壊モード(3)

破壊モード(3)では、前面の洗掘による矢板の受働抵抗力の低下、または鋼管矢板の自由長が大きくなることで、矢板も海側に変形することを想定している。矢板が変位すると破壊モード(2)で示したように、マウンドやケーソンの変位・変形が起こり、それにより鋼管矢板に作用する荷重が大きくなるような悪循環が生まれる。このため、A工法において鋼管矢板の前面が洗掘されることが予想される場合には、洗掘対策を行う必要がある。また、必要に応じて、鋼管矢板の安定検討において設計上の余裕代を考慮する必要がある。

d) 破壊モード(4)

破壊モード(4)では、鋼管矢板打設時のマウンドの変状によりケーソンが変位することを想定している。この変位はケーソンの傾斜も該当し、ケーソンの傾斜によって、底面反力分布が変化することから、より大きな地中応力が鋼管矢板に作用する可能性がある。この荷重増加に対して鋼管矢板の耐力の再評価が必要となる。

鋼管矢板に作用する荷重増加の評価にあたっては、ケーソンの変位量を定量的に評価する必要がある。この評価には矢板打設時のマウンドの変形について実証実験を行うなどの評価が必要である。また、矢板の打設によりケーソンに大きな変位が発生することが予想される場合にはこの破壊モードが発生しないように、構造計画上の工夫として、安全性の確認できる十分な離隔を設ける、またはマウンドを固化して変形を発生させないなどの方法が考えられる。

ただし、マウンドを固化する場合には、固化したマウンドとケーソンまたは鋼管矢板では強度や剛性が異なるために新たな設計課題が生じる。この課題を踏まえて再

度、破壊モードを推定する必要がある。

e) 破壊モード(5)

破壊モード(5)では、経年による粘性土の圧密、地震時における液状化によって、矢板よりもケーソンが沈下している状態を想定している。ケーソンの沈下によりケーソンの底面反力と水平力の発生位置が変化し、鋼管矢板に作用する地中応力の分布が変化する。この荷重に対して鋼管矢板の耐力の再評価が必要となる。

鋼管矢板に作用する地中応力の分布の評価にあたっては、ケーソンの底面反力と水平力の発生位置を確認するために、沈下量の定量的な評価が必要となる。ただし、マウンド中に鋼管矢板が存在しているため、通常のマウンド内に発生する応力伝播とは異なる応力伝播が発生し、不等沈下を起こす可能性がある。このことを考慮した適切な沈下量の評価が必要である。

f) 破壊モード(6)

破壊モード(6)では、地震時の動揺によりケーソンの変位や傾斜が発生することを想定している。この場合、矢板に作用する地中応力の発生位置や底面反力分布が変化するため、より大きな地中応力が鋼管矢板に作用する可能性がある。これらの荷重に対して鋼管矢板の耐力の評価が必要となる。

鋼管矢板に作用する地中応力の評価にあたっては、ケーソンの地震時の残留変位の推定と、推定される残留変位が発生した場合の鋼管矢板に作用する地中応力の分布形状や増加程度を適切に評価する必要がある。

また、ケーソンと鋼管矢板の離隔によっては、鋼管矢板とケーソンが接触することも考えられる。その場合には鋼管矢板にケーソンの水平力が直接、作用することも考えられる。ケーソンの底面反力や水平力から発生する地中応力より著しく大きな荷重となることが想定されるため、このような破壊モードは避けるべきである。地震時のケーソンの変位を確認し、鋼管矢板とケーソンの十分な離隔を確保しておく必要がある。また、破壊モード(1)の事前の対策として、例示した鋼管矢板をフーチングの厚さ分マウンド上に突き出してにおいて間詰石を投入する方法はこの避けるべき破壊モードを引き起こす可能性もあるため、間詰材には直接的に力の伝達を起こすコンクリートブロックではなく石材を用いる、またはケーソンの滑動を抑制する改良工法を併用するなどの対策も考えられる。

(4) 既往の知見で検討できない際の対応策

構造ユニットの性能評価は既往の知見に基づき、検討されることが多いが、(2)で示したように異なる性質をもった構造物が影響し合う改良設計においては、既往の知見にない種類の荷重や既往の知見の適用範囲を超える大きさの荷重が発生することがある。このような場合の対応策としては大きく分けて、以下の3つが考えられる。

①安全代を設けた設計

②不明確な事象を明確にし、再検討

③構造計画の見直し

対応策の手法はどの破壊を想定し、どの破壊は起こさないのかといった、施設の要求性能や復旧方法によって使い分けられる。

例えば、発生すると甚大な被害が想定されるような現象については実験等による確実な現象の把握を行うか、構造計画による事前の対策を行い、復旧が容易であるような現象には既存の検討方法に余裕代を設けた検討を行うといった方法が挙げられる。

3.6 構造系の性能評価の着目点

(1) 本節の位置づけ

本節では図-1.1に示した考え方の⑤構造系の性能評価を行う。

(2) 本検討の内容

本検討では、構造系の性能評価に向けた概略検討として、施設の性能を確保するために確認すべきと考えられる項目、または構造ユニットの検討を行うために必要となる確認項目を着目点として例示する。

なお、本検討では、数値解析等を行っておらず、定量的な検討は行っていない。改良設計の実務において、定量的な構造系の性能評価を行う場合には、主に数値解析や模型実験を用いて構造系の挙動を確認することが必要である。

(3) A工法の性能評価における着目点

まず、構造系の性能評価で注意すべき点は、破壊モード(1)の構造ユニットの挙動で示した、ケーソンが鋼管矢板の直上に載るような避けるべき破壊モードが発生していないか確認することである。

また同時に、構造ユニットの性能評価として推定した荷重が発生しているかについても確認を行う。例えば、破壊モード(1)で推定したケーソンの変位によって発生する鋼管矢板への応力が想定した応力分布や増加程度であれば、検討の妥当性が得られる。

このため、構造系の性能評価では断面に対して、ケーソンの変位が許容変位量を満たしているかどうかといった単純な評価だけでなく、ケーソンの残留変位や鋼管矢板に発生する応力分布といった各検討段階で不明瞭だった項目に対しても着目し検討を行う必要がある。

A工法における性能評価の着目点としては、ケーソンと鋼管矢板の変形量の相互関係が挙げられる。特に鋼管矢板がある変位を起こした段階で、ケーソンではどれほどの変位量が発生するかに着目する。この際のケーソンの動きや変位量によって鋼管矢板に作用する荷重の想定も変化するため、性能評価を行う上で重要な要素である。

鋼管矢板に作用する荷重の分布や大きさもこの段階で数値解析や実験などにより確認することが重要であり、静的な検討における妥当性の確認のためにも必要となる。

施工時の鋼管矢板打設の影響も矢板の変位時と同様であり、性能評価における重要な要素となるため、離隔によるマウンドの変形やケーソンの変位を確認することが必要である。

(4) 検討の見直し

構造系の性能評価によって、想定していなかった破壊モードが発生するといった結果が得られる場合がある。このような場合には、構造系の挙動の推定から再検討を行う必要がある。

また、施設の要求性能に応じて起こしてはならない破壊モードや変形量が存在するため、構造系の性能評価でそれらの挙動が確認された場合には、想定断面の作成段階から再検討を行うなど、構造計画の見直しを行う必要がある。

3.7 改良設計の基本的な考え方に対する改善点

本章では、2章で抽出したA工法に対し、「改良設計の基本的な考え方」に基づく検討を行った。

まず、図-1.1の手順②に示す想定断面の作成を行ったが、A工法は静的安定検討に関する設計法が確立しておらず、設計法を仮定し、検討を行った。改良設計の基本的な考え方の中では、想定断面作成の段階では極度に不合理な断面とならないことを条件としているが、その判定のためには想定断面の作成の段階でも手順③の構造系の挙動の推定と一般化した設計課題によるチェックを行うべきである。

手順③の設計上の課題の抽出では、A工法の構造ユニットを分類し、8つの一般化した設計課題のどれに該当するか考察することにより、検討断面で留意すべき事項を確認することができる。

手順③の構造系の挙動の推定では、網羅的に破壊モードの推定を行ったが、静的安定の検討項目だけでは全ての破壊モードを抽出することはできず、破壊モードを網羅的に抽出するためには、地盤の挙動を考慮した検討が必要である。

手順④の構造ユニットの挙動の推定と性能評価では、手順③で想定した破壊モードに対し、起こり得る荷重とその荷重に対して行うべき構造ユニットの性能評価を考察した。構造ユニットの性能評価の内容によっては手順⑤の構造系の性能評価が必要である。さらに、推定される挙動が回避すべきものである場合は手順②の想定断面の作成段階から構造計画の見直しが必要である。

手順⑤の構造系の性能評価では、手順③で想定した破壊モードと手順④で考察した性能評価の項目を踏まえ、A工法の性能評価で重要となる項目を示した。性能評価結果によっては手順③の構造系の挙動の再推定、または手順②の想定断面の作成段階から構造計画の見直しが必要である。

ただし、「改良設計の基本的な考え方」は、図-1.1に示すように基本方針の検討段階から、最終的な比較段階を経て改良工法が決定するまで、繰り返し参照される考え方である。そのため、図-1.1に示す各手順で残った課題は、検討結果と合わせて留意事項として記録し、次の検討段階で検討を行うといった方法をとることもできる。ここで示した「改良工法の基本的な考え方」に対する改善点は、検討の作業量や求められる検討内容の精度に応じて実施するかどうかを判断する必要がある。

4. おわりに

4.1 改良工法選定の基本的な考え方の検証結果

本検討では、田端ら¹⁾の提案した「改良工法選定の基本的な考え方」に則り、重力式係船岸の増深改良を具体事例として選定候補となる改良工法を抽出した。この結果、本検討の改良目的と制約条件下において適用できる可能性がある2.2の(6)に示す6工法を、一貫した考え方・手順に基づき比較的容易に抽出することができた。

このことから、今回の検討事例に対しては、改良設計における工法選定の手掛かりとして「改良工法選定の基本的な考え方」は有効であった。本検討における「改良工法選定の基本的な考え方」の検証では改善点は抽出されなかった。

4.2 改良設計の基本的な考え方の検証結果

本検討では、重力式岸壁の前面の海中部に鋼管矢板（または鋼矢板）を新たに設置し、矢板の前面を掘削する（A工法（図-1.3）を対象に「改良設計の基本的な考え方」を適用し、3.1に示す性能評価の基礎検討を行った。検討の過程において以下の点に改善の余地があることがわかった。

本検討で得られた改善点により修正した「改良設計の基本的な考え方」のフローを図-4.1に示す。このフロー図は、図-1.1に示した「改良設計の基本的な考え方」の点線枠部分であり、元の考え方の進め方を点線、本検討による改善点（追加事項）を実線で示している。以下、4つの改善点を示す。

- 1) 図-4.1の手順②に示す想定断面の作成を行ったが、A工法は静的安定検討に関する設計法が確立しておらず、設計法を仮定し、検討を行った。「改良設計の基本的な考え方」の中では、想定断面作成の段階では極度に不合理な断面としないことを条件としているが、その判定のためにも想定断面の作成の段階でも図-4.1の手順③の構造系の挙動の推定と一般化した設計課題によるチェックを行うべきである。
- 2) 図-4.1の手順③の構造系の挙動の推定では、網羅的に破壊モードの推定を行ったが、静的安定の検討項目だけでは全ての破壊モードを抽出することはできなかった。破壊モードを網羅的に抽出するためには、地盤の変形を考慮した検討が必要である。
- 3) 図-4.1の手順④の構造ユニットの挙動の推定と性能評価では、図-4.1の手順③で想定した破壊モードに対し、起こり得る荷重とその荷重に対して行うべき構造ユニットの性能評価を考察した。構造ユニットの性能評価の内容によっては図-4.1の手順⑤の構造系の性能評価が必要である。さらに、推定される挙動が回避すべきものである場合は図-4.1の手順②の想定断面の作成段階から構造計画の見直しが必要である。
- 4) 図-4.1の手順⑤の構造系の性能評価では、手順③で想定した破壊モードと図-4.1の手順④で考察した性能評価の項目を踏まえ、A工法の性能評価で重要となる項目を示した。性能評価結果によっては図-4.1の手順③の構造系の挙動の再推定、または図-4.1の手順②の想定断面の作成段階から構造計画の見直しが必要である。

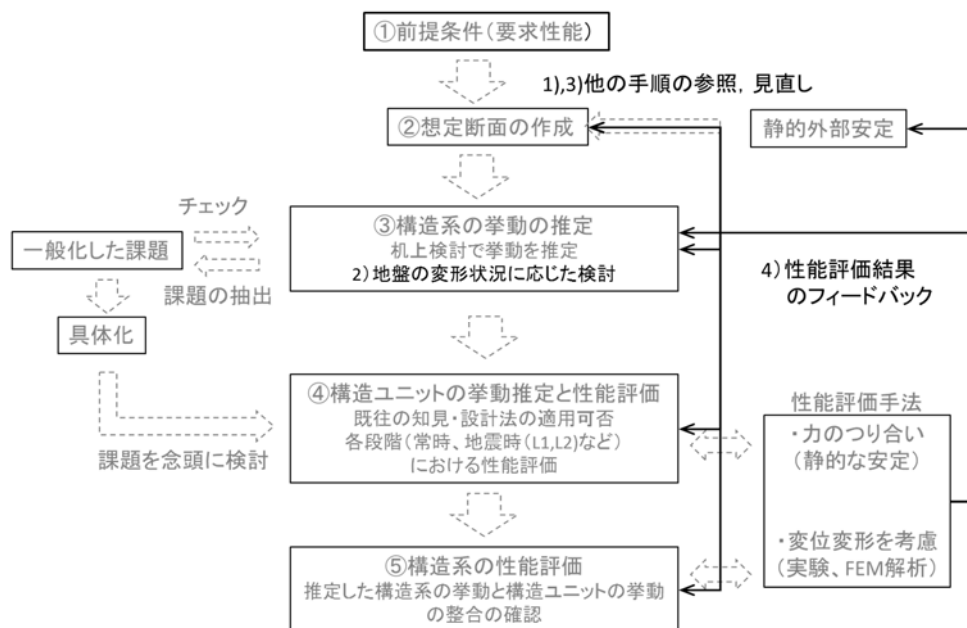


図-4.1 改良設計の基本的な考え方の改善案

4.3 今後の課題

本検討は、重力式係船岸の増深改良を対象として検討を行い、抽出した6工法の中から1工法のみ検討を行ったが、異なる構造形式や異なる一般化した課題を内包する工法の検討によってはさらなる改善点が発見できる可能性がある。次報では、今回抽出した工法の中から本検討で用いたA工法とは別の工法についても「改良工法選定の基本的な考え方」および「改良設計の基本的な考え方」を用いて検証を行い、結果を報告する予定である。

(2018年2月14日受付)

謝辞

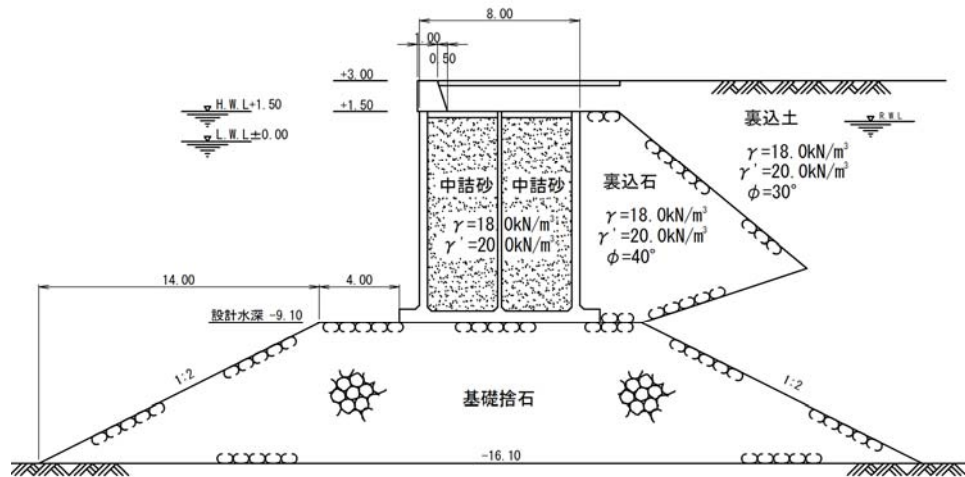
本資料の検討内容について、港湾施設研究室の交流研究員である勝俣優氏に貴重なご意見を頂きました。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田端 優憲，宮田 正史，水谷 崇亮，松村 聡，鍵本 慎太郎，高野 向後，岡元 渉：既存係留施設の改良工法選定および改良設計に関する基本的な考え方，国土技術政策総合研究所資料，No. 996，2017.
- 2) 国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説，社団法人 日本港湾協会，1999.
- 3) 水谷 崇亮，森川 嘉之，渡部 要一，菊池 喜昭，合田 和哉，加藤 繁幸，小笠原 哲也：重力式係船岸の新しい工法の開発，港湾空港技術研究所資料，No. 1277，2013.
- 4) 最上武雄：土質力学，技報堂出版，1982.

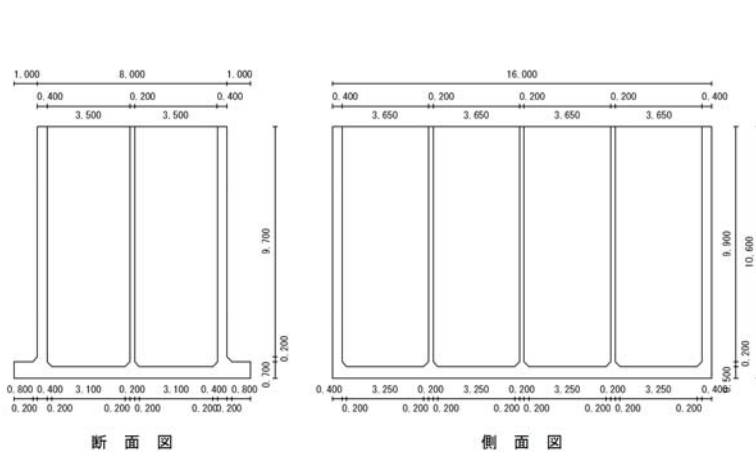
1. 安定検討条件

規格はH10.6m×B8.0m×L16.0mとする。ケーソンの詳細な規格は付図-1.2に示す。その他、本検討で使用する設計条件を付表-1.1に示す。見掛けの震度は荒井・横井の提案式を用いて算出する。



付図-1.1 既存構造物（ケーソン）断面図

付表-1.1 既存構造物（ケーソン）設計条件



付図-1.2 ケーソン諸元詳細

設計水深		- 9.1	(m)
単位体積重量	上部工	22.6	(kN/m ³)
	ケーソン (コンクリート)	24.0	(kN/m ³)
静止摩擦係数	上部工	0.5	
	ケーソン	0.6	
上載荷重	常時	20.0	(kN/m ²)
	地震時	10.0	(kN/m ²)
潮位	H.W.L.	+ 1.5	(m)
	L.W.L.	± 0.0	(m)
残留水位	R.W.L.	+ 1.0	(m)
設計震度		0.15	
見掛けの震度		荒井・横井の提案式	
滑動安全率	常時	1.2以上	
	地震時	1.0以上	
転倒安全率	常時	1.2以上	
	地震時	1.1以上	

2. 安定検討結果

滑動・転倒に関する既存構造物（ケーソン）の安定検討結果を付表-1.2に示す。

付表-1.2 既存構造物（ケーソン）の安定検討結果

		常時		地震時		
		L. W. L. 時	H. W. L. 時	L. W. L. 時	H. W. L. 時	
鉛直力	ΣV	1456. 3	1363. 29	1484. 89	1393. 47	(kN/m)
水平力	ΣH	283. 39	220. 48	804. 08	773. 48	(kN/m)
摩擦係数	μ	0. 6	0. 6	0. 6	0. 6	
滑動安全率	$\mu \cdot \Sigma V / \Sigma H$	3. 08	3. 71	1. 11	1. 08	
抵抗モーメント	ΣV_x	8159. 26	7637. 19	8445. 22	7938. 96	(kN・m/m)
転倒モーメント	ΣH_y	1362. 94	1062. 79	4069. 03	3955. 97	(kN・m/m)
転倒安全率	$\Sigma V_x / \Sigma h_y$	5. 99	7. 19	2. 08	2. 01	
堤体幅	B	10. 00	10. 00	10. 00	10. 00	(m)
$(\Sigma V_x - \Sigma H_y) / \Sigma V$	x	4. 67	4. 82	2. 95	2. 86	(m)
B/2-x	e	0. 33	0. 18	2. 05	2. 14	(m)
B/6		1. 67	1. 67	1. 67	1. 67	(m)
底面反力の分布形状		台形分布	台形分布	三角形分布	三角形分布	
P1		174. 73	150. 89	335. 91	325. 05	(kN/m ²)
P2		116. 53	116. 53	---	---	(kN/m ²)
分布幅	b	---	---	8. 84	8. 57	(m)
作用幅	2 x	9. 33	9. 64	5. 90	5. 72	(m)

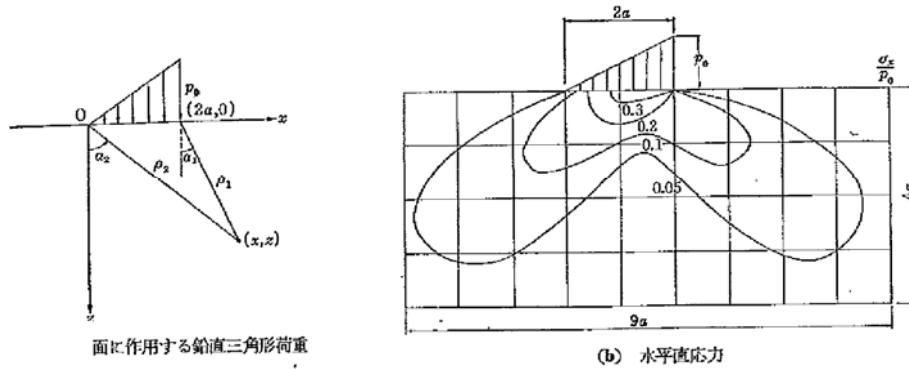
付録B 選定した工法（A工法）の静的安定検討

1. 鋼管矢板に作用する荷重（地中応力）の算出方法

ケーソンによる地表面に作用する荷重が捨石マウンドを伝達して鋼管矢板に作用する荷重を地中応力とする。本検討ではケーソンの底面反力とケーソンの水平力の荷重による地中応力を算定し、鋼管矢板に作用する設計荷重とする。本検討では、ケーソンの底面反力と水平力が最も大きくなる地震時（L.W.L.時）の荷重を用いて、地中応力を算出する。付表-1.1から、地中応力算出時の入力荷重は以下の2つとする。

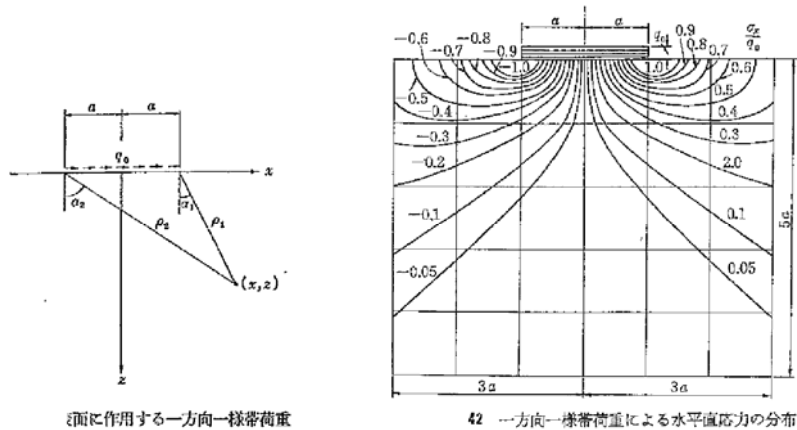
- ①ケーソン底面反力： $P_1=335.91$ （ kN/m^2 ）， $b=8.84$ （m）
- ②ケーソン底面反力： $\Sigma H=804.08$ （ kN/m^2 ）， $2x=5.90$ （m）

付図-2.1にケーソンの底面反力（三角形分布）の作用する場合、付図-2.2にケーソンの水平力が作用する場合の地中応力分布を示す。ケーソン底面反力が作用した際の地中応力の水平成分は付式2.1、ケーソンの水平力が作用した際の地中応力の水平成分は付式2.2より算出する。



付図-2.1 底面反力による地中応力

$$\sigma_x = \frac{P_0}{\pi} \left[\frac{\cos \alpha_1}{\sin(\alpha_1 - \alpha_2)} \left\{ 2 \cos \alpha_2 \log_e \left| \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} \right| + (\alpha_1 - \alpha_2) \sin \alpha_2 \right\} + \sin \alpha_1 \cos \alpha_1 \right] \quad (\text{付式 } 2.1)$$

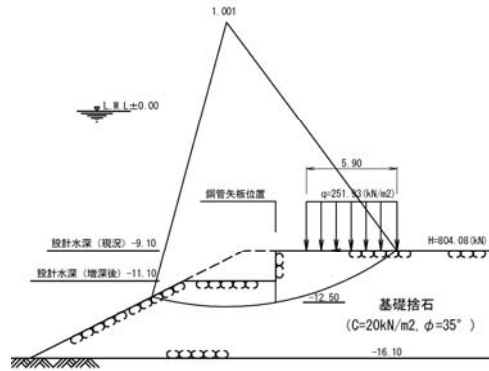


付図-2.2 水平力による地中応力

$$\sigma_x = -\frac{q_0}{2\pi} \left(\cos 2\alpha_2 - \cos \alpha_1 + 4 \log_e \left| \frac{\cos \alpha_1}{\cos \alpha_2} \right| \right) \quad (\text{付式 } 2.2)$$

2. 仮想海底面の設定

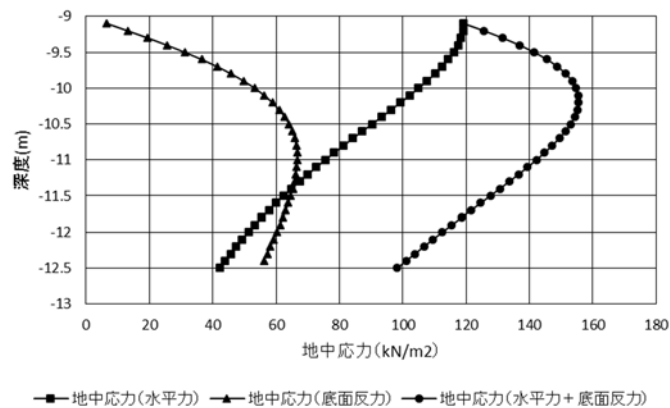
本検討では、偏心傾斜荷重による基礎の支持力（簡易ビショップ法）の安全率が1.0となるときの円弧の深さを仮想海底面として、仮想海底面上に作用する地中応力を鋼管矢板に作用させる。基礎の支持力の計算では、基礎捨石の粘着力 $C=20\text{kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ とした。検討の結果、鋼管矢板の位置において-12.50mの深度で安全率がほぼ1.0となる。よって、仮想海底面は-12.50mとした。付図-2.3に検討結果を示す。



付図-2.3 仮想海底面の設定法

3. 鋼管矢板に作用する荷重（地中応力）の検討結果

付式2.1と付式2.2に基づき、算出した地表面（-9.0m）から仮想海底面（-12.5m）までの地中応力分布を付図-2.4に示す。このような分布荷重が鋼管矢板に作用するが、本検討では、簡易的に計算を行うため、ケーソンの水平力と底面反力によって生じる地中応力の合力を集中荷重に置き換えて検討する。集中荷重を作用させる位置は分布応力の重心とした。付表-2.1に応力分布の重心を示す。



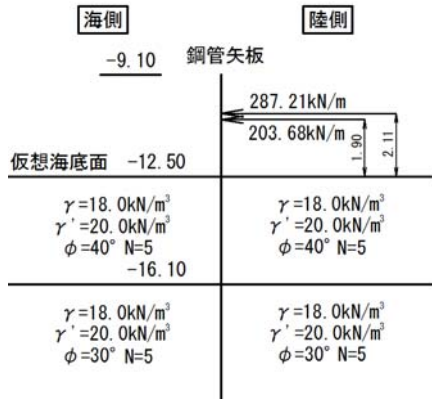
付図-2.4 地中応力分布

付表-2.1 集中荷重作用位置

	水平力	底面反力	
地中応力合力	287.21	203.68	(kN/m)
地中応力モーメント	607.20	387.09	(kN・m/m)
集中荷重作用位置 (仮想海底面からの距離)	2.11	1.90	(m)

4. 鋼管矢板の検討結果

本検討では、鋼管矢板は仮想海底面上に突出した状態を想定し、そこに3. で算出した集中荷重が作用すると考える。本検討では矢板背後の捨石マウンドから発生する主働土圧は考慮していない。付図-2.5に検討のモデル図を示す。なお、基礎捨石の内部摩擦角 $\phi=40^\circ$ 、N値は5と設定する。また、マウンド下の地盤は一様な砂地盤とし、内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ 、N値は5と設定する。この他、鋼管矢板の設計条件を付表-2.2に示す。地盤のN値は全て一定であるとし、C型地盤として検討を行う。また、電気防食等は施さないものとして腐食代による検討を行う。



付図-2.5 鋼管矢板検討モデル

付表-2.2 鋼管矢板設計条件

矢板天端高	-9.1	(m)
前面設計地盤高	-12.5	(m)
設計潮位	+1.5	(m)
耐用年数	50.00	(年)
腐食代	海中部（海側）	0.10 (mm/年)
	海中部（陸側）	0.03 (mm/年)
	泥層中（海側）	0.03 (mm/年)
	泥層中（陸側）	0.02 (mm/年)
根入れの検討	港研方式	
地盤種別	C型地盤	
横抵抗係数 k_c	1374.90	($\text{kN/m}^{2.5}$)
許容応力度	210	(N/mm^2)
矢板天端許容変位量	10	(cm)

付表-2.3に本検討の想定断面の検討結果を示す。この際の鋼管矢板の規格は $\phi 900 \times t15$ であり、継手は(L-T)型[L-100 $\times$ 75 $\times$ 10]を想定している。鋼管矢板長は付表-2.3の検討結果から、19.22m (=28.32-9.10)が必要である。

付表-2.3 鋼管矢板検討結果

(応力度の検討結果)			
腐食前	189.0	<	210 (N/mm^2)
腐食後（海中部）	171.5	<	210 (N/mm^2)
腐食後（海中部）	207.0	<	210 (N/mm^2)
(矢板変位量の検討結果)			
腐食前	8.69	<	10.00 (cm)
腐食後	9.28	<	10.00 (cm)
(根入れ深度の検討結果)			
腐食前	-28.32	(m)	
腐食後	-28.03	(m)	

国土技術政策総合研究所資料

TECHNICAL NOTE of NILIM

No. 1021

March 2018

編集・発行 ©国土技術政策総合研究所

本資料の転載・複写のお問い合わせは
〔〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1
管理調整部企画調整課 電話:046-844-5019〕
E-mail:ysk.nil-kikaku@ml.mlit.go.jp