

フラップ式陸閘の設計

伊藤 義将*・八尋 明彦**・遠山 憲二***・平田 昭博****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 審議役

*** 国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 調査課 調査課長

**** 国土交通省 四国地方整備局 高松港湾空港技術調査事務所 調査課 調査係長

撫養港の海岸部では、津波や高潮から背後を守るため陸閘の整備が計画されており、大型の陸閘については閉鎖を無人・無動力化することが求められている。本稿では、フラップ式陸閘の技術的課題とその検討結果より決定した設計方針について報告する。

キーワード：陸閘，防潮堤，可動式，津波防災，設計方針，動的解析

1. はじめに

撫養港の海岸部では、津波や高潮から背後を守るため陸閘の整備が計画されている。東日本大震災では、陸閘を閉鎖しようとしている際に津波によって命を落とすケースが発生した。そのため、大型の陸閘については閉鎖を無人・無動力化することが求められている。

フラップ式陸閘は津波・高潮来襲時に浮体を用いて陸閘を稼働させる防潮堤構造で、港湾・海岸分野では新しい形式（可動式）である。フラップ式陸閘の概念図を図-2 に示す。

別途実施された水理模型実験の結果を踏まえ、フラップ式陸閘独自の要求性能と性能規定を設定し、対応方針を検討した。

また、地震時に扉体が不用意に作動する可能性もあることから、動的解析を実施し検討を行った。



図-1 検討対象位置図

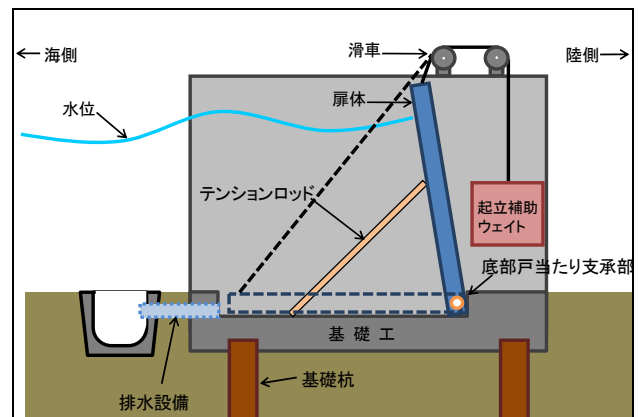


図-2 フラップ式陸閘の概念図（閉鎖状態）

2. 解放・閉鎖のシナリオ

2.1 津波浸水防護のシナリオ

設計にあたり、地震津波等の発生事象、防潮堤の閉鎖・開放、防潮堤への作用を時系列として整理したシナリオ（図-3）を想定した。

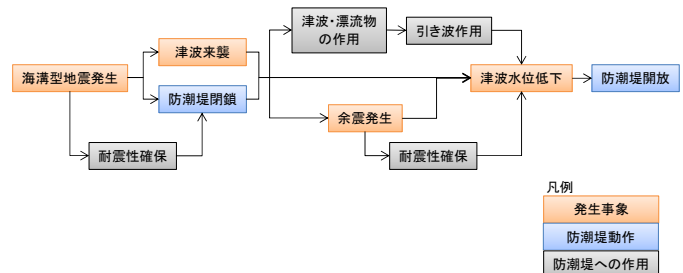


図-3 フラップ式陸閘の津波浸水防護のシナリオ

2.2 高潮浸水防護のシナリオ

高潮時の防護シナリオは図-4 に示す通りである。高潮の場合は事前に台風の接近が予想可能であることから、防潮堤閉鎖は、「手動閉鎖」を前提とした。

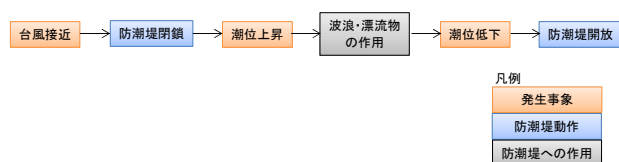


図-4 フラップ式陸閘の高潮浸水防護のシナリオ

3. フラップ式陸閘の要求性能と性能規定

3.1 津波に対する要求性能

フラップ式陸閘の要求性能として、発生頻度の高い津波に対して使用性を確保、それ以上の大きな津波に対しては修復性または安全性を確保することとした（図-5 参照）。

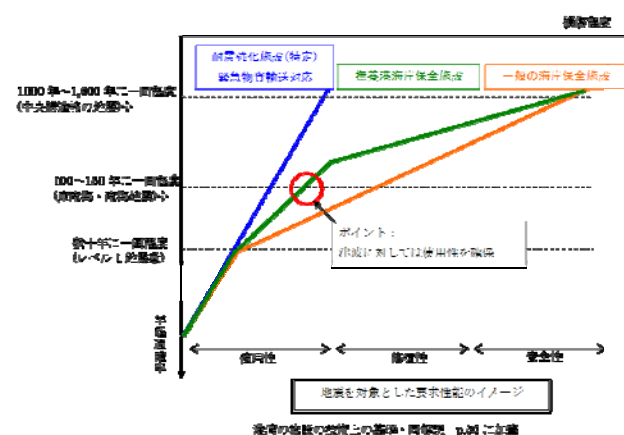


図-5 フラップ式陸閘の要求性能

3.2 地震に対する陸閘の要求性能および性能規定

表-1 は、撫養港海岸における陸閘の地震に対する要求性能と性能規定を示したものである。

表-1 陸閘の地震に対する要求性能と性能規定

想定地震動	対象構造物の状態 (要求性能)	許容損傷程度			
		残留鉛直変位	残留水平変位	傾斜角	構造部材
レベル1地震動	使用性 (防波堤の機能を損なわず継続して使用することによる被害を及ぼさないこと)	地震後の施設天端高が、高潮の許容越波流量から規定される高さよりも低くならないこと。	水平変位のモードが卓越する場合は壁の厚さの2倍、そうでない場合は1/10(100cm、壁の厚さの2倍)。	傾斜角が不同、沈下が門厚の閉閉可能な限界値以下。	部材の応力が弾性限界以下にならないこと。
レベル2地震動 (東南海・南海地震)	津波に対する使用性 (津波から背後地を防護できること)	地震後の施設天端高が、津波よりも低くならないこと。	水平変位のモードが卓越する場合は壁の厚さの2倍、そうでない場合は1/10(100cm、壁の厚さの2倍)。	傾斜角が不同、沈下が門厚の閉閉可能な限界値以下。	部材の応力がせん断耐力以下にならないこと。
レベル2地震動 (直下型：中央構造線)	安全性 (防波堤の機能が損なわれた場合であっても、人命の安全等を確保できること)	地震後の施設天端高が、許容越波流量から決まる天端高よりも低くならないこと。	- (※)	倒壊を許容するが、人命の安全を確保できること。	破壊を許容するが、人命の安全を確保できること。

※：背後地盤高はH.W.L.よりも高いため、浸水の可能性は低い。

対象地に来襲する高潮波浪は非常に小さく、越波流量では天端高は決定しなかった。

凹凸変位量は最大法線はらみ出し量のほぼ 1/2 以下であったと兵庫県南部地震での事例として一井ら¹⁾によってまとめられている。よって、最大法線はらみ出し量の限界値はフラップ式陸閘に接続する胸壁等の壁幅の2倍とした。

水理模型実験結果から撫養港海岸における発生頻度の高い津波の水位上昇速度 (0.03～0.09m/s) では法線平行方向に傾斜があると十分な浮力が働かず浮上しない場合もあるため、法線平行方向の許容傾斜角を 3° と設定した。法線方向の傾斜角から、許容沈下量は径間 8m の場合は 40cm、径間 6m の場合は 30cm となる。

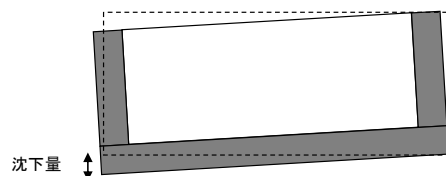


図-6 陸閘縦断方向沈下状況（正面図）

表-2 傾斜角度を基に算出した許容沈下量

傾斜角度	沈下量				
	10cm	20cm	30cm	40cm	50cm
径間 8.0m	0.7°	1.4°	2.1°	2.9°	3.6°
径間 6.0m	1.0°	1.9°	2.9°	3.8°	4.8°

水理模型実験の状況からは前後の傾斜による起立動作への影響は小さいと考えられることから、法線直角方向の許容傾斜角は、胸壁の許容傾斜角である 8°（重力式岸壁の被害程度Ⅱ）とした。

3.3 地震に対する基礎の照査基準

許容傾斜角度を満足するため、扉体下部の地盤は耐震性を有する必要がある。現地盤の状態では耐震性を満足しないため、基礎の検討を実施した。検討は近隣に民間倉庫等が存在するため騒音、振動への配慮と経済性等を比較し中掘工法（鋼管杭）を採用した。

鋼管杭の性能としては、レベル1地震動に対しては、損傷の程度が軽微であることが求められている。またレベル2地震動（東南海・南海地震）に対しては、津波来襲時に津波波力を受ける胸壁を支持する必要がある。ただし、レベル2地震動（中央構造線）に対しては、津波が発生しないことから人命の安全性が確保できればよいと考えられる。

基礎杭に発生する応力に関しては、照査基準は表-3のとおりとした。

表-3 鋼管杭を有する防潮堤の照査基準の考え方

想定地震動	対象構造物の状態 (要求性能)	許容損傷程度			
		残留鉛直変位	残留水平変位	傾斜角	構造部材
レベル1地震動	使用性 (防波堤の機能を損なわず継続して使用することによる被害を及ぼさないこと)	地震後の施設天端高が、高潮の許容越波流量から規定される高さよりも低くならないこと。	水平変位のモードが卓越する場合は壁の厚さの2倍、そうでない場合は1/10(100cm、壁の厚さの2倍)。	傾斜角が不同、沈下が門厚の閉閉可能な限界値以下。	部材の応力が弾性限界以下にならないこと。
レベル2地震動 (東南海・南海地震)	津波に対する使用性 (津波から背後地を防護できること)	地震後の施設天端高が、津波よりも低くならないこと。	水平変位のモードが卓越する場合は壁の厚さの2倍、そうでない場合は1/10(100cm、壁の厚さの2倍)。	傾斜角が不同、沈下が門厚の閉閉可能な限界値以下。	部材の応力がせん断耐力以下にならないこと。
レベル2地震動 (直下型：中央構造線)	安全性 (防波堤の機能が損なわれた場合であっても、人命の安全等を確保できること)	地震後の施設天端高が、許容越波流量から決まる天端高よりも低くならないこと。	- (※)	倒壊を許容するが、人命の安全を確保できること。	破壊を許容するが、人命の安全を確保できること。

※：背後地盤高はH.W.L.よりも高いため、浸水の可能性は低い。

4. 扉体構造の検討

4.1 起伏角度

扉体の自重による倒伏モーメントは、扉体倒伏時（起立角度 0° ）に最大値を示し、起立角度が大きくなるにつれて小さくなり、扉体直立時（起立角度 90° ）に 0 となる。

扉体に作用する水圧荷重（起立モーメント）は、水深が大きくなるにつれて増大するため、扉体の起伏速度は急激に早くなる。特に後方掛け回しタイプは起立角度 15° 付近から、起立状態まで急激に起動する（図-7 左側）。

一方、前方掛け回しタイプは、起立するにつれてウェイトによる起立しようとする荷重が小さくなり、 45° 付近からは扉体がウェイトを持ち上げようとする動作となり、逆に倒伏する方向への荷重となる（図-7 右側）。

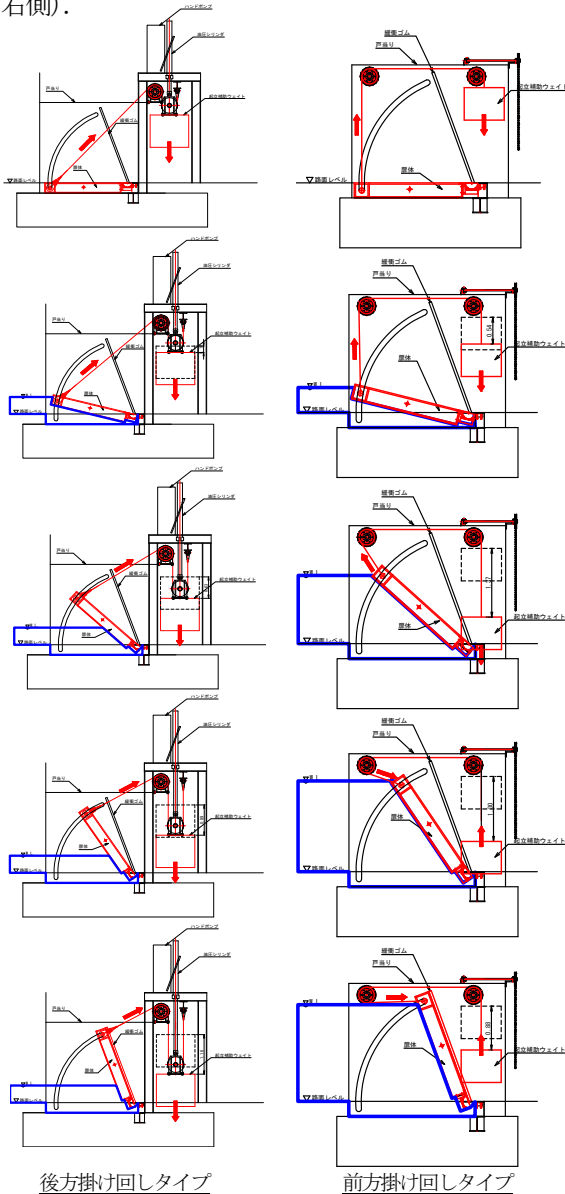


図-7 起立角度とウェイトの関係

4.2 起立補助ウェイトの吊り上げ方式の検討

起立補助ウェイトの吊り上げ方法について、前方掛け回しタイプ、後方掛け回しタイプの比較検討を実施し、安全性及び経済性に優れる「前方掛け回し」タイプを採用した。

4.3 テンションロッドの必要性の判定

純径間が大きくなるにつれて扉体自重が大きくなり、さらに左右の戸当り部に荷重集中するため、基礎構造への負担も大きくなる。このため、扉体中間部にテンションロッドを配置して水圧荷重を分散させることで、扉体の自重軽減および基礎構造への負担が軽減可能となる。しかしながら、テンションロッドへの漂流物の接触や挟まりなどによる損傷によって浮上しないというリスクが想定されるため、今回は採用を見送ることにした。

4.4 ワイヤーの脱索対策

急激な水位上昇や、大きな地震が発生した場合に、扉体及び起立補助装置に想定外の外力が作用し、ワイヤーが脱落する可能性や、扉体が想定以上の速さで戸当りに衝突する可能性がある。

そこで、ワイヤーの脱落防止装置、衝撃の減衰装置として、カバーを取り付けることとした。

4.5 地震動が起立補助ウェイトに作用することによる扉体の起伏について

地震動が発生した場合、起立補助ウェイトが上下に振動することにより、扉体支承部、ワイヤー、扉体に応力が発生することが考えられる。地震時における動的な部材の安全性を以下の方法により照査した。

解析は前掛けおよび後方掛け回しタイプを対象とし、図-8 のとおり解析対象の初期状態を簡略化してモデル化した。モデル化をするにあたり、滑車の摩擦、ワイヤーのたわみなどは一切無視した。

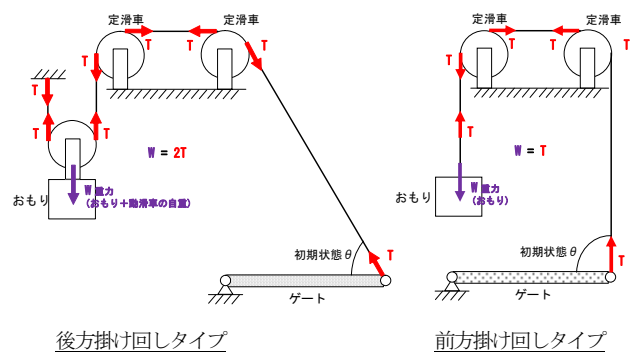


図-8 解析モデル

次に、図-9 の解析ステップ 1 の部分を切り取って地震時応答解析を行い、張力 T の応答値を求め、次にそ

の結果を用いて解析ステップ2の部分についての地震時応答解析を行った。

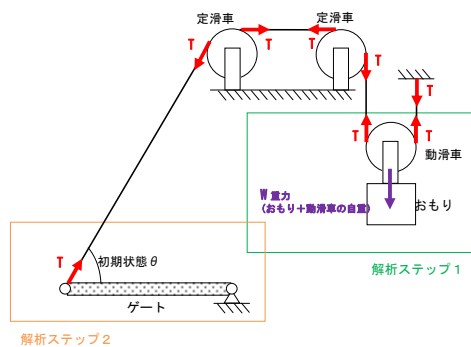


図-9 モデル化の方針

ステップ1の解析結果では水平方向の変位が卓越した(表-4)。そのため、ガイドを用いて変位を低減する構造にした。張力は破断荷重の1/10程度であった。

表-4 起立補助装置部の解析結果

	水平方向				鉛直方向			
	変位 (m)	速度 (m/s)	加速度 (m/s ²)	張力 (kN)	変位 (m)	速度 (m/s)	加速度 (m/s ²)	張力 (kN)
前掛け	0.43	1.23	6.6	15.21	-0.0003	-0.026	-3.582	19.17
後掛け	0.43	1.23	6.6	22.78	0.0002	0.035	7.242	33.67

ステップ2の解析結果を表-5、表-6に示す。解析モデルの測点は図-10に示す通りである。最大変位は0.7mmであり、4mm(主桁長2.623mの1/600)以下であった。反力に関しては、設計上の圧縮力44.0kNに対して最大反力が28.6kNと設計値以下であった。

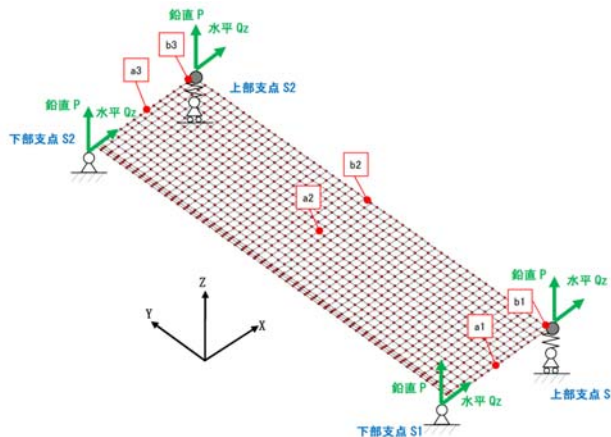


図-10 解析モデルの測点

表-5 扉体部の解析結果(反力)

			水平方向加振				鉛直方向加振			
			初期状態		動的解析		初期状態		動的解析	
			鉛直反力 P(kN)	水平反力 Qz(kN)	鉛直反力 P(kN)	水平反力 Qz(kN)	鉛直反力 P(kN)	水平反力 Qz(kN)	鉛直反力 P(kN)	水平反力 Qz(kN)
前掛け	下部	S1	-20.4	—	-20.5	27.1	-20.4	—	-28.6	—
	上部	S2	-20.4	—	-20.5	27.1	-20.4	—	-28.6	—
	下部	S1	-11.9	—	-11.9	—	-11.9	—	-21.2	—
	上部	S2	-11.9	—	-11.9	—	-11.9	—	-21.2	—
後掛け	下部	S1	-20.1	9.6	-20.2	24.3	-20.1	9.6	-28.4	9.7
	上部	S2	-20.1	9.6	-20.2	24.3	-20.1	9.6	-28.4	9.7
	下部	S1	-7.8	—	-7.8	—	-7.8	—	-17.2	—
	上部	S2	-7.8	—	-7.8	—	-7.8	—	-17.2	—

※-: 圧縮

※-: 圧縮

※-: 圧縮

※-: 圧縮

表-6 扉体部の解析結果(変位)

			水平方向加振		鉛直方向加振	
			水平方向変位 x(m)	鉛直方向変位 y(m)	水平方向変位 x(m)	鉛直方向変位 y(m)
前掛け	中央部	a1	2.87E-05	2.87E-07	6.88E-08	2.67E-05
		a2	3.23E-05	6.40E-06	2.40E-06	7.19E-04
		a3	2.87E-05	2.87E-07	6.88E-08	2.67E-05
	上部	b1	2.88E-05	5.73E-10	8.26E-08	9.35E-10
		b2	3.22E-05	6.26E-06	2.20E-06	6.74E-04
		b3	2.88E-05	5.73E-10	8.26E-08	9.35E-10
後ろ掛け	中央部	a1	2.87E-05	2.71E-07	2.87E-05	2.87E-05
		a2	3.23E-05	6.11E-06	2.87E-05	2.87E-05
		a3	2.87E-05	2.71E-07	2.87E-05	2.87E-05
	上部	b1	2.88E-05	5.60E-10	2.87E-05	2.87E-05
		b2	3.22E-05	6.72E-06	2.87E-05	2.87E-05
		b3	2.88E-05	5.60E-10	2.87E-05	2.87E-05

また、支承部の反力時刻歴(図-11)より、後方掛け回しタイプの場合、反力が0(扉体がわずかに浮き上がる)の時刻があることがわかった。なお、前掛けの場合は反力が0にはならず、浮き上がらないという結果となった。

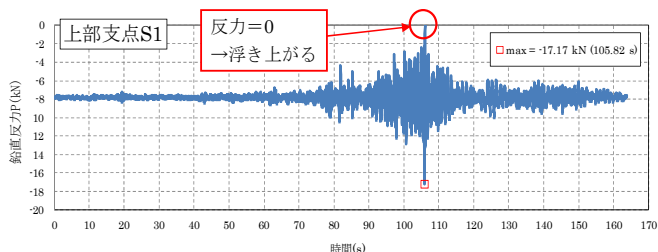


図-11 上部支点における反力時刻歴(後方掛け回しタイプ)

5. おわりに

フラップ式陸間の課題とその検討結果について報告した。今後、フラップ式の構造物を設計する際の参考になることを期待する。

謝辞

本稿は、国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所発注の撫養港海岸陸上設置型浮体式防潮堤検討調査の成果の一部をまとめたものである。

調査にあたっては、撫養港海岸陸上設置型浮体式防潮堤技術検討会(委員長:早稲田大学 清宮教授)の各委員、四国地方整備局の関係者から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 一井 康二, 高橋 宏直, 中本 隆, 赤倉 康寛: 日本地震工学シンポジウム論文集(第10回日本地震工学シンポジウム), vol.10-3, pp. 3241-3244, 1998.
- 2) 国土交通省四国地方整備局高松港湾空港技術調査事務所: 撫養港海岸陸上設置型浮体式防潮堤検討調査報告書, 2013.