

# 東日本大震災の知見を踏まえた水門の基本設計 について

藤倉 永大<sup>1</sup>・河崎 尚弘<sup>2</sup>

<sup>1</sup>近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 技術開発課 (〒651-0082兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

<sup>2</sup>近畿地方整備局 神戸港湾空港技術調査事務所 技術開発課 (〒651-0082兵庫県神戸市中央区小野浜町7-30)

東北地方太平洋沖地震及びこれに伴う津波により水門を含む多くの海岸保全施設が被災した。一方で、今回発生した津波のような発生頻度は極めて低い影響が甚大な最大クラスの津波に対する設計手法は、現時点で明確にされたものはない。

そのような状況の中、今後高い確率で発生することが懸念されている東海・東南海・南海地震等に伴う津波により甚大な被害が想定されている和歌山下津港の海南地区において、津波水門の検討を行ったものである。

キーワード 津波水門, 基本設計, 最大クラスの津波, M9クラス地震, 三連動地震

## 1. はじめに

平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震及びこれに伴う津波は、海岸沿いに整備した一連の防護ラインを乗り越え、堤内地へ浸水被害をもたらすと同時に多くの海岸・港湾・河川構造物を破壊した。

中でも防潮水門・潮止め堰などの構造物は、地震発生時の揺れによる損傷は致命的ではないものの、津波による波力や津波来襲後の越流によって電源・制御設備が浸水し、機能不全になったものや管理橋ごと流出した事例が確認された。また、今回発生した津波は、越流後に引波が生じたため、[図-1](#)に示すとおり隣接する取付護岸の多くが転倒し、水門だけが取り残されているといった箇所も多く確認され、今回の津波では設計外力を大きく上回るものであったことに加えて、超過外力に対して脆弱であることが明らかになった。



図-1 東日本大震災における被災状況

これを受け、今後の施設計画・設計においては、発生頻度の高い津波に対する安全性の確保だけでなく、発生頻度は極めて低い影響が甚大な最大クラスの津波に対しても、壊滅的な倒壊はしにくい「粘り強い構造」が求められているところである<sup>1)</sup>。

本稿で報告する対象施設は、和歌山下津港海岸（海南地区）において整備する津波対策水門（水門幅30m、高さ9.5mと日本最大級クラス）であり、近い将来高い確率で発生することが懸念されている東海・東南海・南海地震（以下「三連動地震」という）を踏まえ、早期整備が求められている施設である。

本稿では、東北地方太平洋沖地震及びこれに伴う津波による被災実績<sup>2)</sup>、中央防災会議の方針<sup>3)</sup>、施設天端を越流するような津波に対する考え方<sup>1) 2) 4)</sup>などを踏まえ、発生頻度の高い津波に対する検討を前提としつつ、最大クラスの津波に対しても「粘り強い構造」となるよう検討した結果を報告する。

## 2. 基本設計内容

### (1) 設計する上での適用基準

設計対象施設である水門は、和歌山下津港海岸（海南地区）における津波防護ラインの一翼をなし、係留区域の港口部に整備される計画であり、海岸保全施設として運用される施設である。

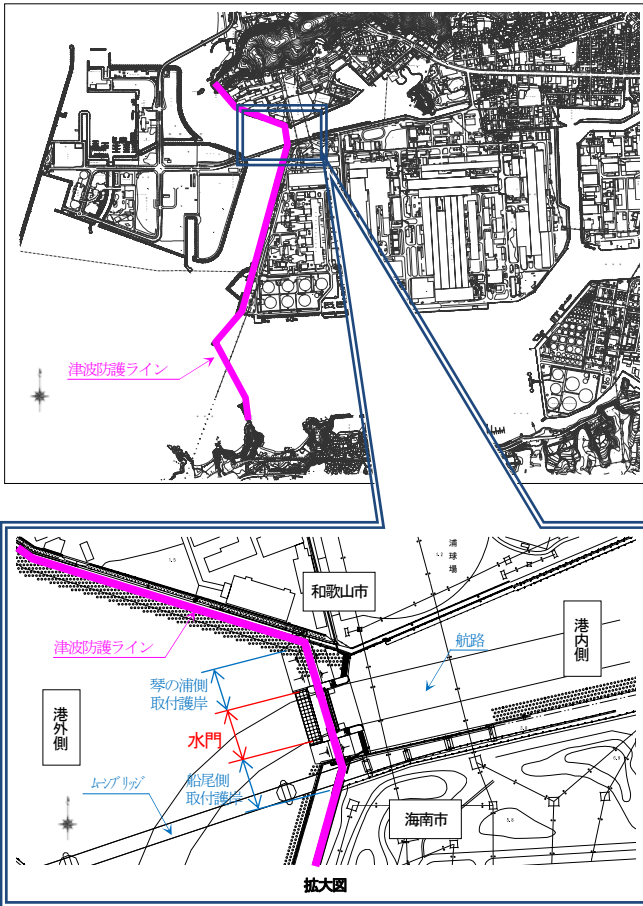


図-2 平面図

通常、海岸保全施設の設計手法は、海岸保全施設の技術上の基準・同解説<sup>5)</sup>（以下「海岸基準」という）及び港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>6)</sup>（以下「港湾基準」という）に基づき設計する。しかしながら、信頼性設計によって構造物の安全性を確認する海岸基準及び港湾基準においては、取付護岸の設計は出来るものの、水門に対しては具体的な性能規定が明確に定められていない。一方で、河川構造物では、河川構造物耐震性能照査指針（案）<sup>7)</sup>（以下「河川基準」という）において、水門に対する要求性能を耐震性能という規定で整理されており、具体的な照査方法が明記されていることから、対象水門については海岸基準及び港湾基準に準拠しつつも、具体的な照査方法は、河川基準や道路橋示方書<sup>8)</sup>、コンクリート標準示方書<sup>9)</sup>に基づいて照査した。

## (2) 津波水位

津波水位については、図-3及び図-4に示す津波シミュレーション結果より表-1のとおり設定した。なお、余震時の津波水位については、3ピークの平均値とした。表-1より余震（M9クラス地震）時の津波においても発生頻度の高い津波水位より高いため、最大クラスの津波が非常に大きいものであることが分かる。

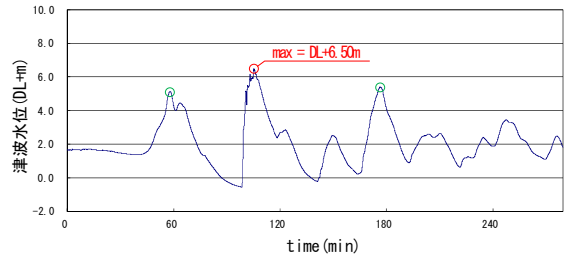


図-3 津波波形（発生頻度の高い津波）

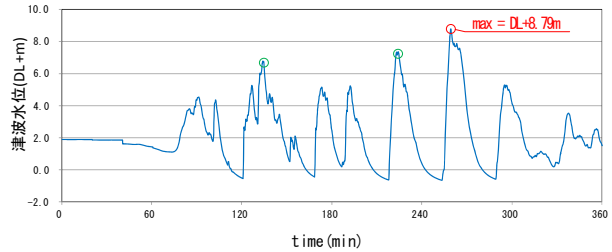


図-4 津波波形（最大クラスの津波）

表-1 対象津波水位（潮位：HWL=DL+1.90m）

①	発生頻度の高い津波 （三連動地震により発生する津波）	DL+6.50m
②	余震（三連動地震）時の津波	DL+4.91 m
③	最大クラスの津波 （M9クラス地震により発生する津波）	DL+8.79 m
④	余震（M9クラス地震）時の津波	DL+6.87 m

## (3) 外力ケース

対象水門に作用する外力は、「想定外の外力」とならないように、実現現象として考えられる外力を組合せて設定した。ここでいう実現現象として考えられる外力とは、東日本大震災でみられた継続時間の長い地震や本震以降の余震回数がかつて発生した大規模地震に比べて多い結果を受け、最大クラスの津波及び最大クラスの津波を引き起こす地震（以下「M9クラス地震」という）や、津波と余震の同時生起を外力ケースとして設定した。

その結果、照査した外力は、常時（自重・風荷重）、地震時（L1地震）、高潮・波浪時、発生頻度の高い津波（三連動地震により発生する津波）時、大規模地震（L2地震：海溝型、直下型の2種類）時に加え、M9クラス地震時とそれに伴い発生する最大クラスの津波時、更には津波（押波）と余震の同時生起、津波（引波）と余震の同時生起とした。

本検討における外力ケース設定の特徴は、津波と余震を同時に作用させたことである。通常の水門であれば、地震もしくは津波の両ケースを外力として作用させ、クリティカルとなる外力ケースで部材を設定する。

今回のように、津波と余震を同時に作用させるということは、水流方向でいうと、図-5に示すとおり地震時の構造物自身に発生する慣性力と地震時に生じる動水圧、更に余震時の津波が同時に作用する場合であり、他の外力ケースに比べて非常に大きな外力ケースとなる。

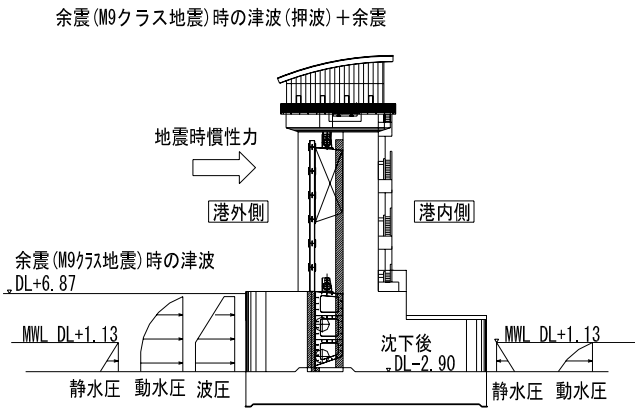


図-5 津波(押波)+余震の同時生起作用時のモデル図

(4) 要求性能と性能規定

対象水門は、発生頻度の高い津波（三連動地震により発生する津波）に対する津波防災施設であり、大規模地震（L2地震：海溝型、直下型の2種類）に対しても水門としての機能を確保することが前提となる。水門としての機能とは、大規模地震後もゲートの開閉が可能であり、防護ラインを確保するという機能である。ただし、大規模地震も海溝型と直下型に大別されるが、津波が発生しないと考えられる直下型については一定期間内に修復することを前提として、海溝型に比べ要求性能を1ランク下げる計画（耐震性能2→耐震性能3）とした。

表-2 耐震性能

耐震性能1	水門としての健全性を損なわない性能
耐震性能2	水門としての機能を保持する性能
耐震性能3	水門としての機能の回復が速やかに行い得る性能

水門の機能は、地震時や津波来襲時にゲートの開閉が可能なる状態であることを前提とするが、大規模地震時に対しても耐震性能1（水門としての健全性を損なわない）を確保することは、施設の規模が大規模となり、コスト面を考えると現実的ではない。

ただし、高い確率で発生することが懸念されている三連動地震（L2地震 海溝型）及び発生頻度の高い津波（三連動地震により発生する津波）に対しては、所定の機能を発揮すべきであり、耐震性能2（塑性変形を生じてもゲートの開閉に支障をきたさない）を確保することとした。

しかし、1000年に1回程度の確率で発生するとされる最大クラスの津波（M9クラス地震により発生する津波）に対しては、全てをハード対策で対応することは施設整備に必要な費用、海岸の環境や利用に及ぼす影響などの観点から現実的ではないため、越流は許容するものの、水門としての機能の回復が速やかに行い得ることを

前提に耐震性能3を確保することとした。なお、M9クラス地震については、その後に発生する最大クラスの津波を考慮して、三連動地震（L2地震 海溝型）と同様に耐震性能2を確保することとした。

(5) 設計手法

対象水門における設計状態と主たる作用を表-3に示す。

表-3 設計状態と主たる作用

永続状態	自重
変動状態	レベル1地震動
偶発状態	レベル2地震動 M9クラス地震動 津波

計画する水門施設は、作用する外力によって、永続状態と変動状態、偶発状態に大別され、それぞれの状態によって設計する手法は異なる。

a) 水門本体

水門本体については、永続状態や変動状態では、水門としての健全性を損なわない性能を確保するため、通常のコンクリート構造物と同様に許容応力度法により弾性領域内となるよう照査を実施した。

偶発状態では、地震時保有水平耐力法により照査を実施し、塑性変形がゲートの開閉を妨げない範囲となるよう照査を実施した。

なお、河川基準での照査は、基本的に静的照査法による照査となるが、対象水門は動的照査法による照査も実施した。

b) 水門基礎

水門基礎については、原則、全ての設計状態において降伏しないことを前提としているが、偶発状態において液状化の影響を考慮する場合は、降伏以下にしようとする不合理な設計になる場合があるため、許容塑性率及び許容変位以下となるよう照査を実施した。この手法は、橋脚や橋台を設計する道路橋と同様の照査手法であり、道路橋示方書<sup>10</sup>にも照査方法が記述されている。なお、許容塑性率の値は橋脚と橋台によって異なるが、水流直角方向に土圧を受けることから橋台に準じて塑性率を3とした。

c) 水門ゲート

水門ゲートについては、大規模であることや湾内に位置した構造物であるため、容易に修復することは困難であることを踏まえ、全ての設計状態において弾性領域内におさまるよう許容応力度法にて照査を行った。但し、偶発状態については弾性領域内の中でも降伏点の90%以内となるよう照査を実施した。

(6) 照査用震度

照査用震度算出フローを次頁の図-6に示す。

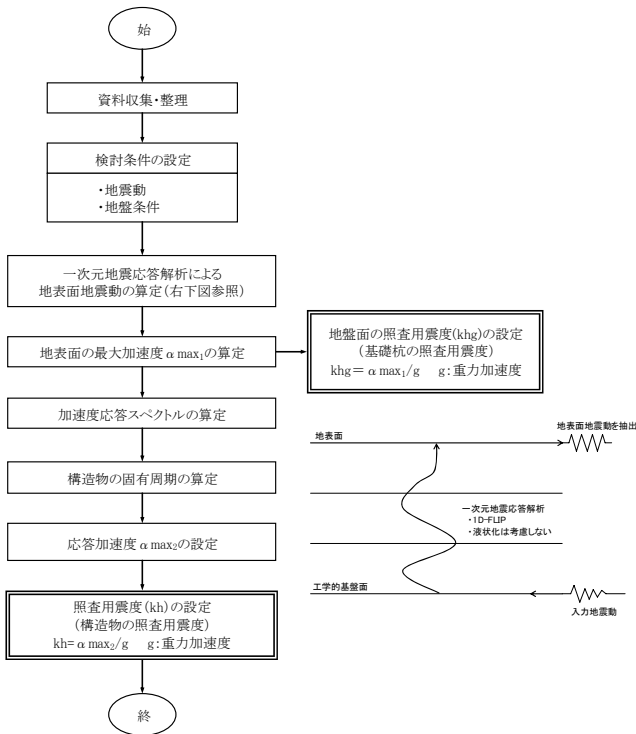


図-6 照査用震度算出フロー

河川基準では、設定する照査用震度は道路橋示方書に準じて地域別、地盤種別に応じて設定されているが、対象水門においては港湾基準に基づいて、計画地点における各地震動について、地表面における地震動から算出した加速度応答スペクトルと構造物の固有周期から照査用震度（構造物照査用）を設定した。

最も大きい値となったのは、M9クラス地震における照査用震度であり、水門構造物に対して1.0以上の照査用震度となった。各地震動における照査用震度（構造物照査用）の算出結果を表-4に示す。

表-4 照査用震度（構造物照査用）一覧表

No.	設計地震動			最大加速度 (gal) (工学的基盤面)	照査用震度
①	L1地震動		水流方向	196.06	0.402
			水流直角方向	196.06	0.368
②	海溝型	三連動	水流方向	305.90	0.764
			水流直角方向	417.83	0.637
③	L2地震動 (本震)	直下型 (M6.5)	走向(北)	624.71	0.728
			水流直角方向	473.69	0.598
④		走向(東)	水流方向	699.84	0.711
			水流直角方向	736.57	0.606
⑤	L2地震動 (余震)	海溝型	水流方向	214.13	0.555
			水流直角方向	292.48	0.521
⑥	M9クラス (本震)	海溝型	M9クラス地震動	731.89	1.043
			水流直角方向	1,025.99	0.750
⑦	M9クラス (余震)	海溝型	M9クラス地震動	548.92	0.876
			水流直角方向	769.49	0.724

3. 設計結果

(1) 水門本体

大規模な水門構造物は、U形形式や逆T形形式のものが大半を占める。対象水門における開閉装置形式は、信頼性、経済性等を比較検討した結果、1モータ2ドラムのワイヤロープウインチ式を採用しており、左右の操作室に設置しているドラムを連動軸により連結し駆動させるため、門柱の相対変位が小さくなるU形形式の方が逆T形形式に比べて優れていると考えられるが、U形形式の場合は、底板中央部に発生するモーメントが大きくなるため、一般的な配筋により所定の安全性が確保されるかどうかは課題であった。

照査の結果、永続状態や変動状態で必要となる軸方向の鉄筋はD32の2段配筋となった。偶発状態においても、鉄筋径を1ランクアップ (D32→D35) させることで、所定の安全性が確保される結果となり、U形形式が選定可能となった。

(2) 水門基礎

水門の基礎は、支持層が60m程度と深く、周辺に病院等が近接する環境であるため、施工可能な杭工法も限られてくる。本検討においては、永続状態と変動状態で経済的となる杭種・杭径を選定し、偶発状態において安全性照査を実施した上で、施工性、経済性等を比較検討した結果、中掘り杭工法（噴出攪拌方式）鋼管杭（上杭：φ800 t=16mm SKK490，下杭：φ800 t=9mm SKK400）を採用した。偶発状態の安全性照査では、一部塑性化するが、許容塑性率及び許容変位量以下となるため、性能規定を満足する結果となった。

(3) 水門ゲート

水門ゲートは、径間長と高さからプレートガーダ構造とシェル構造の2タイプが考えられる<sup>11)</sup>が、経済性、維持管理性等を比較検討し、シェル構造を採用した。なお、水門ゲートの重量は、余震（M9クラス地震）時の津波と余震の同時生起を考慮すると250t程度となった。仮にM9クラス地震とそれに伴い発生する最大クラスの津波を考慮しなければ200t程度となり、東日本大震災を踏まえて採用した設計外力により、ゲート重量が大きく変化することが分かった。

(4) その他

更に、水門本体や水門ゲートの他に危機管理上の「粘り強さ」を確保するため、以下の点についても配慮した。

a) 予備発電設備、閉鎖方法

東日本大震災の被災事例では、地震による停電の影響で常用電源による操作が不可能となった事例が多く見られたため、予備発電設備を設置すると共に、自重降下に



よる急速閉鎖が可能な構造とした。(自重降下閉鎖時間: 10分)

**b) 電源及び制御設備等**

東日本大震災の被災事例では、津波による浸水の影響で電源及び制御設備等の操作が不可能となった事例が多く見られたため、電源及び制御設備等は全て門柱上部の操作室に収納した。(操作室床面高: DL+29.9m)

**c) 操作制御**

東日本大震災の被災事例では、水門の閉鎖を行っていた多くの消防団員等が津波の犠牲となった事例が見られたため、操作制御は機側操作だけではなく、遠隔操作も可能とした。

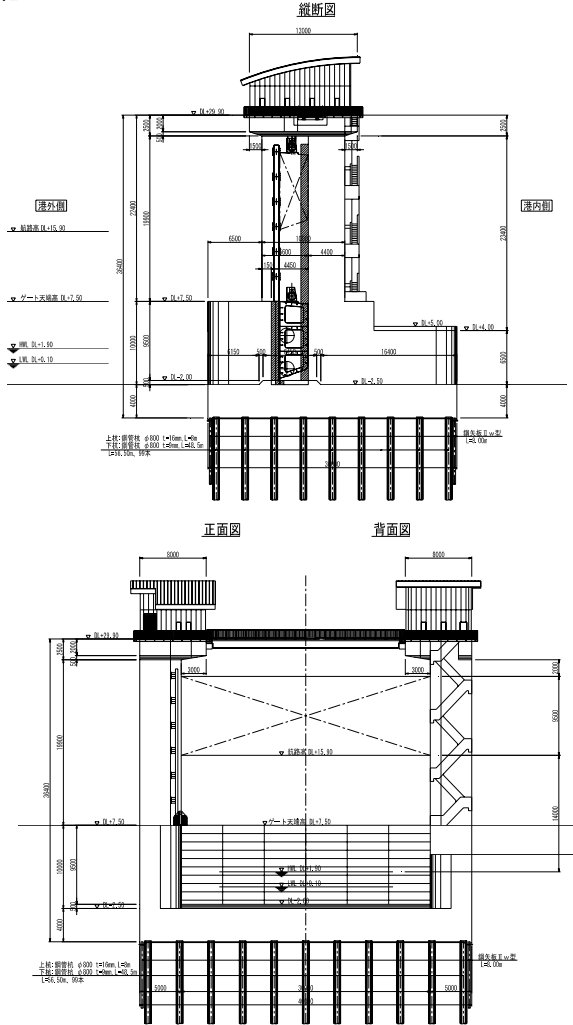


図-7 水門縦断面図, 正面図・背面図

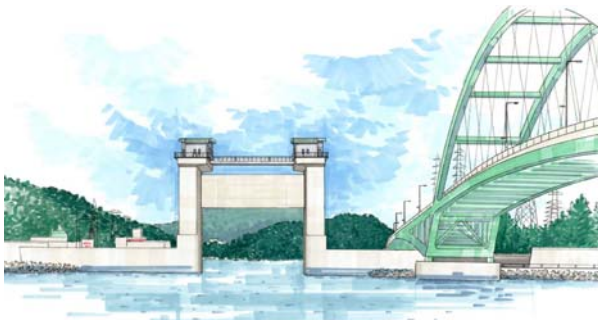


図-8 水門イメージパース

**4. 今後の課題**

M9 クラス地震及び最大クラスの津波を考慮した設計手法は、現時点で明確にされたものはない。一方で、東日本大震災では、M9 クラス地震で発生した津波により数多くの水門が損傷を受け、ゲートの開閉に支障をきたしたことから復旧・復興が遅れている状況である。

1000年に1回程度発生するとされる外力に対して、安全性照査を実施することは、過大設計という意見もあるかもしれないが、整備する防護ラインが破壊されることによって壊滅的な被害になれば、莫大な復旧費用が必要となる。したがって、「粘り強い構造」の具体的内容については、参照出来る基準等が存在しないものの、最新の知見を踏まえて今後反映出来るものは反映していく必要がある。

なお、本検討においては、平成23年7月6日の交通政策審議会港湾分科会防災部会の中間とりまとめを受けて国土交通省港湾局において設定された最大クラスの津波を対象に検討を行ったが、今後は、中央防災会議の専門調査会において検討が進められている東海・東南海・南海地震及びこれに伴う津波についての検討結果を踏まえた再検討が必要である。

また、津波浸水対策事業としては、本水門だけではなく、隣接する護岸も含めた一連の防護施設として機能を発揮することが求められる。したがって、隣接施設との境界部における水密性を確保するため、東日本大震災で得られた最新の知見を考慮した取付形状等について今後詳細を検討していく必要がある。

**参考文献**

- 1) 交通政策審議会港湾分科会防災部会：港湾における総合的な津波対策のあり方（中間とりまとめ）平成23年7月6日
- 2) 東北地方太平洋沖地震を踏まえた河口堰・水門等技術検討委員会：東日本大震災を踏まえた堰・水門等の設計、操作のあり方について 平成23年9月
- 3) 中央防災会議 東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会：東北地方太平洋沖地震を教訓として地震・津波対策に関する専門調査会報告 平成23年9月28日
- 4) 海岸における津波対策検討委員会：平成23年東北地方太平洋沖地震及び津波により被災した海岸堤防等の復旧に関する基本的な考え方 平成23年11月16日
- 5) 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
- 6) (社)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
- 7) 国土交通省河川局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針（案）・同解説 平成19年3月（平成24年2月一部改訂）

調査・計画・設計部門:No.04

- 8)(社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編  
平成14年3月
- 9)(社)土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】2007年  
制定

- 10)(社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編  
平成14年3月
- 11)(社)ダム・堰施設技術協会：ダム・堰施設技術基準(案)