陸閘の自動化を見据えた動力化技術の紹介

LANDLOCK AUTOMATION BY MOTORIZATION

涌井　健 *・上野　太郎 *・石井　秀樹 **・岡田　征太朗 ***
Takeshi WAKUI, Taro UENO, Hideki ISHII and Seitaro OKADA

Landlocks are provided at opening portion of tide embankments. They are used as a transit path of cars and people by holding gates fully opened under normal conditions. They are closed before typhoons and/or when high tide water comes. Operators of the landlocks are understaffed because of aging in recent years and lack of replacements. In addition,　automation projects to close landlocks before tsunamis reach them is being promoted in various locations with a rise in the awareness of tsunami since the Grate East Japan Earthquake. Mie prefecture has independently been promoting landlock motorization on the basis of the guideline, prior to the automation project. This paper discusses various technologies that were adopted to the landlocks at the Nagashima port in order to plan their landlock motorization.

Keywords **：** *landlock motorization, automation, tsunami, DC motor, battery, preliminary power, standby power supply, risk management measures, omission of the stopping device, device to prevent sandwiched, overturning prevention device.*

1. はじめに

陸閘（りっこう）は、防潮堤の開口部（**写真－1**）に設けられ、常時は全開にして人や自動車等の通行路として利用され、台風・高潮時は事前に全閉にして浸水を防ぐための施設である。

陸閘はほとんどの場合、地域防災計画等に基づいて、施設管理者の指示に従い地元住民が手動で操作している。過疎化や高齢化の進行に伴い、操作の担い手が不足する新たな問題が生じている。

多くの陸閘は、台風・高潮対策を目的にして防潮堤と同時に整備され、大型な陸閘でない限り手動操作を基本にしてきた。しかしながら、津波対策への意識の高まりに伴い、平成 13 年頃から遠隔操作によって津波到達前に閉鎖する陸閘自動化事業が各地で進められている。

三重県の場合は、平成 16 年 9 月に「陸閘ゲート自動化設計指針（案）[1)]」を独自に策定した。しかし、三重県では自動化に先立ち、平成 17 年より県内の陸閘 130 門（平成 25 年度末時点）について、機側（現場）手動操作しかできない従来の操作方式から、電動操作できる方式に改修する陸閘動力化事業を進めてきた。

国民の津波対策への意識は、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災以降、一層高いものとなった。

三重県は、近い将来発生が予想されている東海・東南海・南海地震に対し、平成 23 年 10 月に公表した津波被害予測（M9.0）で、長島港海岸に地震発生後 6 ～ 7 分で津波が到達（50cm 上昇）し（**表－1**）、沿岸部では浸水深が 8.0m を超え（**図－1**）、市街地のほぼ全域が浸水すると予測した。

三重県紀北町長島港陸閘（18 門：**写真－2**）は、平成 23 年度に当社が動力化工事の計画を行ったものである。計画

写真－1　防潮堤開口部に設置される陸閘

*　電力事業本部 プラント事業部 機械・情報通信技術部
**　コンサルタント国内事業本部 名古屋支店 技術部
***　玉野総合コンサルタント株式会社 統括事業部 空間情報部 GIS 推進課

にあたっては、次の事項について当社提案に基づく技術が採用されたので、本稿においてそれらを紹介する。

○長期的な維持管理を考慮した駆動方式
○操作の確実性に配慮した冗長化設計
○万一の事態を想定した危機管理対策

2. 長島港の地形と地域産業

(1) 地形概要

長島港は、三重県南部の東紀州地域の玄関口に位置している。熊野灘特有のリアス式海岸の入り江で、急峻な山々に囲まれた地形である。

(2) 地域産業

長島港が位置する紀北町は、水産業・林業が主要な産業である。大阪・東京方面等の消費地へ魚介類を陸送する主要な漁業拠点である。

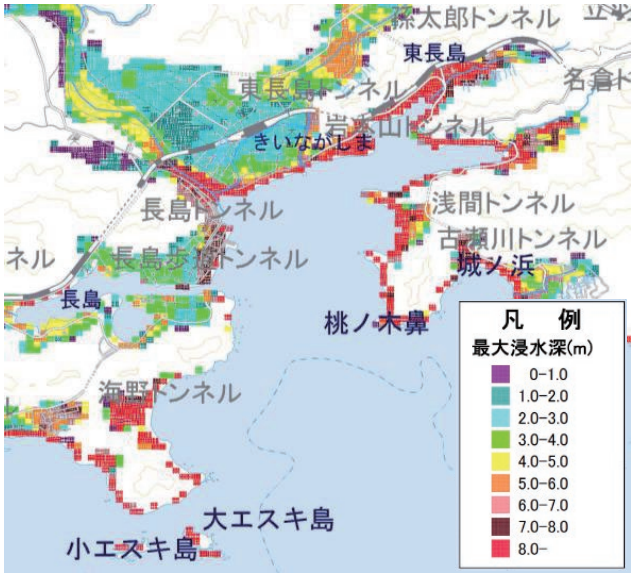
(3) 土地利用

長島港は 7 地区からなる。中ノ島・江ノ浦・西長島・呼崎・名倉地区は、公共交通機関、商業・漁業施設、住宅が密集している（図－2）。

写真－2 電動化工事後の陸閘（新入江町 3 号陸閘）

表－1 長島港 津波到達時間（出典:三重県ホームページ）[2)]

	平成 23 年三重県津波浸水予測（M9.0）		
	50cm 津波到達時間（分）	最大津波到達までに要する時間（分）	最大津波高（m）
名倉	7	22	11.15
長島	6	20	9.59



図－1 長島港津波浸水予測図（出典:三重県ホームページ）[3)]

図－2 長島港港湾区域図
（長島港パンフレット(平成23年) 出典:三重県ホームページ）[4)]

3. 陸閘動力化に関する設計仕様

形式	アルミニウム合金製引き戸式ゲート
設置数	各 1 門（**図－ 3** に位置図を示す）
寸法	**表－ 2** 参照
操作水深	（前面水位）無水
	（後面水位）無水
地震係数	名倉地区　0.30
	中ノ島地区　0.25
設計風速	20.3m/s（25 年確率最大平均風速）
水密方式	後面三方ゴム水密
開閉方式	電動ピンラック方式（**表－ 2** 参照）
	電動モータ内蔵方式（**表－ 2** 参照）
操作方式	現場・手元操作／遠隔操作（将来用）
電源仕様	動力 DC24V
	制御 DC24V ／ 12V
駆動装置	直流モータ式
電動機容量	0.4kW
走行速度	5.0m/min 以上
準拠基準	陸閘ゲート自動化設計指針（案）
	ダム・堰施設技術基準（案）
	水門鉄管技術基準（案）
	アルミニウム合金製水門設計製作指針案

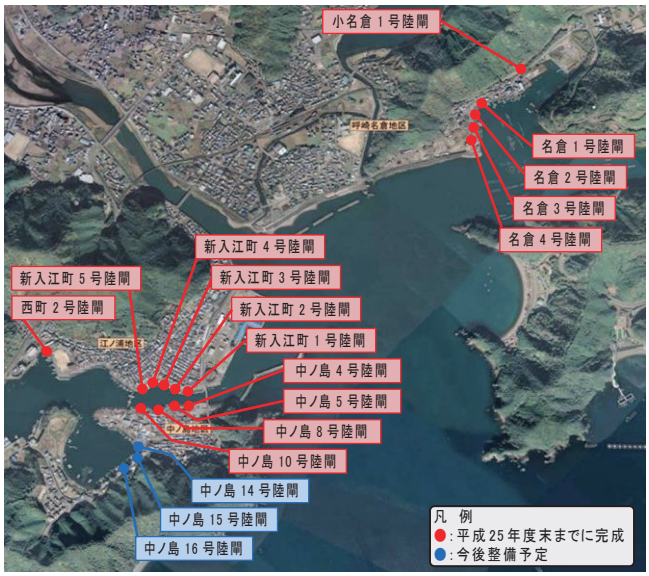
表－ 2　設計対象陸閘　設計仕様

No.	名称	純径間	有効高	駆動方式
1	小名倉 1 号陸閘	6.00m	3.50m	電動モータ内蔵方式
2	名倉 1 号陸閘	4.00m	3.50m	電動モータ内蔵方式
3	名倉 2 号陸閘	4.00m	3.50m	電動モータ内蔵方式
4	名倉 3 号陸閘	4.00m	3.50m	電動モータ内蔵方式
5	名倉 4 号陸閘	4.00m	3.50m	電動モータ内蔵方式
6	新入江町 1 号陸閘	5.00m	2.80m	電動モータ内蔵方式
7	新入江町 2 号陸閘	5.00m	2.80m	電動モータ内蔵方式
8	新入江町 3 号陸閘	5.00m	2.80m	電動モータ内蔵方式
9	新入江町 4 号陸閘	5.00m	2.80m	電動モータ内蔵方式
10	新入江町 5 号陸閘	5.00m	2.80m	電動モータ内蔵方式
11	中ノ島 4 号陸閘	2.00m	3.47m	電動ピンラック方式
12	中ノ島 5 号陸閘	2.00m	3.30m	電動ピンラック方式
13	中ノ島 8 号陸閘	3.00m	2.50m	電動ピンラック方式
14	中ノ島 10 号陸閘	3.00m	2.50m	電動ピンラック方式
15	中ノ島 14 号陸閘	4.00m	1.70m	電動ピンラック方式
16	中ノ島 15 号陸閘	4.00m	1.70m	電動ピンラック方式
17	中ノ島 16 号陸閘	4.00m	1.70m	電動ピンラック方式
18	西町 2 号陸閘	4.00m	2.00m	電動ピンラック方式

4. 陸閘動力化工事の計画コンセプト

動力化を図る長島港陸閘 18 門は、津波・高潮等の自然現象発生による災害の防止および被害の低減を図ることを目的としている。将来、遠隔地から発生する津波注意報・警報等の信号をトリガーとして陸閘の自動閉鎖（以下「自動化」という）を行う計画である。今回計画する陸閘動力化工事は、将来の自動化・遠隔制御化に対応するための第一段階としての整備事業である。

三重県が進めている陸閘自動化整備事業の目的、技術基準・指針およびこれまでの動力化工事実績を踏まえた、陸閘動力化を図るための要求仕様を**表－ 3** に示す。



図－ 3　長島港陸閘動力化事業　位置図

表－ 3　陸閘動力化工事の要求仕様

項目	要求仕様
操作の確実性	開閉速度 5m/min 以上かつ操作時間 3 分以内とする。 主動力故障時や商用電源喪失時の万一の事態においても閉鎖できる。
止水の確実性	想定津波に対し確実に止水できる。
機能保全	将来にわたり維持管理が可能である。 維持管理が容易である。
施工性	動力化工事の施工が短工期で実施可能である。 動力化工事中においても、高潮・津波への対応が可能である。
自動化対応	将来の自動化・遠隔制御化工事において、大掛かりな改造工事が不要で自動化への対応が容易である。
経済性	建設費および維持管理費を含むライフサイクルコストが安価である。

5. 長期的な維持管理を考慮した駆動方式

(1) 駆動方式の現況

平成 17 年以降、平成 24 年までの時点に整備された三重県内陸閘自動化を図った 108 門の駆動方式は、**表－ 4** に示す 4 方式の採用実績がある。

これらの駆動方式の採用比率は**図－ 4** に示すとおり、油圧式がもっとも多く、次いで水圧式が多い。

(2) 駆動方式の課題

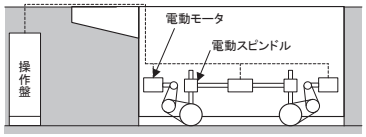
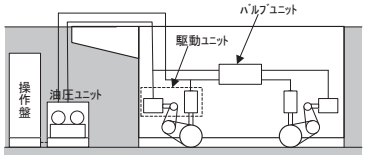
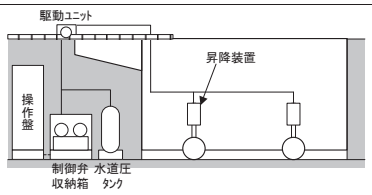
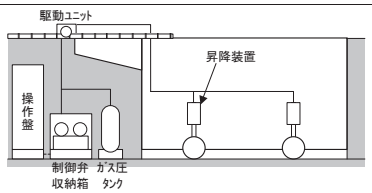
三重県内において、これまでに陸閘動力化工事を行い、採用された油圧式、水圧式、空圧式は、**表－ 5** に示すような運用面の課題がある。

(3) 電動モータ駆動方式の採用

表－ 5 に掲げる運用面の課題を踏まえれば、県内で多くの実績がある油圧式や水圧式をこのまま継続的に採用すると将来これらの設備品の生産中止により維持管理ができなくなる可能性がある。そのため、長島港陸閘では、全国的な実績が多数あり、かつ長期にわたり部品調達が可能となる電動モータを採用した。

電動機は、減速機や伝達機構の固有の抵抗が電動機容量に比べて 4 ～ 5 割を占める。開閉操作を確実なものにするため、余裕をみて 0.4kW 以上とした。

表－ 4　三重県内陸閘自動化の駆動方式

	駆動方式の概要
電動式	 ・ 扉体内蔵の電動モータにより車輪を回転させ走行する。 ・ 扉体昇降は昇降用の電動スピンドルにて行う。
油圧式	 ・ 扉体内蔵の油圧モータにより車輪を回転させ走行する。 ・ 扉体昇降は油圧シリンダにて行う。
水圧式	 ・ 水道圧モータ駆動力を伝達して扉体を走行させる。 ・ 扉体昇降は水圧シリンダリンク機構により行う。
空圧式	 ・ 窒素ガス圧モータ駆動力を伝達して扉体を走行させる。 ・ 扉体昇降はガス圧シリンダのリンク機構によって行う。

6. 操作の確実性に配慮した冗長化設計

(1) 予備動力の採用

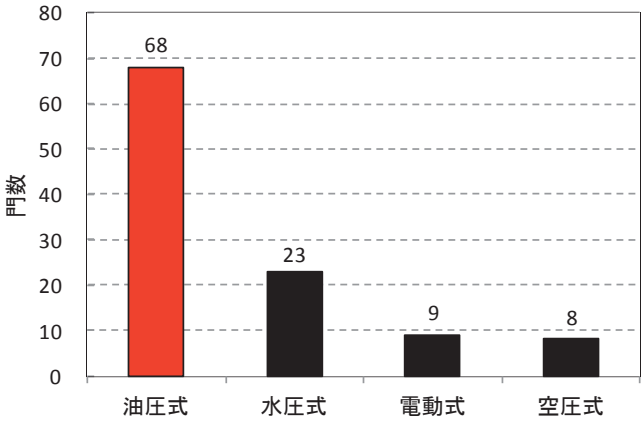
全国各地で整備された動力化陸閘のうち、電動モータ駆動方式を採用した事例の多くは、走行用と昇降用の電動モータをそれぞれ扉体内に 1 台内蔵している。

走行用モータは海岸法線方向に移動するための動力であり、昇降用モータは扉体を上下に動かすための動力である。底部戸当りに水密ゴムが当たらないよう扉体を上げて走行し、全閉位置で扉体を下げて水密を確保する。

長島港海岸に到達する津波は、地震発生後 6 ～ 7 分と想定されているが、電動モータが故障した場合、手動操作に切り替えるための操作員の移動等で 15 分を要する。したがい、故障時に手動操作に切り替えていたのでは津波に対応することができない。

このため、長島港陸閘は、主モータが故障しても動作できるようにするため、主モータに加えて予備モータを組み込むことにした（**写真－ 3**）。なお、主モータ、予備モータおよび手動操作の切り替えは、**表－ 6** に示す方法で行う。

長島港陸閘の走行・昇降装置の計画値は**表－ 7** に示すとおりであり、要求仕様を満足している。モータは同じ機種に統一し、調達できない場合に他の予備モータを転用できるようにした。また、予備モータは主モータ同様の容量であるため、予備モータの操作時間も同じである。



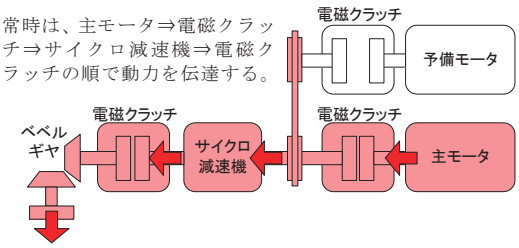
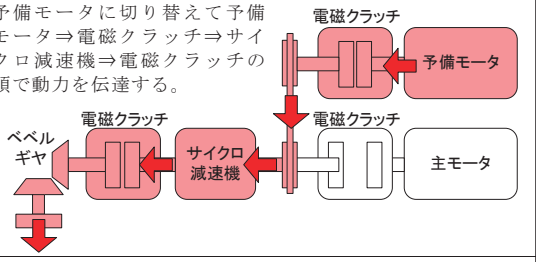
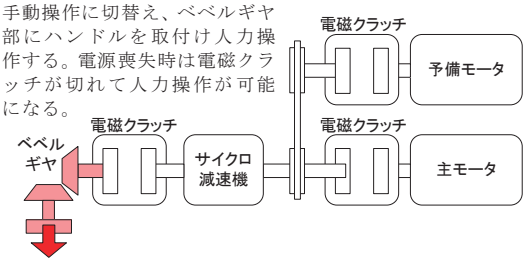
図－ 4　駆動方式の採用実績（N=108 門）

表－ 5　駆動方式に関する運用面の課題

	駆動方式の課題
水圧式 空圧式	● 特許製品であり、現在は販売中止している（建設当時に予見できなかった）。 ● 不具合が出ているが、部品製造販売停止のため購入できず、不具合を放置している。 ● 温度変化により液体圧が変化して圧力異常が生じる。また、老朽化したパッキンから圧抜けする現象が発生している。
油圧式	● 水圧式や空圧式同様に特許登録方式であり、現在は部品調達可能であるが、将来、特許登録業者の生産中止により維持管理できなくなるおそれがある。

写真－3　予備動力の採用（新入江町 3 号陸閘）

表－6　動作概要

	動作概要
主モータ操作時	常時は、主モータ⇒電磁クラッチ⇒サイクロ減速機⇒電磁クラッチの順で動力を伝達する。 
主モータ故障時	予備モータに切り替えて予備モータ⇒電磁クラッチ⇒サイクロ減速機⇒電磁クラッチの順で動力を伝達する。 
手動操作時	手動操作に切替え、ベベルギヤ部にハンドルを取付け人力操作する。電源喪失時は電磁クラッチが切れて人力操作が可能になる。 

表－7　走行・昇降装置の計画

陸閘名 動力化方式	走行荷重 (kN)	昇降荷重 (kN)	モータ出力 走行用 (kW)	モータ出力 昇降用 (kW)	操作時間 (≦3.00) (min)	開閉速度 (≧5.00) (m/min)
小名倉1号陸閘 電動モータ内蔵方式	0.846	28.841	0.4	0.4	2.66	5.25
名倉1号陸閘 電動モータ内蔵方式	1.184	20.699	0.4	0.4	2.91	5.09
名倉2号陸閘 電動モータ内蔵方式	1.184	20.699	0.4	0.4	2.91	5.09
名倉3号陸閘 電動モータ内蔵方式	1.160	18.698	0.4	0.4	2.91	5.09
名倉4号陸閘 電動モータ内蔵方式	1.160	18.698	0.4	0.4	2.91	5.09
新入江町1号陸閘 電動モータ内蔵方式	1.185	24.819	0.4	0.4	2.70	5.18
新入江町2号陸閘 電動モータ内蔵方式	1.183	24.721	0.4	0.4	2.70	5.18
新入江町3号陸閘 電動モータ内蔵方式	1.185	24.819	0.4	0.4	2.70	5.18
新入江町4号陸閘 電動モータ内蔵方式	1.198	26.193	0.4	0.4	2.70	5.18
新入江町5号陸閘 電動モータ内蔵方式	1.197	26.095	0.4	0.4	2.70	5.18
中ノ島4号陸閘 電動ピンラック方式	1.400	－	0.4	－	0.42	5.38
中ノ島5号陸閘 電動ピンラック方式	1.367	－	0.4	－	0.45	5.33
中ノ島8号陸閘 電動ピンラック方式	1.696	－	0.4	－	0.62	5.32
中ノ島10号陸閘 電動ピンラック方式	1.699	－	0.4	－	0.62	5.32
中ノ島14号陸閘 電動ピンラック方式	1.863	－	0.4	－	0.79	5.35
中ノ島15号陸閘 電動ピンラック方式	1.863	－	0.4	－	0.79	5.35
中ノ島16号陸閘 電動ピンラック方式	1.863	－	0.4	－	0.79	5.35
西町2号陸閘 電動ピンラック方式	1.924	－	0.4	－	0.78	5.38

(2) バッテリ電源の採用

商用電源喪失に備えた予備電源は、施工事例より「バッテリ」と「発電機」の 2 種類の採用事例がある。

表－ 8 に示すとおり両者を比較した結果、今後 50 年間のライフサイクルコストはほぼ同等である。しかし、発電機は起動までに 20 ～ 40 秒の時間を要し、津波到達までの閉鎖の確実性に不安がある。このため、予備電源はバッテリ（長寿命型）を採用した。

また、予備電源にバッテリ（直流電源）を採用したことにより、電動モータは直流方式を採用した。交流方式を採用した場合には DC/AC 変換器を搭載しなければならない。この場合、バッテリは変換損失を考慮し容量を大きくして対応しなければならない。直流方式は交流方式に比べ 1.25 倍程度割高になるが、システム全体の経済性では、直流方式（DC）が優位となった。

表－ 8　予備電源の比較

	バッテリ	発電機
概要	自動車等にも使用されている鉛電池により、商用電源喪失時に給電する。操作盤内に配置する例が多く、電源切替盤は不要である。	内燃機関によって発電し、商用電源喪失時に給電する。予備電源に自動切替するため、電源切替盤が必要である。
確実性	○ 瞬時停電に対応でき、電源喪失時に速やかに給電できる。 停電の度にバッテリ給電となるが、復電すると充電されるため、次の電源喪失に対応することができる。	△ 発電機起動に 20 ～ 40 秒を要するため、閉鎖が間に合わないおそれがある。 停電の度に発電機が起動し、燃料補給が行き届かない場合に給電できなくなるおそれがある。
経済性 (LCC)	○ (1.02)	○ (1.00)

7. 万一の事態を想定した危機管理対策

(1) 休止装置の省略

陸閘は、全開状態において強風等によって勝手に閉鎖しないよう後部に休止装置を設けている（**写真－ 4**）。

手動操作の陸閘は、扉体後部に休止フックを手動でかける方式が採用されている。動力化に伴い電動シリンダ方式に更新する施工例がある（**写真－ 4**）が、電動シリンダは作動が不安定で、構造を理解していなければ不具合への対応が困難である。このことから、近年休止装置を省略する例がある。休止装置を省略する場合は、扉体を着床させて水密ゴム摩擦力で横風荷重に抵抗することになる。

長島港陸閘は、**表－ 9** に示すとおり横風荷重に比べて扉体着床時の水密ゴム摩擦力が大きい。そのため、全開位置において扉体を下げて待機することで強風が作用しても勝手に閉まり出すことはない。このことから、休止装置の外し忘れ（ヒューマンエラー）や、故障原因となる機器部品を排除して信頼性の高いシステムを計画した。

写真－ 4　休止装置（左：手動方式、右：電動シリンダ方式）

表－ 9　横風荷重と水密ゴム摩擦力の関係

陸閘名および動力化方式		横風荷重 (kN)	水密ゴム摩擦力 (kN)
小名倉1号陸閘	電動モータ内蔵方式	0.562	1.428
名倉1号陸閘	電動モータ内蔵方式	0.498	0.989
名倉2号陸閘	電動モータ内蔵方式	0.498	0.989
名倉3号陸閘	電動モータ内蔵方式	0.408	0.971
名倉4号陸閘	電動モータ内蔵方式	0.375	0.971
新入江町1号陸閘	電動モータ内蔵方式	0.375	1.203
新入江町2号陸閘	電動モータ内蔵方式	0.375	1.203
新入江町3号陸閘	電動モータ内蔵方式	0.375	1.203
新入江町4号陸閘	電動モータ内蔵方式	0.417	1.214
新入江町5号陸閘	電動モータ内蔵方式	0.392	1.208
中ノ島4号陸閘	電動ピンラック方式	0.190	0.609
中ノ島5号陸閘	電動ピンラック方式	0.122	0.588
中ノ島8号陸閘	電動ピンラック方式	0.114	0.798
中ノ島10号陸閘	電動ピンラック方式	0.114	0.798
中ノ島14号陸閘	電動ピンラック方式	0.078	0.956
中ノ島15号陸閘	電動ピンラック方式	0.078	0.956
中ノ島16号陸閘	電動ピンラック方式	0.078	0.956
西町2号陸閘	電動ピンラック方式	0.092	0.935

(2) 転倒防止装置

陸閘扉体は、常時の強風に加えて、万一の地震によって作用する慣性力や津波越水による引き波荷重が作用しても転倒しないようにするため、転倒防止装置を設けて対応した（**写真－ 5**）。

(3) はさまれ防止装置

長島港陸閘は、扉体側部（開側）にケーブルスイッチを 2 本取り付け、閉操作中に人や車両等が挟まった場合に、これを検知して扉体を停止・遠方通知させる機能を設けた。

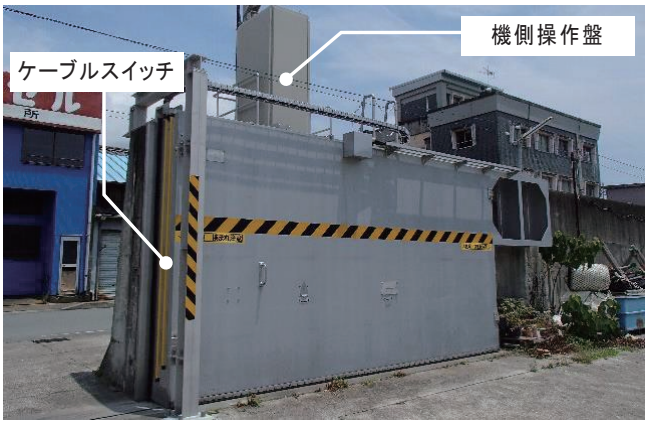
ケーブルスイッチ（**写真－ 6**）は、スイッチ素子に導電ゴムと導電ワイヤを組合せ、圧力がかかることで抵抗値が M Ω から 0 Ω まで変化することを利用したスイッチであり、動力化される陸閘の多くに採用事例がある。

(4) 避難階段および操作台

閉操作遅れにより浸水した場合においても、電源および制御設備の水没によって機能喪失しないように、機側操作盤を防潮堤天端の上方に配置した（**写真－6**）。

また、陸閘閉鎖後に逃げ遅れた地域住民等を避難させるため、防潮堤海側に避難階段を設けた（**写真－5**）。

写真－5 転倒防止装置（新入江町 3 号陸閘）



写真－6 挟まれ防止装置（新入江町 3 号陸閘）

8. まとめ

三重県が管理する陸閘は約 1,500 門あり、平成 25 年度末までで 130 門の動力化工事が完了したところである。今後、動力化を予定している陸閘は本稿で紹介した電動モータ式による工事を予定している。

東海・東南海・南海地震に向けた津波対策の緊急度が増している。操作員の不足が深刻化する事態を鑑みて、陸閘動力化・自動化事業は急速に進めていかなければならない。陸閘動力化事業を計画するにあたり、本稿で紹介した技術を参考いただくことがあれば幸いである。

謝辞：長島港陸閘動力化計画にあたり、ご指導いただきました三重県尾鷲建設事務所の皆様ならびに工事完成写真を提供いただきました株式会社伊藤工作所関係者様に対し心から謝意を表します。

参考文献

1) 三重県土木整備部港湾・海岸室：陸閘ゲート自動化設計指針（案）、平成 16 年 9 月
2) 長島港　津波到達時間、http://www.pref.mie.lg.jp/D1BOUSAI/tsunami/tunami_hight_152point_02.pdf
3) 長島港　津波浸水予測図、http://www.pref.mie.lg.jp/D1BOUSAI/tsunami/map/13kihoku_north_n.pdf
4) 長島港港湾区域図、http://www.pref.mie.lg.jp/KOWAN/HP/mie-kowan/minato/naga/image/data.pdf
5) 三重県県土整備部：三重県の海岸管理の実態、平成 25 年 10 月