

技術報 既設樋門門柱の上屋軽量化による耐震対策効果に関する検討

国土保全技術推進部 ○丸岡乃信 / 行徳有紀 / 名尾耕司

我が国では首都直下型地震や南海トラフ地震などの巨大地震の想定を受け、河川構造物の耐震性能照査及び耐震対策が鋭意実施されている。河川構造物における代表的な施設の一つである樋門では、その門柱の断面形状や、逆流防止ゲート設備を保持するという河川構造物特有の条件により、地震時の挙動や耐力発揮の特性は複雑となる。このため門柱への直接的な補強対策をとる際は、多くの照査ケースを定めて検討する等、その評価には慎重さが必要となる。これらのことより著者らは、部材補強の観点ではなく、地震時慣性力の低減に着目し、その耐震対策効果を検討した。この結果、上屋の軽量化を図ることで曲げ破壊と塑性変形、せん断破壊の何れも有意な耐震対策効果が得られることを確認できた。

キーワード：樋門門柱、上屋軽量化、耐震対策、地震時保有水平耐力、曲げ破壊、せん断破壊、残留変位

1. はじめに

我が国は、災害リスクの高い約 35%の国土に人口の約 70%以上が居住するなど、災害に対して脆弱な国土構造となっている¹⁾。また、首都直下型地震や南海トラフ地震、日本海溝・千島海溝周辺海溝型地震など、切迫する巨大地震・津波によって広域にわたる甚大な人的・経済的被害をもたらされるおそれがある²⁾。これらを受け、防災・減災、国土強靱化に関する取組として、河川構造物の耐震性能照査を令和 7 年度までに約 90%の達成度となることを目標に鋭意実施されている状況である³⁾。

河川構造物における代表的な施設である樋門は、河川堤防を横断して設けられる制水施設であり³⁾、洪水時には流水が堤内地に流入しないよう堤防の一部を構成する。樋門はこの制水機能のための逆流防止ゲートを有しているが、従来型の既設樋門は、ゲートを門柱により保持する事例が多い(図-1, 図-2)。また既設樋門は設置数が多いため、耐震性能照査と対策検討を効率的・効果的に実施していくためには、部材毎に優先度を定め段階的に補強を実施していくことが有効とされている⁴⁾。樋門門柱は、地震被害を受けた事例がある部材であるとともに、致命的な損傷を受けた場合にゲートの開閉が困難となるため重要な部材であり、優先的な照査・対策が必要である⁴⁾。

樋門門柱におけるゲート保持機能及びその断面の L 型形状の耐力特性は、地震時の挙動や耐力発揮の複雑化の要因であり、多くの照査ケースを定めて検討する等、その評価には慎重さが必要となる。またゲート戸当りにより補強工の適用箇所が限定されるという制約もある。

このようなことから著者らは、挙動が複雑で補強対策の配置制約の多い門柱部材補強以外の対策として、上載荷重の軽量化により地震時慣性力そのものを低減することに着目し、上屋軽量化の耐震対策効果やその実現性を検討することとした。

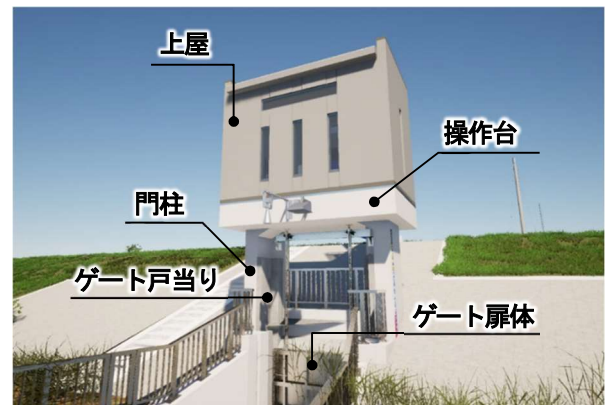


図-1 樋門イメージ (3D モデル)

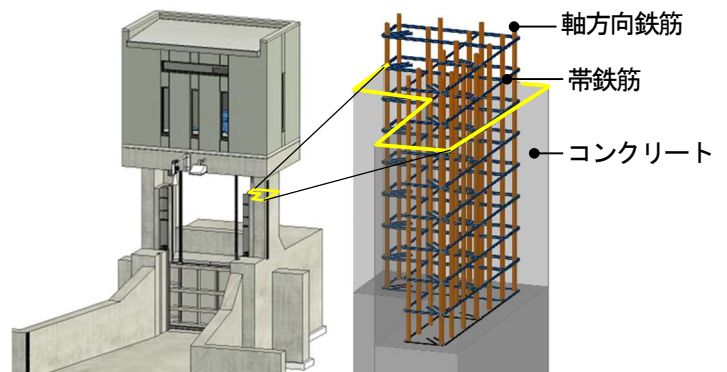


図-2 門柱断面の細部構造

2. 門柱の耐力特性

門柱の耐震照査では、比較的単純な構造で地震時に 1 次振動モードが卓越し、主たる塑性化の生じる部位が明確であるとの条件のもとで静的照査が可能とされている⁵⁾。静的照査では、門柱を函体に支持されたフレーム構造としてモデル化し、設計地震動の作用による門柱の地震時慣性力と、門柱の保有する水平耐力の比較により安全性が照査される。具体的には、門柱フレームに対し、地震時慣性力相当の水平力を漸増載荷し、これに伴う軸力、せん断力、モーメントといった断面力と、断面力に応じた部材の耐力・変位を計算する。次にこの耐力と、樋

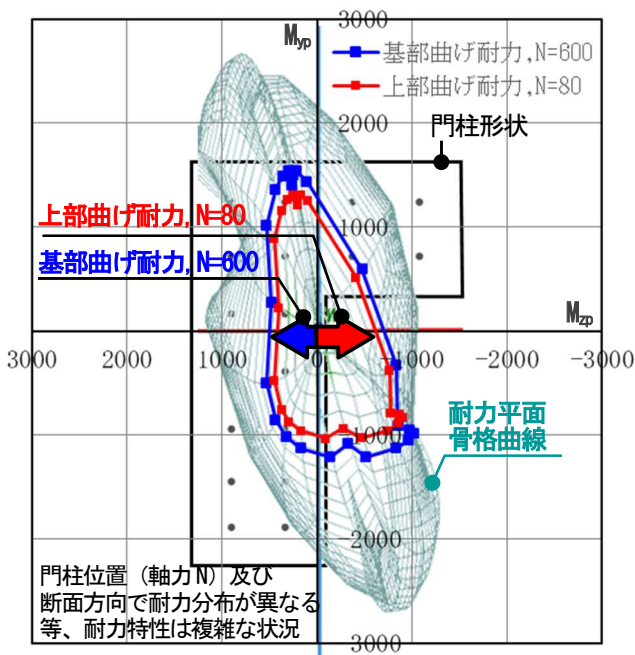
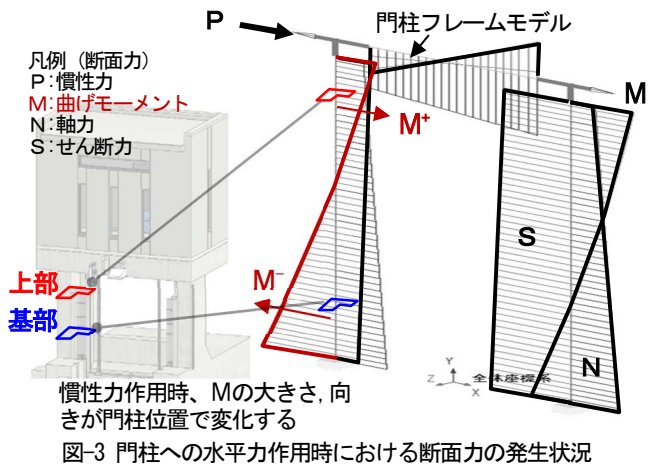


図-4 門柱断面耐力の特性
(軸力変動に伴う終局曲げ耐力の平面分布)

門位置や地域種別等を考慮して計算される水平力を比較することで照査する (Pushover 解析)。

ここでは断面力のひとつであるモーメントの地震時挙動について概説する。載荷前の常時状態においては、門柱や操作台、ゲートや上屋の死荷重による断面力が部材に発生しているが、ここに地震による水平荷重が作用すると、その慣性力の大きさに応じフレームの断面力が変化する。例えば断面力の1つであるモーメントは門柱全体で左右対称であったものが、水平力作用側と反対側で異なるようになり、門柱上部と基部で作用方向が反転してくる。この挙動に伴い、同じ部材断面を有する門柱でも、位置により外力や耐力が大きく異なることとなる (図-3、図-4)。また、樋門門柱は非対称断面 (L 型形状) であり、慣性力の作用方向によって耐力の発揮状況が大きく異なる傾向がある (図-4)。このように、門柱耐力特性は複雑といえる。

表-1 既設門柱の部位と補強工法の適用性⁶⁾

工 法	函体	継手	門柱	翼壁	摘 要
FRP 接着工法	◎	○	○	◎	
鋼板接着工法	◎	○	○	◎	
FRP 巻立て工法	○		◎		
鋼板巻立て工法	○		◎		
RC、PC 巻立て工法			◎		
プレストレス導入	◎	◎	○	○	外ケーブル工法
増厚工法	○		○	○	
打換え工法	◎	○	○	◎	継手は取替
継手取替・増設	○	◎			
耐震ブレース工法			◎		

◎: 適用可能、○: 適用が可能と考えられるもの

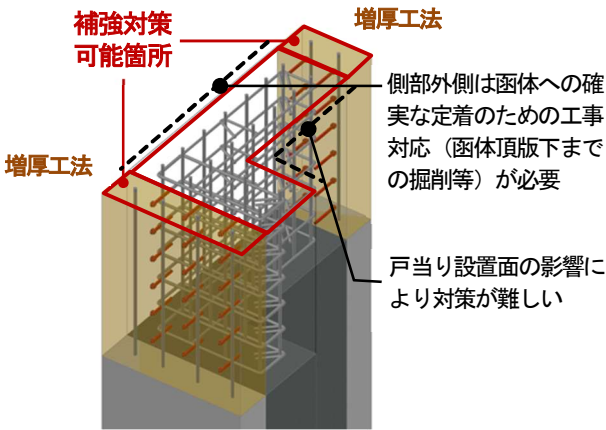


図-5 門柱補強の配置的制約

3. 門柱における耐震補強の配置上の制約

門柱に対する適用可能と考えられる耐震対策工法として、巻立て工法 (FRP、鋼板、RC)、耐震ブレース工法、接着工法 (FRP、鋼板) や増厚工法等が挙げられている (表-1)。ここで樋門門柱は、側部内側の一面にゲート戸当り設備を設けることや、側部外側には函体側壁まで確実に定着させるための工事対応が必要となることなどから、補強可能箇所が限定されるという制約を有する (図-5)。これより、全周巻立てによる対策は、実際の現場適用が難しい一面がある。このような場合には部分巻立て工法や部分的な増厚工法の適用が考えられるが、効果発揮状況について十分確認する必要がある。耐震ブレース工法は、流水直角方向には効果があるが、流水方向は効果がほとんど期待できない。これより門柱への補強対策の適用にあたっては効果の評価・判断に慎重な対応が必要といえる。

4. 上屋軽量化による耐震対策効果の検討

既設樋門への耐震対応を考えていくために、耐力効果の発揮や対策適用性に慎重さを有する門柱補強対策以外にも、より簡易で適用性の高い対策についても検討することとした。ここで耐震メカニズム上重要となるパラメータには、「耐力・剛性」、「重量」が挙げられる。先に挙げた門柱補強は「耐力・剛性」に相当するが、ここでは「重量」に着目し、重量軽減による地震時慣性力の低下を図ることを考える。

門柱には、操作台上にゲートの巻上機等の機械設備や、操作室としての上屋が設置される。上屋は、経済性等の観点から、RC 型で重量のある形式が採用されることが多かった。また一方で、樋門施設規模によっては上屋がない樋門も存在している。また近年では、アルミ製の軽量な上屋形式も採用される事例が多くなってきている。

これらをふまえ、地震時慣性力の低減策として、従来の RC 上屋を撤去することや、軽量アルミ製に変更する等の対策を想定したモデルにより試算計算を行うことで、軽量化による耐震対策の効果を検討することとした。

1) 検討方法

検討モデルは、既往設計事例および土木構造物マニュアルに基づく樋門の設計例を参考として設定した⁷⁾。門柱間隔は 2.5m、門柱は高さにより破壊形態が変わることを考慮し、既往設計事例を参考に 5.6m（曲げ破壊モデル）、2.8m（せん断破壊モデル）とした。門柱断面は既設樋門事例及び既往設計事例から軸方向鉄筋 D16、帯鉄筋 D13@150mm、部材厚 400mm とした。このモデル断面は、常時・L1 地震動による耐力を満足する諸元であり、これに対し L2 外力による特性を確認した(図-6)。

このモデルに対し上屋荷重を変化させ、曲げ破壊モデルにおいては曲げ耐力と残留変位、せん断破壊モデルにおいてはせん断耐力照査を行った。照査方向には流水方向、流水直角方向があるが、流水方向は片持梁状態で挙動が単純なことから流水直角方向のみ検討した(表-2)。



写真-1 樋門上屋構造の例 (左: RC, 中: AL, 右: 上屋無し)

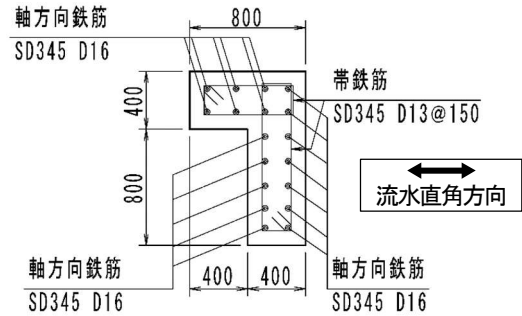
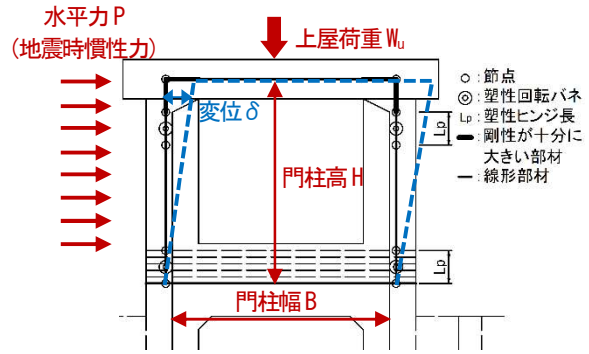


図-6 検討モデル概要

表-2 検討条件

照査方法	地震時保有水平耐力法 (Pushover 解析)
照査基準	水平力 $P \leq$ 保有水平耐力 P_a 残留変位 $\delta_R \leq$ 許容残留変位 δ_{Ra} (設計水平震度作用時)
照査条件	照査方向 流水直角方向 レベル 2-1 地震動、耐震性能 3
設計水平震度	地盤種別 II 種、地域別補正係数 $C1z(1.20)$
門柱諸元	間隔 B(2.5m)、高さ H(5.6m) 曲げ破壊型 間隔 B(2.5m)、高さ H(2.8m) せん断破壊型 断面幅 b(0.8m)、断面高 h(1.2m) 箱抜部 (0.4m×0.8m) 軸方向鉄筋 SD345D16×18 本 帯鉄筋 SD345D16@150
操作台諸元	全幅(4.8m)、奥行(2.9m)、厚(0.6m)
検討ケース	上屋荷重 $W_u=0 \sim 300kN$

2) 検討結果

上屋荷重と保有水平耐力の関係図によると、軽量化に伴う耐力上昇の傾向が確認できる(図-7, 図-8)。RC 構造(RC)からアルミ構造(AL)への改築による軽量化(約 250kN から約 15kN)により設計水平震度を上まわる効果がでていることがわかる。曲げ破壊時の残留変位についても許容値を下回る効果が得られている(図-9)。このときの水平力・変位図を示す(図-10, 図-11)。これより耐震性能照査(流水直角方向)で、保有水平耐力が約 65~70%増加し、高重量(RC)の場合は耐力不足だったのが、軽量化(AL)により保有水平耐力の照査を満足するほどの耐力増加効果があることを確認できた。

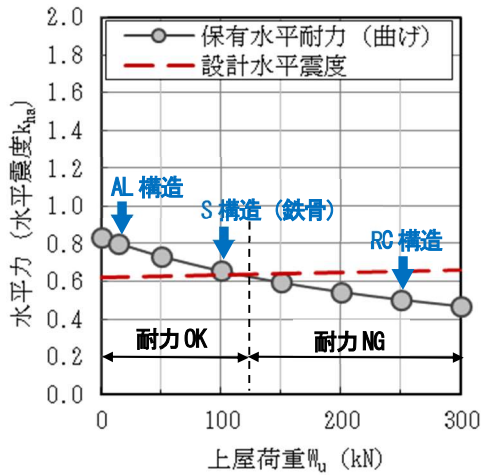


図-7 上屋荷重と保有水平耐力の関係 (曲げ破壊型)

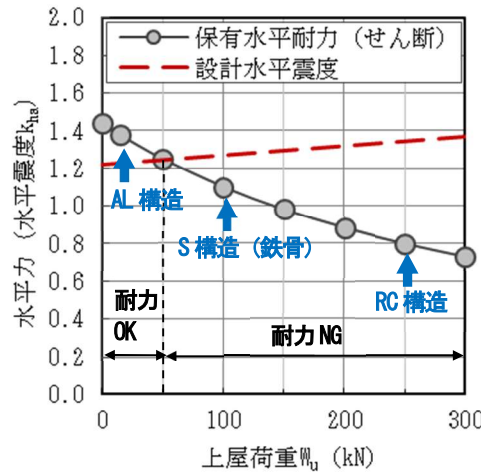


図-8 上屋荷重と保有水平耐力 (せん断破壊型)

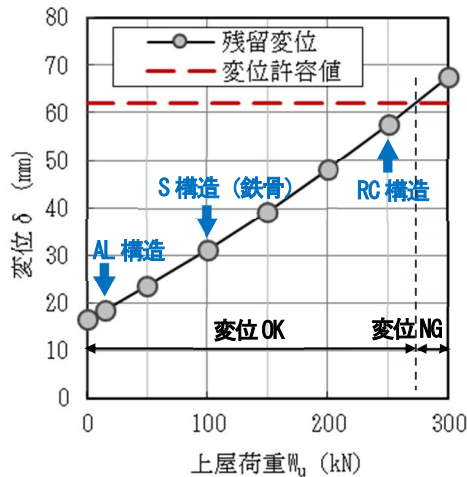


図-9 上屋荷重と門柱水平変位の関係 (曲げ破壊型)

5. まとめ

本稿では、門柱耐震性能照査において通常用いられる門柱補強対策に対し、軽量化による耐震対策の有効性を検討し、その効果を定量的に示した [上屋荷重 250kN→15kN, 門柱諸元 B(2.5m)/H(5.6m)にて曲げ耐力増加率 65%・残留変位低下率 70%、門柱諸元 B(2.5m)/H(2.8m)にてせん断耐力増加率 70%]。これにより、樋門門柱全体

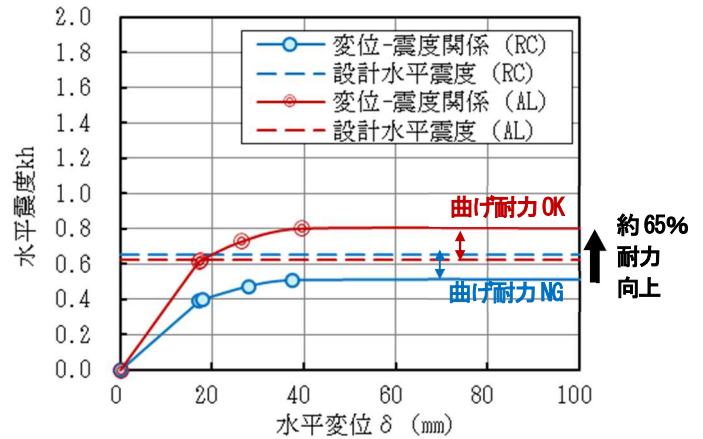


図-10 軽量化による保有水平耐力上昇効果 (曲げ破壊型)

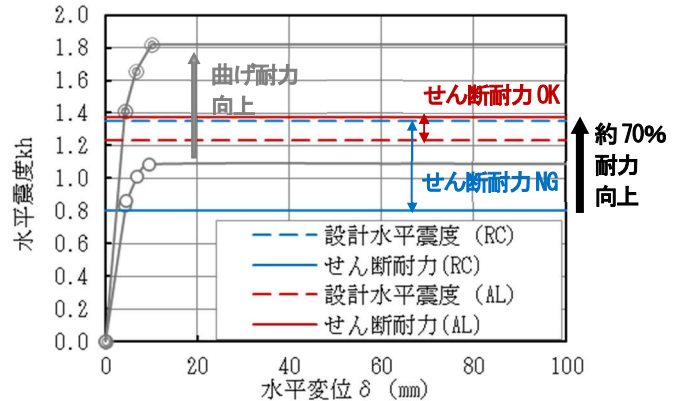


図-11 軽量化による保有水平耐力上昇効果 (せん断破壊型)

を軽量化するだけというシンプルな耐震対策案として、軽量化策が提案できるものとする。

今後は、本検討で得られた軽量化の効果を参考に、効果の程度や構造諸元、現場条件、コストなどを総合的に評価し、耐震対策検討業務に展開していきたい。

参考文献

- 1) 国土交通省：国土形成計画（全国計画），2023.7
- 2) 国土交通省：第5次社会資本整備重点計画（計画期間：令和3年度～令和7年度）の指標について（参考資料1），2021.5
- 3) 国土開発技術研究センター：改定 解説・河川管理施設等構造令，2000.1
- 4) 国土交通省：河川構造物の耐震性能照査等の実施に係る留意事項について（事務連絡），2013.4.9
- 5) 国土交通省：河川構造物の耐震性能照査指針・解説Ⅳ・水門・樋門及び堰編一，2020.2（2020.6一部追記）
- 6) 国土交通省：樋門補強マニュアル（案）-既設樋門の補修・補強、継足し，2001.12
- 7) 国土交通省：土木構造物設計マニュアル（案）に係わる設計・施工の手引き（案）[樋門編]，2001.12