

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1329

December 2016

防波堤ケーソンにおける部材設計の合理化に関する一考察

宇野 健司
加藤 絵万
川端雄一郎

国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所

National Institute of Maritime,
Port and Aviation Technology, Japan

目 次

要 旨	3
1. はじめに	4
1.1 背 景	4
1.2 目 的	4
2. 港湾基準におけるケーソン部材の設計	4
2.1 許容応力度設計法と限界状態設計法	4
2.2 ケーソン部材の性能設計	4
3. ケーソン部材の性能照査に関する検討	5
3.1 検討概要	5
3.2 検討条件	5
3.3 部材の性能照査結果と考察	5
4. 部材断面の合理化に向けたケーソン部材の設計に関する一考察	9
4.1 設計作用について	10
4.2 照査項目と限界値について	10
4.3 部材のモデル化について	11
5. まとめ	12
6. おわりに	12
参考文献	14
付 録	15

Fundamental study on rational design of structural member of caisson in breakwater

Kenji UNO*

Ema KATO**

Yuichiro KAWABATA*

Synopsis

Following the performance-based design currently adopted in the Technical Standards and Commentaries for Port and Harbor Facilities in Japans, design method of structural members comprising a caisson was discussed. Firstly a comparison between the former and the current design methods for structural reinforced concrete (RC) members was reviewed; namely allowable-stress design and limit state design, respectively. Then the critical index for verification with respect to limit states of structural member in caisson was investigated. According to the result of investigation, serviceability limit state of structural member turned out to be the most severe state frequently to determine the structural details such as cross-section and bar arrangement of structural RC member. Especially the crack width, one of the serviceability limit states, had a great impact on bar arrangement. These investigations put particular emphasis on the importance of in-depth discussions of crack width of concrete member in terms of serviceability as well as durability. These points were summarized, with special references to the standard specification by Japan Society of Civil Engineers (JSCE) and other related studies.

Key Words: caisson, performance verification, serviceability limit state, crack width

* Senior Researcher, Structural Mechanics Group

** Head, Structural Mechanics Group

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

Phone : +81-46-844-5059 Fax : +81-46-844-0255 e-mail:uno-k852a@pari.go.jp

防波堤ケーソンにおける部材設計の合理化に関する一考察

宇野 健司*・加藤 絵万**・川端 雄一郎*

要 旨

本論では、港湾基準の性能規定化に伴うケーソンの部材設計の合理化について議論する。まず、過去と現在の設計法、すなわち許容応力度設計法と限界状態設計法について基本的な考え方を整理した。次に、ケーソン部材について、限界状態の観点から支配的な照査指標を調査した。その結果、ケーソン部材の使用限界状態が、コンクリート部材の構造断面や配筋を決定する上での制約となる場合があることが分かった。特に、使用限界状態の照査指標のひとつであるひび割れ幅は、配筋に強く影響することが分かった。これらの結果から、ケーソン部材の使用性や耐久性の観点からは、コンクリート部材のひび割れ幅に関して本質的な議論が必要であることが強く認識された。なお、本論では、土木学会の示方書や関連研究を参考にこれらの議論を整理した。

キーワード：ケーソン，性能照査，使用限界状態，曲げひび割れ幅

* 構造研究領域構造研究グループ 主任研究官

** 構造研究領域構造研究グループ グループ長

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 e-mail:uno-k852a@pari.go.jp

1. はじめに

1.1 背景

我が国の2016年度の建設投資の見通し額は49.6兆円と試算され、ピーク時の約6割程度の水準である¹⁾。今後、ますます財政上の制約が厳しくなり、新規公共事業に対するコスト削減が強く求められる状況である。それを受けて、国土交通省では建設現場の生産性向上に向けて、調査、設計から施工、さらに維持管理に至る全プロセスにおいて、情報化を前提とした「i-Construction」の導入を推進している²⁾。導入を推進する視点のひとつに、建設生産プロセス全体のシームレス化を掲げ、その課題として、設計と現地条件の不一致や施工性や維持管理の効率化等に配慮した設計などを挙げている。すなわち、一人一人の生産性を向上させるためには、現場の課題に対して設計からの即時的なフィードバックができることが重要である。

また、2016年8月に国土交通省港湾局および国土技術政策総合研究所から「港湾技術基準の改定方針」が取りまとめられ、2018年度からの施行を目標に基準の改定を行うことが発表された³⁾。この改訂方針では、2007年度に策定された現行の技術基準から蓄積されてきた防災・減災技術の強化、社会資本の老朽化に対する維持管理技術の強化、ICT等を利用した生産性革命の取り組みといった様々な技術的課題を解決するために、港湾管理者等のユーザーニーズを踏まえ、より合理的な設計・施工・維持管理の必要性が求められている。社会資本の老朽化に対する維持管理技術の強化に対する具体的な取り組みとして、設計・施工・維持管理の連携強化に関する考え方、改良設計の考え方、鋼・コンクリート部材（ケーソン等）の最新知見の反映などが盛り込まれている。

本検討では、港湾構造物の設計合理化のための一検討として、防波堤を構成するケーソン部材に着目する。ケーソン部材の断面を合理的に決定するためには、部材断面の決定に支配的な条件等を整理することが重要である。また、2018年度の港湾技術基準の改定に向けては、設計実務者からのニーズに対応しつつ、コンクリート標準示方書〔設計編〕2012年版⁴⁾など最新の学会基準や研究成果を取り入れた、柔軟で合理的な設計・照査手法を確立することが求められる。

1.2 目的

上記の背景を基に、本検討では、コンクリート部材断面の設計合理化を最終目標として、部材設計における課題を整理した。具体的には、全国から収集したケーソン式防波堤の設計事例をもとに、以下の基礎的研究を行った。

(1)ケーソン部材について、2007年の港湾の施設の技術上の基準・同解説⁵⁾（以下、「技術基準」という）による部材照査を実施し、設計断面として支配的となる照査項目・指標を調査した。

(2)部材設計の合理化に向けて、設計条件における現状の課題を整理した。なお、付録1には、許容応力度設計法で設計されたケーソン部材に対して、限界状態設計法による再照査を実施し、その比較を行った結果を示す。

2. 港湾基準におけるケーソン部材の設計

2.1 許容応力度設計法と限界状態設計法

1999年の技術基準よりも以前に設計・整備されたケーソン構造物は、許容応力度設計法により設計されている。この従来設計法は、鉄筋コンクリート（RC）構造物を鉄筋とコンクリートをともに弾性体と仮定して計算し、算出された応力度が許容応力度を満足するかどうか確認する方法である。その安全性は各材料の基準となる強度をそれぞれの材料に対する安全係数で除した許容応力度で確保するものである。

1999年以降に設計・整備されたケーソン構造物は、限界状態設計法により設計されている。構造物や各部材に外力が作用しても、その機能や安全性を損なわない限界状態を設定した上で、作用に対する応答値が限界値を超えないことを照査するもので、限界状態に対して特性値と部分係数を用いて算定される構造断面の耐力の設計用値が、同様に算定される荷重作用に対する設計用値を満足するか確認する。この限界状態には終局限界状態、使用限界状態、疲労限界状態がある。例えば、使用限界状態は通常の供用または使用性に関する限界状態であり、過度のたわみやひび割れ、変位、変形、振動など比較的軽微な不都合を生じる状態で、比較的しばしば作用する荷重により発生し、その被害は終局限界状態に比べて小さい。

2.2 ケーソン部材の性能設計

ケーソン部材の要求性能は、施工時および供用時に当該施設が置かれる諸条件に照らし、自重、変動波浪、水圧、L1地震動等の作用による損傷等が、当該施設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と規定されている。

ケーソン構造物の性能設計では、一般に、基本設計で設定された形状寸法に対して、細部設計で配筋計算等を実施し、詳細な部材断面を想定した上で、各限界状態に対する照査を行う。一般的な照査手順としては、想定した設計断面に対して、最初に変動波浪による断面破壊に対する終局

限界状態の照査を行い、その後、使用性に対する使用限界状態の照査を行う。ここで対象とする変動波浪は、終局限界状態で設定した波浪ではなく、設計供用期間にそれ以上の波高の波が来襲する回数が 10^4 回程度の波浪（一万回波と呼ぶ）である。使用限界状態における曲げひび割れ幅の限界値を満足しない場合には、部材寸法や配置鉄筋量を見直し、再度、終局限界状態の照査を行う必要がある。終局限界状態と使用限界状態を満足する寸法や配置鉄筋量が定まった後、疲労破壊に対する疲労強度が満足されれば部材照査は終了となる。

例えば、ケーソンの底版およびフーチング部材に関する性能照査は、表-2.1に示すとおり、主たる作用が変動波浪における断面破壊や断面の使用性、疲労破壊といった照査項目に対してそれぞれ、設計断面耐力（終局限界状態）、曲げひび割れ幅の限界値（使用限界状態）、設計疲労強度（疲労限界状態）などの照査指標に基づき実施されることになる。

限界状態設計法における利点の一つは、部材に求められる様々な要求性能に応じた構造設計が可能になる点である。したがって、ケーソン部材の設計断面を合理化するためには、部材断面を決定する設計条件を明確にし、それらの条件を合理化または高度化することが重要といえる。

3. ケーソン部材の性能照査に関する検討

3.1 検討概要

本章では、構造部材の断面の合理化のため、ケーソンを

構成する各構造部材の断面に支配的な条件を明らかにすることを目的とした検討を行った。すなわち、ケーソンの各部材（底版、フーチング、側壁、隔壁）について、主たる作用が変動波浪等の場合の終局限界状態と使用限界状態の各部材の性能照査を行い、性能照査における支配的な照査項目・指標を調査した。

3.2 検討条件

(1) 対象施設

全国の防波堤施設のうち、現行の技術基準で設計された5施設を対象とした。今回、それぞれの施設名をA防波堤、B防波堤、C防波堤、D防波堤、E防波堤と表示する。

(2) 計算条件

検討にあたって用いた条件は、表-3.1のとおりである。表中の波浪・材料条件はすべて既存の施設を設計した際の設計条件を採用している。

3.3 部材の性能照査結果と考察

(1) 性能照査結果

部材の性能照査は、底版、フーチング、側壁、隔壁の各部材について、変動波浪に着目し、終局限界状態および使用限界状態に対して行った。また、隔壁部材については、終局限界状態の検討では、主たる作用は変動波浪ではなく、内部土圧に対して、使用限界状態の照査では、主たる作用が据付時の静水圧差に対して実施した。部材の照査結果を表-3.2～表-3.6に示す。各部材の主要な照査箇所において、

表-2.1 ケーソンの底版およびフーチングに関する性能規定及び設計状態
(主たる作用が変動波浪の変動状態)に関する設定

省令 条 項 号	告示 条 項 号	要求性能 状態	設計状態		照査項目	標準的な限界値の指標
			主たる作用	従たる作用		
7 1 -	23 1 1	使用性	変動波浪 ^{*1)}	自重、水圧、地盤反力、載荷重、土圧	底版及びフーチングの断面破壊	設計断面耐力（終局限界状態）
					底版の隔壁からの抜け出し（鉄筋の降伏）	設計降伏応力度
					底版及びフーチングの断面の使用性	曲げひび割れ幅の制限値（使用限界状態）
			変動波浪 ^{*2)}		底版及びフーチングの断面の使用性	曲げひび割れ幅の制限値（使用限界状態）
			波浪の繰り返し作用 ^{*3)}		底版及びフーチングの疲労破壊	設計疲労強度（疲労限界状態）

*1) :ここでの波浪は、この告示第八条第一項第一号に定めている波浪のうち、当該施設の構造の安定性の性能照査に用いたものとする。

*2) :ここでの波浪は、この告示第八条第一項第二号に定めている波浪のうち、設計供用期間にそれ以上の波高の波が来襲する回数が 10^4 回程度のものとするを標準とする。

*3) :ここでの波浪は、この告示第八条第一項第二号に定めている波浪のうち、設計供用期間に生じる波浪の波高と周期に関する出現回数に応じた適切なものを設定する必要がある。

表-3.1 設計条件一覽

設計年度	平成25年度		平成26年度		平成26年度		平成23年度		平成23年度	
	終局限界	使用限界	終局限界	使用限界	終局限界	使用限界	終局限界	使用限界	終局限界	使用限界
断面図										
平面図										
ケーン形状図										
設計年度	平成25年度		平成26年度		平成26年度		平成23年度		平成23年度	
限界状態	終局限界	使用限界	終局限界	使用限界	終局限界	使用限界	終局限界	使用限界	終局限界	使用限界
潮位	H.W.L.	L.W.L.	H.W.L.	L.W.L.	H.W.L.	L.W.L.	H.H.W.L.	L.W.L.	H.W.L.	L.W.L.
Hmax(m)	12.9	7.32	14.5	7.0	3.27	3.1	8.0	4.3	4.2	5.5
H1/3(m)	7.5	4.07	8.5	3.9	1.95	1.72	4.6	2.4	2.4	3.1
T(sec)	12.3	8.31	15.3	9.2	8.6	8.6	10.1	6.6	6.6	8.4
$\beta(^{\circ})$	15.0	15.0	10.5	0.0	6.6	8.6	0.0	0.0	0.0	0.0
コンクリート	$f_{ck} = 30N/mm^2$		$f_{ck} = 30N/mm^2$		$f_{ck} = 30N/mm^2$		$f_{ck} = 30N/mm^2$		$f_{ck} = 24N/mm^2$	
鉄筋	SD345		SD345		SD345		SD345		SD345	
許容ひび割れ幅(内側)	0.0040・c		0.0050・c		0.0050・c		0.0050・c		0.0040・c	
許容ひび割れ幅(外側)	0.0035・c		0.0035・c		0.0035・c		0.0035・c		0.0035・c	
ϵ_{csd}	0		150×10^{-6}		150×10^{-6}		150×10^{-6}		0	

表-3.2 A防波堤 照査結果

	照査箇所	配置鉄筋量 As(cm ² /m)	終局限界状態		使用限界状態			照査位置図			
			必要鉄筋量 Asn1(cm ² /m)	Asn1/As	必要鉄筋量 Asn2(cm ² /m)	Asn2/As	発生引張応力度 σs(N/mm ²)				
A防波堤	底板	法直方向	I-① 上側	D13 @200 D16 @200 As=16.27	14.97	0.92	12.67	0.78			
			I-⑤ 下側	D13 @200 D19 @200 As=20.67	16.85	0.82	12.67	0.61			
		法平方向	Ⅲ-③ 上側	D13 @200 D13 @200 As=12.68	12.50	0.99	9.93	0.78			
			Ⅲ-③ 下側	D13 @200 D13 @200 As=12.68	12.65	1.00	9.93	0.78			
	フーチング	法直方向	基部	下側	D19 @200 D25 @200 As=39.67	28.14	0.71	39.66	1.00	133.16	
	側壁	鉛直方向	I-① 内側	D13 @200 D19 @200 As=20.67	11.62	0.56	16.27	0.79	148.80		
				D13 @200 D16 @200 As=16.27	14.86	0.91	12.67	0.78	117.35		
		水平方向	Ⅲ-④ 内側	D19 @200 D16 @200 As=24.26	15.26	0.63	24.26	1.00	134.82		
				D19 @200 D13 @200 As=20.67	19.14	0.93	16.27	0.79	125.79		
	隔壁	鉛直方向	底板基部 (I-①)	D19 @200 D19 @200 As=28.66	26.01	0.91	6.34	0.22	46.73		
				D16 @200 D16 @200 As=19.86	17.51	0.88	9.93	0.50	32.93		

表-3.3 B防波堤 照査結果

	照査箇所	配置鉄筋量 As(cm ² /m)	終局限界状態		使用限界状態			照査位置図			
			必要鉄筋量 Asn1(cm ² /m)	Asn1/As	必要鉄筋量 Asn2(cm ² /m)	Asn2/As	発生引張応力度 σs(N/mm ²)				
B防波堤	底板	法直方向	I-① 上側	D13 @200 D13 @200 As=12.68	10.32	0.81	12.67	1.00	93.29		
			I-⑤ 下側	D16 @200 D19 @200 As=24.26	22.74	0.94	16.27	0.67	89.74		
		法平方向	Ⅲ-③ 上側	D13 @200 D13 @200 As=12.68	10.84	0.85	9.93	0.78	110.07		
				D16 @200 D16 @200 As=19.86	17.92	0.90	12.67	0.64	101.30		
	フーチング	法直方向	基部	下側	D25 @200 D25 @200 As=50.68	50.32	0.99	12.67	0.25	102.80	
	側壁	鉛直方向	I-① 内側	D16 @200 D22 @200 As=29.29	19.07	0.65	28.65	0.98	139.08		
				D19 @200 D19 @200 As=28.66	26.52	0.93	28.65	1.00	64.58		
		水平方向	Ⅲ-③ 内側	D22 @200 D22 @200 As=38.72	23.77	0.61	38.71	1.00	131.33		
				D19 @200 D22 @200 As=33.69	32.49	0.96	33.68	1.00	73.67		
	隔壁	鉛直方向	底板基部 (I-①)	D16 @200 D22 @200 As=29.29	25.35	0.87	6.34	0.22	66.96		
				D16 @200 D19 @200 As=24.26	22.49	0.93	12.67	0.52	41.37		

表-3.4 C防波堤 照査結果

	照査箇所	配置鉄筋量 As(cm ² /m)	終局限界状態		使用限界状態			照査位置図		
			必要鉄筋量 Asn1(cm ² /m)	Asn1/As	必要鉄筋量 Asn2(cm ² /m)	Asn2/As	発生引張応力度 σs(N/mm ²)			
C防波堤	底板	法直方向	I-③ 上側	D13 @200 - As=6.34	1.87	0.29	6.34	1.00	59.13	
			I-⑤ 下側	D13 @200 D13 @200 As=12.68	4.46	0.35	12.67	1.00	70.09	
		法平方向	I-③ 上側	D13 @200 - As=6.34	1.09	0.17	6.34	1.00	34.40	
			III-③ 下側	D13 @200 D13 @200 As=12.68	3.55	0.28	9.93	0.78	72.35	
	フーチング	法直方向	基部	D19 @200 D16 @200 As=24.26	9.10	0.38	24.26	1.00	102.12	
	側壁	鉛直方向	I-① 内側	D13 @200 D13 @200 As=12.68	6.03	0.48	12.67	1.00	129.18	
				I-① 外側	D13 @200 D13 @200 As=12.68	5.97	0.47	6.34	0.50	
		水平方向	III-⑤ 内側	D16 @200 D13 @200 As=16.27	6.35	0.39	12.67	0.78	135.74	
			III-⑥ 外側	D16 @200 D13 @200 As=16.27	11.41	0.70	16.27	1.00	86.11	
	隔壁	鉛直方向	I-①	D13 @200 - As=6.34	4.78	0.75	6.34	1.00	102.51	
		水平方向	III-⑦	D19 @200 D19 @200 As=28.66	7.24	0.25	9.93	0.35	98.67	

表-3.5 D防波堤 照査結果

	照査箇所	配置鉄筋量 As(cm ² /m)	終局限界状態		使用限界状態			照査位置図		
			必要鉄筋量 Asn1(cm ² /m)	Asn1/As	必要鉄筋量 Asn2(cm ² /m)	Asn2/As	発生引張応力度 σs(N/mm ²)			
D防波堤	底板	法直方向	I-① 上側	D16 @200 - As=9.93	3.59	0.36	6.34	0.64	60.14	
			I-⑤ 下側	D16 @200 D13 @200 As=16.27	4.33	0.27	6.34	0.39	73.28	
		法平方向	III-③ 上側	D16 @200 - As=9.93	2.61	0.26	6.34	0.64	35.84	
			III-③ 下側	D16 @200 - As=9.93	2.57	0.26	6.34	0.64	44.85	
	フーチング	法直方向	基部	D19 @200 - As=14.33	7.85	0.55	12.67	0.88	78.53	
	側壁	鉛直方向	I-① 内側	D13 @200 D16 @200 As=16.27	9.31	0.57	16.27	1.00	127.60	
				I-① 外側	D16 @200 D13 @200 As=16.27	5.07	0.31	6.34	0.39	
		水平方向	III-④ 内側	D13 @200 D19 @200 As=20.67	10.72	0.52	19.86	0.96	125.91	
			III-⑦ 外側	D13 @200 D16 @200 As=16.27	11.30	0.69	12.67	0.78	94.50	
	隔壁	鉛直方向	底板基部 (I-①)	D13 @200 D13 @200 As=12.68	8.08	0.64	6.34	0.50	70.33	
		水平方向	側壁基部 (III-⑦)	D13 @200 D13 @200 As=12.68	11.84	0.93	6.34	0.50	31.26	

表-3.6 E防波堤 照査結果

	照査箇所	配置鉄筋量 As (cm ² /m)	終局限界状態		使用限界状態			照査位置図		
			必要鉄筋量 Asn1 (cm ² /m)	Asn1/As	必要鉄筋量 Asn2 (cm ² /m)	Asn2/As	発生引張応力度 σs (N/mm ²)			
E防波堤	底版	法直方向	I-③ 上側	D13 @200	3.88	0.61	9.93	1.57		
				As=6.34						
			D13 @200	10.26	0.63	16.27	1.00	108.06		
		D16 @200	As=16.27							
		法平方向	I-③ 上側	D13 @200	4.04	0.64	6.34	1.00		113.74
				As=6.34						
	III-③ 下側		D13 @200	9.33	0.74	16.27	1.28	103.73		
	D13 @200	As=12.68								
	側壁	鉛直方向	I-① 内側	D13 @200	5.29	0.42	12.67	1.00		
				D13 @200						8.22
			As=12.68							
			D13 @200	6.48	0.51	12.67	1.00	120.11		
		D13 @200	As=12.68							
		水平方向	III-④ 内側	D13 @200	6.48	0.51	12.67	1.00	120.11	
				D13 @200						9.77
D16 @200			9.77	0.60	12.67	0.78	115.79			
D13 @200	As=16.27									
隔壁	鉛直方向	底板基部 (I-①)	D13 @200	6.79	0.54	6.34	0.50			
			D13 @200							
			As=12.68							
	水平方向	側壁基部 (III-⑦)	-	7.92	0.80	6.34	0.64		59.95	
As=9.93										

上側・下側，内側・外側など配置鉄筋量 (As) を示している。

照査結果の整理としては，既存の設計結果から配置されている鉄筋量 (As) に対して，今回照査した終局限界状態と使用限界状態での結果，それぞれ必要な鉄筋量 (Asn1, Asn2) を算出し，その比 (Asn1/As, Asn2/As) で評価を実施している。すなわち，各状態における比 (Asn1/As, Asn2/As) の値が大きいくほど，設計断面に対して支配的な状態であると考えられる。併せて，使用限界状態での曲げひび割れ発生時の鉄筋の引張応力度を記載した。

(2) 考察

底版においては，5 施設中，3 施設の比 (Asn1/As, Asn2/As) が終局限界状態よりも使用限界状態の方が大きな値を示している。ゆえに，ケーソンの形状や波浪条件により傾向が異なることが考えられる。

フーチングにおいては，4 施設中，3 施設の比 (Asn1/As, Asn2/As) が終局限界状態よりも使用限界状態の方が大きな値を示している。照査事例数は4 施設と少ないが，設計断面は使用限界状態で決定されていると考えられる。

側壁においては，5 施設中，4 施設の比 (Asn1/As, Asn2/As) が終局限界状態よりも使用限界状態の方が大きな値を示した。また，残りの1 施設についても，側壁内側の照査結果

は使用限界状態で決定された。ゆえに，設計断面は使用限界状態で決定されていると考えられる。

隔壁においては，5 施設中，4 施設の比 (Asn1/As, Asn2/As) が使用限界状態よりも終局限界状態の方が大きな値を示している。ゆえに，設計断面は終局限界状態で決定されていると考えられる。

総合的に判断すると，防波堤ケーソンの底版，フーチング，側壁の部材については，主たる作用が変動波浪の場合に，配置される鉄筋量は，概ね，断面破壊に対する終局限界状態ではなく，使用限界状態で決定されていると考えられる。すなわち，鉄筋量は，曲げひび割れ幅の限界値で決定されているといえる。それに対して，隔壁部材は，主たる作用が据付時の静水圧差ではなく，内部土圧であることから，配置される鉄筋量は，概ね，曲げひび割れ幅の限界値に対する使用限界状態ではなく，底版および側壁からの抜け出し力に対する終局限界状態で決定されていると考えられる。すなわち，鉄筋量は，鉄筋の設計降伏応力度で決定されているといえる。

4. 部材断面の合理化に向けたケーソン部材の設計に関する一考察

防波堤ケーソンの底版，フーチング，側壁については，

主たる作用が変動波浪の場合の使用限界状態が照査結果に影響を及ぼすことが分かった。そこで本章では、ケーソン部材の使用性に着目し、部材の設計合理化に関する考察を行った。

4.1 設計作用について

部材断面の設計において、設計作用の特性値は強い影響を及ぼす。

底版及びフーチングの断面の使用性を照査するための主たる作用としての変動波浪については、前述したとおり、一万回波が採用される。この一万回波の算定方法については、現行の技術基準の「構造部材の耐久性（使用限界状態）の照査に用いる波浪条件の設定」において記載されており、各現場の設計担当者に活用されている。それでは、そもそも一万回波の数字の根拠を辿ると、港湾において限界状態設計法をいち早く取り入れたプレストレストコンクリート分野の「プレストレストコンクリート港湾構造物設計マニュアル⁶⁾」に記載がある国際PC協会（FIP）の規定によるものと推察されるが、その具体的な設定根拠までは定かではない。参考までに当該マニュアルでは、以下のように規定されている。

使用限界状態の検討に用いる荷重の特性値は、種々の場合に応じて責任技術者の判断により決定するのがよい。

使用限界状態に対する波の情報としては、波高、波長および個々の作用回数（たとえば10⁴回等）が必要である。しかしながら、波浪情報等にも多くの不確定要素が存在し、厳密に規定することは困難である。そのため、暫定的に、沖波 H_0 の再現期間6ヶ月の確率波高を用いて計算される、構造物設置地点における設計波高 H_D による波力を使用限界状態に対する荷重の特性値としてよい。この場合、耐用期間を50年とすると、地域的にばらつきがあるものの、耐用期間中に6ヶ月確率波高を越す波数は、およそ500～25,000波となり、ほぼ妥当な作用回数となる。なお、国際PC協会（FIP）では1ヶ月確率波高と規定しているが、50年の耐用期間では、それを超過する波が50,000～500,000回となり、やや作用回数として多いと判断される。

この中で推奨されている6ヶ月確率波高の妥当性については、過去の検討において、全国の港湾を対象として、一万回作用時の波高を算出し、設計沖波波高との比や確率波高への換算が行われている⁷⁾。その結果、6ヶ月確率波高については、日本海側港湾、太平洋側・関東以北港湾、太平洋側・東海以南港湾などの場所によるばらつきが大きく、一万回作用時の波高の代替として6ヶ月確率波を用いるこ

とは、必ずしも妥当とは言い難いと結論づけられている。このように、6ヶ月確率波については検証がなされているが、作用回数の一万回波については検証がなされていない。したがって、将来的には設計作用の見直しも含めた議論が必要と思われる。

4.2 照査項目と限界値について

コンクリート標準示方書〔設計編〕2012年版⁴⁾では、コンクリート部材の使用性と照査項目について、次のように規定している。

使用性：想定される作用のもとで、構造物の使用者や周辺の人が快適に構造物を使用するための性能、および構造物に要求される諸機能に対する性能とする。

1) ひび割れによる外観に対する照査

ひび割れにより外観が損なわれないことは、ひび割れ幅により照査することを原則とする。ただし、ひび割れ幅を適切に算定できない場合は、鉄筋の応力度により照査してよい。

2) 変位・変形に対する照査

構造物に要求される機能性や快適性の照査を変位・変形を照査指標として行う。

3) 水密性に対する照査

透水によって構造物の機能が損なわれないことの照査は、透水量を用いることを原則とする。

4) 耐火性に対する照査

コンクリートがかぶりに応じた所要の耐火性を満足すれば、火災等によって構造物の所要の性能は失われないうとしてよい。

防波堤ケーソン部材の使用性を考えた場合に、主要なものには、ひび割れや外力の作用による変形・変位などが考えられる。現行の技術基準では、表-2.1に示すとおり、照査項目として、「底版及びフーチングの断面の使用性」、照査項目の標準的な限界値の指標として、「曲げひび割れ幅の制限値」が記載されている。曲げひび割れ幅の照査では、式(1)によって算定されたひび割れ幅 w が、表-4.1に示す曲げひび割れ幅の限界値 w_g を満足することを確認する。この

表-4.1 曲げひび割れ幅の限界値 w_g

環境区分	異型鉄筋・普通丸棒	PC鋼材
特に厳しい腐食性環境	0.0035 c	—
腐食性環境	0.004 c	—
一般の環境	0.005 c	0.004 c

(cはかぶり)

曲げひび割れ幅の限界値は、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕2002年版⁸⁾において定められた耐久性上の限界値に基づき、設定された値である。

$$w = 1.1 k_1 k_2 k_3 [4c + 0.7(c_s - \phi)] \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (1)$$

ここに、

w : ひび割れ幅 (mm)

k_1 : 鉄筋の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数 (異形鉄筋の場合=1.0)

k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7$$

f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)。一般に圧縮強度の設計用値 f'_{cd} としてよい。

k_3 : 引張鉄筋の段数の影響を表す係数

$$k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8}$$

n : 引張鉄筋の段数

c : かぶり (mm)

c_s : 鉄筋の中心間隔 (mm)

ϕ : 引張鉄筋径で、最小鉄筋の公称径 (mm)

E_s : 鉄筋のヤング係数 (N/mm²)

ε'_{csd} : コンクリートの収縮及びクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値。

一般の場合、 150×10^{-6} 程度、高強度コンクリートの場合は 100×10^{-6} 程度としてよい。

σ_{se} : 表面に近い位置にある鉄筋応力度の増加量 (N/mm²)

鉄筋応力度の増加量 σ_{se} は、断面が弾性範囲にあるとして、式(2)により求めることができる。

$$\sigma_{se} = \frac{M_d}{A_s j d} \quad (2)$$

ここに、

M_d : 使用限界状態検討時の曲げモーメントの設計用値 (N/mm)

$$j = 1 - k/3$$

k : 中立軸比 ($= \sqrt{2np_w + (np_w)^2} - np_w$)

n : ヤング係数比 ($= E_s/E_c$)

p_w : 鉄筋比 ($= A_s/(b_w d)$)

d : 有効高さ (mm)

b_w : 部材の腹部幅 (mm)

A_s : 鉄筋の断面積 (mm²)

一方、コンクリート標準示方書〔設計編〕2007年版⁹⁾以降、曲げひび割れ幅は鋼材腐食に対するひび割れ幅 (例えば、 $0.005c$) として耐久性での照査指標として用いられているものの、使用性の照査では、外観の限界値 (例えば、 0.3mm) のみに用いられるよう改定された。このように、現行の港湾の技術基準で求める本来の部材の使用性としての照査指標である曲げひび割れ幅と、コンクリート標準示方書における使用性の照査指標としての曲げひび割れの位置づけが乖離した状態となっている。したがって、港湾の技術基準において、照査項目として要求する断面の使用性に対応するよう、照査指標およびその限界値を見直す必要がある。

4.3 部材のモデル化について

ケーソン部材の曲げひび割れ幅の算定においては、各部材の曲げモーメントの値が支配的要因となることから、部材のモデル化が照査結果に影響する。

現行の技術基準では、ケーソン部材の曲げモーメントを算出する際に、部材の設計スパン長は部材を支持している壁体の中心間隔でモデル化することになっている。ただし、過去の実験結果によれば、側壁部材の固定点が支持壁の中心ではなく、ハンチ直下～側壁内りにあることが明らかとなっている¹⁰⁾。すなわち、設計スパン長を中心間隔から内り間隔に変更することにより、算出される曲げモーメントが小さくなるため、部材断面のスリム化や配筋量の低減に繋がることが考えられる。

したがって、図-4.1に示すとおり、設計スパン長を壁中心間隔から内り間隔へ変更することによるケーソン部材断面の変化について、ケーススタディを行うとともに、断面の変化が経済性に及ぼす影響について試算した。

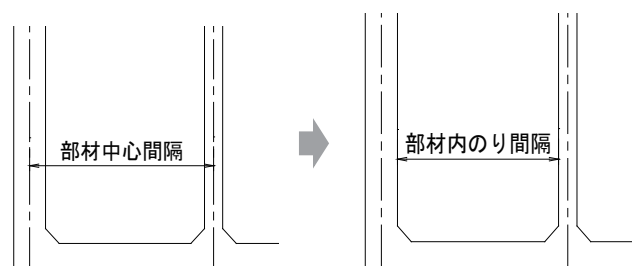


図-4.1 設計スパン長の考え方

(1) 対象施設

全国の防波堤施設のうち、比較的、鉄筋量が多く配置さ

れているケーソンで、現行の技術基準で設計された3施設を対象とした。今回、それぞれの施設名をA防波堤、B防波堤、C防波堤と表示する。

(2) 計算条件

検討にあたって用いた条件は、第3章の表-3.1のとおりである。表中の波浪・材料条件はすべて既存の施設を設計した際の設計条件を採用している。

(3) 計算結果

部材の性能照査は、ケーソンの底版および側壁の各部材の使用限界状態に対して行った。その際の主たる作用は変動波浪（一万回波）を用いた。

部材耐力の照査結果を表-4.2～表-4.4に示す。各部材の主要な照査箇所において、上側・下側、内側・外側など配置鉄筋量（ A_s ）や必要鉄筋量（ A_{sn} ）を使用限界状態における設計スパン長を中心間隔にした場合と、内のり間隔にした場合について示している。

使用限界状態の照査結果の整理として、既存の設計結果から配置されている鉄筋量（ A_s ）に対して、中心間隔と内のり間隔で計算した必要鉄筋量（ A_{sn2} 、 A_{sn3} ）を算出し、その比（ A_{sn2}/A_s 、 A_{sn3}/A_s ）で評価を実施した。すなわち、内のり間隔で計算した比（ A_{sn3}/A_s ）が中心間隔で計算した比（ A_{sn2}/A_s ）よりも小さい値が、計算上、有利に働き、鉄筋量が低減された箇所である。

その結果、側壁部材については、対象3施設すべてにおいて、中心間隔で計算した結果よりも内のり間隔で計算した結果の方が鉄筋量の低減に寄与していることが判明した。特に、B防波堤においては、底版・側壁の大半の照査箇所において、鉄筋量が低減された。

(4) 経済比較

鉄筋量が低減された箇所に対して、部材の鉄筋量（重量）に各鉄筋の購入単価を考慮して材料費を算出した。

その結果、鉄筋量の低減効果が大きかったB防波堤で、底版・側壁に限定すると3割程度、ケーソン1函に換算すると2割程度、材料費が削減されるという結果となった。A防波堤とC防波堤の場合には、鉄筋量の低減効果が小さかったため、4%程度の低減にとどまる結果となった。なお、この結果は、以下の前提条件のもとで成立するものであり、あくまでも、鉄筋の代表位置での照査結果を部材全体に反映させたものであることや、鉄筋量の低減により、結果として、部材の冗長性が低減される可能性があることに留意されたい。

(1) 現行の技術基準の鉄筋量を使用限界状態で決まっ

ている部分について鉄筋量を低減する。

(2) 対象は底版と側壁とし、各部材の水平（法平）、鉛直（法直）、内側（上側）、外側（下側）の代表値を照査を実施していない他の鉄筋位置に反映する。

(3) 鉄筋の単価は、建設物価版（2016年2月号）のSD345（東京地区）を採用した。

5. まとめ

本論では、防波堤のケーソンを対象として、現行基準で設計された部材の主たる作用が変動波浪等の場合の支配的要因や設計スパン長に関する経済比較について検討を行い、以下の結論を得た。

(1) 現行基準で設計された部材の配置鉄筋量に対して、支配的要因の検討を行った結果、底版、フーチング、側壁部材の配置鉄筋量は、概ね、曲げひび割れ幅の限界値を照査指標とする使用限界状態で決定されている。それに対して、隔壁部材の配置鉄筋量は、鉄筋の設計降伏応力度を照査指標とする終局限界状態で決定されている。

(2) 部材設計の合理化に向けて、設計条件における現状の課題を整理した。また、ケーソン部材の設計スパン長を壁中心間隔から内のり間隔へ変更することで、部材（底版・側壁）に必要な鉄筋量が低減されることが確認された。

6. おわりに

現在、2018年度に発刊を予定している港湾の技術基準について、各担当レベルにおいて、設計法の見直しや最新知見の導入検討が進められている。その中でも維持管理・老朽化対策においては、設計における維持への配慮事項など設計・施工・維持管理の連携強化に関する考え方の拡充やコンクリート部材におけるコンクリート標準示方書の最新知見の反映が期待されている。

また、最近では各地方整備局や港湾管理者から、既存施設を転用して有効活用する事例について問い合わせが急増している。このような相談に対して、2015年6月に国土技術政策総合研究所と港湾空港技術研究所ライフサイクルマネジメント支援センターが共同で、港湾・海岸・空港施設に関わる良好な維持管理の実施を支援するため、「久里浜LCM支援相談窓口」を開設し、技術的な支援を進めている。

今回、ケーソンの各部材において、配置鉄筋量を決定する支配的要因が概ね把握できたことで、設計実務者が細部設計を行う際に、合理的に設計断面を想定することができると考えられる。

最後に本検討が、今後の港湾構造物の設計・照査および

表-4.2 A防波堤 検討結果

	照査箇所	配置鉄筋量 As(cm ² /m)	終局限界状態			使用限界状態(中心間隔)			使用限界状態(内のり間隔)			照査位置図		
			必要鉄筋量 Asn1(cm ² /m)	Asn1/As	必要鉄筋量 Asn2(cm ² /m)	Asn2/As	発生引張応力度 σs(N/mm ²)	必要鉄筋量 Asn3(cm ² /m)	Asn3/As	発生引張応力度 σs(N/mm ²)				
A防波堤	底板	法直方向	I-① 上側	D13 @200	14.97	0.92	12.67	0.78	121.37	上側	D13 @200	0.78	98.80	
				D16 @200 As=16.27							D13 @200 Asn3=12.68			
			I-⑤ 下側	D13 @200	16.85	0.82	12.67	0.61	110.58	下側	D13 @200	0.61	90.00	
		D19 @200 As=20.67	D13 @200 Asn3=12.68											
		法平方向	Ⅲ-③ 上側	D13 @200	12.50	0.99	9.93	0.78	118.63	上側	D16 @200	0.78	96.60	
				D13 @200 As=12.68							Asn3=9.93			
	Ⅲ-③ 下側		D13 @200	12.65	1.00	9.93	0.78	108.00	下側	D16 @200	0.78	87.90		
	D13 @200 As=12.68	Asn3=9.93												
	側壁	鉛直方向	I-① 内側	D13 @200	11.62	0.56	16.27	0.79	148.80	内側	D13 @200	0.79	125.70	
				D19 @200 As=20.67							D16 @200 Asn3=16.27			
			I-⑨ 外側	D13 @200	14.86	0.91	12.67	0.78	117.35	外側	D13 @200	0.78	99.10	
		D16 @200 As=16.27	D13 @200 Asn3=12.68											
水平方向		Ⅲ-④ 内側	D19 @200	15.26	0.63	24.26	1.00	134.82	内側	D16 @200	0.82	138.10		
			D16 @200 As=24.26							D16 @200 Asn3=19.86				
	Ⅲ-⑨ 外側	D19 @200	19.14	0.93	16.27	0.79	125.79	外側	D16 @200	0.79	106.20			
D13 @200 As=20.67	D13 @200 Asn3=16.27													

表-4.3 B防波堤 検討結果

	照査箇所	配置鉄筋量 As(cm ² /m)	終局限界状態			使用限界状態(中心間隔)			使用限界状態(内のり間隔)			照査位置図		
			必要鉄筋量 Asn1(cm ² /m)	Asn1/As	必要鉄筋量 Asn2(cm ² /m)	Asn2/As	発生引張応力度 σs(N/mm ²)	必要鉄筋量 Asn3(cm ² /m)	Asn3/As	発生引張応力度 σs(N/mm ²)				
B防波堤	底板	法直方向	I-① 上側	D13 @200	10.32	0.81	12.67	1.00	93.29	上側	D16 @200	0.78	102.00	
				D13 @200 As=12.68							Asn3=9.93			
			I-⑤ 下側	D16 @200	22.74	0.94	16.27	0.67	89.74	下側	D13 @200	0.52	92.00	
		D19 @200 As=24.26	D13 @200 Asn3=12.68											
		法平方向	Ⅲ-③ 上側	D13 @200	10.84	0.85	9.93	0.78	110.07	上側	D13 @200	0.50	147.30	
				D13 @200 As=12.68							Asn3=6.34			
	Ⅲ-③ 下側		D16 @200	17.92	0.90	12.67	0.64	101.30	下側	D13 @200	0.64	87.30		
	D16 @200 As=19.86	D13 @200 Asn3=12.68												
	側壁	鉛直方向	I-① 内側	D16 @200	19.07	0.65	28.65	0.98	139.08	内側	D16 @200	0.83	149.70	
				D22 @200 As=29.29							D19 @200 Asn3=24.26			
			I-⑨ 外側	D19 @200	26.52	0.93	28.65	1.00	64.58	外側	D16 @200	0.57	99.90	
		D19 @200 As=28.66	D13 @200 Asn3=16.27											
水平方向		Ⅲ-③ 内側	D22 @200	23.77	0.61	38.71	1.00	131.33	内側	D19 @200	0.87	137.60		
			D22 @200 As=38.72							D22 @200 Asn3=33.69				
	Ⅲ-⑨ 外側	D19 @200	32.49	0.96	33.68	1.00	73.67	外側	D16 @200	0.72	92.60			
D22 @200 As=33.69	D19 @200 Asn3=24.26													

表-4.4 C防波堤 検討結果

	照査箇所	配置鉄筋量 As(cm ² /m)	終局限界状態			使用限界状態(中心間隔)			使用限界状態(内のり間隔)			照査位置図		
			必要鉄筋量 Asn1(cm ² /m)	Asn1/As	必要鉄筋量 Asn2(cm ² /m)	Asn2/As	発生引張応力度 σs(N/mm ²)	必要鉄筋量 Asn3(cm ² /m)	Asn3/As	発生引張応力度 σs(N/mm ²)				
C防波堤	底板	法直方向	I-③ 上側	D13 @200	1.87	0.29	6.34	1.00	59.13	上側	D13 @200	1.00	52.60	
				-							As=6.34			
			I-⑤ 下側	D13 @200	4.46	0.35	12.67	1.00	70.09	下側	D13 @200	1.00	62.30	
		D13 @200 As=12.68	Asn3=12.68											
		法平方向	I-③ 上側	D13 @200	1.09	0.17	6.34	1.00	34.40	上側	D13 @200	1.00	30.60	
				-							As=6.34			
	Ⅲ-③ 下側		D13 @200	3.55	0.28	9.93	0.78	72.35	下側	D16 @200	0.78	64.30		
	D13 @200 As=12.68	Asn3=9.93												
	側壁	鉛直方向	I-① 内側	D13 @200	6.03	0.48	12.67	1.00	129.18	内側	D13 @200	1.00	116.90	
				D13 @200 As=12.68							Asn3=12.68			
			I-① 外側	D13 @200	5.97	0.47	6.34	0.50	42.72	外側	-	0.50	37.00	
		D13 @200 As=12.68	Asn3=6.34											
水平方向		Ⅲ-⑤ 内側	D16 @200	6.35	0.39	12.67	0.78	135.74	内側	D13 @200	0.78	130.80		
			D13 @200 As=16.27							D13 @200 Asn3=12.68				
	Ⅲ-⑥ 外側	D16 @200	11.41	0.70	16.27	1.00	86.11	外側	D13 @200	0.78	72.00			
D13 @200 As=16.27	D13 @200 Asn3=12.68													

改良設計の考え方の一助となれば幸いである。

(2016年8月12日受付)

参考文献

- 1) (一財)建設経済研究所：建設経済モデルによる建設投資の見通し，2016
- 2) 国土交通省：平成27年度 i-Construction 委員会 報告書，2016
- 3) 国土交通省港湾局：港湾技術基準の改訂方針，2016
- 4) 社団法人土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，2013
- 5) 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，日本港湾協会，2007
- 6) 運輸省港湾局：プレストレストコンクリート港湾構造物設計マニュアル，pp.38-39，1987
- 7) 長尾毅：限界状態設計法の鉄筋コンクリート港湾構造物への適用に関する研究，港湾技術研究所報告第33巻第4号，pp.80-90，1994
- 8) 社団法人土木学会：2009年制定 コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，p.97，2002
- 9) 社団法人土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，2008
- 10) 横田弘，福島賢治，秋本孝，岩波光保：鉄筋コンクリートケーソンの構造設計の合理化に関する2，3の検討，港研資料 No. 995，2001

付録

- 付録1 供用応力度法により設計されたケーソン部材の性能照査に関する検討
- 付録2 既設構造物におけるケーソン部材の性能評価に関する考察
- 付録3 ケーソン形状図

付録 1 許容応力度法により設計されたケーソン部材の性能照査に関する検討

1.1 検討概要

過去に許容応力度法により設計されたケーソン式防波堤の標準部断面を対象として、現行の技術基準に基づき、各部材の性能照査を行い、現行基準による性能照査における支配的な照査項目・指標を調査した。

1.2 検討条件

(1) 対象施設

全国の防波堤施設のうち、ケーソン形状や波浪条件が異なる5施設を対象とした。今回、それぞれの施設名をF防波堤、G防波堤、H防波堤、I防波堤、J防波堤と表示する。

(2) 計算条件

検討にあたって用いた条件は、付録表-1.1のとおりである。今回の検討においては、使用限界状態に着目した照査を実施したこともあり、設計状態の主たる作用については、変動波浪（一万回波）を用いた。また、照査指標は曲げひび割れ幅であり、その限界値は現行の技術基準に従った。すなわち、側壁や底版等の外側鉄筋では、 $0.0035c$ （ c はかぶり厚さ）を、内側鉄筋では、 $0.005c$ を採用した。

また、技術基準の中で、使用限界状態の照査に用いる波浪条件の設定は、設計供用期間中にしばしば作用することが想定される波浪として適切に設定することとされている。一般的な方法として、各地点における波浪観測データより個別波の出現状況の推定を行い、次に、観測期間中の個別波の平均周期を用いて設計供用期間中における個別波の頻度分布を作成し、波の来襲する回数が10,000回オーダーとなる波を設定する。

本論では、5施設の波浪条件の設定を簡便に行うため、過去に全国の港湾で一万回作用時の波高を算出し、設計沖波波高との比や確率波高へ換算した結果を用いて、使用限界状態の照査に使用する変動波浪を設定した。過去の一萬回作用時の波高の換算表を付録表-1.2に示す。5施設の設計波高は、既往の設計波高に設計沖波波高との比（ $H_{-万}/H_0$ ）を乗じることで使用限界状態の設計波高とした。なお、波の周期については既往条件と同じものとする。付録表-1.3に算出した5施設の使用限界状態の設計波高を示す。

1.3 部材の性能照査結果と考察

(1) 性能照査結果

部材の性能照査は、底版、フーチング、側壁の各部材の

付録表-1.2 一万回作用時の波高の換算

	地点名	一万回波	設計沖波	$H_{-万}$	確率波高	一万回波算出	
		($H_{-万}$)	(H_0)	H_0	(ヶ月)	データの統計年	
太平洋側・関東以北	紋別	7.4	6.8	1.09	5.2	6年統計	
	苫小牧	6.0	8.7	0.69	3.3	8年統計	
	むつ小川原	7.4	7.8	0.95	2.7	16年統計	
	八戸	6.9	6.7	1.03		18年統計	
	宮古	4.6	6.6	0.70		6年統計	
	釜石	6.2	8.3	0.75	3.8	12年統計	
	塩釜(仙台港区)	5.6	7.0	0.80		11年統計	
	相馬	5.7	6.5	0.88	3.7	8年統計	
	小名浜	6.9	6.0	1.15		10年統計	
	常陸那珂	6.8			3.3	10年統計	
東海以南	鹿島	7.7	8.7	0.89		6年統計	
	波浮	7.9			3.6	17年統計	
	御前崎	5.0	14.0	0.36		2年統計	
	御坊沖	7.5			4.6	6年統計	
	高知	8.0	15.0	0.53	6.0	9年統計	
	油津	7.8	9.0	0.87	5.9	10年統計	
	志布志	6.8	12.2	0.56		10年統計	
	中城湾	8.3	17.0	0.49	7.6	17年統計	
	日本海側	留萌	8.1	8.9	0.91		20年統計
		瀬棚	8.2			0.9	7年統計
秋田		9.8	12.1	0.81		8年統計	
酒田		9.6	7.5	1.28		20年統計	
新潟西		7.2	7.6	0.95	0.9	8年統計	
輪島		8.4			1.0	11年統計	
福井		8.3	8.5	0.98		9年統計	
金沢		9.0	8.8	1.02	0.8	20年統計	
鳥取		7.5	10.0	0.75		11年統計	
浜田		7.8			1.3	16年統計	
玄界灘	7.1			5.4	6年統計		
名瀬	7.9	7.0	1.13	2.1	10年統計		
那覇	6.9	11.5	0.60	1.6	16年統計		

付録表-1.3 設計波高の設定

施設名	使用限界状態の設計波高 $H_0=H_{1/3} \times (H_{-万}/H_0)(m)$
F防波堤	7.60
G防波堤	9.20
H防波堤	4.20
I防波堤	4.70
J防波堤	6.70

使用限界状態に対して行った。その際の主たる作用は、変動状態（一万回波）を用いた。また、フーチングが存在しないH、I、J防波堤については、フーチングの照査は実施していない。部材の照査結果を付録表-1.4～付録表-1.8に示す。各部材の主要な照査箇所において、上側・下側、内側・外側など配置鉄筋量（ A_s ）や必要鉄筋量（ A_{sn} ）を示している。併せて、各状態で発生する鉄筋の引張応力度も計算している。

使用限界状態の照査結果の整理としては、既存の設計結果から配置されている鉄筋量（ A_s ）に対して、今回照査した結果、必要な鉄筋量（ A_{sn} ）を算出し、その比（ A_{sn}/A_s ）で評価を実施した。すなわち、比（ A_{sn}/A_s ）が1.0を超える箇所は設計上、鉄筋が不足し、曲げひび割れ幅の限界値を満足しないことになる。

(2) 考 察

底版においては、5 施設中、3 施設において比 (A_{sn}/A_s) が1.0を超え、許容値を満足しない結果となった。特に底版下側の鉄筋が不足し、許容値に近い値を示す傾向が顕著となった。

次にフーチングにおいては、2 施設すべてで比 (A_{sn}/A_s) が 1.0 以下であり、許容値を満足する結果となった。

側壁においては、5 施設すべてで比 (A_{sn}/A_s) が1.0を超える箇所が見受けられ、許容値を満足しない結果となったが、底版のように鉄筋の内側、外側での比 (A_{sn}/A_s) の傾向は見受けられなかった。ただし、比 (A_{sn}/A_s) が1.0を超える箇所を見てみると、場所によっては2倍以上もの鉄筋が不足している箇所もあり、ケーソン部材の中でも特に側壁が設計上、配筋を決定する上での支配的な部材であると考えられる。

また、許容値を満足しない箇所について、表中の既設計結果と使用限界状態の発生引張応力度の数値を比較すると、使用限界状態の引張応力度の数値が既設計結果よりも小さいにも関わらず、必要鉄筋量が多い傾向にある。すなわち、鉄筋が降伏に至る前に、曲げひび割れ幅の限界値の照査により設計断面が決定されることになる。

付録表-1.1 設計条件等一覧

		F防波堤		G防波堤		H防波堤		I防波堤		J防波堤	
		断面図		断面図		断面図		断面図		断面図	
		平面図		平面図		平面図		平面図		平面図	
ケーソン形状図		断面図		断面図		断面図		断面図		断面図	
		平面図		平面図		平面図		平面図		平面図	
設計年度		昭和51年度		平成4年度		平成元年度		平成7年度		平成8年度	
設計状態		既住		既住		既住		既住		既住	
潮位		H.W.L.	L.W.L.	H.W.L.	L.W.L.	H.W.L.	L.W.L.	H.W.L.	L.W.L.	H.W.L.	L.W.L.
Hmax(m)		-	7.6	14.3	9.2	8.02	4.2	6.4	4.7	11.0	6.7
H1/3(m)		8.0	4.2	8.0	5.1	4.71	2.3	4.6	2.6	7.5	3.7
T(sec)		14.0	14.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	14.0	14.0
$\beta(^{\circ})$		25.56	25.56	0.00	0.00	74.00	74.00	0.00	0.00	10.00	10.00
コンクリート		$f_{ck} = 24\text{N}/\text{mm}^2$		$f_{ck} = 24\text{N}/\text{mm}^2$		$f_{ck} = 24\text{N}/\text{mm}^2$		$f_{ck} = 24\text{N}/\text{mm}^2$		$f_{ck} = 24\text{N}/\text{mm}^2$	
鉄筋		SD295		SD295		SD295		SD345		SD345	
許容ひび割れ幅(内側)		0.0050・c(今回設定)		0.0050・c(今回設定)		0.0050・c(今回設定)		0.0050・c(今回設定)		0.0050・c(今回設定)	
許容ひび割れ幅(外側)		0.0035・c(今回設定)		0.0035・c(今回設定)		0.0035・c(今回設定)		0.0035・c(今回設定)		0.0035・c(今回設定)	
ϵ'_{csd}		150×10^{-6} (今回設定)		150×10^{-6} (今回設定)		150×10^{-6} (今回設定)		150×10^{-6} (今回設定)		150×10^{-6} (今回設定)	

付録表-1.4 F防波堤 照査結果

	照査箇所	既設計結果			使用限界状態(今回)			照査位置図			
		配置鉄筋量 As(cm ² /m)	発生引張応力度 σs(N/mm ²)	必要鉄筋量 Asn(cm ² /m)	Asn/As	発生引張応力度 σs(N/mm ²)					
F防波堤	底板	法直方向	I-① 上側	D13 @200 D13 @200 As=12.68	141.38	上側	D13 @200 Asn=6.34	0.50	40.86		
			I-⑤ 下側	D19 @200 D19 @200 As=28.66	150.59	下側	D19 @200 D19 @200 Asn=28.66	1.00	99.38		
		法平方向	I-③ 上側	D13 @200 D13 @200 As=12.68	130.02	上側	D16 @200 Asn=9.93	0.78	100.43		
			III-③ 下側	D19 @200 D19 @200 As=28.66	153.17	下側	D19 @200 D19 @200 Asn=28.66	1.00	92.49		
		フーチング	法直方向	基部 下側	D22 @200	139.82	下側	D19 @200	0.74		89.20
					D22 @200 As=38.72			D19 @200 Asn=28.66			
	側壁	鉛直方向	I-① 内側	D13 @200 D16 @200 As=16.27	153.88	内側	D13 @200 D16 @200 Asn=16.27	1.00	143.96		
			I-② 外側	D19 @200 D19 @200 As=28.66	101.84	外側	D16 @200 Asn=9.93	0.35	58.98		
		水平方向	III-④ 内側	D16 @200 D19 @200 As=24.26	142.05	内側	D16 @200 D19 @200 Asn=24.26	1.00	127.39		
			III-⑨ 外側	D19 @200 D19 @200 As=28.66	56.13	外側	D19 @200 D22 @200 Asn=33.69	1.18	89.65		

付録表-1.5 G防波堤 照査結果

	照査箇所	既設計結果			使用限界状態(今回)			照査位置図			
		配置鉄筋量 As(cm ² /m)	発生引張応力度 σs(N/mm ²)	必要鉄筋量 Asn(cm ² /m)	Asn/As	発生引張応力度 σs(N/mm ²)					
G防波堤	底板	法直方向	I-① 上側	D19 @200 D16 @200 As=24.26	161.83	上側	D16 @200 D16 @200 Asn=19.86	0.82	131.60		
			I-⑤ 下側	D19 @200 D25 @200 As=39.67	170.69	下側	D25 @200 D25 @200 Asn=50.68	1.28	114.08		
		法平方向	III-③ 上側	D16 @200 D19 @200 As=24.26	156.05	上側	D16 @200 D16 @200 Asn=19.86	0.82	117.61		
			III-③ 下側	D19 @200 D25 @200 As=39.67	150.27	下側	D25 @200 D25 @200 Asn=50.68	1.28	102.05		
		フーチング	法直方向	基部 下側	D25 @200	129.28	下側	D25 @200	1.00		163.12
					D25 @200 As=50.68			D25 @200 Asn=50.68			
	側壁	鉛直方向	I-① 内側	D13 @200 D19 @200 As=20.67	161.96	内側	D13 @200 D19 @200 Asn=20.67	1.00	147.70		
			I-⑨ 外側	D13 @200 D16 @200 As=16.27	163.59	外側	D19 @200 D22 @200 Asn=33.69	2.07	97.25		
		水平方向	III-④ 内側	D19 @200 D19 @200 As=28.66	162.77	内側	D19 @200 D22 @200 Asn=33.69	1.18	122.17		
			III-⑨ 外側	D19 @200 D19 @200 As=28.66	170.75	外側	D25 @200 D25 @200 Asn=50.68	1.77	113.69		

付録表-1.6 H防波堤 照査結果

	照査箇所	既設計結果			使用限界状態(今回)			照査位置図			
		配置鉄筋量 As(cm ² /m)	発生引張応力度 σs(N/mm ²)	必要鉄筋量 Asn(cm ² /m)	Asn/As	発生引張応力度 σs(N/mm ²)					
H防波堤	底板	法直方向	I-① 上側	D19 @200 D13 @200 As=20.67	148.68	上側	D13 @200 D13 @200 Asn=12.68	0.61	86.88		
			I-⑤ 下側	D19 @200 D25 @200 As=39.67	165.03	下側	D19 @200 D22 @200 Asn=33.69	0.85	87.27		
		法平方向	III-③ 上側	D13 @200 D19 @200 As=20.67	149.78	上側	D16 @200 Asn=9.93	0.48	88.50		
			III-③ 下側	D19 @200 D22 @200 As=33.69	154.89	下側	D19 @200 D19 @200 Asn=28.66	0.85	91.58		
		フーチング	法直方向	基部 下側	D19 @200	155.64	内側	D19 @200	1.39		137.12
					D19 @200 As=20.67			D19 @200 Asn=28.66			
	側壁	鉛直方向	I-① 外側	D19 @200 As=14.33	144.31	外側	D13 @200 D13 @200 Asn=12.68	0.88	80.56		
			I-① 内側	D16 @200 D19 @200 As=24.26	162.41	内側	D19 @200 D22 @200 Asn=33.69	1.39	139.24		
		水平方向	III-④ 内側	D16 @200 D13 @200 As=16.27	140.62	内側	D13 @200 D13 @200 Asn=12.68	0.78	86.32		

付録表-1.7 I 防波堤 照査結果

	照査箇所	既設計結果			使用限界状態(今回)			照査位置図				
		配置鉄筋量 As(cm ² /m)	発生引張応力度 σ_s (N/mm ²)	必要鉄筋量 Asn(cm ² /m)	Asn/As	発生引張応力度 σ_s (N/mm ²)						
I 防波堤	底板	法直方向	I-③ 上側	D13 @200 D16 @200 As=16.27	171.91	上側	D13 @200 D16 @200 Asn=16.27	1.00	110.36			
			I-⑤ 下側	D22 @200 D25 @200 As=44.70	175.93	下側	D25 @200 D25 @200 Asn=50.68	1.13	94.44			
		法平方向	I-③ 上側	D13 @200 D16 @200 As=16.27	179.85	上側	D13 @200 D13 @200 Asn=12.68	0.78	147.49			
			Ⅲ-③ 下側	D22 @200 D22 @200 As=38.72	176.13	下側	D22 @200 D25 @200 Asn=44.70	1.15	98.32			
		側壁	鉛直方向	I-① 内側	D13 @200 D16 @200 As=16.27	174.07	内側	D16 @200 D19 @200 Asn=24.26	1.49		146.69	
				I-⑨ 外側	D16 @200 D13 @200 As=16.27	193.98	外側	D13 @200 D16 @200 Asn=16.27	1.00		93.68	
	水平方向		Ⅲ-⑤ 内側	D16 @200 D16 @200 As=19.86	161.32	内側	D19 @200 D19 @200 Asn=28.66	1.44	131.90			
			Ⅲ-⑨ 外側	D19 @200 D19 @200 As=28.66	135.92	外側	D16 @200 D19 @200 Asn=24.26	0.85	90.31			

付録表-1.8 J 防波堤 照査結果

	照査箇所	既設計結果			使用限界状態(今回)			照査位置図				
		配置鉄筋量 As(cm ² /m)	発生引張応力度 σ_s (N/mm ²)	必要鉄筋量 Asn(cm ² /m)	Asn/As	発生引張応力度 σ_s (N/mm ²)						
J 防波堤	底板	法直方向	I-③ 上側	D13 @200 D13 @200 As=12.68	105.03	上側	D16 @200 - Asn=9.93	0.78	88.19			
			I-⑤ 下側	D16 @200 D19 @200 As=24.26	167.99	下側	D19 @200 D19 @200 Asn=28.66	1.18	89.37			
		法平方向	I-③ 上側	D13 @200 D13 @200 As=12.68	173.87	上側	D13 @200 D13 @200 Asn=12.68	1.00	103.48			
			Ⅲ-③ 下側	D16 @200 D19 @200 As=24.26	187.50	下側	D19 @200 D19 @200 Asn=28.66	1.18	95.71			
		側壁	鉛直方向	I-① 内側	D19 @200 D16 @200 As=24.26	168.67	内側	D19 @200 D22 @200 Asn=33.69	1.39		131.79	
				I-⑨ 外側	D13 @200 D19 @200 As=20.67	181.91	外側	D13 @200 D16 @200 Asn=16.27	0.79		79.29	
	水平方向		Ⅲ-④ 内側	D19 @200 D19 @200 As=28.66	176.52	内側	D22 @200 D22 @200 Asn=38.72	1.35	141.11			
			Ⅲ-⑨ 外側	D19 @200 - As=14.33	10.10	外側	D16 @200 D16 @200 Asn=19.86	1.39	86.94			

付録 2 既設構造物におけるケーソン部材の性能評価に関する考察

既設構造物においても、状況によって性能評価が必要となる場合がある。その際、構造物が完成する前に実施される設計作業と前提条件が異なる場合がある。以下に、既設構造物における性能評価の考え方を提示するとともに、幾つかの項目について留意点や課題を記載する。

なお、以下の文献が参考になる。

公益社団法人日本コンクリート工学会発行 コンクリート工学 Vol.53, No.1 港湾のコンクリート構造物の転用計画～防波堤等ケーソンを例として (2016.1)

①既設ケーソンにおける性能評価

上述の通り、既設ケーソンにおける性能評価では、新設時に実施される設計作業と前提条件が異なる場合がある。例えば、鉄筋の配筋量やコンクリート強度は設計時と施工時で異なるのが一般的である。したがって、供用されたケーソンの現状に沿った性能評価が求められる。

また、本編で示した通り、ケーソン部材のうち底版、フーチング、側壁は曲げひび割れ幅の照査で断面が決定されている場合が多い。現行基準の使用生では曲げひび割れ幅が指標となるが、外観調査によって直接観察できる場合がある。その際、点検診断によって直接応答値を入手できる。ただし、海中に没したケーソンでは、アクセスが困難な箇所や海生物の付着などによってひび割れの観察が困難な場合が多い。このような場合には、再度応答値や限界値を見直すことが必要と思われるが、それらの手法に関しては知見が少ない。

以下に、現状考え得る各項目の性能評価における配慮と課題を示す。

②鉄筋の配筋量

ケーソン各部材の配筋計算については、基本設計で決定した断面に対して、鉄筋のピッチやかぶり等に配慮して細部設計において決定される。通常、ケーソンを製作する場合には、配筋計算で算出された規定の鉄筋量を満足するように計画され、特に部分的に差筋が必要な箇所や側壁と底版の端部など部材間の調整が必要な箇所には、実際に計算された配筋よりも多く鉄筋が配置される。したがって、実際に現場で施工された施工配筋図をもとに、鉄筋の配筋量を評価に用いることができる。ただし、鉄筋の定着等が十分であるか、確認しなければならない。

③コンクリート強度

一般的に、現場で使用されるコンクリートの圧縮強度は、設計強度よりも大きくなっている場合が多く、施工時の現場配合試験結果等を確認し、その配合強度を採用することは有効である。また、ケーソン本体から実際にコア抜きして実強度を確認することもできる。ただし、コンクリートの強度の設定にあたっては、施工状況等も踏まえた空間的なばらつきを考慮しなければならない。

④曲げひび割れ幅

現行基準では、本編の式(1)により曲げひび割れ幅を算定する。この時、算定式の中で用いられる定数であるコンクリートの収縮及びクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値 ϵ'_{csd} には 150×10^{-6} 程度を使うことが標準とされている。

一方、付録表-2.1 に示すとおり、コンクリート標準示方書では、 ϵ'_{csd} の値は2012年改訂時に見直しが行われている。コンクリート標準示方書〔設計編〕2012年版では、環境条件を踏まえた ϵ'_{csd} が設定された。ケーソンは仮置き期間を除けば海中に没しているものであり、常時湿潤環境に該当する。また、一般に仮置き期間は比較的短期であり、仮置き期間および据付け時にひび割れが発生した事例は確認されていない。したがって、 ϵ'_{csd} には 100×10^{-6} を採用することができると考えられる。ただし、構造物を製作した現場環境やヤードでの仮置き期間などを総合的に判断して決定することが重要である。

いずれにしても、今後、ケーソン部材の評価のための調査項目の設定や、現場調査の実行可能性等、現実的な状況も鑑みて、応答値算定法と限界値の設定を見直すことが重要と思われる。

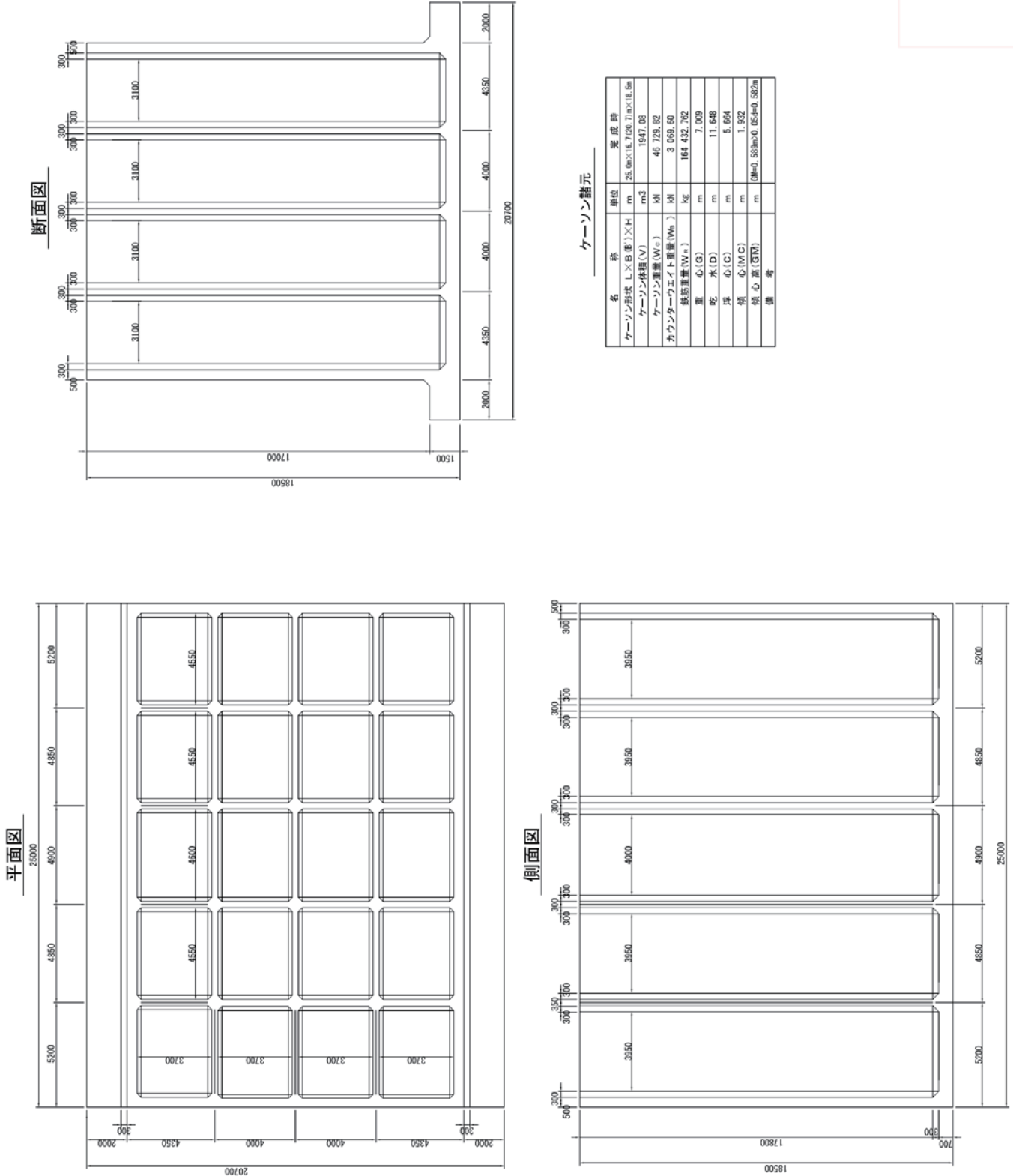
付録表-2.1 コンクリートの収縮及びクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値の比較

基準類	ϵ'_{csd}				備考
H11港湾基準	海中部では0, それ以外では 150×10^{-6}				—
H19港湾基準	一般の場合, 150×10^{-6} 程度, 高強度コンクリートの場合は 100×10^{-6} 程度				製作直後にケーソンを設置しない場合を考慮して, 海中部の記載を削除した
コンクリート 標準示方書 [設計編] 2012年版	環境条件	常時乾燥環境 (雨水の影響を受けない桁下面など)	乾湿繰返し環境 (桁上面, 海岸や川の水面に近く湿度が高い環境など)	常時湿潤環境 (土中部材など)	常時湿潤環境では乾燥収縮は進行しないが, 不確定要素を考慮して 100×10^{-6} とした
	自重でひび割れが発生 (材齢30日を想定)する部材	450×10^{-6}	250×10^{-6}	100×10^{-6}	
	永続作用時にひび割れが発生 (材齢100日を想定)する部材	350×10^{-6}	200×10^{-6}	100×10^{-6}	
	変動作用時にひび割れが発生 (材齢200日を想定)する部材	300×10^{-6}	150×10^{-6}	100×10^{-6}	

付録3 ケーソン形状図

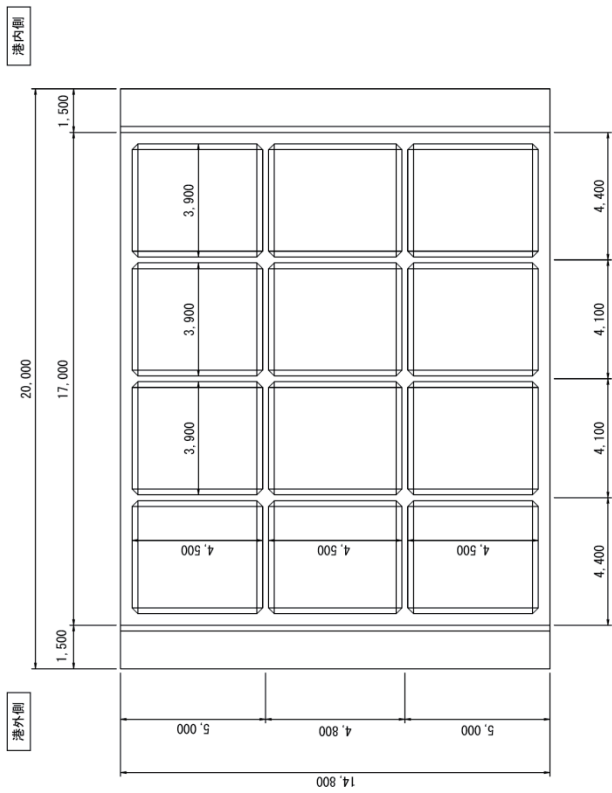
3.1 対象施設のケーソン諸元

各防波堤ケーソンの形状図を付録図-3.1～3.10に示す。

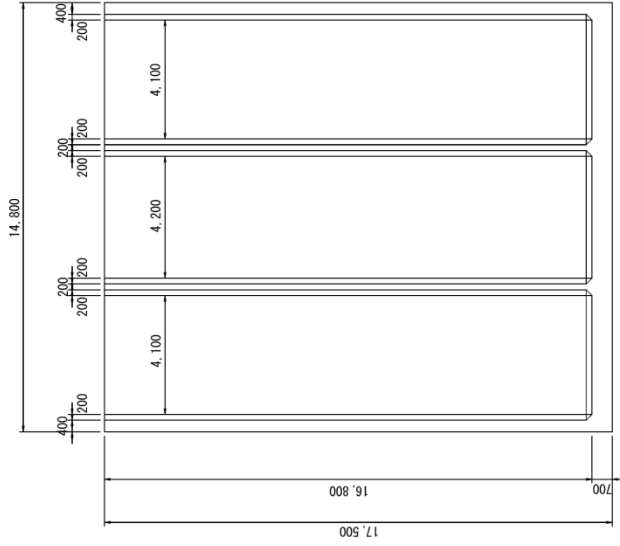


付録図-3.1 A防波堤ケーソン形状図

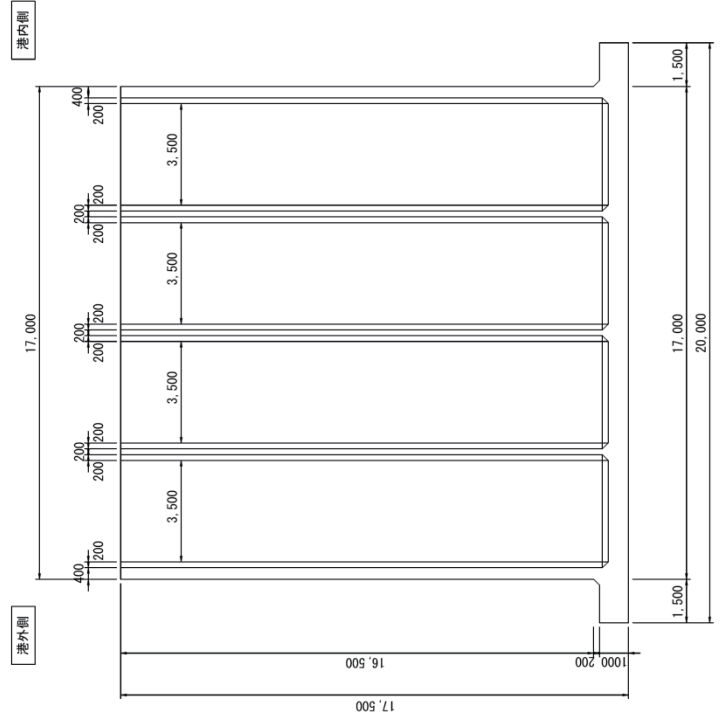
平面図



側面図



断面図

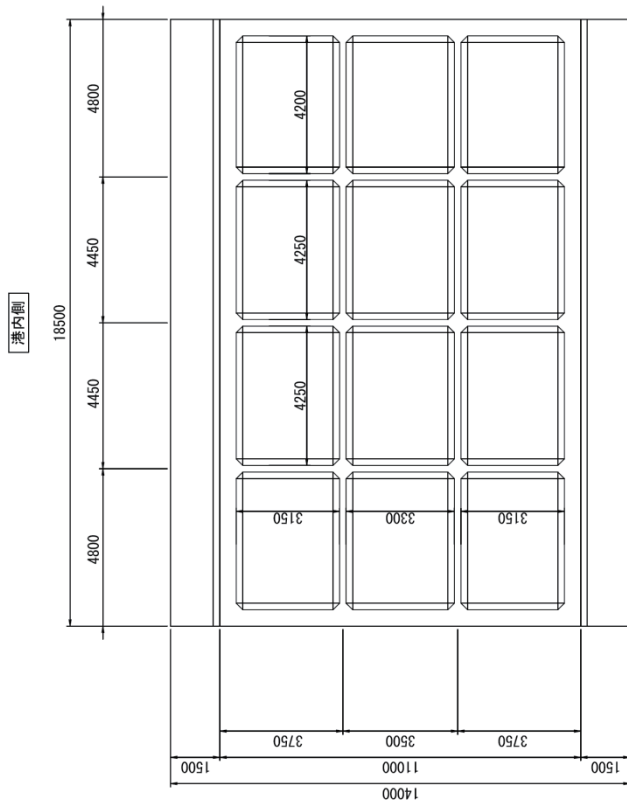


ケーソン諸元

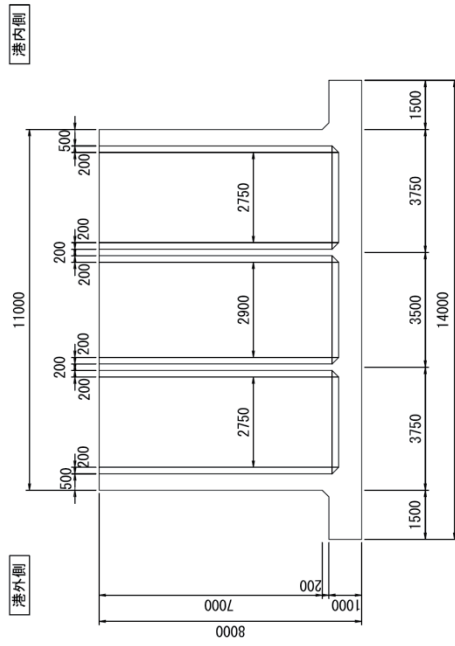
ケーソン製作	完成時
幅(B)	17,000/20,000 mm
形状寸法	長さ(L) 14,800 mm
	高さ(H) 17,500 mm
ケーソン体積(V)	903.624 m ³ /個
ケーソン重量(W)	21,686.976 kN/個
摩擦増大マット重量(W')	535.168 kN/個
ケーソン総重量	22,222.144 kN/個

付録図-3.2 B防波堤ケーソン形状図

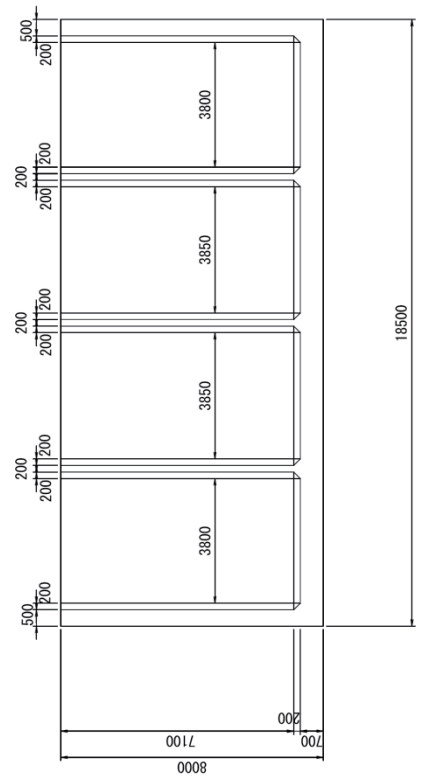
平面図



断面図



側面図

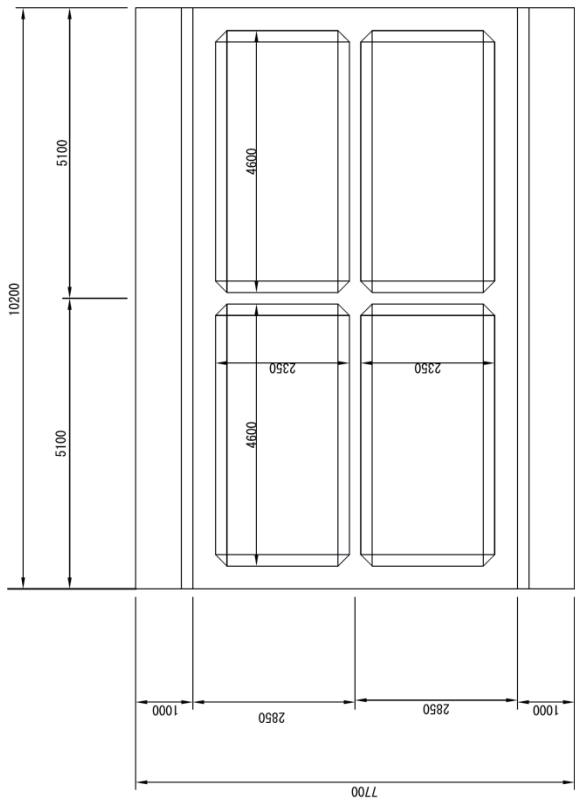


ケーソン諸元

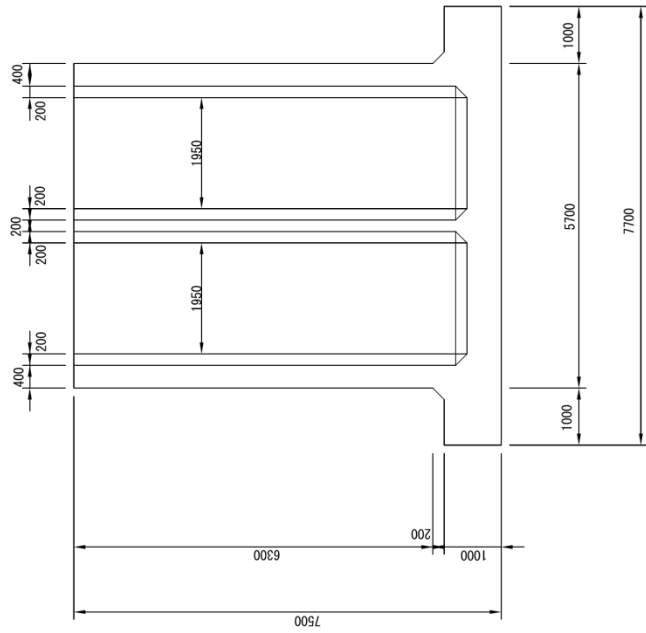
項目	記号	単位	諸元	摘要
ケーソン形状	長さ	L	m	18.50
	幅	B	m	11.00
ケーソン本体重量	高さ	H	m	8.00
	重量	W _G	kN	12,244.90
コンクリート体積	V	m ³	510.20	γ=24.0kN/m ³
ケーソン重心	G	m	2.79	ケーソン底面より
吃水	d	m	5.81	"
浮心	C	m	2.75	"
傾心	GM	m	1.70	傾心と重心の距離

付録図-3.3 C防波堤ケーソン形状図

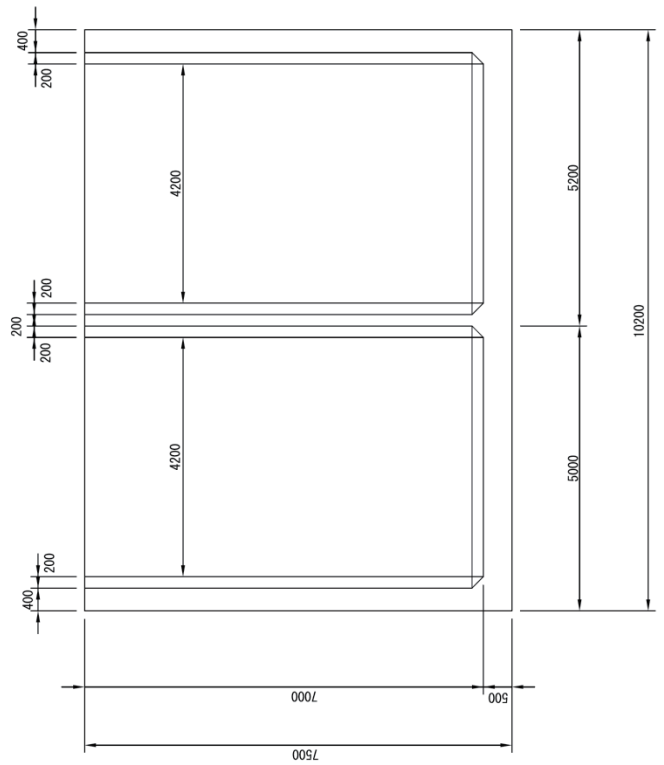
平面図



断面図

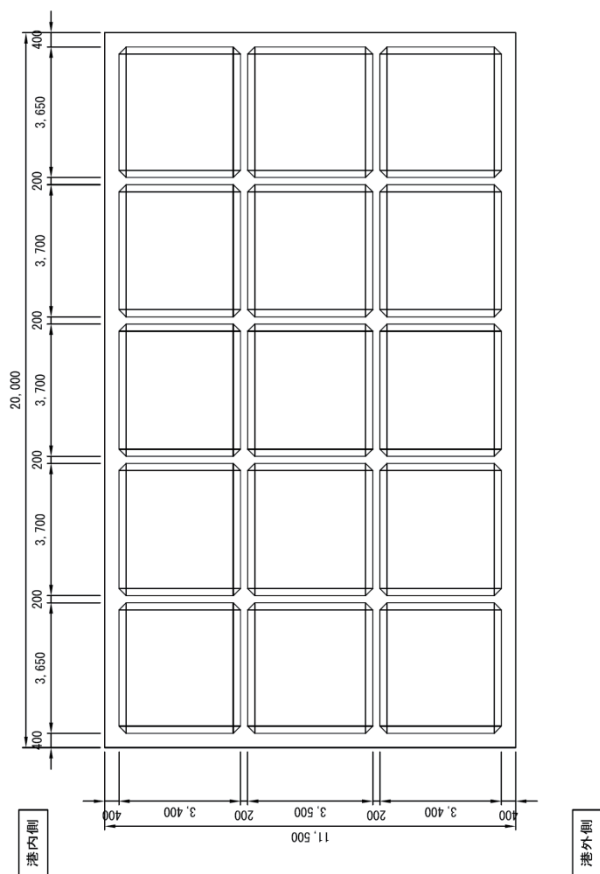


側面図

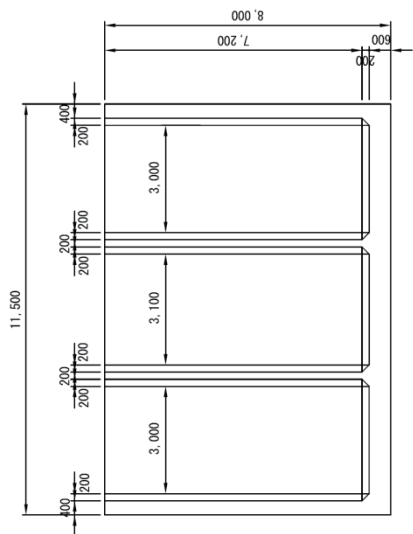


付録図-3.4 D防波堤ケーソン形状図

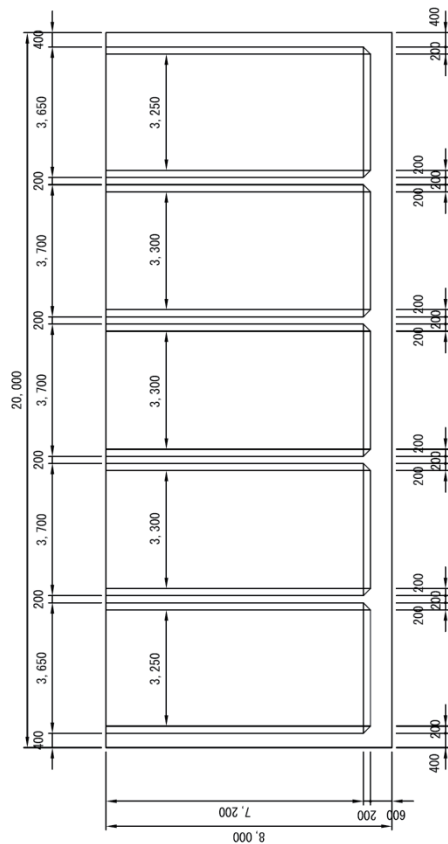
平面図



断面図



側面図

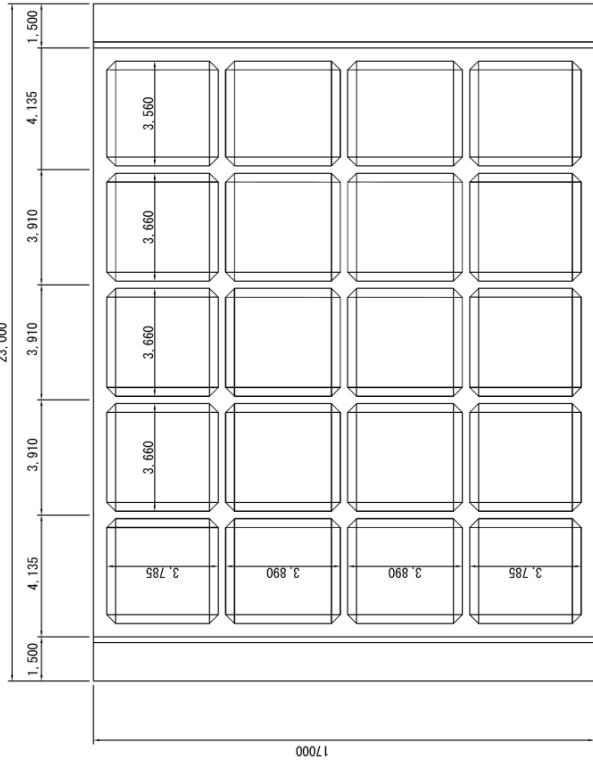


ケーソン諸元

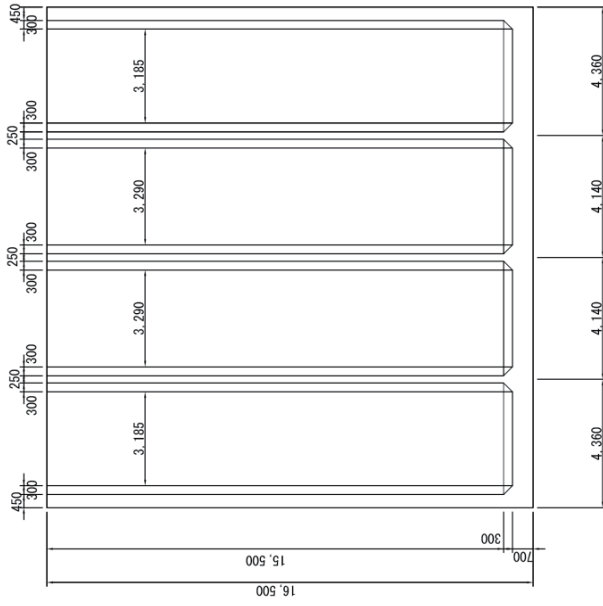
項目	符号	単位	アスファルトマット	ゴムマット
コンクリート体積	V	m ³	450.38	450.38
コンクリート質量	W	kN	10,809.12	10,809.12
ケーソン重心	G	m	3.01	3.05
ケーソン吃水	d	m	4.76	4.66
ケーソン浮心	c	m	2.42	2.34
ケーソン傾心	MG	m	1.69 > 0.05bd=0.24	1.64 > 0.05bd=0.23

付録図-3.5 E防波堤ケーソン形状図

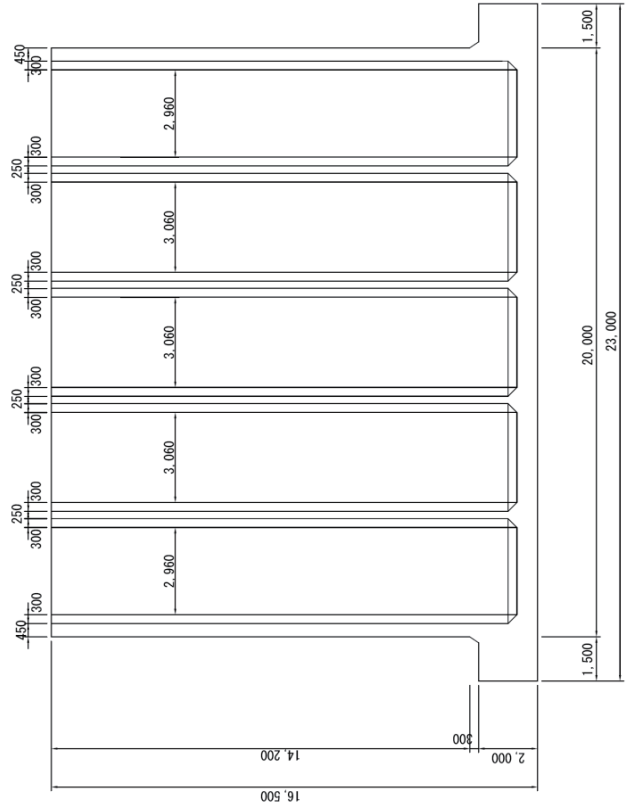
平面図



側面図



断面図

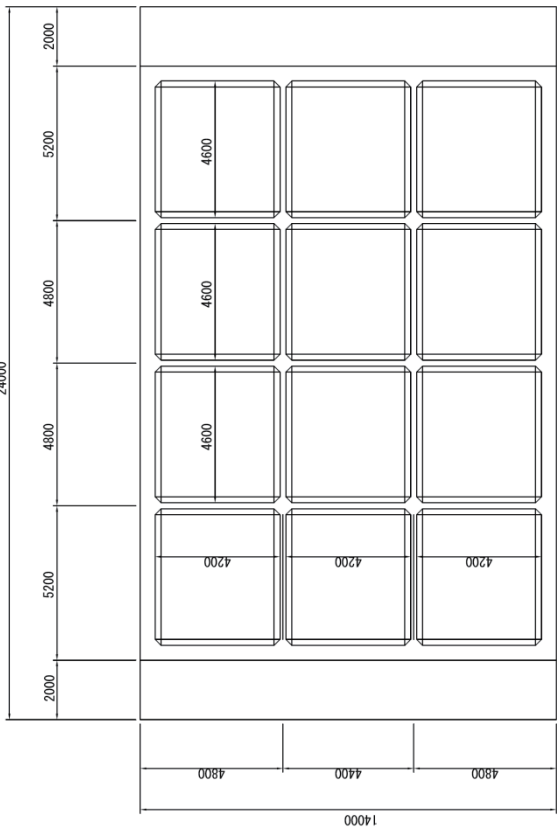


ケーソン諸元

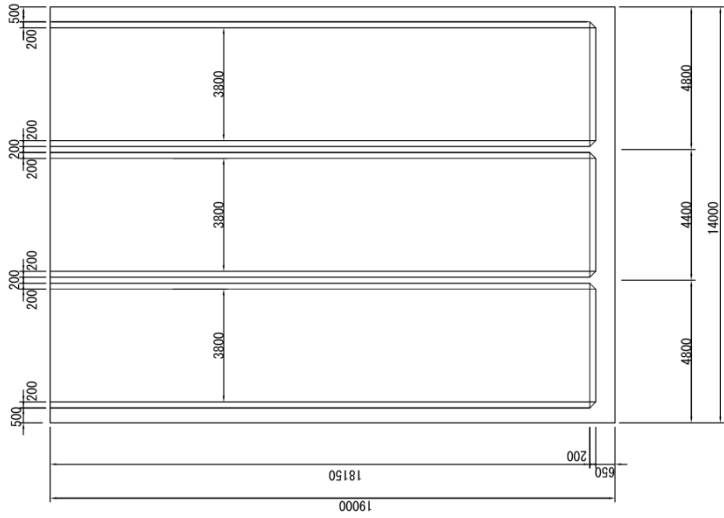
ケーソン製作	完成時
幅 (m)	20.0 (23.0)
長さ (m)	17.0
高さ (m)	16.5
総重量 (t)	3,411.87
吃水 (m)	9.44
浮心 (m)	4.60
重心 (m)	6.56
コンクリート量 (m ³)	1,392.60
鉄筋量 (kg)	134,616.99
ケーソン1体あたりの埋込率 (%)	
浮遊時の安定	M/G=0.52m> 0.05D=0.47m

付録図-3.6 F 防波堤ケーソン形状図

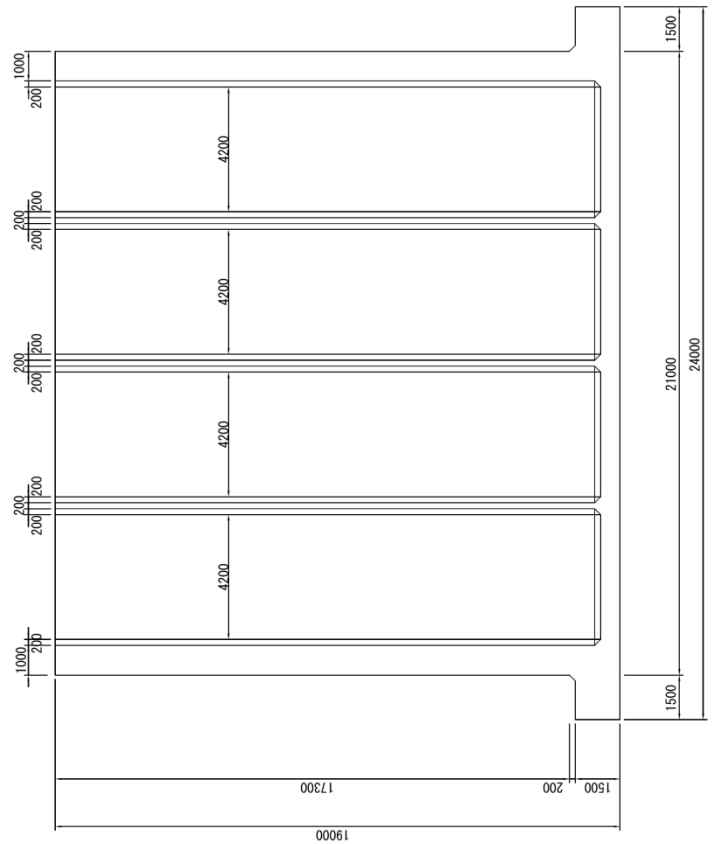
平面図



側面図

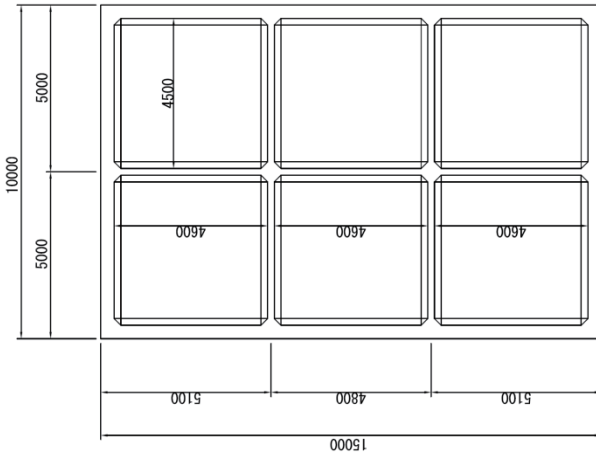


断面図

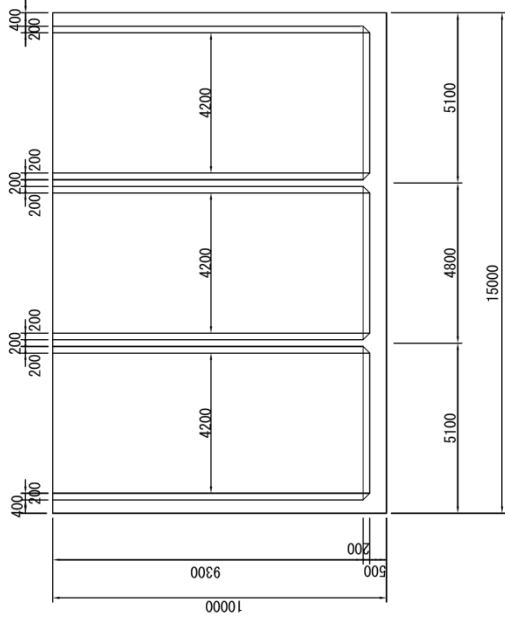


付録図-3.7 G防波堤ケーソン形状図

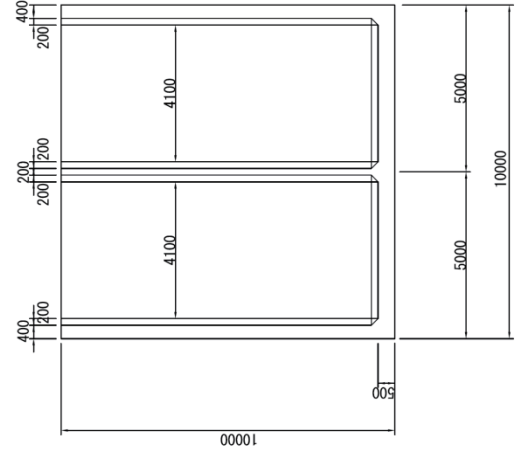
平面図



側面図

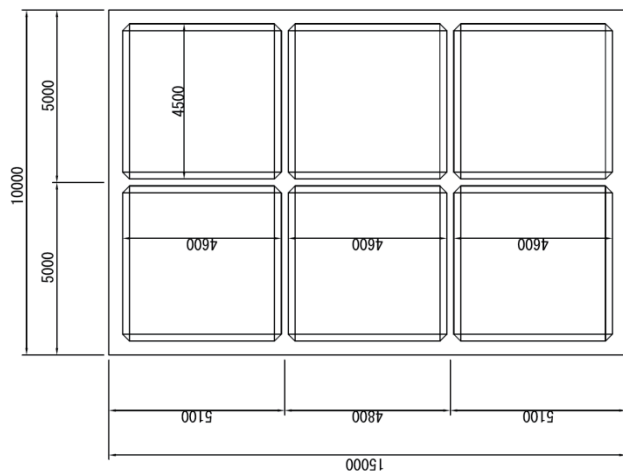


断面図

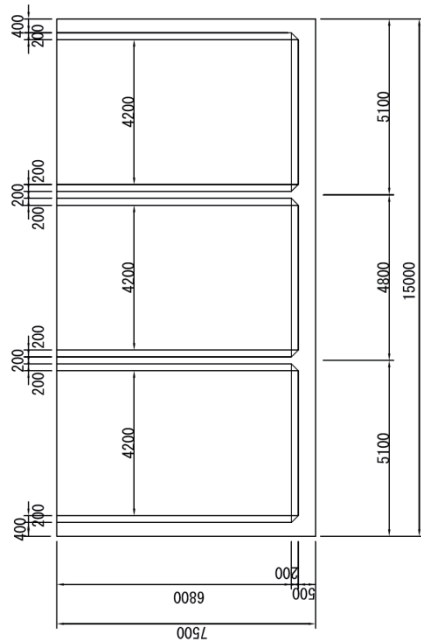


付録図-3.8 H防波堤ケーソン形状図

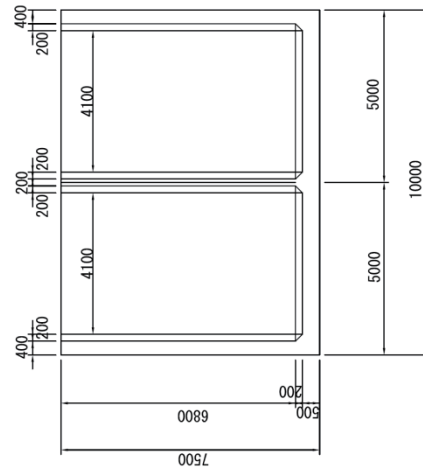
平面図



側面図



断面図



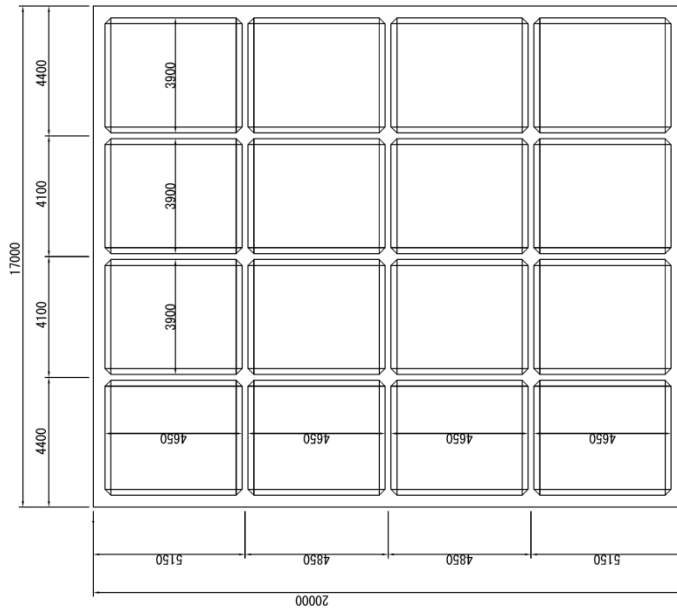
ケーソン諸元

ケーソン製作	完成時
幅	10.00 m
長さ	7.50 m
高さ	15.00 m
重量	639.47 t
重心	2.90 m
吃水	4.14 m
浮心	2.07 m
傾心	$GM=1.19m \geq 0.05 \cdot d=0.21 m$
コンクリート量	261.01 m ³
鉄筋量	27157.89 kg
型枠量	1127.44 m ²

付録図-3.9 I 防波堤ケーソン形状図

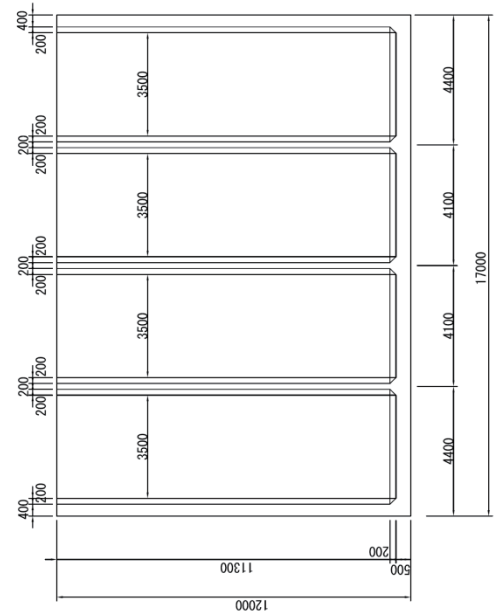
平面図

港外側

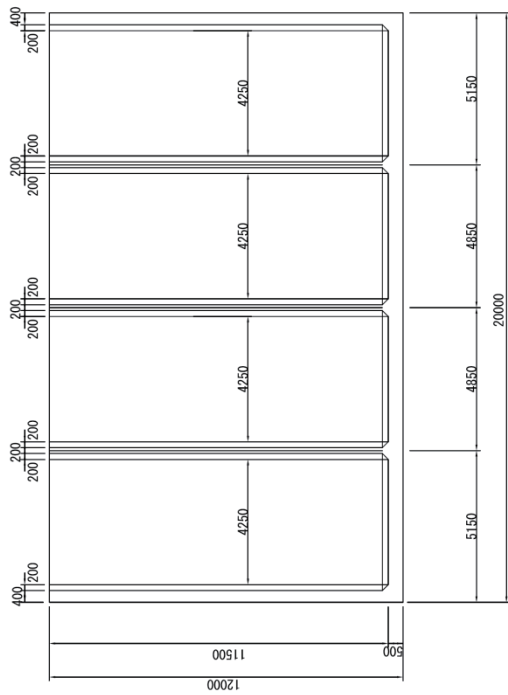


港内側

断面図



側面図



ケーソン浮遊時諸元

名称	単位	完成時
容積	V	m ³ 763.01
高さ	H	m 12.00
重量	W	t 1689.37
重心	G	m 4.88
吃水	D	m 5.24
浮心	C	m 2.67
傾心	MG	m 2.30 ≧ 0.05 • D=0.27

付録図-3.10 J防波堤ケーソン形状図

港湾空港技術研究所資料 No.1329

2016. 12

編集兼発行人 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

発行所 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2016) by MPAT

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of MPAT

この資料は、海上・港湾・航空技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は海上・港湾・航空技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。