

津波水門の提案

PROPOSAL OF NEW TSUNAMI GATE

田村 保¹・日根野聰弥²・西村敬一³・舘 憲司⁴

Tamotsu TAMURA, Akihiro HINENO, Keiichi NISHIMURA and Kenji TACHI

- ¹正会員 M. S. 五洋建設株式会社 土木本部 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)
²正会員 元 五洋建設株式会社 土木本部 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)
³ 石川島播磨重工業株式会社 鉄構事業部 水門設計部 (〒135-8731 東京都江東区豊洲2-1-1)
⁴ 工修 石川島播磨重工業株式会社 鉄構事業部 水門設計部 (〒135-8731 東京都江東区豊洲2-1-1)

The present study shows the importance of the flood gate performance during severe earthquake accompanied by tsunami. One of the major concerns for mitigation of disastrous earthquake was the occurrence of Tokai, Tonankai and Nankai, Miyagi-oki earthquake which are expected to be accompanied by huge tsunami. Because tsunami source of those earthquakes locates very near to the coast of Japan, quick operation of gate-closing is necessary. Existing flood gates are recently renewed for automatic operation but it takes much time to close the gate and damage during earthquake and resultant incapability of gating are worried. Considering those situation, new type of flood gate which was designated as a special countermeasure for tsunami was presented. This new tsunami gate gives us the reliable gating capability and safe system at emergency situation by employing the self-gate-closing system.

Key Words: *Tsunami, Tsunami gate, Rising sector gate*

1. はじめに

わが国は地震多発地帯であり、過去においても多くの津波災害が発生している。特に、太平洋沿岸の三陸地方や東海・紀伊半島・四国地方では、プレート境界型の巨大地震による大規模な津波災害に繰り返し遭遇しており、多くの死者と多大な経済的な損失を被っている。既に前回の津波災害時から相当の期間が経過していることもあり、過去に大規模な津波災害を発生させたプレート境界型地震発生の危険度の高まりが指摘されており¹⁾、津波災害に対する対策が急務となっている。

近年の津波災害対策では、避難活動などのソフト対策の重要性が強調される傾向にある。しかし、住民の避難の容易さを確保するため、また、臨海部に位置する多大な資産を保全するためにも、防潮堤や防潮水門等のハード施設の適切な整備を進めることも必要である。これまでに高潮・津波災害から臨海部を守るためのハード施設の整備は、営々と続けられている。しかし、依然として未整備の地域が残されていることや、これまでに整備されてきたこれらのハード施設が巨大地震時に必ずしも有効に機能しない可能性もあることなどが指摘されている。そ

のため早急な防災施設の整備、既往施設の耐震性検証と補修・補強・更新の必要性は極めて高い。

津波対策施設の中でも、防潮水門は津波災害低減のために極めて重要な施設であり、津波来襲時までに確実に閉操作が行えることが求められる。しかしながら、例えば、阪神淡路大震災時の事例²⁾に見られるように、大規模地震時の確実な機能を保障できる耐震性は十分とは言えないのが現状である。津波災害時に確実に機能する津波水門の必要性がここにある。

本研究では、津波被害軽減と、津波後の水路開放のために必要とされる津波水門の要求性能を整理し、これらの結果に基づいて、津波水門の要求性能を満たす新しい水門形式を提案する。標準的な水路条件を設定して提案構造に基づいた水門の試設計を行い、実現性について検証をおこなう。

2. 津波水門の要求性能

(1) 防津波施設の現状および課題

東海・東南海・南海・宮城県沖地震などの大規模地震災害への対応のためには水際線に設けられる防

防災施設整備が不可欠であり、水門・防潮扉等の防災対策は重要課題の一つである。津波来襲時にはこれらが閉鎖されていることが、被害軽減に大きく寄与する。そのため、常時も閉鎖しておくことが防災上有利ではあるが、内水排水や利用者の利便上の理由から、現実にはほとんど常時開放されている。そのため、地震発生後の短時間に津波来襲が予想される地域においては、地震を感知してから水路上に吊下げられた扉体を手動もしくは電動による操作で降下させ、水路の閉鎖をおこなう構造が多用されているのが現状である。

東海・東南海・南海地震や宮城県沖地震などの津波による大規模災害が懸念される地域では、想定される震源位置が沿岸域に極めて隣接している。そのため早いところでは、津波発生から20分以内に津波の第一波の到達が予想される地域も多い。これらの地域では、地震を感知してからのゲート管理者の判断によって水門閉鎖を津波到達前に完了させることは、現実的には極めて困難と予想される。また、水門の開閉機能を、自動化が進んだ水門施設や近地で発生する巨大地震による強震動下においても維持するためには、相当の耐震性を確保することが必要である。河田²⁾によれば、大阪府下にある約900の水門で、南海地震により想定されている津波高さに対して天端高さは十分であることがわかっているが、過去の高潮警報時に全水門の完全閉鎖までに要した時間が6時間であったとの報告もある。現在水門の機械化・自動化が進められているが、地震による機能障害を起す例も相当数に上ることが予想され、阪神淡路大震災では大阪市域の水門約350の内、約1/3が機能障害を起した、とされている。

大規模震災時に、これらの防災施設が健全に機能することの重要性は強く認識されているところである。例えば、中央防災会議の「東南海・南海地震対策専門調査会」における津波被害想定³⁾では、地震の揺れによる水門の閉鎖不能等が発生した場合の被害を計算し、水門が正常に機能した場合との比較からその重要性を認識できるような配慮がなされている。例えば家屋全壊棟数についてみると、水門が閉鎖不能の場合には津波による被害が1.4倍になるとの想定結果がしめされている。

また、一旦堤防内に流入した氾濫水はすみやかに堤外に排水することが望ましい。そのため、一旦降下させた扉体を引上げることが必要であり、このためには電力等の動力源が必要となるが、大規模災害時に電力供給が停止した場合を想定すると、早急な水路の開放が困難となることも予想される。

写真-1に示すようなローラゲート等に代表される既往の水門構造では、地上高く突出した門構があり、さらに常時は扉体を門構上部に吊上げているため、水路利用上の制限構造物となると共に、非常に目立つために周囲の景観性を損なってしまう例が見られる。

津波災害低減の視点からは、現在では人的被害の

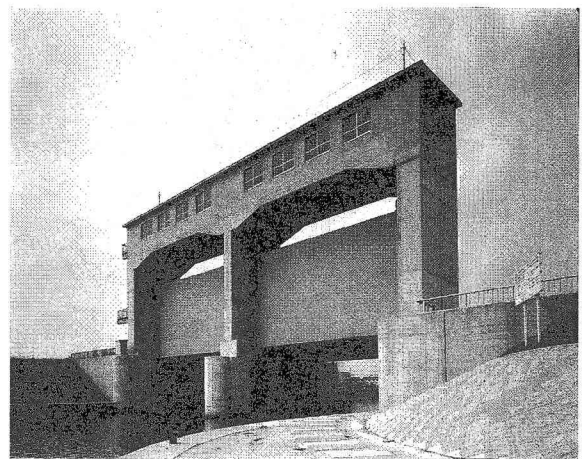


写真-1 既往の水門の例

対策の重要性の認識が高まっている。津波水門に期待される機能としては、確実な水門閉鎖による津波浸水被害の防止が第一目標となるのは当然であるが、想定以上の高さの津波が来襲した時においても、津波が居住地まで到達する時間を遅らせることが可能であるところに重要性がある。例えば、佐藤ら⁴⁾によれば、東南海・南海地震発生から津波第一波の到達時間が18分と予想される徳島県のある市のデータより、避難所までの避難時間は概ね15分程度となっている。また、河田ら⁵⁾によれば、高知県でおこなった津波避難に対する意識調査において、避難行動を開始してから避難所までの到達時間が15分以内である人の割合は6割を超えている。これらのことから、概ね20分以内の避難完了をめざして避難所を整備することは、現実的な到達目標として設定できそうである。

杉本ら⁶⁾によれば、水門の閉鎖が完了した場合でも、津波高さが想定高さを超える場合には、全開の場合にくらべても浸水域は1割程度しか低減しないとされている。しかし、津波の到達時間を遅らせることは可能であり、概ね20分以内での避難完了を目指す、この時間を遅延できることの効果は高い。

(2) 数値計算による水門の防災効果の検証

ここでは、宮城県気仙沼湾を対象にした津波浸水シミュレーションを行い、湾奥部に水門を設置した場合の減災効果について検証を行う。対象としたのは、表-1に示す過去に津波を引き起こした4地震である。図-1は計算対象となる気仙沼周辺の地形図であり、仮想の水門を設けた位置とシミュレーション結果の比較を行う位置を合わせて示している。本検討ケースおよび津波伝播計算は豊田ら⁷⁾の計算結果から引用したものであり、津波の伝播計算は、非線形長波理論式をStaggered Leap-frog法により差分化したもの⁸⁾を用いている。また地震の震源位置や規模については、静的断層パラメータ⁹⁾を用い、Mansinha & Smylieの方法¹⁰⁾により地震による初期海面変動を求めたものである。

図-2は、水門を設置した場合の堤内側における浸

水面積を示したものである。水門の天端高さは1mと3mを仮定しており、水門が無い場合との比較をしている。図-3は、気仙沼湾奥の市街地において浸水被害が発生する場合の時間（地震発生からの時間）を、水門が存在する場合と無い場合について比較したものである。また図-4は、図-3に示した結果より、浸水被害のあるCASE2～4の地震について、水門設置により湾奥市街地に津波が到達するのがどれだけ遅らせられるかを示している。

これらの試算結果では、津波水門前面での到達津波高さが水門天端を越えない場合には、水門より内側に津波に伝播することは無く、浸水域は0である。一方津波水門前面での到達津波高さが水門天端を越える場合には、水門が3mの時はどのケースについても浸水域の低減が見られるが、水門が1mの場合には越流した水の排水の遅れのために、水門が無い場合よりも浸水域が増加してしまう結果となった。しかし津波の浸水時間を遅らせることに対しては、どの地震のケースでも効果が見られ、浸水被害の大きいCASE3とCASE4については、15分～20分程度到達時間を遅らせることが出来ることが分かった。そのため住民が避難に要する時間を考慮すると、人的被害低減の効果は高いと言える。

(3) 津波水門に要求される機能の提言

以上のことから、津波水門に要求される機能をまとめると、以下のようになる。

- ① 耐震性に優れた構造であること。
- ② 自動的に閉鎖操作ができること。
- ③ 短時間に閉鎖が完了できること。
- ④ 津波来襲後に速やかに開操作ができること
- ⑤ 景観上の支障とならないこと。

当然のことではあるが、避難警報発令の遅れや避難警報伝達の遅れ、住民の避難行動開始の遅れなどの要因による人的被害は別の課題として残されている。

3. 津波水門の新構造形式の提案

提案する津波水門の基本構造として、ライジングセクタ方式の水門構造を採用している。同方式の水門は、常時には海底部（河床部）に扉体部が格納されており、水路利用および景観上の支障とならない利点があり、ゲートの開閉操作も自動化されている。この水門構造を基本構造として水門の開閉操作に関わる機構を改良することで、前節に示した5つの条件を満たす新構造形式の津波水門を提案する。提案構造形式による津波水門は、基本構造としたライジングセクタ方式の水門が元々備えていた景観上の支障とならない利点を生かしつつ、無動力で自動的かつ迅速にゲートの開閉が可能となる機構を提供するものである。

図-5はライジングセクタゲートの全開状態と全閉

表-1 津波浸水シミュレーション対象地震

	発生年および地震名
CASE1	1978年宮城県沖地震
CASE2	1897年宮城県沖（海溝寄り）地震
CASE3	1933年三陸（プレート内）地震
CASE4	1611年三陸（プレート間）地震

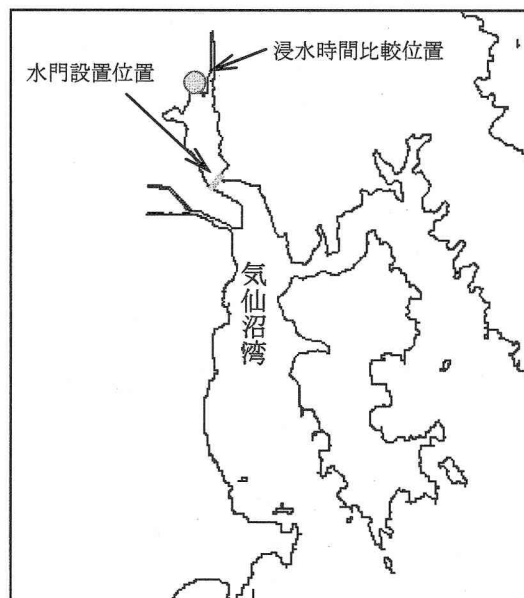


図-1 気仙沼周辺図と水門設置位置および浸水時間比較位置

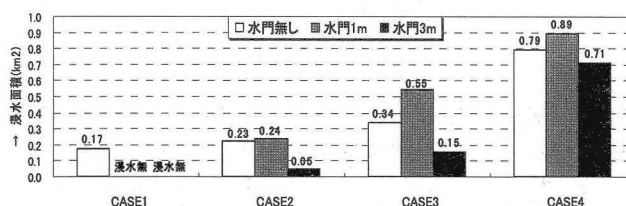


図-2 浸水域の増減に見られる水門の効果

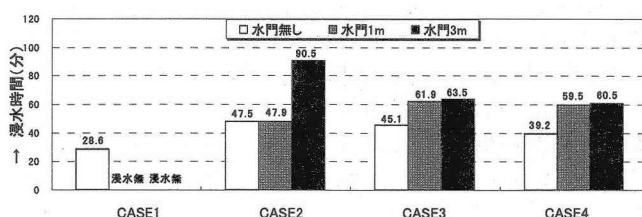


図-3 津波浸水時間に見られる水門の効果

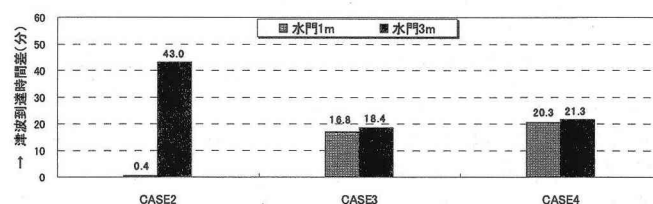
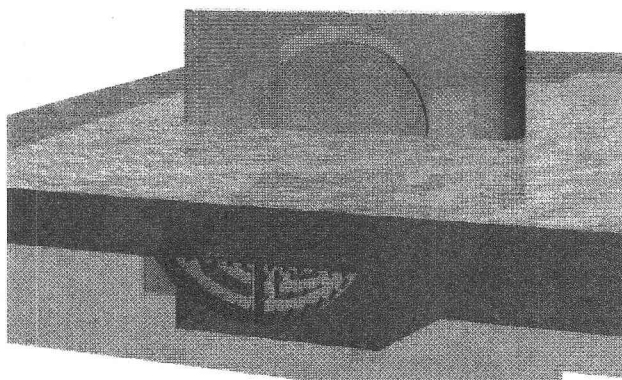
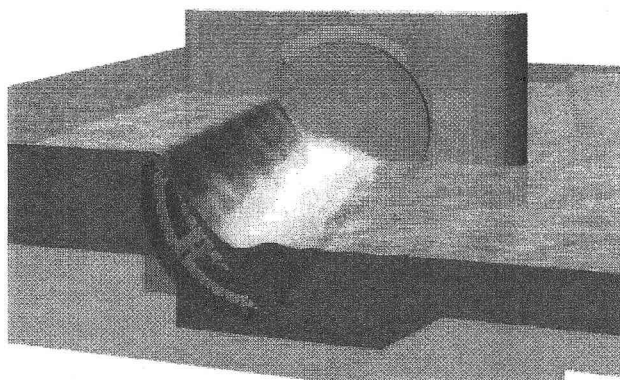


図-4 水門が無い場合に対しての津波到達時間差

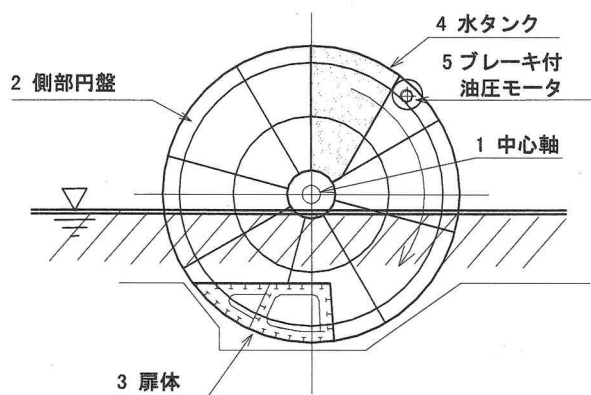


a. 全開状態

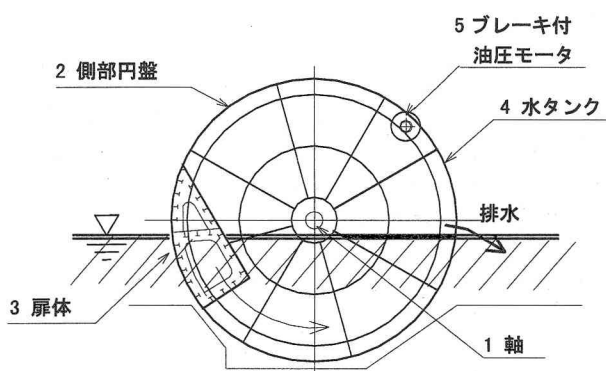


b. 全閉状態

図-5 津波水門の原型であるライジングセクタゲートの概観



a. 全開状態から閉操作



b. 全閉状態から開操作

図-6 津波水門の操作状態

状態の概観を示したものである。提案する津波水門も基本的には同じ開閉機構を採用している。すなわち、通常時においてゲート本体部は水路底部に格納されており、津波来襲時にはゲート両端部に設けられた側部の支持円盤が回転することでゲート本体の閉操作を行う。

この水門の両端部に設けられた側部円盤には、図-6に示すように、回転部の上部に注水された水タンクを備えており、通常時は図の時計回りのカウンターウエイトとして作用する。注水した水タンク重量は、側部円盤中心軸周りのゲート本体等との重量バランスから、回転して閉状態となるように定められているが、通常時にはブレーキ機構により図-6 a に示される開状態を保っている。図-7に示すようにブレーキ機構は、ピニオンギヤ、ピンラック、ブレーキ付油圧モータによって構成される。

一旦所定の地震動以上の揺れを感知した場合や津波警報が発令された場合には、このブレーキを開放することで、図-6 a に示すように側部円盤の中心軸回りの重量バランスを利用してゲート部が閉方向に回転し、5分程度でゲートの閉鎖が可能となるものである。閉鎖後は、ブレーキによりゲートの固定を行い、波浪や水位の変化によるゲート開度の変

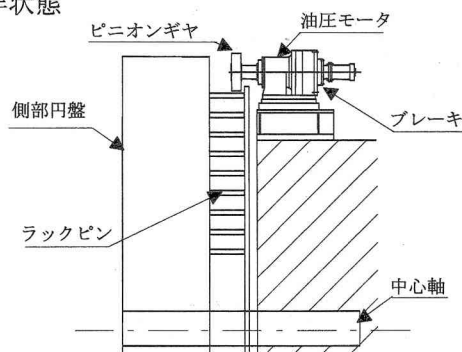


図-7 ブレーキ機構

動を防止する。すなわち、基本的には回転操作には動力を必要としない機構となっている。ただし、ブレーキは電力無供給時に作用する構造のため、待機時には電力が不用であるが、制御およびブレーキ開放時にバッテリー供給される少量の電力を必要とする。

前章の津波水門に要求される機能でも示したように、津波来襲後には速やかな開操作が可能であると、堤内側の浸水を早期に排水することが可能となり、災害復旧に際して有利となる。本提案の津波水門は図-6 b に示すように、水門の閉操作時にカウンターウエイトとなる水タンクに設けられた排水バル

ブが、通常時の海水面よりも上部に設けられている。このため、海水面が平常時に戻った段階で同バルブを開放することにより、タンク内の水を排水することが可能である。タンクから排水することで、側部円盤の中心軸まわりの重量バランスが逆転し、ゲートを開状態となる方向に回転させることができる。このように、動力を必要とすることなく、水タンク内の排水によって開操作が可能である点が、本提案の津波水門の大きな特徴である。

ローラゲートに代表される既往の水門に比べると、常時において重量構造物となるゲート本体が河床底部に格納されていることから軽量化が可能であり、耐震設計上極めて有利な構造となっている。これらの津波水門の多くは、軟弱な沖積地盤上に構築されることが多く、地盤支持力の確保のために大規模な基礎構造の採用を余儀なくされるケースが多い。本提案の津波水門を採用することにより、上部の構造物の軽量化が図られることから、基礎構造の簡略化が可能となり、コストの低減が可能である。これらのことから、安全性と経済性を兼ね備えた津波水門を提供することができるといえる。

4. 提案する津波水門の試設計例

前述した津波水門の構造形式の提案に基づき、水門の試設計を行った。設計条件は、来襲する津波を十分に防ぐことが出来る規模を想定した。

設計では、構造のコンパクト化や軽量化、維持管理性などについて、特に留意した。

以下に設計条件および津波水門の構造に関する概略・特徴を示す。

(1) 設計条件

径 間：30.0m

津 波 高：EL+5.000

常時水位：EL+2.500

考慮荷重：

静水圧(EL+2.500)+波圧(合田の式：波高2.5m)

静水圧 (EL+5.000)

操作条件：

津波発生時—無動力で閉操作可能 (1回)

津 波 後—無動力で開操作可能 (1回)

人力、バッテリー電源程度は使用

点 検 時—動力により開閉操作

(油圧モータを設置)

排砂操作時—動力により開閉操作

(油圧モータを設置)

(2) 水門の構造

津波水門の構造概要図を図-8に、試設計概略図を図-9に示す。以下に構造概要を示す。

・扉体

シェル構造で、水圧荷重・堆砂圧荷重等を端部円盤に伝達する。

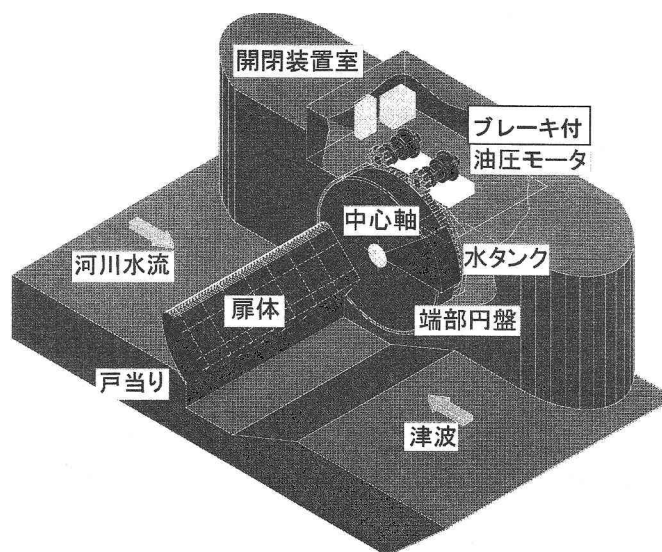


図-8 構造概要図

・端部円盤

扉体からの荷重をその両端で支持して回転する円盤で、外周には駆動（開閉）トルクを伝達するピンラックが取り付けられている。

・戸当り

下部・側部戸当りで構成される。

・開閉装置

油圧ユニット、ブレーキ付油圧モータ、ピニオン、ピンラック（端部円盤に設置）、開閉装置フレーム、油圧配管等で構成される。点検時、河床の排砂操作時は開閉装置により水門の開閉を行う。

・水タンク

扉体と反対側の端部円盤内に設置するバラストタンクである。扉体全閉時には海水面より上方に位置するため、排水バルブを用いてタンク内の水を排水可能。

(3) 水門の特徴

本津波水門はライジングセクタゲート^{11)~13)}を基本構造として採用している。そのため、堰柱が低く、水門および土木構造が単純であり、水門全体としてのコストの低減が可能となる。また、水門開放時には水路上部にゲートが現れないため、景観性に優れている。水路底部に設けるゲートの格納スペースには土砂等が堆積することが予想されるが、扉体操作によるオーバーフローやアンダーフローなどの掃流力と、扉体を駆動させて掘り込み部から押し出すことにより排砂することができる。扉体は、剛性の高いシェル構造を採用するため、長径間ゲートへの適用性もある。

これらのライジングセクタゲートの持つ特性を活かしつつ、無動力によるゲートの開閉操作を可能とすることで、津波災害時に要求される緊急時への対応性を高めた点に大きな特徴を有している。

5. まとめ

既往の地震被害および津波浸水シミュレーション結果から、津波被害軽減のために必要とされる水門・防潮扉の要求性能を整理した。景観上の配慮の点で有利なライジングセクタ形式の水門構造をベースとして、上記要求性能を満たす新しい水門構造を提案した。本提案による水門構造によれば、常時水門を開放した場合においても景観上の障害とならず、津波来襲時には無動力で自動的かつ迅速に水門を閉鎖することができ、来襲後もすみやかに水門を開放することが可能な津波水門を提供することができる。標準的な水路条件を仮定して試設計を行い実現性を検討した。

謝辞：宮城県気仙沼湾を対象とした津波浸水シミュレーションは、豊田ら⁷⁾が津波防災事業の定量的評価を行った際に実施した結果を利用させていただいた。また、その結果の整理および解釈については上記文献の共著者である五洋建設の佐々木氏にご協力いただいた。記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 地震調査推進本部地震調査委員会：南海トラフの地震の長期評価について、<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>, 2001.
- 2) 河田恵昭：大規模地震災害による人的被害の予測，自然災害科学 J. JSNDS 16-1, pp.3-13, 1994.
- 3) 中央防災会議「東南海・南海地震等に対する関する専門調査会」（第14回）：東南海・南海地震の被害想定について，中央防災会議事務局，1993.
- 4) 佐藤広章，村上仁士，島田富美男，上月康則，倉田健悟，大谷 寛：地震による家屋の倒壊を考慮した津波来襲時における避難に関する一考察，海岸工学論文集題49巻，pp.311-315，2002.
- 5) 河田恵昭，柄谷友香，酒井浩一，矢代晴実，松本逸子：津波常襲地域における住民の防災意識に関するアンケート調査，海岸工学論文集第46巻，pp.1291-1295，1999.
- 6) 杉本卓司，村上仁士，島田富美男，上月康則，倉田健悟，志方建仁：津波に対する水門・陸閘の有効活用とその効果に関する考察，海岸工学論文集第49巻，pp.306-310，2002.
- 7) 豊田泰晴，今村文彦，佐藤健一，佐々木洋之：地震長期確率を組み入れた津波防災事業の定量的評価に関する研究，土木学会地震工学論文集，2003
- 8) 今村文彦：津波災害とシミュレーション，計算工学会誌，Vol. 6, No. 3, pp.311-315，2001
- 9) 佐藤良輔：日本の地震断層パラメータ・ハンドブック，鹿島出版会，1995
- 10) 土木学会 原子力土木委員会 津波評価部会：原子力発電所の津波評価技術，pp121-125，2002
- 11) 小島治久，後藤光寿：ドルフィンゲートの水理，排砂特性について，水門鉄管No.191，pp65-76，1997
- 12) 松川徹，由井孝昌，作山博康，鉤流洋：永山取水ゲート（ドルフィンゲート）新設工事，石川島播磨技報1999 Vol.39，pp305-308，1999
- 13) 松川徹，高遠典宏，佐藤則行，岡田慎司：領内水門（ライジングセクタゲート）工事報告，水門鉄管No.199，pp59-67，1999

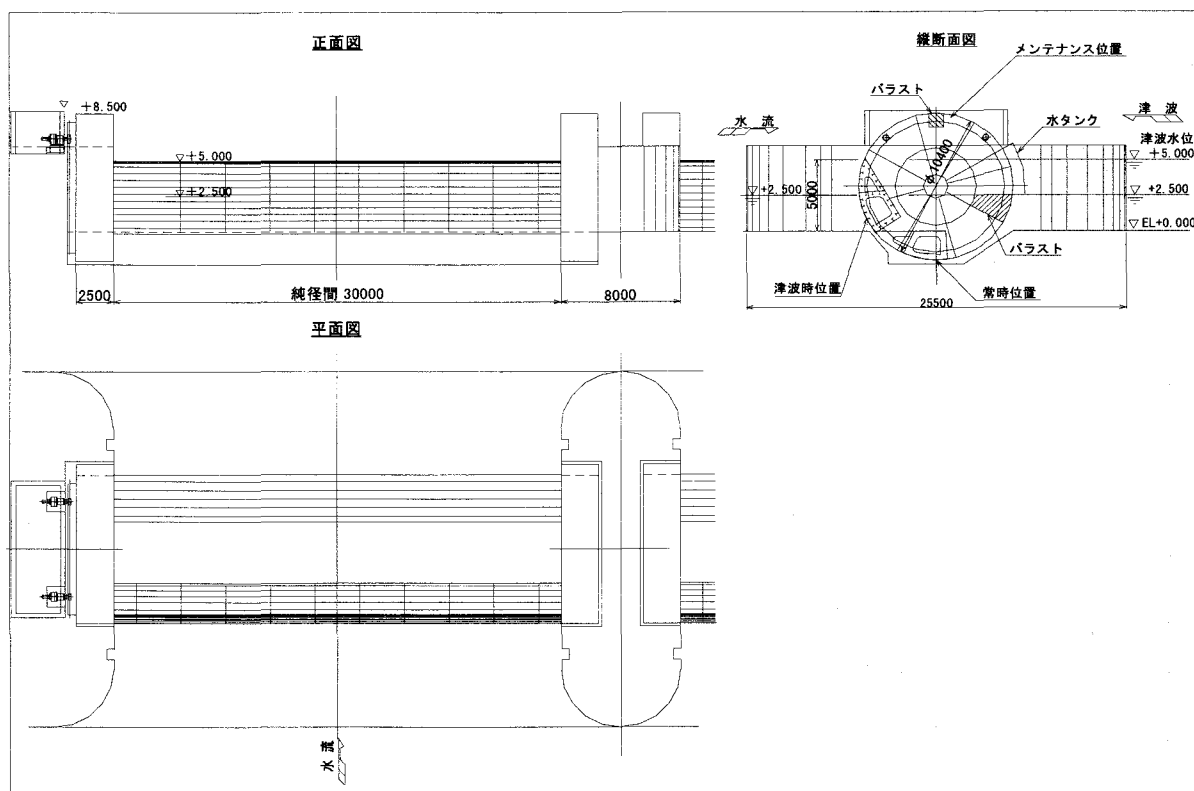


図-9 試設計概略図