

報告書概要

①技術研究開発課題名	新材料を用いた樋門・樋管用ゲートの性能設計・施工技術に関する技術研究開発
②技術研究開発テーマ名	新材料モルタルを主材とした低コスト軽量ゲートの実用化に関する技術開発
③研究代表者	
氏名	所属・役職
川崎 秀明	(前)山口大学大学院 理工学研究科 教授
④共同研究者	
氏名	所属・役職
松尾 栄治	(前)山口大学大学院 理工学研究科 助教
宮本 文穂	山口大学大学院 理工学研究科 教授
羽田野 袈裟義	山口大学大学院 理工学研究科 教授
高海 克彦	山口大学大学院 理工学研究科 准教授
明石 英男	豊国工業(株) 執行役員 鉄構事業部副本部長
貞満 一則	豊国工業(株) 鉄構事業部品質保証部長
栗栖 和男	豊国工業(株) 鉄構事業部理事
有村 圭二	豊国工業(株) 鉄構事業部技術部
⑤背景・課題	
<p>全国的におびただしい数のある樋門・樋管ゲートだが、「それらの多くが更新期を迎えつつある、鋼製であるため定期的に塗装等補修費を要する、地震や洪水など設計外力の増大によって扉体補強が必要である」などの問題が山積しており、これらを解決できる新型ゲートの開発が強く望まれている。</p> <p>なお、新材料導入は、コスト縮減や長寿命化等の効果が期待されるが、鋼材以外の材料の導入に不可欠な「耐候性、耐久性、信頼性」等といった性能規定を定めるための知見が不足していることから、新材料を用いた樋門樋管ゲートについて、適用範囲、施工・供用条件も含めた要求性能の整理やこれら性能の確認試験方法も含めた性能設計・施工技術の開発を行うことが重要である。</p>	
⑥技術研究開発の目的	
<p>本研究の目的は「従来の樋門樋管用鋼製ゲートと同等の性能を有した上で、より軽量かつ経済的である新材料モルタルゲートを実用化に近いレベルで開発する」ことである。当初数値的目標を以下に示す。</p> <ol style="list-style-type: none"> a. 従来の鋼製ゲートよりも軽量かつ経済的であること b. 国土交通省小規模ゲート標準設計から、約 1.5m 径間のスライドゲートにおいて水深 4.6m の水圧に耐えること c. 必要な水密性と耐久性を有すること d. 緊急閉塞や流木衝突などを考慮して必要な耐衝撃性と耐変形性を有すること <p>研究においては、構造解析、材料試験、部材試験、実寸大の水圧載荷試験等によって実用化に適する材料と構造を求めるとともに、設計・施工論を取りまとめ、必要とされる要求性能から性能照査を行うこととする。主材料となる EPS モルタルは、軽量性と非吸水性に優れた EPS 骨材（発泡スチロール廃材を熱減容処理したリサイクル骨材）に水とセメントを混ぜたものである。</p>	

⑦技術研究開発の内容・成果

＜概要＞

卓越した水密性と軽量性を持つ EPS 骨材であるが、混和材料によって品質改善を行い、これを鋼材（外枠）や FRP 材（内筋）と組み合わせた複合補強構造とすることで、モルタルゲートに必要な強度と耐変形性を持たせることに成功した。当構造は実寸大の水圧載荷試験によって検証するとともに、実験データに基づく FEM 解析によって補強効果を力学的に照査し、設計手法として整理した。また、塩水環境の既設樋門におけるモルタルゲートの現地試験を開始して十分な実用性を確認した。

＜年次実績＞

表-1.1 に当該研究開発における 3 カ年全体の年次実績を示す。受託研究は平成 21 年 12 月から開始され、平成 24 年 3 月終了までの 2 年 4 カ月にわたった。この間に、要求性能、設計・施工法、ゲート構造解析、材料特性、実用化性能確認（水圧載荷試験ほか）等に関する研究について実施して、寸法や構造・型式に制約はあるもののほぼ実用化の段階まで達することができた。

表-1.1 研究開発の年次実績

研究項目	21 年度	22 年度	23 年度	主担当 ()は補助業務
1. 要求性能に関する研究 (☆:性能評価委員会開催)	要求性能の整理 ←→☆	要求性能の評価 ←→☆	評価手法の提案 ←→☆	川崎 (技術基準：ダム堰施設技術協会)
2. 設計・施工法に関する研究	基本事項の検討 ←→	設計方法の検討 施工方法の検討 ←→	設計法・施工法の提案 ←→	川崎, 貞満, 栗栖
3. 構造解析による力学的妥当性に関する研究	FEM 構造解析 (単純構造) ←→	FEM 線形非線形解析 (複合構造) ←→	水圧載荷試験結果との照合 ←→	栗栖, 川崎 (非線形計算：中外テクノス)
4. EPS モルタルの材料特性に関する研究	基本特性の把握 ←→	乾燥収縮試験, 耐久性試験, 切欠き曲げ試験 ←→	乾燥収縮試験, 強度特性の確認, 実用配合の選定 ←→	川崎, 松尾
5. 実用化のための性能確認に関する研究			性能試験の総括	川崎, 松尾, 貞満, 有村 (載荷試験機製作・雑作業：構造物クリニック, 試験扉体製作・乾燥収縮試験：柏木興産, 切欠き曲げ試験・振動数計測：中外テクノス, 凍結融解試験・透水試験：建材試験センター)
5-1 試験方法	載荷試験方法検討・試験仕様 ←→	構造仕様の検討 ←→	推奨仕様の決定 ←→	
5-2 水圧載荷試験	試験機の製作設置 ←→	試験扉体 18 ケース (基本構造決定) ←→	試験扉体 12 ケース (構造の最適化) ←→	
5-3 各種実用性能試験	押抜きせん断試験 ←→	押抜きせん断試験 ←→	衝撃性, 自重降下, 振動数, 押抜きせん断等 ←→	
5-4 実地性能試験			現地設置試験 ←→	
報告書作成	年度報告書 ←→	年度報告書 ←→	最終報告書 ←→	川崎, 松尾

注 1) 性能評価委員会☆は、ゲートの要求性能に対しての当該ゲートの妥当性を客観的観点から審議し、研究開発チームに適切な助言を与えるもので、水工・鋼構造・コンクリートの専門家から構成した。

注 2) 当該技術開発は山口大学大学院理工学研究科 安全環境研究センターの主要プロジェクトとして位置づけられ、研究推進に当たっては、大学側から社会建設工学科学生数名の卒論研究指定、水圧載荷試験機用実験室の提供、受託事務等の便宜供与を受けた。

以下、モルタル材料・実用化試験・構造解析・設計施工法・性能照査の5項目の順で述べる。

1. EPS モルタルの材料特性に関する研究

配合、混和材、粒度等を変化させた練混ぜ試験、各種力学試験、浸透試験、乾燥収縮試験、耐久性試験等を行い、EPS モルタルの基本特性の確認と性能改善を行った。以下に概要を示す。

(1) EPS モルタル配合ケース

21-22年度において実用に適したEPS モルタル配合を検討した結果、施工性、強度、重量を考慮して、下記配合が妥当と判断された。これらにVF（ビニロン短繊維）0.5%、収縮低減剤10kg/m³等を混和したものが、実際の試験扉体に用いた配合となる。（図-1 参照）

A 配合：EPS 骨材 40%（体積比）＋水＋普通ポルトランドセメント，水セメント比 30%

B 配合：EPS 骨材 50%（体積比）＋水＋普通ポルトランドセメント，水セメント比 40%

D 配合：EPS 骨材 50%（体積比）＋減水剤＋水＋普通ポルトランドセメント，水セメント比 35%

(2) モルタル材料強度

各種の28日および91日材齢における圧縮試験、曲げ試験及び割裂試験を実施した。Φ10 cm円柱供試体による試験結果を以下に示すが、図-1の4cm角の角柱供試体と比べて低めの値となっている。

a. 総括的な材料強度試験

試験機と打設場所による強度とばらつきへの影響を確認するため、D 配合（VF なし、36 供試体）の総括的な材齢28日強度試験を平成23年5、6月に実施した。

結果→ 試験機と打設場所による有意な差はなく、D 配合の材齢28日平均値は、圧縮強度17.4N/mm²、ヤング係数5,451N/mm²、ポアソン比0.23、単位体積重量1.25 g/cm³となった。2σ（σ：標準偏差）による特性値は、圧縮強度16.3N/mm²、ヤング係数E=5,173 N/mm²であった。

b. 水圧载荷試験等における材料強度試験

水圧载荷試験、押抜きセン断試験等においてケース毎に円柱供試体による強度試験を実施した。供試体数nが少ないので平均値のみを記述する。

① D 配合（VFあり）：材齢28日；圧縮強度18.4 N/mm²（n=7）、ヤング係数6,395N/mm²、密度1.29 g/cm³、材齢91日；圧縮強度18.8 N/mm²（n=9）、ヤング係数6,744 N/mm²、密度1.30 g/cm³

② D 配合（VFあり・収縮低減剤あり）：材齢28日；圧縮強度16.6 N/mm²（n=21）、ヤング係数6,554 N/mm²、密度1.34 g/cm³、材齢91日；圧縮強度16.9N/mm²、ヤング係数6,857 N/mm²

③ A 配合（VFあり・収縮低減剤あり）：材齢28日；圧縮強度18.8 N/mm²（n=6）、ヤング係数11,666 N/mm²、密度1.56g/cm³、材齢91日；圧縮強度24.8 N/mm²、ヤング係数11,811 N/mm²

(3) 乾燥収縮試験（長さ変化試験）

22年度は、収縮低減剤、膨張材、高炉ヒューム等の混入によるEPS モルタルの長さ変化試験を行い、普通モルタル、普通コンクリートとも比較した。23年度は、収縮低減剤、膨張材、短繊維等の複数混入によるEPS モルタルの長さ変化試験を行った。

結果→ 各種乾燥収縮対策の違いを確認し、「収縮低減剤＋VF（短繊維混入）」が乾燥収縮低減、施工性、経済性に優れていると判断した。（図-2 参照）

(4) 透水試験

21年度： 透水試験（水圧0.25 N/mm²、7日間（604,800sec）加圧）を行い、インプット法によって拡散係数を求めた。

結果→ D 配合の拡散係数で3.5 x 10⁻⁴cm²/sec程度（透水係数換算1.02×10⁻¹¹ cm/sec）と10⁻¹¹台の非常に低い値となり、水密性が極めて高いことを確認した。（図-1 参照）

(5) 凍結融解試験

22年度： 10 x 10 x 40cm 供試体で試験を実施した。JIS規格に則り300サイクルにおいて相対動弾性係数が60%以上となるものを耐凍害性が高いと判断する。

結果→ 減水剤を混和したD 配合においてもJIS規格を満足しなかったが、表面保護剤として樹脂コーティングを施すことによりJIS規格を満たすことができた。

(6) 促進中性化試験

22年度： 酸性環境の一つである二酸化炭素による中性化を対象に促進中性化試験を行った。
 結果→ 材料強度が小さいほど中性化速度が速い傾向は見られ、EPS モルタルの中性化速度は一般コンクリートと比べると大きいですが、超長期の使用以外は問題になるものではない。また、内筋はFRPであるので発錆の問題はないと言える。

(7) 切欠きはり曲げ試験

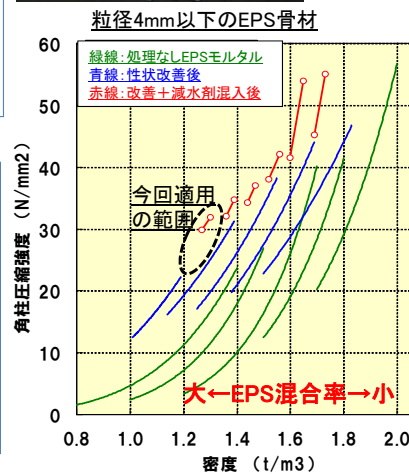
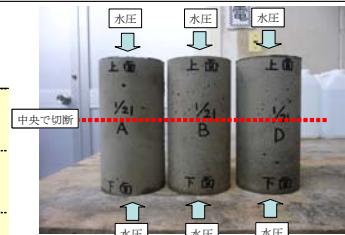
当試験によってビニロン短繊維補強あり・なしのEPSモルタルの「荷重-肩口開口変位曲線」をピーク強度以降の挙動も含めて正確に把握できた。この結果を用いて、短繊維補強による靱性改善効果と引張軟化特性をエネルギー的に数値化することができた。(図-1 参照)

図-1 EPSモルタルの材料特性

EPS骨材
 当該モルタルの骨材として用いるEPSは、発泡スチロール(Expanded Polystyrene)廃材に遠赤外線減容処理(体積で約1/20)した粒状の固形物である。
 密度0.53g/cm³と従来のコンクリート骨材の1/4程度の重量、気泡が独立しているため吸水率ほぼゼロ等の優れた特性を有している。



水密性
 透水試験(水圧0.25 N/mm², 7日間加圧)を行い、インプット法によって拡散係数を求めた。
 結果→ D配合の拡散係数で $3.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 程度(透水係数換算 $1.02 \times 10^{-11} \text{ cm/sec}$)と 10^{11} 台の非常に低い値となった(水密性が極めて高い)。



強度・靱性
 各種強度試験や切欠きはり曲げ試験(写真)で強度特性を確認。

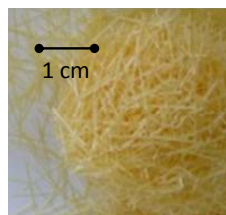


EPSモルタル
 密度は1.2~1.3g/cm³(EPS混入率50%かつW/C=40%)とコンクリートの半分近い軽さで水より重い。
 強度は一般コンクリートの7~8割程度だが、ゲート使用に十分な圧縮強度を有している。水密性や施工性についても優れた性質を有している。

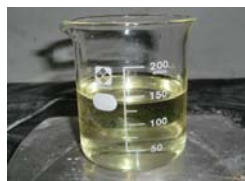
EPSモルタルの密度と圧縮強度の関係

- 材料特性の向上の方法は下記いくつか考えられる。(◎:採用, ○:可能性あり)
1. 減水剤混和◎: 減水剤添加によって単位水量を減じて強度を上げる。
 → 実験において強度と耐久性の増を確認した。
 2. 繊維材混和◎: ビニロン短繊維を混ぜて、引張強度と可撓性を増進する。→ 実験を行い靱性増と乾燥収縮の効果を確認した。流動性減とムラを生じない適量として0.5%混入した。
 3. 微粒材混和○: 高炉ヒューム材(比表面積3万, セメントの8倍)による緻密度増によって水密性を上げる。→ 乾燥収縮低減効果を確認したが供給の問題あり, ベンディング。
 4. シール剤塗布○: 防水効果による水密性と耐久性向上が期待できる。→ モルタル表面に塗布して耐久性向上の効果を確認したが, 暴露環境で長期的な効果を調べる必要がある。
 5. 収縮低減剤混入◎: 毛細管張力を緩和し乾燥収縮を低減する。→ 実験において最大の乾燥収縮低減を確認した。側面あばた(気泡による細孔量)を減らす効果も確認した。
 6. その他: 膨張材○, フライアッシュ, EPS骨材(EPS混入率減○, 7mmサイズ付加)など

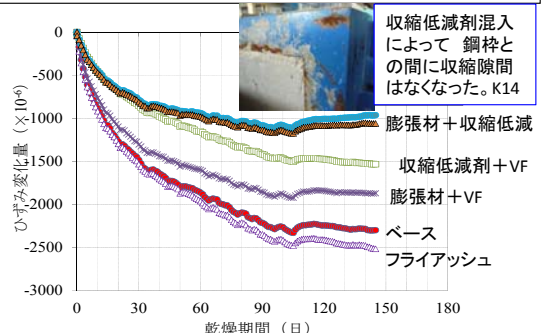
図-2 モルタル材料の品質改善による性能向上策



ビニール系繊維材



収縮低減剤



3. 実用化のための性能確認に関する研究

補強方法・厚み・配合を変えた実寸大 1.65m 角平板状の試験扉体を 30 体作成して（図-3 参照）、水圧載荷試験を行うことで、内部 FRP 格子筋と外部鋼枠の補強による要求性能を満たす扉体構造を検証した。また、試験部材を作成して押抜きセン断、曲げ試験等を行い、応力・ひずみの関係、ひび割れまたは破壊時の限界状況等を確認した。さらに、実際の現場において当該ゲートを試験設置し、機能性や操作性に関する性能確認を行った。各項目について下記に記す。

(1) 水圧載荷試験

ゴム製袋体を利用して水圧を忠実に再現できる水圧載荷試験機を独自に開発した（図-4 参照）。

22 年度：学内製作 8 ケース，工場製作 10 ケースを実施した（図-6 参照）。

結果→22 年度は内部補強として FRP 格子筋が非常に有効であることを確認した。

23 年度：格子筋の剛性増とモルタル乾燥収縮低減を図り，学内 2 ケース，工場 10 ケースを実施した。

結果→100mm 厚，75mm 厚ともにたわみ度，発生応力を大きく低減することができた。

(2) 押抜きセン断試験

21,22 年度に 1.0m 角，1.5m 角の試験扉体によって押抜きセン断試験を行った。23 年度には水圧載荷試験後の試験扉体（5 体）について押抜きセン断試験を行った。

結果→ 押抜きセン断によって終局耐力，破壊状況，各種強度特性等を確認した結果，モルタルゲートの最終的なケースの押し抜き耐力は一般コンクリートによる鉄筋補強床版と比べて遜色なく，破壊時の靱性も高い（一気崩壊しない）ことを確認した。

(3) 固有振動数計測

水圧載荷，実地，押抜きセン断等の試験において吊りと拘束状態で扉体の振動数を計測した。

結果→ 各扉体とも固有振動数が 70~100Hz と地震動や水流振動に対して十分高いこと，載荷試験時に微細クラックが生じても扉体の剛性への影響が少ないこと等を確認した。（図-10 参照）

(4) 既設樋門への設置による現地試験

23 年度： 11 月 10 日に島根県中海・揖屋 10 号樋門において現地鋼材ゲートと交換して実地の試験運用を開始し，以降，定期的な目視観察，開閉操作等を行っている。（図-10 参照）

結果→ 7 月現在，性能上の問題は生じていないが，塗布剤の保護効果は顕著に表れている。今後は 24 年 11 月まで現地試験を継続し，結果取りまとめを行う予定である。

(5) 衝撃試験

23 年度： 流木相当の衝撃に対して十分な強度を持つことを確認した。

結果→ 衝撃試験の結果，コンクリート表面（衝撃面）にはクラックや陥没は生ぜず，十分な耐衝撃性を有することを確認した。

(6) 自重降下試験

23 年度： 耐衝撃性と操作性（緊急時）の確認のために豊国工業において戸溝内に設置しての自重降下試験を行った。

結果→ スムーズに自重降下した扉体は，終速度約 2.0m/min でゲート下端水密ゴムから損傷なく着床し，上下方向の耐衝撃性と操作性に問題のないことを確認した。



外枠



内筋



モルタル主部

図-3 実寸大試験扉体の製作（外枠+内筋+モルタルの複合構造）



水圧载荷試験機:ゴムシート(写真の黒い部分)を前面に持つ函体に水を充填しゴムシートを膨出させ、その前に設置された試験体(左右側辺で支持)を押圧し、試験体に水道水圧をかける。
幅 1910×長さ 2638×高さ 2409mm

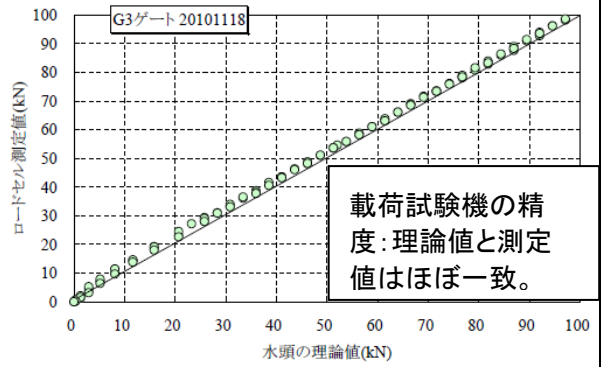


図-4 水圧载荷試験機

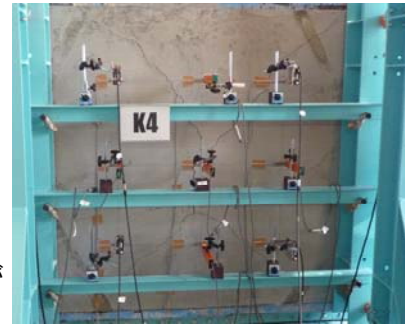
図-5 水圧载荷試験による試験扉体のひび割れ状況
◎平成 23 年度の性能向上は、主に複合構造の剛性増と乾燥収縮の低減による。



平成22年度

←G1:補強なし
ひび割れ発生状況
1回目载荷時に曲げ破壊が発生し平板は真二つに分断。

→K4:100mm厚、枠補強+短繊維、2回目設計水頭時のひび割れ発生状況(0.5%):目視でひび割れが判る。2回载荷後に上流面でひび割れ非貫通を確認。



平成23年度

←K16:設計水圧まで2回载荷したが、ひび割れ発生はなかった)

→K17:75mm厚、収縮低減剤+VF、内部格子筋、鋼枠、D配合)、僅かにみられる微細クラック

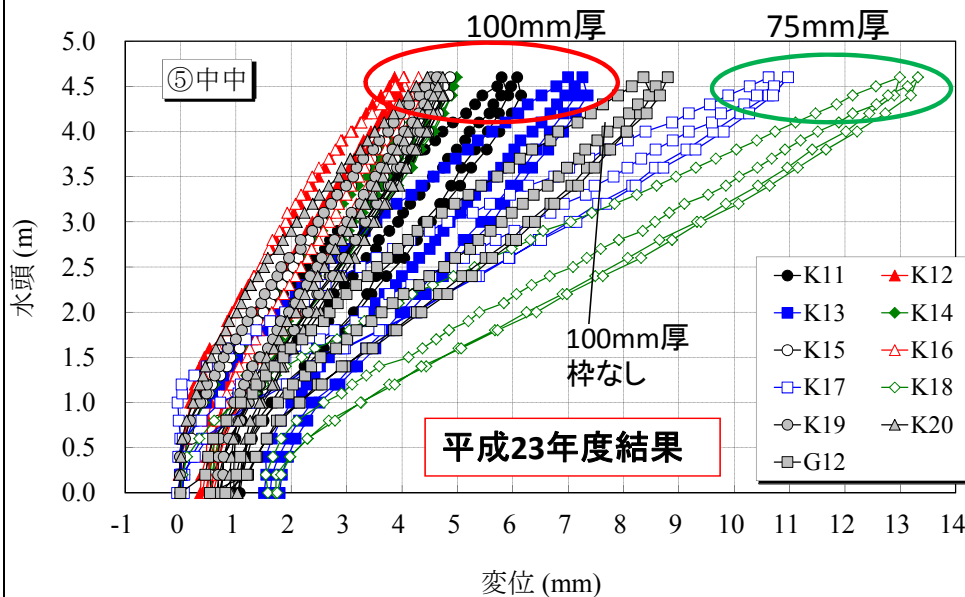
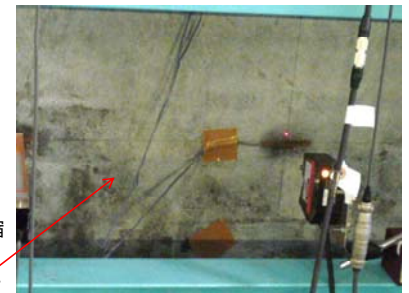


図-6 水圧载荷試験結果 (圧力水頭-下流中央変位)

最大水圧(4.6m)までの荷重履歴と下流面中央変位との関係を図に示す。
◎変位量:100mm厚の場合、最大変位5mm(たわみ度1/300~1/400)、75mm厚の場合、最大変位13mmと大きく改善。
◎挙動:弾性的挙動を示し、残留変位の進展や顕著なひび割れは生じなかった。
◎鋼製ゲート規定の1/800のたわみ度には不足するが、性能照査によって、剛性や水密上の不都合は生じないことを確認した。

2. 構造解析による力学的妥当性に関する研究

扉体構造数種類において3次元線形・非線形解析(有限要素法)を行い、単純構造、複合構造について力学的な妥当性の検証を行った。さらに、構造解析結果を性能試験結果と照合して構造解析の精度を高めることで、非線形解析結果の改善に反映させた。下記に結果を要約する。

(1) モルタルゲートの基本構造

モルタルは引張強度や剛性が低いため、鋼材等の高張力材で複合構造化する必要がある。

このため、保護を含めた鋼製外枠による外部補強を行った上で、FRP格子筋(内筋)による内部補強をモルタルゲートの基本構造とした。この外枠内筋構造はこれまでにない新たな構造(図-7参照)であることから、解析によってモルタル、格子筋、鋼枠の複合構造の有利性を基本的に確認した上で、水圧載荷試験を種々実施し、構造の最適化を行った。

(2) 有限要素法解析を用いた非線形設計法の妥当性

モルタルゲートの構造は外側に4辺鋼枠が配され、内部に格子筋を有する複合構造であるため、従来の簡便な計算手法は適用できず、有限要素法による解析手法が必要となる。さらに、ひび割れを考慮する場合は非線形解析を適用する必要がある。図-8右上は、扉体(1.5m径間・厚さ100mm)中央水平線部の変位を3次元FEMによる線形・非線形の解析手法による違いをもって算定したものであるが、非線形の方が微細なひび割れ発生による材料軟化の状況をよく表している。

(3) 非線形解析における引張軟化特性の影響

モルタル主応力度が引張強度に達した領域は応力が開放される軟化現象により変位は増大するが、引張応力度は引張強度以上には増加しないことから、引張軟化特性がモルタルゲートの挙動に与える影響は大きい。そこで、切欠きはり曲げ試験結果をもとに引張軟化曲線を作成し、非線形解析に適用した。この結果、ひび割れによりモルタルの応力負担が減少し、変位が大きくなる状況を以前よりも精密に再現できた。

(4) 格子筋の効果の確認

モルタル引張軟化現象を確認するため、格子筋のある場合の引張強度をモルタル最大引張応力度より大きくなるように設定して格子筋有無の解析を行った。その結果、格子筋のない場合には、ゲート中央部の引張応力度が強度を超える部分からひび割れが起こった。格子筋のある場合、発生応力度は引張強度を超えないように設定しているためひび割れは起こらず、水圧載荷試験で観察された現象を再現していることが確認できた。

なお、水平方向の格子筋発生応力度 173.9N/mm^2 に対し、垂直方向の格子筋には 40.5N/mm^2 の応力が発生していることより、垂直方向格子筋によっても変形を抑止していることが推察される。

(5) ひび割れの分布形状・方向・深さの検証

図-8左に示すように、FEM非線形解析法によるひび割れの形状・方向・深さは、格子筋の有り・無しともに水圧載荷試験のひび割れ方向に近い結果が得られた。つまり、格子筋有りの場合は、格子筋なしと比べて左右側方支持の拘束が強まり、そのためひび割れは鉛直方向に集約された。

(6) 初期引張ひずみの影響

モルタル乾燥収縮に伴い格子筋の拘束が強まることにより、初期引張ひずみが発生する。解析の結果、初期引張ひずみがモルタルゲートの変位に与える影響はかなり大きいことが判明した。

このため、扉体製作においては、積極的に乾燥収縮対策を行って格子筋の拘束作用低減を図ることにより、初期内部ひずみをできるだけ抑えることとした。

(7) 載荷試験との比較による非線形解析の再現性の検証

図-8右下に示すように、22~23年度に行ったFEM3次元非線形解析の結果、材料特性値(引張軟化曲線、乾燥収縮ひずみ、強度、ヤング係数等)の精度を上げることによって100mm厚(鋼枠付き、格子筋あり)における変位、応力ともに水圧載荷試験の実験値とほぼ同じ値とすることができた。

従って、FEM3次元非線形解析は、水圧載荷試験と並んで性能照査における有効な確認手段であると言える。

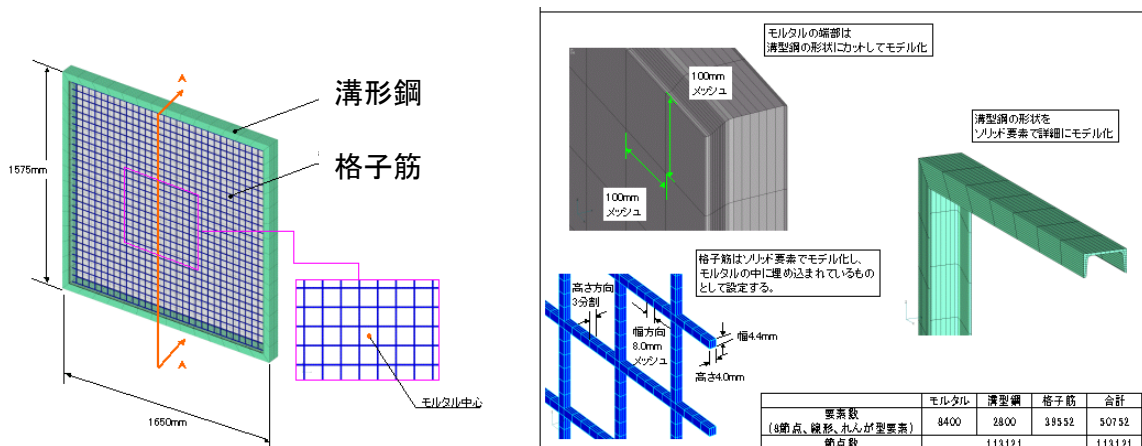


図-7 モルタルゲート構造のFEM解析モデル

複合構造の応力・変位及びひび割れ進展を5万メッシュもの細密モデルで表現した。
 ◎結果：外枠や格子筋の効果は載荷試験結果ともほぼ合致する。なお、切欠き曲げ試験や載荷試験との照合によって引張軟化特性、ひび割れ進展、変位等の精度を高めることができた。

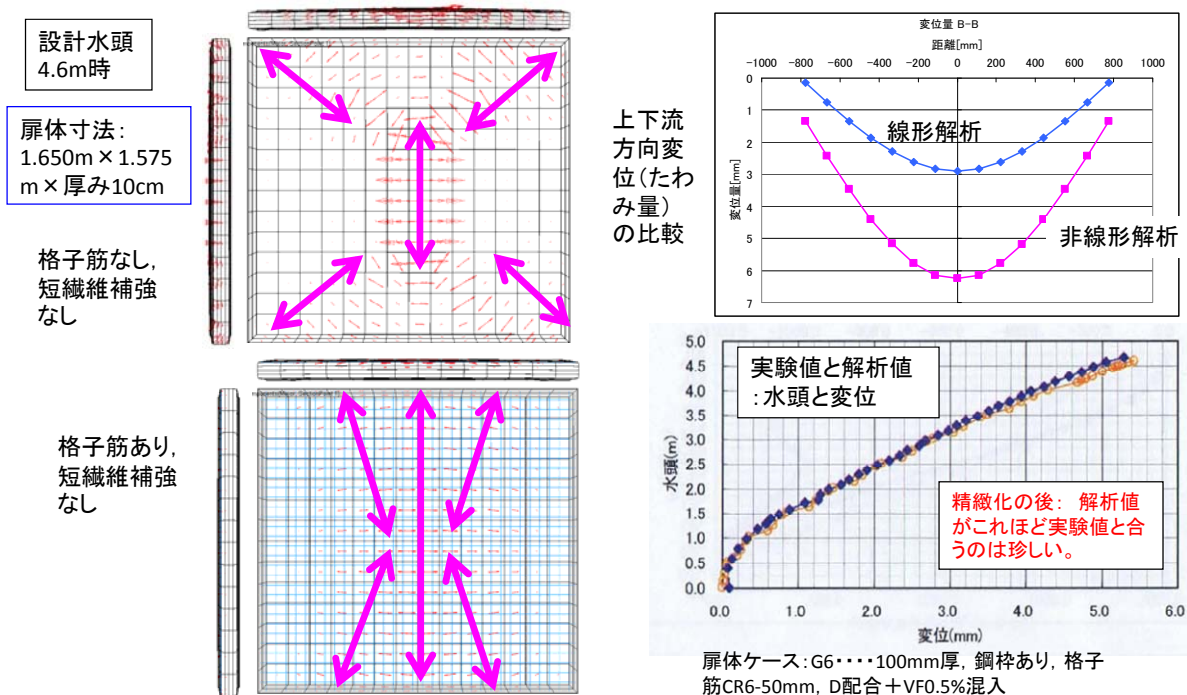


図-8 高精度の解析照査：非線形解析によるひび割れ解析

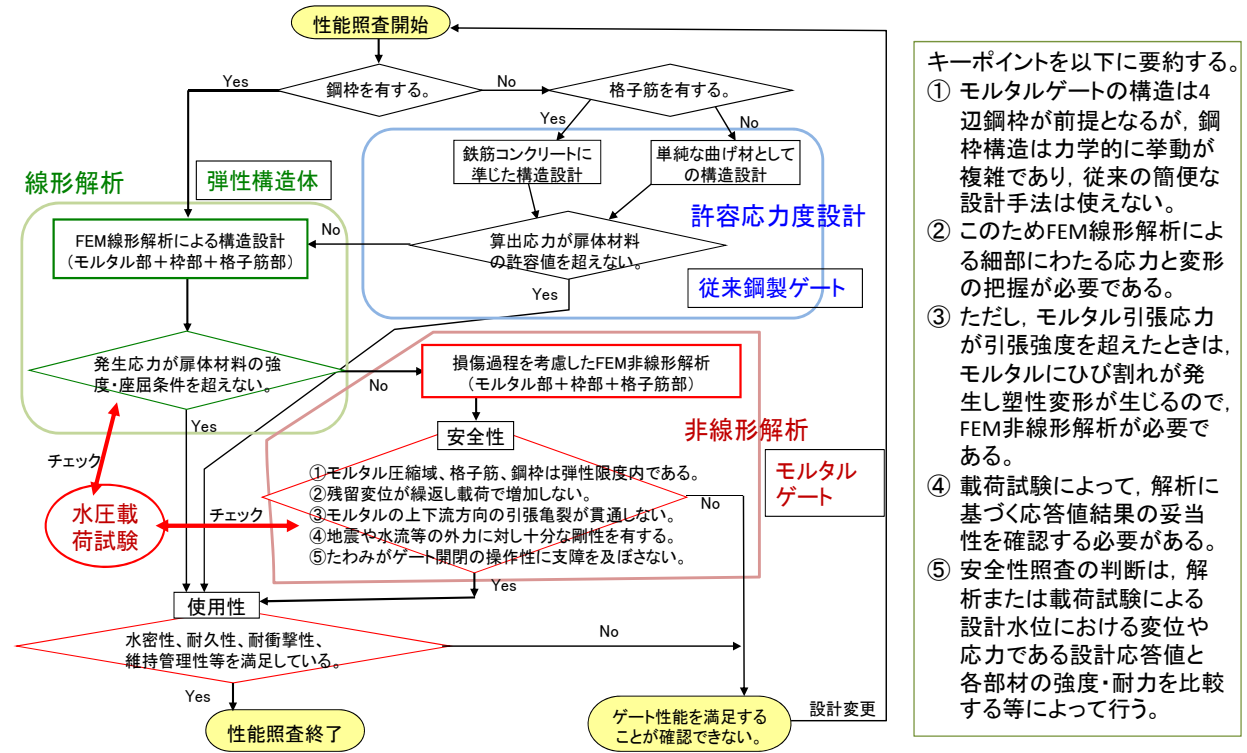
4. 設計・施工法に関する研究

基本特性について整理し、複合構造を含む施工・施工方法を検討した。また、構造解析、性能試験、性能評価等の各結果に基づいてより合理的な設計・施工法について具体化した。以下に検討項目を記す。

(1) モルタルゲートに関する設計法

設計法について、鋼製ゲートにおいては許容応力度設計法の枠組みで現在も設計体系が成り立っているが、コンクリート構造物においては1990年代以降、限界状態設計法が主流である。最近では性能規定型設計法が取り入れられている。

モルタルゲートは、新材料、新構造であるため上記の新しい設計法を考慮した新たに設計法を策定する必要がある。従来の設計手法では、「外枠補強時の応力が算定できない、要因別に安全係数を区分できない」等の問題があるので、数値解析導入と限界状態設定が必要となる。そこで、限界状態における性能照査指標の設定を行った。図-9に従来の許容応力度設計法から非線形解析までの性能照査フローを示す。ひし形は、限界状態での照査指標を示す。



- キーポイントを以下に要約する。
- ① モルタルゲートの構造は4辺鋼枠が前提となるが、鋼枠構造は力学的に挙動が複雑であり、従来の簡便な設計手法は使えない。
 - ② このためFEM線形解析による細部にわたる応力と変形の把握が必要である。
 - ③ ただし、モルタル引張応力が引張強度を超えたときは、モルタルにひび割れが発生し塑性変形が生じるので、FEM非線形解析が必要である。
 - ④ 載荷試験によって、解析に基づく応答値結果の妥当性を確認する必要がある。
 - ⑤ 安全性照査の判断は、解析または載荷試験による設計水位における変位や応力である設計応答値と各部材の強度・耐力を比較する等によって行う。

図-9 新たな設計法の提案：従来の許容応力度設計法から限界状態設計法による線形解析及び非線形解析までの性能照査を中心とした設計フロー

(2) 簡易設計法の検討

FEM 非線形解析の計算コストは高いため、概略の検討等を行うことが可能な簡易設計法を検討した。その一つとして、面外変形をする長方形平板の簡易法を取り上げたが、平板を格子梁にモデル化し、格子の交点における z 方向のたわみが同じであること ($\delta z_x = \delta z_y$) を利用して、同じたわみを示す時のそれぞれの方向の負担荷重を算定して、変形を計算する方法である。この方法による当該モルタルゲートにおける実験との最大誤差は概ね 20%程度である。

(3) たわみ度に関する要求性能の検討

ダム・堰施設技術基準において扉体のたわみ度規制 (1/800 以下) が設けられているが、その理由のうち剛性の確保や動的安定性の確保については、たわみ度よりむしろ地震や水理力による共振現象を避けるため、固有振動数を共振領域から離すことが肝要である。

まず「地震振動に対する安全性」については、モルタルゲート試験扉体の計測による固有振動数は、拘束なし・水圧載荷試験後の状態で 70~100 Hz であり、線形解析による固有振動数も 53Hz である。これに対して地盤や門柱等の周辺構造系の固有振動数は数 Hz であり、地盤や構造系との共振の可能性は明らかにならないと考えられる。

一方、水の流れによる扉体の振動に対する安全性については、ゲートが小開度で停止した状態である下端放流時における垂直方向と水流方向の振動について計算を行った。その結果、渦やせん断層の不安定性による水流方向と垂直方向の連成振動は発生しないが、微少開度時に比較的高い水深の時、水流方向自励振動が発生する範囲が存在する可能性があることが判った。よって、微少開度で使用する場合には、ゲート下部形状を振動の発生しない構造にする必要がある。

(4) 戸当たり部の水密構造

たわみ度制限の理由のうち、操作性と水密性の確保のためには、操作性に支障を及ぼすような水圧等の外力による過大な変形を避けるべきであるが、水密上の許容されるたわみ量は水密構造に制約される。そこで、水密構造（水密ゴム、戸当たり、補助具）とそれから決まるたわみ量の許容値について検討し、最大たわみ量 8mm 程度以下であればゲート開閉上の問題がないことを確認した。

(5) 現地試験用扉体の設計および設置

検討の結果、塩水のため防錆対策が必要とされるとともに将来更新予定の樋門を多く抱える中海・宍道湖沿岸が適当と判断され、出雲河川事務所との協議によって管内の中海にほぼ面した揖屋 10 号樋門において現地試験を行うこととし、実用のゲートとしての設計および設置を行った。



図-10 塩水環境での現地試験状況：

鳥根県中海沿岸の揖屋10号樋門(1.5m径間)。塩分対策のため防錆ゲートが必要とされている。

(6) モルタルゲートに関する施工法

22,23 年度に行った試験扉体の学内製作 10 体と工場製作 20 体の実績から外枠作製、内筋セット、軽量モルタルの練混ぜ・打設・養生についての施工方法を取りまとめた。(図-3 参照)

(7) 品質確保への施工対応

乾燥収縮ひび割れの懸念から全試験扉体とも剥離剤の塗布によって鋼枠とモルタルの付着を避けたが、拘束による初期ひび割れ発生の問題が生じた。そこで、23 年度には乾燥収縮対策として収縮低減剤とビニロン繊維の混入を行い、乾燥収縮ひび割れの多くを解決した。

一方、初夏の打設において、日照の強さからモルタルの流動性不足に陥り、充填不足によるジャンカが生じて再施工となったが、この時の施工上の解決方法について記した。また、扉体側面のあばたについては、収縮低減剤混和による「水の表面張力を小さくするとともに、コンクリート硬化体の細孔量を減少させる効果」によって側面のあばたを大きく軽減することができた。

(8) 経済性に関する検討

モルタルゲート材料費（今年度実績に基づく製作原価）、鋼製スライドゲートの工事価格（積算基準参考）について積上げ計算を行い、1.5m 径間かつステンレス (SUS304) の場合のモルタルゲートと鋼製スライドゲートの価格比較を行った。その結果、モルタルゲートの工事価格は、従来鋼製スライドゲートと比べて約 6 割の金額となり、十分な経済性を有すると判断された。数門同時に製作する場合の工事価格はオールステンレス製ゲートの半分程度に近づくことと推測される。

(9) 市場性調査

EPS 骨材に関する聞き取り調査を行い、EPS 骨材の市場性（流通性、供給体制、価格）等について情報を得た。結果として、現在の市場は大きくはないが、ゲート扉体の需要が急激に拡大しない限り十分な安定的な供給が期待できると判断される。

5. 要求性能に関する研究

技術基準類の資料調査に基づいて安全性、耐久性、操作性など当該ゲートの必要な要求性能を抽出し、試験、解析等の結果に基づいて性能指標を整理かつ評価した。それに基づき性能照査を行い、要求性能を満たしていることを確認した。

(1) 照査項目の抽出

現行の鋼製ゲートの技術基準である「ダム・堰施設技術基準（案）、土木学会コンクリート標準仕様書」等の技術基準の中から、今回検討の対象である扉体部分について照査すべき項目を抽出し、その考え方を整理した。

(2) 性能照査方法の提案

モルタルゲートに対して性能規定として考えた場合、個々の条項がどのような考え方になるかを整理し、その上でモルタルゲートにおける性能照査の方法について取りまとめた。また、要求性能の考え方として、限界状態設計法を基本とすべきこと、安全性以外に耐久性、維持管理性に関する要求性能を対象とすべきであることを示した。

(3) 安全性に関する性能照査

「部材が必要な強度を有する、ひび割れが貫通しない、繰返し荷重に対して残留変位の進展がない、たわみに対する必要な機能を保持している」の4点が重要な評価事項である。そこで、試験と解析の結果に基づき安全性能照査を以下のように実施した。

- ① 必要な強度（引張・圧縮）を有する： モルタル部、FRP 格子筋、鋼枠部の3つの材料に分けて評価を行った。水圧載荷試験結果を以下に記すが、モルタル部、FRP 格子筋については強度に関する問題はないと判断される。鋼枠部については強度上の問題は生じうるが板厚増によって対応は容易である。
 - a. モルタル部： 全ケースとも引張強度を超えるものの、格子筋を設置したケースでは微細なひび割れ以下に収まっており、問題はないと判断される。圧縮強度については、100mm 厚、75mm 厚の場合ともに、圧縮応力に対して各々3 以上または2 以上の余裕のある安全率を有していることから、モルタル圧縮強度に関する問題はないと判断される。
 - b. FRP 格子筋： 22,23 年度の格子筋を設置したケースにおいては、100mm 厚、75mm 厚ともに格子筋の引張応力は強度の1/4~1/10 程度に過ぎず、格子筋強度に関する問題はないと判断される。
 - c. 鋼枠： 100mm 厚の場合、鋼枠の引張及び圧縮応力は降伏点応力度を安全率2 で除した値（鋼製ゲート設計における許容値）とほぼ同値であり、75mm 厚では当値を大きく超えた。このため何らかの対策が必要となるが、100mm 厚において圧縮側鋼枠に平板を溶接して断面増厚した試験ケースを追加して安全率増に直接的に有効であることを確認した。
- ② ひび割れの貫通： 水圧載荷試験の結果、100mm 厚、75mm 厚ともに FRP 格子筋を入れた全ケースともひび割れ貫通はなかった。よって、これに関する問題はないと判断される。
- ③ 繰返し残留変位の進展： 水圧載荷試験の結果、23 年度の全ケースにおいて100mm 厚、75mm 厚ともに残留変位は進展しなかった。よってこれに関する問題はないと判断される。
- ④ たわみに対する必要な機能の保持： 剛性を高めた23 年度の本命案構造においてたわみ度は、1/332~1/309 と大きく改善されたが、ダム・堰施設技術基準で規定している1/800 のたわみ度上限値を満たすことはできなかった。このため、たわみに対して有すべき必要な機能について原点に立ち帰って再考し、「剛性の保持と開閉機能の保持」について評価することとした。以下にその結果を記すが、たわみに関する問題はクリアできたと判断される。
 - a. 剛性の保持： 地震または水流に起因する振動に対する安全性を固有振動数の計測や水流振動の解析によって、問題がないことを確認した。
 - b. 開閉機能の保持： 水密構造上の制約からたわみ量8mm 以下を条件としたが、23 年度水圧載

荷試験の 100mm 厚の全ケースにおいてはこれを満足した。一方、75mm 厚においては 10mm を超すたわみが生じたが、水密ゴム取付けを工夫することで解決できる。

- c. 荷重条件に関する制限： 今回の 4.6m の設計水圧は一般使用からするとかなり過大な水圧であるので、設計水位を 3m 程度に低くすることでたわみ度の現規定 1/800 以下を満足することができる。これは水圧の低い場合の対処案である。

(4) 使用性に関する性能照査

「水密性、耐久性、耐衝撃性、維持管理性」の 4 点が使用性における重要な要求性能である。そこで、試験と解析の結果に基づき使用性能照査を以下のように実施した。

- ① 水密性： たわみ以外のモルタルゲート扉体水密性の要因である「ひび割れ、収縮、透水」の特性と戸当たり部密着性の点から評価を行い、いずれも問題がないことを以下確認した。
 - a. ひび割れ： 水圧载荷試験の結果、FRP 格子筋の設置によって 100mm 厚、75mm 厚ともにひび割れ貫通はなく、水密性の問題はないものと判断される。
 - b. 収縮： 収縮低減剤混合によって、水圧载荷試験用の扉体の収縮は抑制され、ひび割れや鋼枠とモルタルの隙間は著しく減少した。よって、EPS モルタルの収縮は水密上支障のない程度に抑えられていると判断される。
 - c. 透水： 圧力を加えた透水試験の結果から、EPS モルタルの水密性は極めて高く、扉体の水密上は問題ないことが判った。
 - d. 戸当たり部の密着性： 現地設置の結果、扉体水密ゴムと戸当たりの密着性は良好に保たれるとともに、開閉にも支障は生じなかった。
- ② 耐久性： 耐久性は様々な項目による長期的な評価が必要であるが、今回はこのうち扉体モルタル部について比較的短期間で結果が得られる「凍結融解、耐酸性」の評価を行い、下記事項を確認した。
 - a. 凍結融解： 凍結融解試験結果から、EPS モルタル自体は耐凍害性を満たすことができなかったが、表面保護剤として樹脂コーティングを施すことにより耐凍害性を満たすことができることを確認した。
 - b. 耐酸性： 促進中性化試験の結果、EPS モルタルの中性化速度は一般コンクリートと比べると大きい、扉体としての機能に問題が生じるものではないことを確認した。
- ③ 耐衝撃性： 評価項目として、「流木衝突、自重降下着床時の衝撃」に関する試験結果の評価を行い、いずれも問題のないことを確認した。
- ④ 維持管理性： 維持管理性、操作性については様々な項目が考えられるが、定量的な評価が可能な「扉体重量、防錆性、異物付着性」等について下記のように性能照査を行った。
 - a. 扉体重量： 現地設置試験におけるゲートの開閉操作において円滑な操作が為され、自重降下試験でも問題はなかった。このことから、重量に関する操作上の問題はないと判断される。
 - b. 防錆性、防汚性： 現在のところ、現地試験（平成 23 年 11 月～）において防錆性や異物付着の上での異常は生じていないが、長期的に観察を続けた後に評価するものとする。
 - c. 製品品質性： 22,23 年度製作の試験扉体の重量や強度のばらつきは小さく、一定の品質は保たれていると推察される。ただし、具体的な定量化は今後の課題である。

(5) 環境・景観等に関する評価

モルタルゲートは、色、質感は樋門の門柱や堤防擁壁等のコンクリート構造物と同様であり、単純な平板形状が周辺景観ともなじみやすく、ゴミも付着しにくい。従って、モルタルゲートの方が、従来の鋼製ゲート比べて周辺の景観になじみやすいと言える。

(6) 新材料ゲート性能評価委員会による審議

当委員会は合計 3 回実施され、最終的にモルタルゲートの性能について実験や解析結果から実用上の問題が無く、設計手法についても妥当であることが確認された。また、実用化に向けて、「品質管理、設計の簡易化、防錆仕様、現設計法との調整、寸法や型式の違うゲートへの適用」等への取り組みが必要との意見が出された。

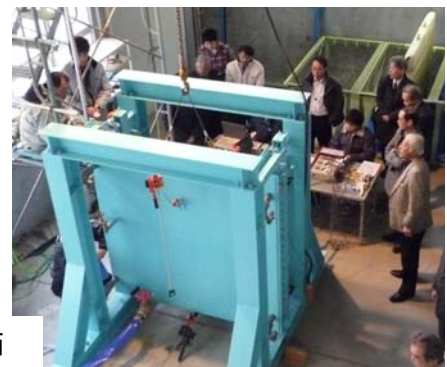


図-11 新材料ゲート性能評価委員会による性能評価

操作性：適度な重量を有する。
(重すぎると開閉装置の更新が必要、軽すぎると閉まらない)

防錆性：枠をステンレスとすることで、完全な防錆仕様となる。

水密性：水密ゴムの取り付けは従来の鋼製ゲートと同じで容易。右のように水密ゴムが戸当たりには密着して水密性を保っている。



衝撃性：鋸で容易に切断可能だが、ハンマーで叩いても全く割れない。



景観：モルタルゲートの色、質感は樋門の門柱や堤防擁壁等のコンクリート構造物と同様である。従って、周辺の景観になじみやすい。



維持管理性：凹凸の無い平板のため異物は付着しにくく、掃除しやすい。表面をコーティングするとさらに防汚性と表面耐久性が増す。



図-12 モルタルゲートの維持管理上の様々な利点

6. 研究の内容・成果の総括

(1) 経済性・耐久性・品質・環境に優れたモルタルゲートの実現

材料としては、軽量性・水密性・経済性と環境性に優れた EPS モルタルの特徴を活かしつつ、強度や乾燥収縮を改善した。また、EPS モルタルを主体に鋼枠外部補強と FRP 格子筋内部補強による複合構造化によって構造体としての力学特性を大幅に改善した。

その結果、水密性等の品質を保持するとともに、低廉かつ高耐久性であるため従来鋼製と比べて製作及び維持管理コストが格段に安い、従来鋼製よりも若干軽量となることから将来更新時に門柱、巻上げ機等はそのままだに扉体のみを交換できる等の利点を持たせることができた。また、発泡スチロール廃材利用や単純でなじみやすい形状の点で環境や景観に優しいと言える。

結果として、小規模樋門対象ながら世界で初めて実用的なモルタルゲートをほぼ実現した。

(2) 水圧载荷試験による実寸大での確認と非線形有限要素法による高精度解析

独自開発の水圧载荷試験機によってモルタルゲートの強度や変形性を実寸大で確認し、力学要求性能を満足できることを直接確認した。また、各種試験結果に基づく特性値を入力することで3次元非線形有限要素法による高精度の変位・応力解析を可能とした。

(3) 塩水環境における実地試験

耐久性と操作性の確認のために、平成23年11月より塩水域の既設樋門（扉体径間1.5m）において現地試験に入っており、今後は平成24年11月までの結果を取りまとめる予定である。7月現在、性能上の問題は生じていないが、塗布剤の保護効果は顕著に表れている。

⑧今後の課題・展望

樋門樋管用の小型ゲートは全国におそらく何万と存在し、更新の需要だけでも大きい。また、津波対策による海岸域の堤防の建設やかさ上げが今後進む中で樋門樋管の設置数が多くなると予想される。

この点、モルタルゲートについては、上記の優れた特性からその導入が急速に進む可能性が高いと考えられる。特に、塩分による錆劣化の激しい海岸地域などでは、モルタルゲートのメリットは大きい。

ただし、耐久性、維持管理性等の使用性能については、現地試験での定期的な観察を継続し長期的な性状について確認を行う必要があることから、今後の研究開発成果の製品化等については、平成24年度現地試験の結果を踏まえた上で、具体計画を立てることとしたい。

また、今後の研究体制については、これまでの共同研究体制に各種材料会社（コンクリート、FRP材、塗布材）、設計会社等を入れた体制で当該技術の発展と普及に臨みたいと考えている。

なお、当面の技術課題として下記があり、河川行政からの支援を今後もお願いしたい。

- a. 異なる径間・荷重・型式への対応： 今回のモルタルゲート実用化は、径間1.5m、水圧4.6mまでの性能確認であるので、これ以上の径間や荷重については解析または実験による力学的な検証を行う必要がある。また、今回開発の引き上げ式ゲート以外のフラップ式、陸開式、角落とし式の型式についてもモルタルゲート適用の可能性は高いが、同様に解析または実験による力学的な検証を行う必要がある。
- b. 現地試験の拡充： 平成24年度以降も定期的な観察を続けて長期の耐久性を確認する必要がある。また、塗布材効果の確認、試験精度の向上、多様な水域・塩分環境への対応等のために現地試験の数を増やす必要がある。
- c. 設計手法の確立： 今回提案の性能照査方法の改良（安全係数等）、設計荷重が低い場合の緩和方法、簡易設計手法、既往ゲート設計法との整合（特にたわみ規定）等について検討を進める必要がある。

今回開発のモルタルゲートは1.5m径間と小規模の引上げ式ゲートに対するものだが、更なる長径間化、陸開門やフラップゲートへの適用など技術の発展性は高い。



陸開門への適用



フラップゲートへの適用



長径間化



平成24年2月8日の宇部日報紙

図-13 モルタルゲート技術の大いなる発展性