



港湾における水門の耐震性能照査事例

野津厚¹⁾、楠謙吾²⁾、岡部登³⁾

1) 正会員 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
地震防災研究領域、領域長、博士（工学）

e-mail : nozu@pari.go.jp

2) 非会員 株式会社ニュージェック

e-mail : kusunokikn@newjec.co.jp

3) 非会員 株式会社ニュージェック、博士（工学）

e-mail : okabenb@newjec.co.jp

要 約

本検討は、港湾における水門について、地震時の要求性能（耐震性能）や照査規準を設定し、それをもとにレベル2地震動に対する耐震性能照査を実施したものである。照査規準の設定にあたっては、水門の残留変形の形態やそれによる不具合事象を想定し、門扉の閉操作が可能な残留傾斜角等について整理した。

キーワード： 耐震性能照査、水門、要求性能、照査規準

1. はじめに

東京港の背後地は、朔望平均満潮位以下の低地部が124km²と23区面積の20%を占める。また、昭和34年の伊勢湾台風の際に伊勢湾に來襲したといわれている潮位（干潮面上約5m）より低い地域の面積は225km²にのぼり23区面積の41%にもなる。仮に同規模の高潮が來襲したならば約300万人の都民が甚大な被害を被ったと想定されている。そのため、東京都では伊勢湾台風を契機に昭和35年から本格的な海岸保全施設の整備を鋭意進めてきた。

ところで、我が国は高潮などの台風被害が多いことと併せて地震多発国でもある。平成7年の阪神・淡路大震災では土木構造物も甚大な被害を受け、耐震設計法が大きく進展する契機となった。また、平成23年東日本大震災のような想定外ともいえる巨大海溝型地震も発生している。

こうした背景から東京都では、首都直下地震や海溝型地震等を想定し、都民の生命と財産を守るために、高潮・津波に対する防護機能を有する海岸保全施設の耐震性能の向上を目指した対策をすすめている。耐震対策をすすめるにあたり、海岸保全施設のひとつである水門についても、地震後に確保すべき性能や許容損傷程度を整理し、それを具体的に照査するための照査規準を設定したうえで、耐震性能照査を実施している。

水門は、常時は船舶の航行のため門扉を開放し、高潮時・津波時にはそれを閉鎖することで背後地の浸水を防ぐ施設である。このように、水門は海岸保全施設の中でも機能という点で特異な性格を有しており、海岸保全施設の技術上の基準・同解説¹⁾にも照査規準が明解に記されていないことから、水門特有の照査規準の設定が必要であった。その内容については、他の地域の港湾における水門の耐震性能照査においても参考になる点が多いのではないかと考え、ここに紹介する次第である。

2. 水門の要求性能と許容損傷程度

照査規準の設定に先立ち、水門の要求性能とそれに対応した許容損傷程度を設定した。

海岸保全施設の技術上の基準・同解説¹⁾によると、すべての海岸保全施設は、レベル1地震動に対して、所要の構造の安全が確保され、機能が損なわれないことが求められる。加えて、より高い耐震性能が必要と判断される海岸保全施設は、レベル2地震動に対して、生じる被害が軽微であり、かつ、地震後の速やかな機能の回復が可能であることが求められる。

以上のことから、東京港では、レベル1地震動作用時の要求性能は「使用性」とし、許容損傷程度は「門扉の開閉操作が可能かつ損傷がほとんど生じないこと」とした。また、レベル2地震動作用時の要求性能は「限定された使用性」とし、許容損傷程度は「門扉の開操作が可能である損傷」とした。地震時の水門の要求性能と許容損傷程度を表1に示す。

表1 水門の要求性能と許容損傷程度

地震動レベル	要求性能	許容損傷程度
レベル1	使用性	門扉の開閉操作が可能 損傷がほとんど生じない
レベル2	限定された使用性	門扉の開操作が可能

3. 照査項目

水門は機械設備が稼働して初めて機能するため、構造部材の安定性のみならず、残留変形に関する照査が必要となる。よって、要求性能を満足するための照査項目を①躯体の断面損傷、②基礎の損傷、③躯体の残留変形の3項目とした。なお、地震動による機械部品の損傷に起因する機能低下も考えられるが、この予測は困難なため検討の対象外とした。

4. 照査規準の設定

水門のレベル1地震動、レベル2地震動に対する照査規準について、海岸保全施設の技術上の基準・同解説¹⁾及び港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁾には明解な記載がない。よって、ここでは3.に示す照査項目に対する照査規準を以下の通り設定した。

4.1. 躯体の断面損傷

水門の構造部材である門柱、および堰柱（図1参照）は、構造的に橋脚に類似しているため、躯体の断面損傷に対する照査規準は「道路橋示方書・同解説V耐震設計編」³⁾に準拠することとした。

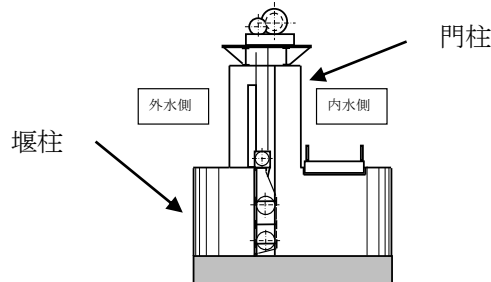


図1 水門の主な構造部材

表2 躯体の断面損傷に関する照査規準

照査項目	地震動レベル	照査規準
躯体の断面損傷	レベル1	弾性限界未満
	レベル2	曲げ：許容曲率 ³⁾ 未満 せん断：せん断耐力未満

4.2. 基礎の損傷

照査対象とした水門の多くは杭基礎構造（鋼管杭）を有しており、それに対する照査規準を設定した。

港湾において鋼管杭を使用する代表的施設として栈橋があり、港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁾において栈橋に対する地震時の照査規準が示されている。しかし、水門の基礎構造は、栈橋のように杭体が突出し（自由長を有し）たわみ性が大きい構造ではなく、むしろ道路橋の橋脚基礎に類似している。道路橋脚におけるレベル2地震動に対する基礎の照査で多く用いられる保有水平耐力法³⁾では、プッシュオーバー解析により得られる水平震度と重心位置での変位の関係を利用し、設計水平震度に対する塑性率を計算し、応答塑性率が許容塑性率を超えるか否かを目安に照査を行う。一方、港湾の施設の技術上の基準・同解説²⁾では、レベル2地震動に対して地震応答解析により照査することを基本としており、設計水平震度は設定しない。本検討では、躯体に作用する応力の時間変化とそれによる損傷程度の大小をより適切に評価できる地震応答解析を採用した。その際、下記の理由から、基礎杭の曲げモーメント M ～曲率 ϕ 関係で定義する塑性率で照査した。この塑性率は深さ毎に異なる値をとる。

- ① 基礎の塑性化位置が比較的明確である（固定条件である場合の杭頭、もしくは土層境界等の地盤剛性急変点）。
- ② M - ϕ 関係で規定される塑性率を用いることで、局所的な（弱点部の）値が反映され、プッシュオーバー解析による塑性率の評価よりも安全側になると考えられる。

ここで、本検討における塑性率は、 ϕ_{max} （発生曲率の時刻歴での最大値）と ϕ_p' （全塑性モーメントを折れ曲がり点とするバイリニア形非線形ハリ要素の折れ曲がり点における曲率（図2参照））の比とした。

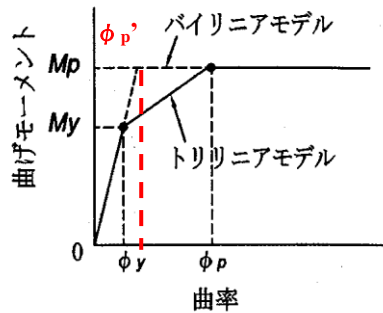


図2 ϕ_p' の定義（参考文献4）に加筆）

次に、許容塑性率は、既往の鋼管杭の実大曲げ圧縮試験⁵⁾より得られた曲げモーメントと曲率の関係を参考に設定した。参考とした実験は、鋼管杭（ $\phi 600\text{mm}$ 、 $t9\text{mm}$ ）に対し、軸力一定とし、ジャッキにて繰り返し載荷したものである。実験より得られた曲げモーメントと曲率の関係では、ある曲率をこえると曲げ耐力が低下する結果となっている。曲げ耐力が低下しはじめる曲率と、図2に示す ϕ_p' の定義から実験条件より算定した $4\phi_p'$ を比較すると、 $4\phi_p'$ のほう小さい。よって、発生する曲率が $4\phi_p'$ 未満であれば鋼管杭の耐力の低下はみられず、以降の解析で用いる M ～ ϕ 関係（バイリニアモデル）は成立しており、解析での残留変形の精度がある程度確保されると考えられる。以上より、基礎の損傷に対する照査規準は、レベル2地震動作用時においては「発生する曲率の最大値が $4\phi_p'$ 未満であること」とした。一方、レベル1地震動に対する照査規準は「弾性限界未満であること」とした。基礎の損傷に対する照査規準を表3に示す。

表3 基礎の損傷（鋼管杭）に関する照査規準

照査項目	地震動レベル	照査規準
基礎の損傷 （鋼管杭）	レベル1	弾性限界未満
	レベル2	発生曲率が $4\phi_p'$ 未満

なお、今回対象とした水門基礎は鋼管杭であり、その他の材料を用いた基礎杭に対して照査規準を定める際は、別途設定が必要である。

4.3. 躯体の残留変形

(1) 水門躯体の残留変形の形態

躯体の残留変形に関する照査規準を設定するにあたり、まず水門躯体の残留変形の形態を整理した。

躯体全体の変形は、水流方向、水流直角方向の回転による変位と上下変位が考えられる。ただし、傾斜の発生しない上下変位は門扉の開閉には影響がなく、また、対象とした水門は鋼管杭基礎に支持されているため、次項の検討からは上下変位は除外している。

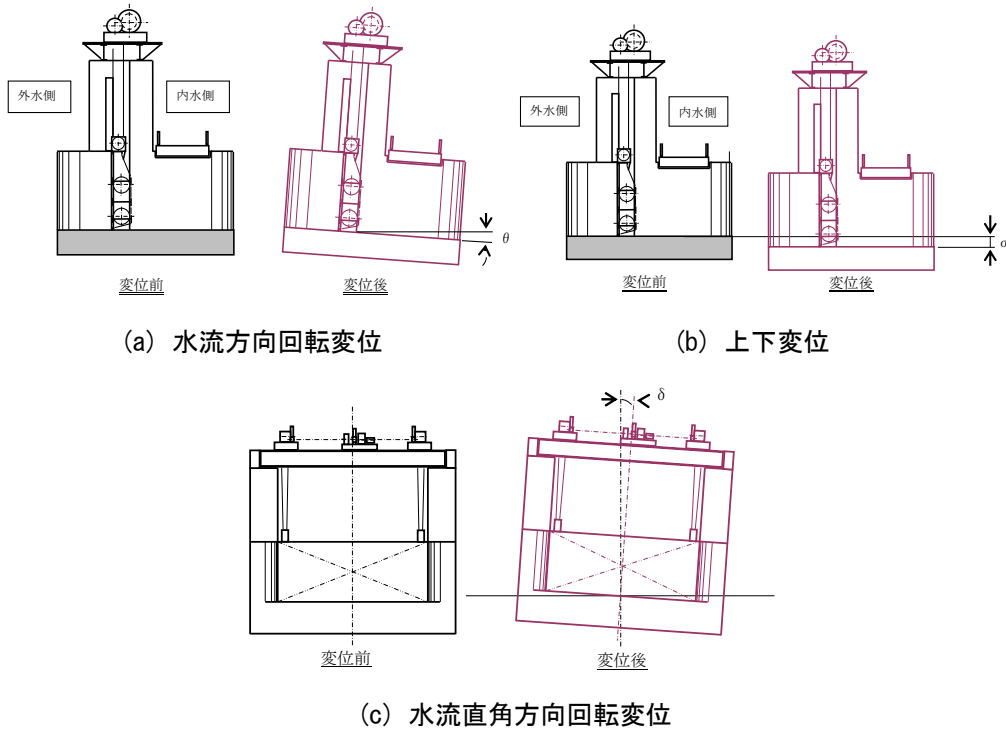


図3 躯体の変形

水門を構成する部材のうち門柱・堰柱は下端部が弱点となるため、前述の躯体全体としての変位に加え、門柱・堰柱の屈曲がそれぞれの下端で発生するモード（図4）を想定した。なお、水流方向の堰柱の強度は十分に大きいと考えられるため、堰柱の下端で水流方向の屈曲が発生するモードは想定していない。水流直角方向とは異なり水流方向の堰柱は背後から土圧をうける構造ではないため、極端に細い場合を除き屈曲は発生しにくいと考えられる。

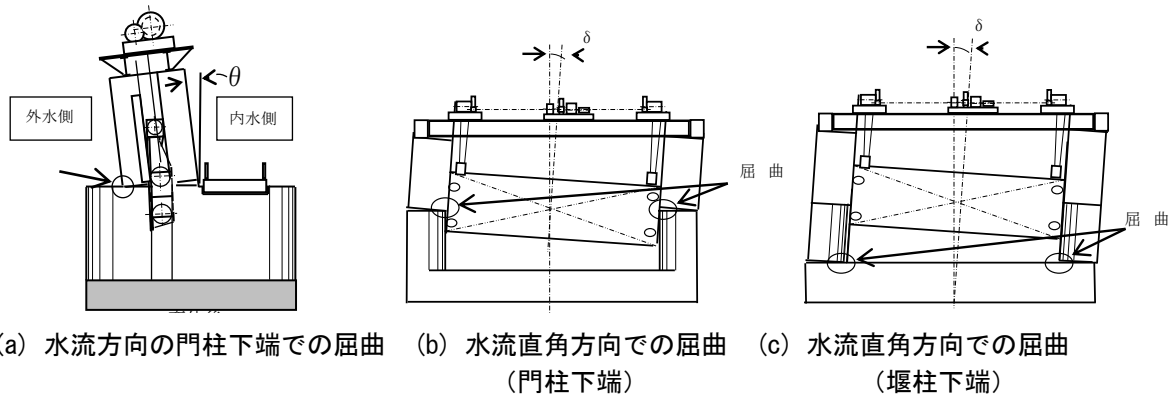


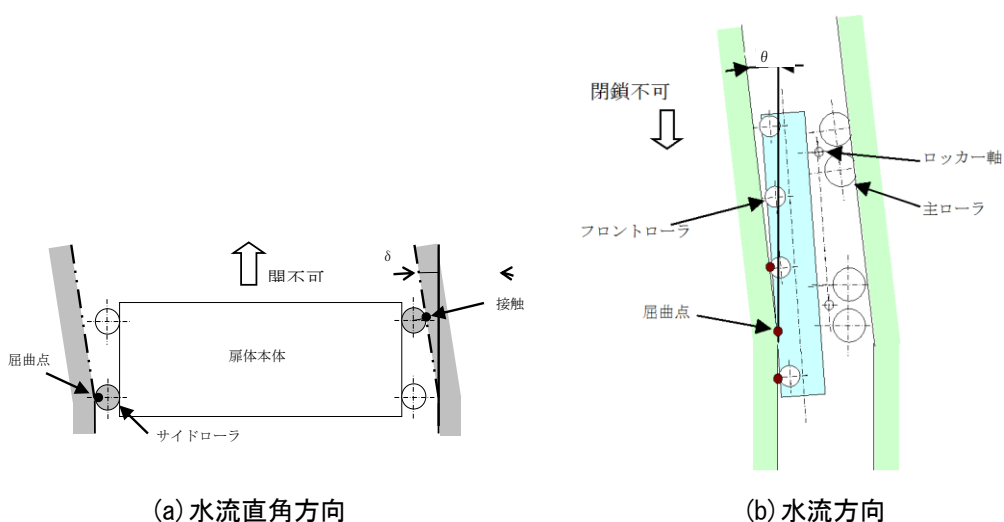
図4 門柱、堰柱の屈曲

(2) 想定不具合事象と検討内容

表4は、想定不具合事象とそれによる機能上の支障、および限界値を定めるための検討内容を示したものである。また、図5～図8にその不具合事象のイメージを示す。

表4 残留変位による想定不具合事象と限界値設定のための検討内容

検討項目	残留変位による不具合事象	機能上の支障	限界値設定のための検討内容
①門柱・堰柱の屈曲	門扉の対角線が門柱に接触	開閉不可	門柱・堰柱屈曲量と門扉の幾何学的関係
②開閉装置の開閉力	主ローラやサイドローラの抵抗力増加による開閉力増加	開閉不可	開閉荷重の増加量
③ワイヤーロープの巻き取り機能	フリートアングル超過によりロープが巻き取り不能	開閉不可	フリートアングルの変動量
④潤滑性能	潤滑性能不足による機器の焼きつき	開閉不可	油面の傾斜と歯車の関係



(a) 水流直角方向

(b) 水流方向

図5 門柱の屈曲に対する不具合事象（扉体のつかえ）（表4中①）

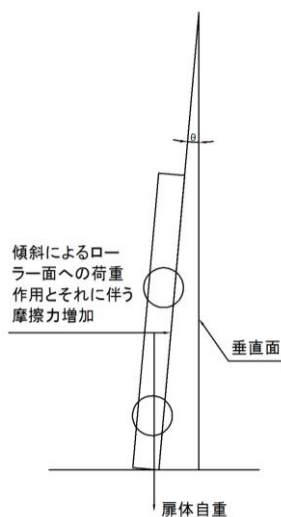


図6 開閉装置の開閉力に対する不具合事象（表4中②）

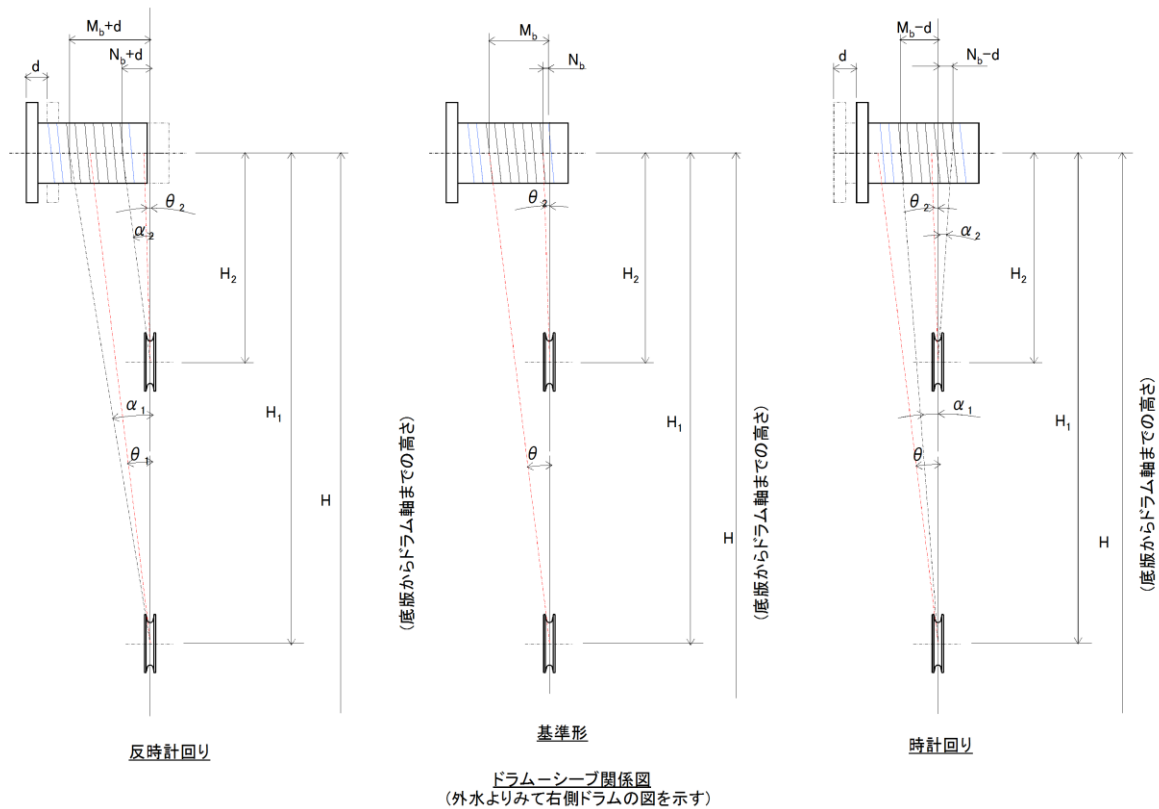


図7 ワイヤロープの巻き取り機能に対する不具合事象 (表4中③)

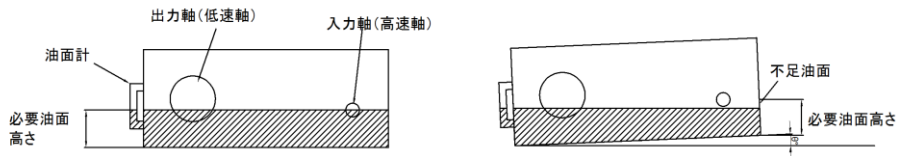


図8 潤滑性能に対する不具合事象 (表4中④)

(3) 照査規準の設定

各水門のローラーと戸当たりの関係、電動機余裕率、巻き上げ装置の諸元、油浴式減速機の諸元より残留変形に対する照査規準を設定した。なお、ここでは下記に示す前提条件を設けた。

- ① 躯体は底版と堰柱（門柱）が一体構造であるため、基本的には剛体的な傾斜を考える。ただし、躯体内での変形として門柱・堰柱の下端部での屈曲を考慮する。
- ② 操作橋は、門柱天端の固定端に追従して変位し、固定端側の門柱から門扉の吊り下げ位置までの水平距離は変化しないとする。
- ③ 地震荷重により機械部品には開閉が不可となる損傷が生じないとする。

設定した残留変形に関する照査規準の一例を表5に示す（ローラーゲート式水門の例）。当該水門では、水流直角方向の門柱、堰柱の屈曲による扉体のつかえ（図5 (a)）に対する限界傾斜角は、上下のサイドローラーの間隔3955mm、ローラー径240mm、サイドローラーと戸当たりの間隔16mmをもとに検討し、開操作に対し 0.23° 、閉操作に対し 2.96° となった。水流方向の門柱、堰柱の屈曲による扉体のつかえ（図5 (b)）に対する限界傾斜角は、フロントローラー側が制約条件となり、上下のフロントローラー

の間隔2200mm、ローラー径250mm、フロントローラと戸当たりの間隔17mmをもとに検討し、開閉操作に対し1.78°となった。開閉装置の開閉力(図6)に対する限界傾斜角は、機械性能に余裕があり、水流方向・水流直角方向とも10°まで傾斜させて検討したが開閉作業には問題ない結果となった。ワイヤーロープの巻き取り機能に対する限界傾斜角の算定では、図7に示すように、門柱が反時計回りまたは時計回りに傾斜し、巻き取りドラムの位置が $d=H \tan \delta$ だけ移動する状況を考える。ここに δ は門柱の傾斜角、 H は底版からドラム軸中心までの高さである。なお、屈曲が門柱下端で生じる場合には H としてより小さい値を採用することもできるが、ここでは安全側を考え H は底版からドラム軸中心までの高さ(当該水門の場合19,400mm)とした。ワイヤーロープの傾きは、移動前の $\theta_1=\tan^{-1}(M_b/H_1)$ 、 $\theta_2=\tan^{-1}(N_b/H_2)$ から、移動後は $\alpha_1=\tan^{-1}((M_b+d)/H_1)$ 、 $\alpha_2=\tan^{-1}((N_b+d)/H_2)$ に変化する(当該水門の場合、 $M_b=532\text{mm}$ 、 $N_b=-90\text{mm}$ 、 $H_1=13,725\text{mm}$ 、 $H_2=2875\text{mm}$)。これよりドラム溝角度 $\gamma=\tan^{-1}(P/\pi D)$ を差し引いた角度 $\beta_1=\alpha_1-\gamma$ 、 $\beta_2=\alpha_2-\gamma$ の絶対値がフリートアングルの限界値を超えないとの条件のもとに限界傾斜角を設定した。ここに P はドラムの溝ピッチであり当該水門の場合36mm、 D はドラム径であり当該水門の場合1,200mmである。フリートアングルの限界値を「ゲート用開閉装置(機械式设计要領(案))⁶⁾より4°(一層巻)としたところ、限界傾斜角は0.25°となった。この値は水流直角方向の限界値として考慮する。潤滑性能(図8)に対する限界傾斜角は、製造メーカーに型番を指定して調査し、水流方向1.5°、水流直角方向2.0°とした。以上の数値をもとに、躯体の傾斜に関する照査規準としては、扉体のつかえとフリートアングルを除く限界傾斜角のうち最も厳しいものを設定した。また、門柱の屈曲に関する照査規準としては、すべての限界傾斜角のうち最も厳しいものを設定した。その結果、当該水門では、開閉装置の開閉力やワイヤーロープの巻き取り機能ではなく、油面傾斜による潤滑性能の喪失と門柱・堰柱の屈曲による門扉のつかえがクリティカルとなった(表5)。

表5 躯体の残留変形に関する照査規準の例

照査項目	地震動レベル	照査規準			
		躯体の傾斜		門柱・堰柱の屈曲	
		水流方向	水流直角方向	水流方向	水流直角方向
躯体の残留変形	レベル1	1.5°	2.0°	1.5°	0.23°
		油面傾斜	油面傾斜	油面傾斜	扉のつかえ
	レベル2	—	—	1.78°	2.96°
		—	—	扉のつかえ	扉のつかえ

※クリティカルとなる項目や照査規準の数値は水門毎に検討する必要がある。

5. 水門の耐震性能照査

4. で照査規準を設定したローラーゲート式水門を対象として具体的に耐震性能照査を実施した事例について述べる。港湾構造物への適用実績の多いFLIP⁷⁾を用いて2次元地震応答解析を実施し、レベル2地震動に対する耐震性能照査を実施した。

5.1. 解析モデル

水門を水流方向と水流直角方向でモデル化し解析を行った。図9にモデル化の概念図を示す。RC部材である門柱、堰柱、底版はひび割れ点、降伏点を折れ曲がり点とするトリリニアの非線形はり要素とし、躯体～地盤間には両者の剥離や滑りを表現するジョイント要素を配した。ジョイント要素は、壁面摩擦角と垂直応力から求まるせん断力以上の力を伝達しないものとした。鋼管杭は全塑性モーメントを折れ曲がり点とするバイリニアの非線形はり要素とし、杭～地盤間には、杭間での地盤のすり抜けを考慮した地盤反力が得られる杭-地盤相互作用ばね要素⁸⁾を配した。操作橋は線形はり要素とし、実際の取付け状況を確認して、門柱との拘束は固定端と可動端とした。扉体は線形平面要素とし、サイドローラーの位置に門柱と門扉の衝突力を考慮するための非線形バネ要素(図10に復元力特性を示す)を配した。両者が接触した場合のバネ定数は既往の検討⁹⁾¹⁰⁾を参考に設定している。また、ワイヤーロープの位置で扉体と操作橋の鉛直変位が同一となるような拘束条件を与えた。

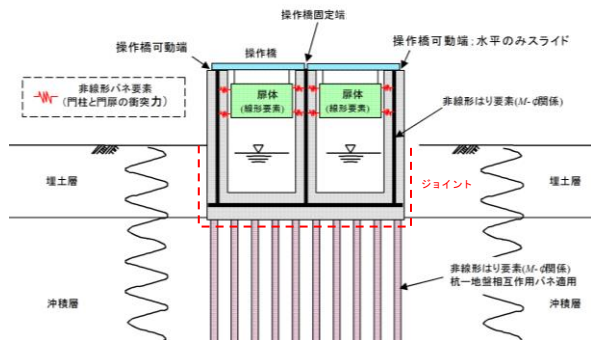


図9 水門のモデル化の概念図

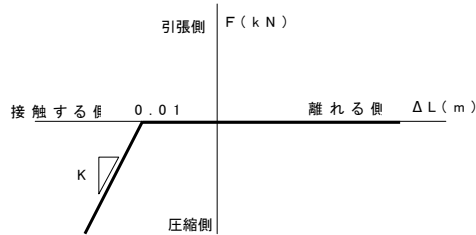


図10 門扉～門柱間の衝突を表現するバネ要素

解析モデルを図11に示す。水流方向には門柱に偏土圧が作用せず門柱の断面性能も大きいいため屈曲は考慮せず躯体を線形要素でモデル化した。また、水流方向には耐震対策のため躯体を挟みこむ形で固化改良が実施されている。当該地点の土層は、埋立土の下は有楽町層と七号地層からなり、埋立土と砂分の多い有楽町層（図11のYus）は液状化の可能性がある土層である。PS検層結果や非排水繰返し三軸試験等から設定した各土層の解析パラメータを表6に示す。

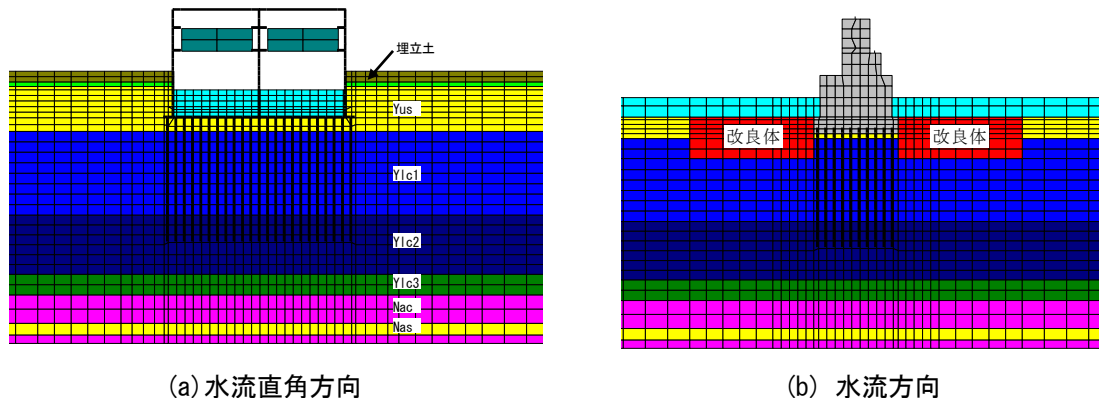


図11 解析モデル

表6 土層の解析パラメータ

土層	ρt (t/m^3)	間隙率 n	基準 拘束圧 σ'_{ma} (kPa)	基準 せん断 剛性 Gma (kPa)	ポアソン比 ν	最大 減衰 定数 h_{max}	粘着力 c (kPa)	内部 摩擦角 ϕf ($^\circ$)
埋立層	1.76	0.45	98.00	93055	0.33	0.240	—	38.20
Yus	1.79	0.51	98.00	72848	0.33	0.210	—	38.08
Ylc1	1.61	0.65	98.00	32050	0.33	0.175	74.7	—
Ylc2	1.61	0.59	98.00	45360	0.33	0.169	102.8	—
Ylc3	1.61	0.56	98.00	52192	0.33	0.175	220.6	—
Nac	1.67	0.55	98.00	61975	0.33	0.200	275.3	—
Nas	1.80	0.45	98.00	68473	0.33	0.197	—	39.87

土層	液状化特性パラメータ					
	ϕp ($^\circ$)	S1	w1	p1	p2	c1
埋立層	28.0	0.005	2.400	0.500	1.037	2.122
Yus	28.0	0.005	4.000	0.500	0.784	2.260

5.2. 入力地震動

レベル2地震動は、東京湾北部地震（首都直下地震）、元禄型関東地震（海溝型地震）の二つの想定地震動とした。水流直角方向と水流方向で施設配置の方向を考慮して入力地震動を個別に設定した。ここでは、代表して水流直角方向の入力地震動を図12に示す。

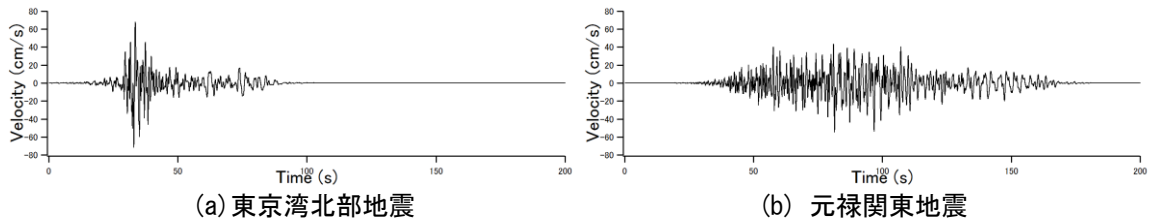
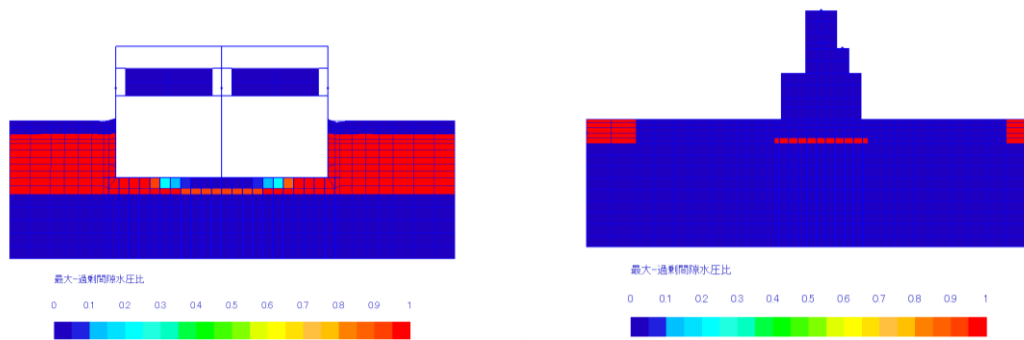


図12 入力地震動（工学的基盤での速度波形）

5.3. 耐震性能照査結果

地震応答解析結果として、元禄型関東地震による残留変形および過剰間隙水圧分布を図13に示す。水流直角方向では過剰間隙水圧は上昇し液状化は発生するものの、門柱の耐力が大きく屈曲しないため残留変形はほとんど生じない結果となった。水流方向の液状化の状況は水流直角方向と同様であるが、躯体の両側の固化改良体の拘束効果で残留変形はほとんど生じていない。図14は照査の一例として鋼管杭基礎の塑性率の時刻歴での最大値と許容塑性率を比較したものである。杭頭部で最大の塑性率を示すが許容塑性率未満であり、鋼管杭の耐力は低下していないと考えられる。地震応答解析による耐震性能照査の結果を表7にまとめて示す。当該水門では、レベル2地震動により躯体や基礎杭の破壊は生じず、門扉の閉作業に支障をきたす変形は生じないと判断された。なお、レベル1地震動に対する地震応答解析も同様に実施しており、門扉の開閉作業に支障をきたす変形は生じず、構造部材に発生する応力も弾性限界未満である結果が得られた。



(a) 水流直角方向 (b) 水流方向
図13 残留変形および過剰間隙水圧分布（元禄型関東地震）

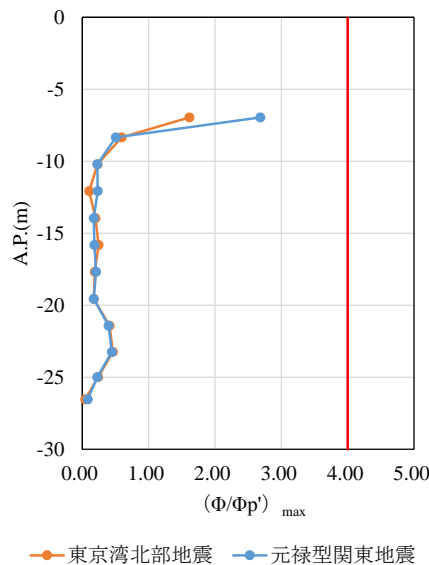


図14 塑性率の時刻歴での最大値の深度分布

表7 耐震性能照査結果

地震	躯体		基礎杭	残留変形		判定
	曲げ	せん断		躯体傾斜	門柱・堰柱 屈曲	
東京湾北部	許容曲率 未満	せん断耐力 未満	許容塑性率 未満	限界傾斜角 未満	限界傾斜角 未満	OK
元禄関東	許容曲率 未満	せん断耐力 未満	許容塑性率 未満	限界傾斜角 未満	限界傾斜角 未満	OK

6. おわりに

港湾における水門について、残留変形の形態やそれによる不具合事象を想定し門扉の閉操作が可能な残留傾斜角等について整理したうえで地震時の照査規準を設定した事例を示した。また、地震応答解析により具体的に耐震性能照査を実施した事例を示した。なお、門扉の戸当たり部の構造や機械設備の性能は水門毎に異なるため、照査規準を設定する際はそれらを考慮して個別に設定することが必要である。また、本検討では対象としていない機械部品に対する照査規準の設定方法と耐震性能照査方法の確立は今後の課題である。

謝 辞

本稿の著者は東京港の水門について照査規準の設定と具体的な照査に参画する機会を得たが、そこでの検討内容は、他の地域の港湾における水門の耐震性能照査においても参考になる点が多いと考えられたため、東京都港湾局の了解を得てここに紹介した次第である。本稿の作成への御理解をいただいたことに対し東京都港湾局に心より御礼申し上げる次第である。なお、東京都港湾局においては、現在、高潮・津波に対する防護機能を確保するほか、災害時における緊急輸送ルートとして水上輸送経路を確保する観点等から、災害時において水門の開閉機能を保持することとしている。

参考文献

- 1) 海岸保全施設技術研究会：海岸保全施設の技術上の基準・同解説、平成16年6月
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、平成19年7月
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、平成24年3月
- 4) 財団法人沿岸技術研究センター：港湾構造物設計事例集（平成19年改訂版）、平成19年3月
- 5) 中山裕章ら：鋼管杭の水平耐力に関する実大曲げ圧縮試験、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.51、第3部(B)、pp.46-47、1996
- 6) 一般社団法人ダム・堰施設技術協会：ゲート用開閉装置（機械式）設計要領（案）、平成12年8月
- 7) Iai,S.,Matsunaga,Y. and Kameoka,T. : Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations,Vol.32,No.2,pp.1-15,1992
- 8) 小堤治ら：2次元有効応力解析における杭と液状化地盤の相互作用のモデル化、第38回地盤工学研究発表会、pp.950-951、2003
- 9) 川島一彦ら：斜橋における落橋防止構造の有効性に関する研究、土木学会論文集I、703巻、I-59号、pp.221-236、2002
- 10) 尾崎健博ら：桁衝突がフレキシブル橋脚を有する橋台固定式橋梁の地震応答解析に与える影響、土木学会年次学術講演会講演概要集、Vol.54、第1部(B)、pp.434-435、1999