

海拔ゼロメートル地帯における 排水機場の耐水化・耐震化対策の立案

はらだなおき にしでなるおみ なかじまりょうた
原田直樹¹・西出成臣²・中嶋亮太¹

¹ (株) 建設技術研究所 中部支社 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦1-5-13)

² (株) 建設技術研究所 東京本社 (〒330-0071 埼玉県さいたま市浦和区上木崎1-14-6)

木曾三川下流域の海拔ゼロメートル地帯では、「濃尾平野の排水計画」に基づき南海トラフ巨大地震による津波、大型台風に起因する想定最大規模の洪水および高潮による災害時の機能維持を目的として、機場の耐水化・耐震化が計画されている。長良川下流部に位置する長島排水機場はその先行モデルとして位置づけられ、当社は機場周囲に耐水壁およびフラップゲート式陸閘を設置することで耐水化を立案した。同時に、機場本体（土木、建築、機電設備）の耐震照査を行い、地震後の機能確保に必要な対策を検討した。本論文は、耐水壁およびフラップゲート式陸閘の設計事例ならびに機電設備の耐震性の照査事例について報告するものである。

Key Words : 排水機場, 耐水化, 耐震, フラップゲート式陸閘, 無動力

1. はじめに

近年は、気候変動に伴い計画規模を上回る洪水や高潮の発生リスクが高まっている。さらには南海トラフ大地震による津波災害も懸念されている。

一方、2011年に発生した東日本大震災では、津波による広範囲かつ長期間の湛水が、救助や応急復旧活動の大きな障害となったと報告されている。

濃尾平野ではこのような背景をふまえ、想定最大規模の超過外力によって浸水が発生しても排水機場の機能が確保されることを前提に、速やかな排水作業を遂行するための計画として「濃尾平野の排水計画」が平成25年に定められた。この計画を受け、濃尾平野の機場では現在、耐水化・耐震化の検討が進められている。当社は、その先行モデルである長島排水機場に対し、必要な耐震対策工の実施に加え、機場周囲に耐水壁（重力式擁壁）および排水機場では全国初となるフラップゲート式陸閘を設置することによる耐水化・耐震化対策を立案した（図-1）。

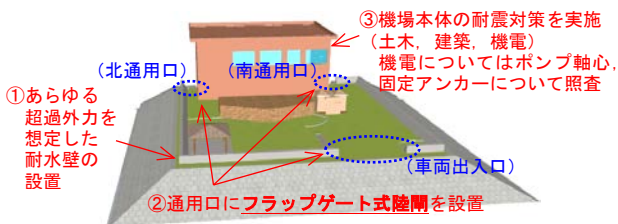


図-1 長島排水機場耐水化の概要

2. 長島排水機場の概要

長島排水機場（表-1）は木曾川水系長良川の下流部に位置し、長島輪中内の内水排除を目的として設置されている。この地域一帯は濃尾平野と呼ばれ、図-2に示すとおり海拔0m地帯が広がっている。その地形特性から水災害に極めて脆弱であり、排水機場は特に重要な役割を担っている。

表-1 長島排水機場 基本諸元

完成年月	昭和 57 年
位置	長良川左岸 4.8k (三重県桑名市)
ポンプ口径	φ1350×2基, φ1000×1基
吐出货量	10m ³ /s

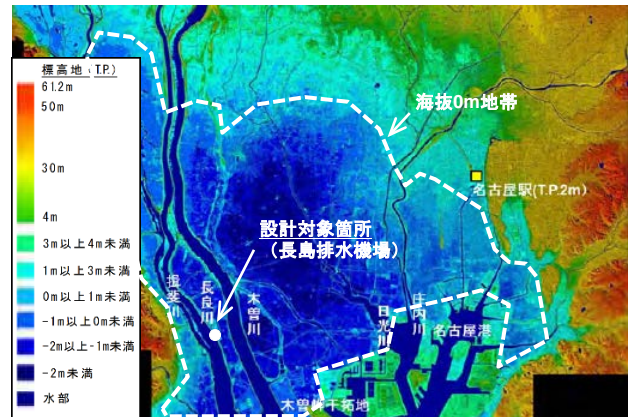


図-2 設計対象箇所周辺の地盤高標高¹⁾

3. あらゆる超過外力を想定した耐水壁の設計

耐水化においては、L2津波、L2洪水、スーパー伊勢湾台風襲来時の高潮などの超過外力に対し、機場周囲に耐水壁を設置することで対策を図った。

対象とする想定最大規模の超過外力は、三重県におけるレベル2地震により発生する津波（レベル2津波）、想定し得る最大規模の降雨に伴う洪水（レベル2洪水）、スーパー伊勢湾台風時の高潮とし、耐水壁の設計高さは、これら外力による浸水深を網羅する高さを設定した。

(1) 津波による浸水深の設定

津波シミュレーション結果による機場周囲のレベル2津波の浸水深を図-3に示す。設計上で採用する浸水深は、機場内と同等の地盤高である計算メッシュにおける浸水深とし、0.74mとした。

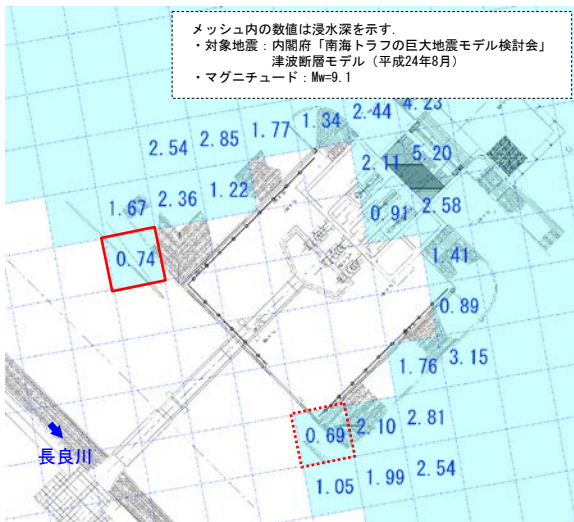


図-3 排水機場周辺のレベル2津波の浸水深²⁾

(2) 洪水による浸水深の設定

浸水シミュレーション結果による機場周囲のレベル2洪水の浸水深を図-4に示す。設計上で採用する浸水深は、機場内の計算メッシュにおける浸水深とし、0.50mとした。

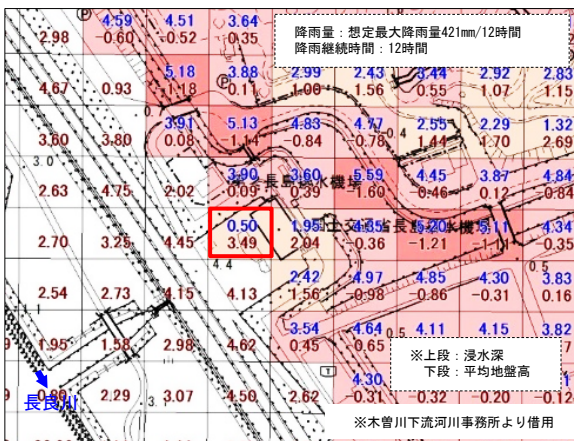


図-4 排水機場周辺のレベル2洪水の浸水深

(3) 高潮に対する施設高の設定

「濃尾平野の排水計画」に記載されたスーパー伊勢湾台風による高潮の最大浸水想定により、排水機場の地盤高は高潮により浸水しないことを確認した。

(4) 設計高さの設定

各超過外力の浸水深の整理結果を表-2に示す。設計上の浸水位は、レベル2津波、レベル2洪水、高潮の浸水位のうち最大値を採用してT.P.+4.74mとした。一方、耐水壁設置予定箇所には、現況でT.P. 5.1m相当の高さで侵入防止柵が設置されていることから、耐水壁の設計高さは侵入防止柵の高さを兼ねるようT.P.+5.1mとした。

表-2 浸水深と浸水位の整理

	浸水深	浸水位
レベル2津波	0.74m	T.P.+4.74m
レベル2洪水	0.50m	T.P.+4.50m
スーパー伊勢湾台風による高潮	0.00m	T.P.+0.80m
採用設計高	-	T.P.+5.10m

4. フラップゲート式陸閘の設計

本設計では、耐水壁に接続する車両出入口および通用口の陸閘の構造形式としてフラップゲート式陸閘を採用した。設計条件一覧は表-3のとおりである。

表-3 設計条件一覧（位置は図-1参照）

位置	車両出入口	北通用口	南通用口
径間	9.6m	2.0m	2.0m
有効高さ	1.1m	1.1m	1.4m
輪荷重	T-25	T-6	T-6
津波波圧算定式	ウェスターガードの簡易式		

(1) フラップゲート式陸閘の特徴

フラップゲート式陸閘の作動原理を図-5に示す。本ゲートの扉体の内部には硬質ポリウレタンフォームが充填されており、周囲に水が存在しない状態では自重により倒伏しているが、浸水が生じると扉体に浮力が生じるため、水位に応じて扉体が起立する仕組みとなっている。

フラップゲート式陸閘は表-4に示すように扉体開閉の確実性、維持管理性、景観性の観点から一般的に陸閘として採用される横引きゲートよりも優れており、以下に示す利点を有している。

a) 浸水直前まで出入口が使用可能

フラップゲート式陸閘は、浸水時の水位に応じて開閉するため、津波等の外力到達前にゲートを閉鎖する必要がない。よって外力到達直前まで陸閘の通行が可能であり、避難遅れを防ぐことができる。

b) 無動力かつ人為操作が不要

横引きゲートは、動力装置や制御装置を設置しない限り、開閉時に人為操作が必要となる。一方、フラップゲート式陸閘は人為操作を伴わないことから陸閘操作員が危険にさらされず、かつ操作ミスによるゲート閉鎖の遅れ等のリスクも回避できる。

c) 構造の単純化による施設管理の省力化

フラップゲート式陸閘は、動力や電気、通信機器を使用しないため、ゲート設備の単純化により電気代や設備点検費が最小限となり、LCCが低減される。

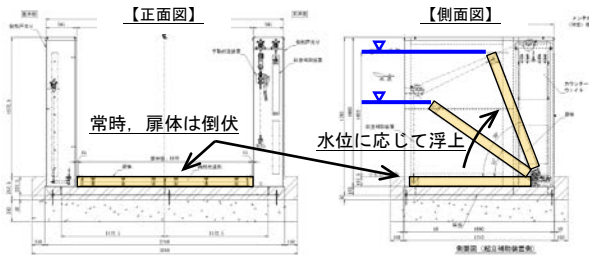


図-5 フラップゲート式陸閘の構造

表-4 フラップゲート式陸閘と横引きゲートの比較

	フラップゲート式陸閘	横引きゲート	
参考写真			
概要	<ul style="list-style-type: none"> 浮力によりゲートが起伏 ゲートを事前に閉鎖しておく必要がないため、外力到達直前まで陸閘の通行が可能 	<ul style="list-style-type: none"> 閉鎖時には人為操作必要(浸水時に危険が伴う) 電力やガス圧等によるゲート開閉や遠隔化に要する費用は高額 	△
扉体開閉の確実性	<ul style="list-style-type: none"> 扉体と戸当りが一体構造であるため、地震の発生等により地盤変状が生じても、扉体の開閉能力に与える影響は小さい 	<ul style="list-style-type: none"> 戸当り等が擁壁に取り付いているため、地盤変状が生じて擁壁に変位が生じると、扉体が適切に閉鎖しなくなる可能性有 	△
維持管理性	<ul style="list-style-type: none"> 無動力であり電気代不要 単純かつ一体構造であるため、設備点検費が必要最小限かつ故障リスクが少ない 	<ul style="list-style-type: none"> レールの変形、目詰まり防止のため、日常的な点検が必要 動力装置の定期点検も必要 	△
景観性	<ul style="list-style-type: none"> 扉体は常時倒伏しており、周辺景観への影響が僅少 	<ul style="list-style-type: none"> 扉体、駆動装置が露出しており、周辺景観への影響大 	△
総合評価	<ul style="list-style-type: none"> 浸水時に陸閘操作員が危険にさらされず、かつ操作ミス回避できる 	<ul style="list-style-type: none"> ゲート操作による人的被害のリスクがあり、維持管理性にも劣る 	△

(2) 技術的な課題とその対応方法

フラップゲート式陸閘の設計時に生じた技術的な課題とその対応方法は、以下の3点である。

a) 移設困難な既設構造物への対応

排水機場内には多数の地下埋設物が存在しており、図-6に示すようにフラップゲート式陸閘の設置予定箇所にも移設困難な支障物件（マンホール）が確認された。

よって本設計では、図-7に示すように現況地盤に対して腹付け盛土を実施し、その天端にフラップゲート式陸閘を設置することで、既設構造物を移設せずに陸閘を整備する方針とした。

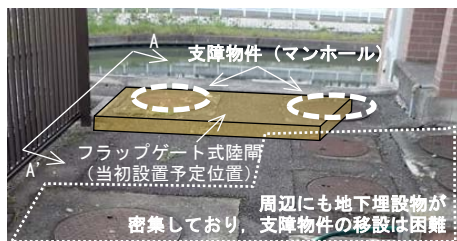


図-6 フラップゲート式陸閘設置予定箇所の状況

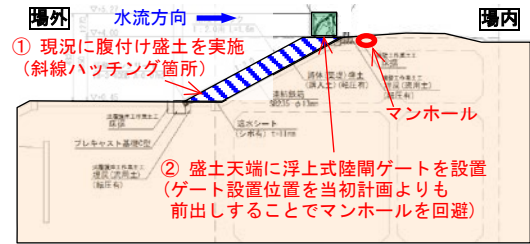


図-7 ゲート設置箇所の造成イメージ (A-A'断面)

b) 不等沈下への対応

濃尾平野はかつて地下水が大量に使用されたため、過去50年間で最大140cmもの地盤沈下が確認されるほど広域地盤沈下が進行し、長島排水機場でも沈下が確認されている。今回の耐水化では耐水壁として機場周囲に重力式擁壁を設置するため、擁壁施工後は基礎地盤がさらに沈下する可能性が考えられる。

よって本設計では、フラップゲート式陸閘と耐水壁の接合部に50mm幅の離隔を設けた不連続構造とし、擁壁の沈下が陸閘に影響を与えないよう配慮した。なお、接合部には後施工タイプ止水可とう継手（図-8）を設置し、止水性を確保した。

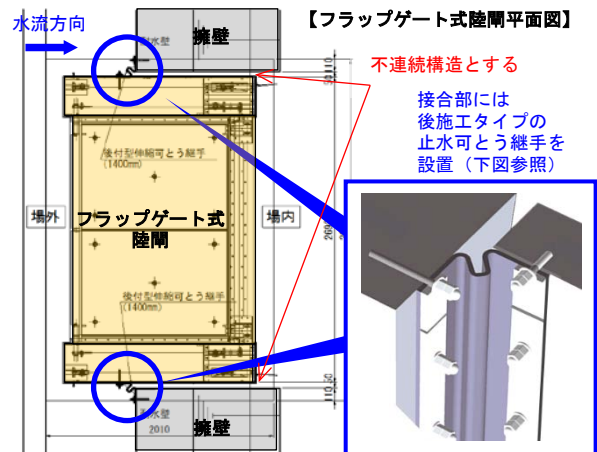


図-8 後施工タイプ止水可とう継手の設置イメージ

c) 耐久性を考慮した戸当り構造の採用

一般的にフラップゲート式陸閘は、図-9 (左) に示すようにゲート前面の支柱内にカウンターウェイトを配置し、扉体とカウンターウェイトをワイヤーロープで繋ぐことで、扉体起伏時の衝撃力を緩和させている。しかしこの構造では、漂流物等の衝突により支柱が変形した場合、カウンターウェイトが正常に動作しなくなる恐れがある。またワイヤーロープがむき出しとなるため、漂流物等によりワイヤーロープが損傷を受ける可能性が生じると判断した。

よって本設計では、図-9 (右) に示すようにカウンターウェイトをゲート後方に配置し、かつ支柱と戸当りを一体化したBOX構造の中にワイヤーロープを格納することで、漂流物等の衝突より機器類を保護し、確実に扉体が起伏するよう耐久性を重視した構造とした。

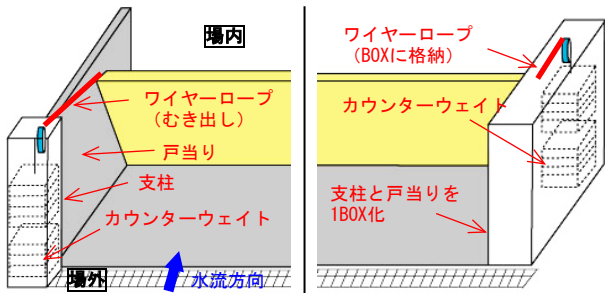


図-9 フラップゲート式陸閘の標準構造 (左) と戸当りを1BOX化した本設計での構造 (右)

5. 機電設備の機能確保に対する耐震性の照査

耐震化においては、土木・建築の耐震照査に加え、地震発生時にポンプが停止することのないよう機電の耐震性の検討を行った上で、必要な対策工を検討した。本論文では、ポンプ軸心の変位とアンカーボルトの引抜力、せん断力および応答塑性率に着目し、機電の機能確保に対して照査した結果を示す。

(1) ポンプ軸心 (カップリング) の変位量の確認

地震外力によりポンプの軸心がずれると、主軸や軸受けに負荷が生じ、ポンプ故障の原因となる。このため、土木の耐震照査結果より、ポンプ軸心のずれに相当する変位 (図-10) が、減速機とポンプを接続するカップリング (変位を吸収する部材) の許容変位以内に収まっているか確認した。

確認の結果、表-5のとおりレベル2地震動により生じる変位は許容変位以下であることを確認した。

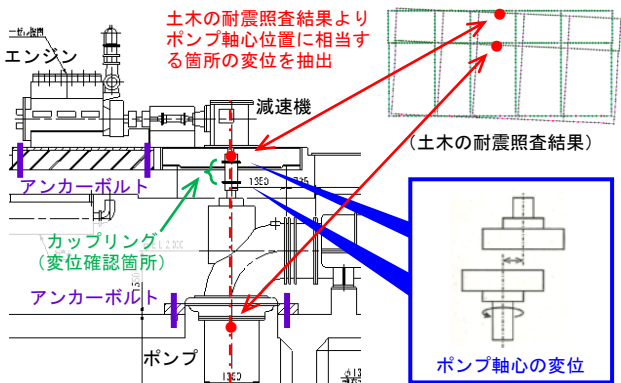


図-10 ポンプ軸心の変位イメージ

表-5 ポンプ軸心の変位量の照査結果

地震動	軸心の傾きを考慮した変位	許容変位	判定
L2-1+	0.97mm	4.24mm	○
L2-1-	-0.67mm	4.24mm	○
L2-2+	1.14mm	4.24mm	○
L2-2-	-0.84mm	4.24mm	○

※許容変位は、製品毎に設定される固有の値

(2) ポンプ設備の固定アンカーに対する照査

地震外力によりポンプ設備が転倒・変形しないよう、ポンプ設備を固定するアンカーボルトの照査を行った。本検討では建築設備耐震設計・施工指針⁴⁾

によるアンカーボルトの引抜力およびせん断力の照査に加え、レベル2地震動に対応した照査として、高圧ガス設備等耐震設計指針⁵⁾にしたがって応答塑性率の照査を行った。

照査の結果、表-6、表-7のとおりアンカーボルトの引抜力、せん断力、応答塑性率は許容値の範囲内であり必要十分な強度を有するため、地震発生時もポンプ設備の転倒や変形は生じないことを確認した。

表-6 アンカーボルトの引抜・せん断力の照査結果

対象	ボルト諸元	引抜力 (KN)		せん断力 (KN)		判定
		計算値	許容値	計算値	許容値	
ポンプ 1, 2号	M42×8本	26.00	176.96	44.10	102.14	○
ポンプ 3号	M36×8本	8.75	129.09	24.50	79.44	○
エンジン 1号	M24×12本	16.58	55.77	9.80	32.19	○
エンジン 2号	M24×14本	14.21	55.77	8.40	32.19	○
エンジン 3号	M20×12本	7.25	38.71	5.72	22.34	○

※引抜力およびせん断力の許容値は、建築設備耐震設計・施工指針に示されるステンレスボルトの短期許容応力度 ($f_t=15.8\text{kN/cm}^2$, $f_s=9.12\text{kN/cm}^2$) より設定

表-7 アンカーボルトの応答塑性率の照査結果

対象	ボルト諸元	応答塑性率	許容塑性率	判定
ポンプ 1, 2号	M42×8本	0.66	1.8	○
ポンプ 3号	M36×8本	0.30	1.8	○
エンジン 1号	M24×12本	0.53	1.8	○
エンジン 2号	M24×14本	0.29	1.8	○
エンジン 3号	M20×12本	0.48	1.8	○

※許容塑性率は、高圧ガス設備等耐震設計指針に示される基礎ボルトの引張降伏による損傷が生じる塑性率として $\mu_{ps}=1.8$ を設定

6. 結論

「濃尾平野の排水計画」の具現化に向け、耐水壁とフラップゲート式陸閘の組み合わせによる機場の耐水化を立案した。また土木・建築の耐震対策の検討に加え、機電の地震発生後の機能確保に対する照査を行った。検討を通じて得られた所見・課題は以下のとおりである。

- ・フラップゲート式陸閘は構造上、扉体上に障害物が存在するとゲートが起立しないため、扉体上に車両等を放置させないための対策が必要である。
- ・地震発生後のポンプ軸心の変位は、カップリングの許容変位内である一方、ポンプ設置時における芯出しの目標値は0.05mmである。よって変位発生後は、機器の摩耗を極力少なくするため、速やかにポンプ軸心を再度アライメントする必要がある。
- ・排水機場でのフラップゲート式陸閘の採用実績は本設計が全国初となるため、今後の機場耐水化に本事例が活用されることが期待される。

参考文献

- 1) 国土交通省 中部地方整備局 河川部：濃尾平野の排水計画，平成25年8月
- 2) 三重県：津波浸水想定について (解説)，平成27年3月
- 3) 一般社団法人 沿岸技術研究センター：フラップゲート式陸閘技術マニュアル，平成28年6月
- 4) 一般社団法人 日本建築センター：建築設備耐震設計・施工指針 2014年版，平成26年9月
- 5) 高圧ガス保安協会：高圧ガス設備等耐震設計指針 (2012) レベル2耐震性能評価 解説編，平成27年10月

