

(31) 小形FRP水門扉の使用性, 安全性に関する 実験的検討

日比 英輝¹・中村 一史²・杉浦 邦征³・那須 雅義⁴

¹正会員 FRP水門技術協会 会長 (〒503-1337岐阜県養老郡養老町直江613-1)
E-mail: hidekey@hibi-frp.co.jp

²正会員 東京都立大学大学院 准教授 (〒192-0397東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

³正会員 京都大学大学院 教授 (〒615-8540京都市西京区京都大学桂キャンパス C1棟)
E-mail: sugiura.kunitomo.4n@kyoto-u.ac.jp

⁴非会員 FRP水門技術協会 副会長 (〒869-0413熊本県宇土市花園町1736)
E-mail: nasu@nihonfrp.co.jp

河川, 農業水路等の施設で供用されている水門は「ダム・堰施設技術基準(案)」に基づいて設計される。軽量性, 高耐食・耐久性によるLCCの削減など多くの長所を有するFRP水門扉も土木学会で発刊された「FRP水門設計・施工指針(案)」などに準拠して, たわみ制限, 強度, 安全率などが規定され, 設計・照査が行われている。一方, 施工実績の中で機能障害等を理由とした更新や補修の事例報告はないことから, 同指針に準拠して設計されたFRP水門扉は十分に安全であると判断できるが, 実構造扉体の使用性・安全性に関して実験的な検証は実施されていない。そこで, 本研究では実構造扉体を高压水槽内に設置し, 破壊に至るまで加圧することで, 漏水などによる機能障害, 限界応力, 破壊形式を検証することとした。実験結果からより実用的な強度に基づいたたわみ制限, 安全率の再検討を行うことで, FRP水門扉のより合理的な構造設計の工夫や留意点, 初期コストへの有利な反映を見いだすことができた。

Key Words : FRP, Hydraulic gate, serviceability, ultimate strength, safety

1. はじめに

一般的な水門は, 貯水または逆流防止等を目的として, 主に河川・農業用水路・湾岸等の施設で供用されている。軽量性, 高耐食・高耐久性など多くの長所を有するFRP(Fiber reinforced polymer)水門扉は, 土木学会で発刊された「FRP水門設計・施工指針(案)」(以下「同指針」という。)に規定された強度, たわみ制限, 安全率などに準拠して, 設計・照査が行われている。一方, 今日までの施工実績中で機能障害等を理由とした更新や補修の事例報告はないことから, 同指針に準拠して設計されたFRP水門扉は十分に安全であると判断できるが, 実構造扉体の使用限界・終局限界については, これまでに実験的に精査されていないため, 使用性・安全性は明らかにはなっていない。

そこで, 本研究では実構造扉体を高压水槽内に設置し, 破壊または機能障害に至るまで加圧することで, 限界耐力, 破壊形式, 漏水などによる機能障害を検証することとした。実験結果からより実用的な強度, たわみ制限, 安全率の再検討を行うことで,

FRP水門扉のより有効的な構造設計の工夫や留意点, 初期コストへの有利な反映を見いだすこととした。

2. 小形水門扉の概要と設計条件

(1) 実構造扉体の設計条件

FRP水門扉の種別の中でも逆流防止を目的とするため, 扉体の内外水位差が比較的大きく, 厳しい水压条件にさらされる実構造FRP扉体として, FRPフラップゲートを研究対象とした。図-1に, そのFRPフラップゲートの施工例を示す。



図-1 FRPフラップゲートの施工例

また、FRP水門の施工実績において扉体面積が10m²未満の小形水門扉が多いこと、実験設備の規模等を考慮し、同指針に記載されている「FRP水門扉の衝撃载荷実験」に使用された実構造扉体と同様の有効幅650mm×有効高650mmの小形水門扉を本実験の検討対象とした。

FRP水門扉の形式は、同指針に記載されているプレートガーダ形式と、グリッドモールド形式の2種類とした。図-2に、プレートガーダ形式FRP扉体の一般図を示す。さらに、材料相違による比較のために、プレートガーダ形式鋼製扉体^{2),3)}を、また、直接水圧を受けるスキンプレートの基本的な構造特性を把握するために、FRPスキンプレートを別途検討対象とした。

FRP水門扉の設計照査方法は、主部材に加わる最大荷重に対する応力度とたわみ度で評価している。また、通常のFRP扉体に使用されるGFRP材は、一般構造用鋼材と比較して弾性率が低いため、たわみ制限値が支配的となり、応力に余裕がある照査結果になることが一般的である。

a) たわみ度の許容値

同指針で規定されているたわみ度の許容値は、①有害な二次応力が発生しないこと、②水密ゴムの追従可能範囲であること、③地震動等により有害な振動が発生しないこと、④操作不良を生じない程度にたわみが収まることを理由として、扉体が支持される幅に対して1/600以下と規定している。

例えば、プレートガーダ形式の場合のたわみ度の照査は、最大荷重を受ける主桁単体を照査し、その受圧幅を支持間隔として算出するのが一般的である。図-2の扉体の場合、支持間隔725mmに対して、たわみ度1/600を満足する条件は、扉体幅中央での変位が約1.2mm以下となる。

扉体は、主部材の主桁以外にも、スキンプレート、横桁、縦桁、補剛材、ガセットプレート等の2次部材で構成され、それらが一体となって水圧に抵抗す

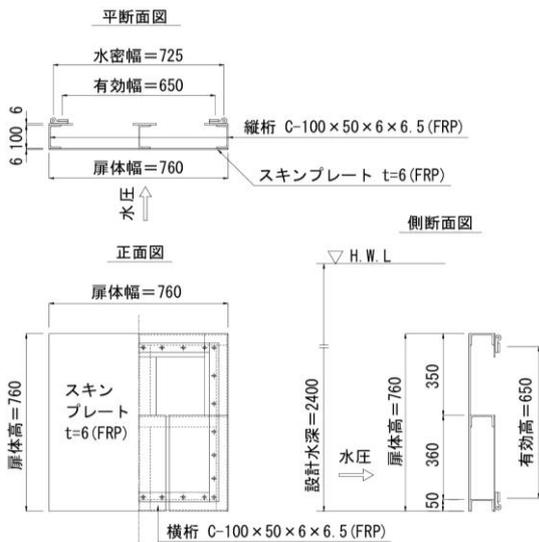


図-2 プレートガーダ形式FRP扉体一般図 (単位: mm)

るため、規定されるたわみ度に対して、余裕のある設計となっている可能性がある。現行の基準による設計断面に対して、たわみ度、終局応力を载荷実験で確認する。

b) 許容応力度

同指針では、安全率を4.0と規定し、これに基づいて許容応力度を定め、設計を行うことで安全性を確保している。これは、扉体を構成するスキンプレートなどの受圧部、骨組みになる架構部、戸当りに荷重伝達する支承部および水密部が、予想される荷重に対して必要な強度、剛性および水密性を有する構造であることを根拠としている。

表-1に、小形水門扉の設計条件および水圧作用の概念図を示す。これらの設計条件で、図-2に示す扉体に作用する全静水圧は、 $P=1/2 \times w \times (H^2 - (H-H_0)^2) \times B = 11.434 \text{ kN}$ となる。扉体に作用する荷重は、図-3に示したように、底部になるほど大きくなるが、本実験では、後述するように高压水槽を用いて水圧ポンプにより均等に水圧を作用させるため、一様な荷重分布とした。また、実験時の一様な荷重分布は、実共用時の設計計算に用いた主部材に作用する荷重に換算することで、検証することとした。

なお、FRP水門では、たわみ度が設計で支配的となることから、部材に発生する応力にはかなり余裕があると考えられるが、破壊形式が明確になっていない。载荷実験により、扉体の限界状態を明らかにするとともに、限界時の部材の応力状態を把握し、破壊に対する余裕を確認する。

表-1 小形FRP水門扉の設計条件

形式	フラップゲート
設計水深H (mm)	2,400
扉体高H ₀ (mm)	760
扉体幅B (mm)	760
水の単位重量w (kN/m ³)	9.80
許容応力度	部材基本強度/4.0
たわみ度	1/600

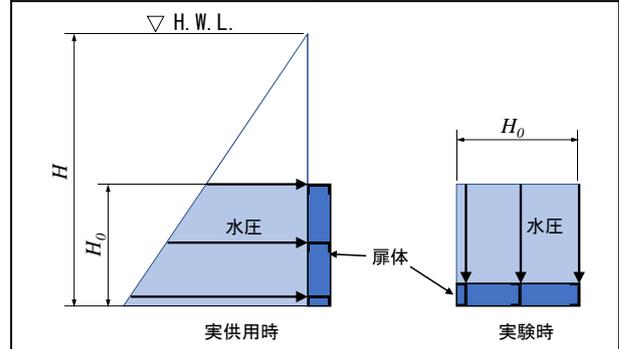


表-2 プレートガーダ形式FRP扉体の概要

FRPの成形方法		ハンドレイアップ成形法
主部材 (mm)	主桁および縦桁	溝形材: 100×50×6×6.5
	スキンプレート	板材: t=6
FRP部材同士の接合方法		ボルトと接着剤の併用
支持間隔 (mm)		725
扉体重量 (kg)		33

(2) 試験体の種類

試験体は、以下に示す4種類であり、それぞれの構造諸元を示す。なお、扉体一般図には、戸当りを

表-3 グリッドモールド形式FRP扉体の概要

FRPの成形方法	グリッドモールド成形法	
主部材 (mm)	格子	リブ：t=7
	スキンプレート	板材：t=6
FRP部材同士の接合方法	樹脂接着	
支持間隔 (mm)	716	
扉体重量 (kg)	50	

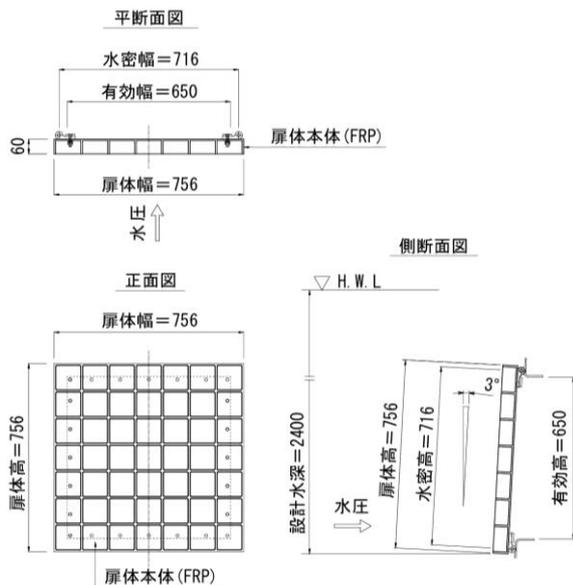


図-3 グリッドモールド形式FRP扉体一般図 (単位：mm)

表-4 プレートガーダ形式鋼製扉体の概要

主部材 (mm)	主桁	等辺山形鋼：75×75×6
	スキンプレート	鋼板：t=6
補助部材	中間補助縦桁	平鋼：50×6
支持間隔 (mm)	715	
扉体重量 (kg)	58	

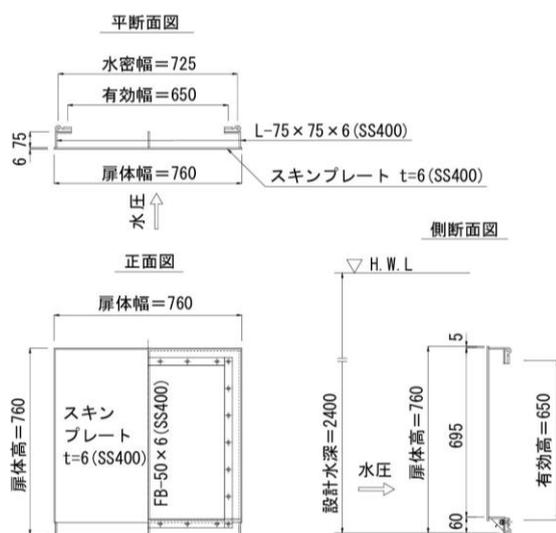


図-4 プレートガーダ形式鋼製扉体一般図 (単位：mm)

含む設置状況まで示されているが、評価対象は扉体単体である。

a) プレートガーダ形式FRP扉体 (FPG)

図-2に、プレートガーダ形式FRP扉体の一般図を、表-2に、その概要をそれぞれ示す。この形式は、FRPスキンプレートとFRP桁で構成され、小形水門扉としては最も標準的な形式である。FRPスキンプレートとFRP桁の接合は、ステンレスボルトと接着剤の併用接合としている。扉体背面側の必要な部位にも、スキンプレート同様のFRPガセットプレートを使用し、桁材にステンレスボルトと接着剤で接合されている。

b) グリッドモールド形式FRP扉体 (FGM)

図-3に、グリッドモールド形式FRP扉体一般図を、表-3に、その概要をそれぞれ示す。基本構造は、グリッドモールドと呼ばれる一種のハンドレイアップ成形法にて作製された格子状のFRPパネル材に、FRPスキンプレートを接着接合により組み立てられたFRP扉体である。

c) プレートガーダ形式鋼製扉体 (SPG)

図-4に、プレートガーダ形式鋼製扉体一般図を、表-4に、その概要を示す。基本構造は、SS400材のスキンプレートと桁で構成される形式である。設計計算上は、スキンプレートの有効区画面を補助縦桁により二等分することで、設計条件を満足したため、等辺山形材の主要桁を四辺に配置した形状(額縁状)となった。

d) FRPスキンプレート単体 (FPL)

前述したプレートガーダ形式FRP扉体に構成されるFRPスキンプレートと同仕様、同寸法であり、水密ゴムをFRPスキンプレートに直接設置した。なお、水密ゴムの取付けは、スキンプレートのボルト孔による強度欠損を考慮して接着剤で接合した。

3. 小形水門扉に用いる部材と材料特性

(1) FRP部材の材料物性値

表-5に、各試験体の主構造として構成されるFRP部材の材料物性値を示す。これらの値は各メーカーによる保証値である。

表-5 FRP部材の材料物性値

扉体形式	主構造	対象	強度 (MPa)	弾性率 (GPa)
プレートガーダ形式	主桁	引張 ⁴⁾	240	23
		圧縮	270	—
		面内せん断	50	—
	スキンプレート	引張	200	18
		圧縮	260	—
		面内せん断	35	—
グリッドモールド形式	格子	引張	200	15
	スキンプレート	引張	100	8
スキンプレート単体	プレートガーダ形式のスキンプレートと同じ			

(2) 水密ゴムの圧縮試験と変形挙動の予測

実験体に使用した水密ゴムの圧縮試験結果から、水圧荷重による変形挙動を予測をすることとした。

図-5に、P型水密CRゴムの断面形状図を示す。圧縮試験用の水密ゴムの試験体は、試験機に収まる500mmの長さとした。図-6に、圧縮試験用治具を示す。この治具に、試験体をゴム押え板で挟み込みボルトで固定した。圧縮試験には、島津製作所社製オートグラフ（容量：250kN）を用いた。試験速度を5mm/min、繰り返し試験回数を5回として、変位制御にて静的圧縮試験を行った。

図-7に、水密ゴムの圧縮荷重とストローク変位の関係を示す。ストローク変位は、試験機の上下固定治具の相対変位である。設計条件において、全静水圧の作用に対する水密ゴムの圧縮変位量は、図より、プレートガーダ形式に使用した水密ゴム（PG）で約4mm、グリッドモールド形式（GM）では約7mmであった。

水圧が作用すると、水密ゴムが戸当りに接触して

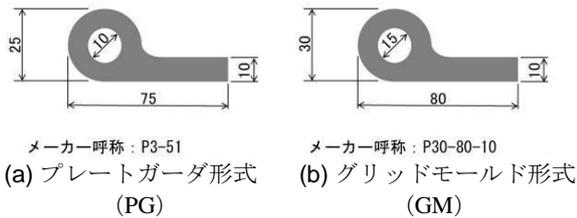


図5 水密ゴムの断面形状図（単位：mm）

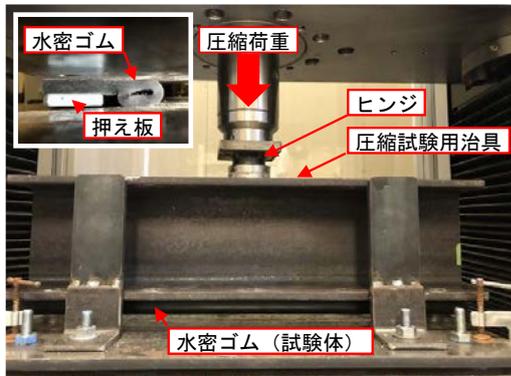


図-6 水密ゴムの圧縮試験用治具とセットアップ状況

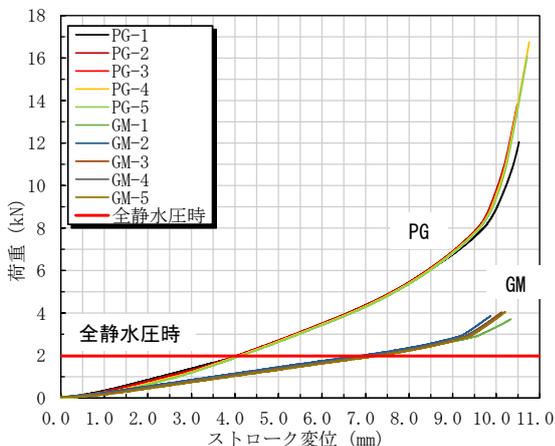


図-7 水密ゴムの圧縮荷重とストローク変位の関係

つぶれ始めるが、水圧が大きくなると、ゴム押え板が戸当りに接触し、水密支持間隔が増減する恐れがある。戸当りまでのつぶれ代は、PGで7mm、GMで11mmであることから、設計上、全静水圧の作用下では、水密ゴムは追従可能範囲を十分に確保でき、水密支持間隔にも影響はないといえる。

さらに、繰り返し実施した圧縮試験においても、荷重-変位関係に再現性が見られることから、設計荷重の2倍相当までの範囲において、使用性についても特に問題はないと考えられる。

4. 水圧試験方法

(1) 高圧水槽の概要と水圧作用方法⁵⁾

図-8に示す箱形高圧水槽の1面に、戸当りの有効寸法と同寸法の開口区画を設け、その開口面を戸当りに見立てて扉を設置し、水槽内部より水圧荷重を扉体に負荷させる仕組みとした。

この高圧水槽の設計は、実験対象としたFRP扉体の設計計算上で、最も剛性の低いスキムプレート区画面の限界破壊応力以上の構造体とした。水圧の作用方法は、最高圧力10MPa、送水能力13ml/ストロークの手動圧力ポンプにて負荷した。高圧水槽の外観を図-9に、扉体設置用開口部を図-10に示す。

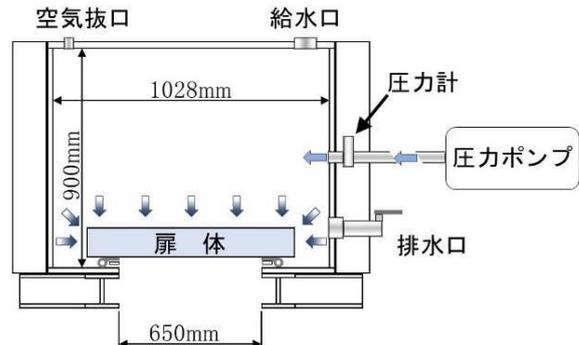


図-8 扉体の水圧载荷の概念図



図-9 高圧水槽の外観



図-10 扉体設置用開口部

(2) 計測方法

水圧の負荷による扉体の変位計測には、以下の3種類の測定方法を採用した。

a) 変位計測

全ての試験体の有効面の中心に、巻き込み型変位計を取付け、水圧に対する扉体の面外変位を計測した。加えて、赤外線カメラを用いた非接触3次元動的挙動計測システムにより、扉体の各点の変位を、

サンプリング周波数100Hzで計測した。

b) ひずみ計測

プレートガーダ形式FRP扉体のスキンプレートは、一区画面の中心位置および各端辺の中央の計5点を測点とし、それぞれの辺に対して直交方向を0°として、2軸ゲージを設置した。また、主桁となる溝形材中間横桁には、その全長を二等分した片側を計測対象とし、ウェブおよびフランジの内外面に、1軸、2軸、3軸ゲージを、3つの断面に設置した。

グリッドモールド形式およびFRPスキンプレート単体は、いずれもスキンプレート片面の中心および各端辺中央の計5点到2軸ゲージを設置した。

プレートガーダ形式鋼製扉体は、縦リブ（補剛材）を境に二等分されたスキンプレートの片側を対象に、上記のスキンプレート同様の5点を計測することとした。さらに、本実験では分布荷重が一様であるため、鋼製扉体に溶接された縦リブが主部材の代替となるため、これも計測対象とした。

5. 試験結果と考察

4つの試験体に対して、水圧を手動ポンプを用いて、破壊に至るまで、あるいは水圧を作用させることができなくなるまで、荷重を行った。

(1) 水圧による変位挙動

図-11に、作用水圧と扉体中心部の変位（巻込み型）の関係を示す。変位は、扉体中心部における面外変位を示している。これらの変位には、高压水槽、水密ゴムの変位も含まれている。なお、変位計測の結果、高压水槽の変位は、十分に小さいことを確認しているが、

水密ゴムの変位は大きいため、3章の水密ゴムの圧縮試験の結果を参照して、その影響の除去を試みた。

図-11 (a)より、まず、FRPスキンプレート（FPL）では、最大水圧は小さく、変位が大きいことがわかる。FRPスキンプレートは、基本構造として、選定しているため、構造設計は行われていないため、参考値である。

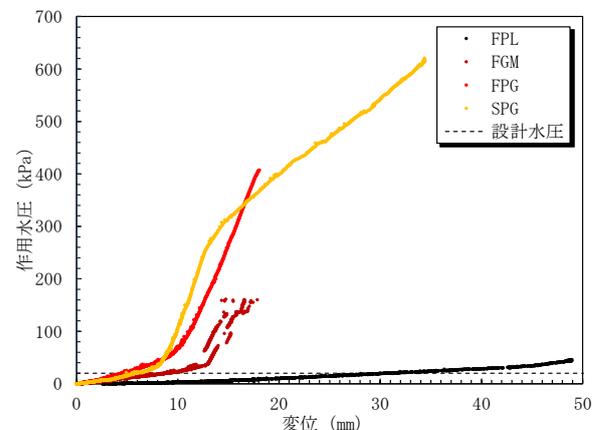
3つの扉体構造について、最大水圧は、各試験体で異なるものの、設計水圧（約20kPa）を超えたあたりで、作用水圧に対する変位の勾配（剛性）が大きくなることがわかる。なお、剛性が変化する箇所では、水密ゴムの変位量が限界に達し、押え板が戸当りに接触したことによるものと考えている。押さえ板が戸当りに接触した後も作用水圧の上昇とともに、変位は直線的に増加することがわかる。

グリッドモールド形式FRP扉体（FGM）では、戸当りに接触するまでの変位が大きい傾向にあるが、これは、3章で示したように、水密ゴムの剛性が小さいことによるものである。また、最大水圧は、165.9kPaであり、他と比べて小さかった。これは、この時点で、水密ゴムの取付けボルトからの漏水が発生し、手動ポンプでの給水以上の漏水となり、荷

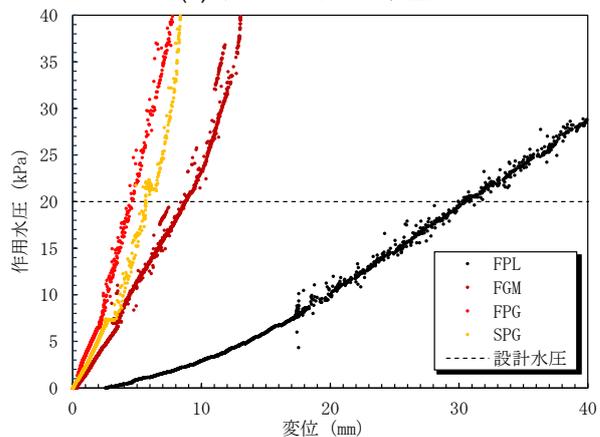
重の荷重が困難となったため、実験を終了した。

プレートガーダ形式FRP扉体（FPG）では、戸当りに接触する位置がやや不明確であるが、これは、FRP横桁（溝形材）の変形も含まれていることによると考えられた。最大水圧は、407.3kPaであり、この時点で、FRP横桁とFRPスキンプレートの交差部で、部分的にFRPスキンプレートの面外せん断破壊が生じ、漏水が生じて終了となった。

プレートガーダ形式鋼製扉体（SPG）では、8mm程度の変位で戸当りに接触して、剛性が変化すること、その後、12mm程度の変位でも剛性が変化することがわかる。2つ目の剛性変化は、鋼補剛材の引張側で降伏した点である。部材降伏以降も水圧は上昇し、最大水圧は620.9kPaであった。この時点で、若干の漏水は生じたが、圧力計（荷重容量：200kPa）の破壊限界（荷重容量の3倍）に達したた



(a) 最大水圧までの範囲



(b) 設計水圧近傍までの範囲

図-11 作用水圧と扉体中心部の変位の関係

表-6 設計水圧，最大水圧による比較

試験体名	FPL	FGM	FPG	SPG
主な材料	FRP	FRP	FRP	鋼
試験体の形式	プレート	グリッド	プレート	プレート
	モールド	モールド	ガーダ	ガーダ
全静水圧荷重 P_d (kN)	11.43	11.43	11.43	11.43
全静水圧 (設計水圧) p_d (kPa)	19.80	18.91	19.80	19.80
設計水圧時のたわみ (mm)	29.9	8.4	4.4	5.6
設計水圧時の水密ゴム変位 (mm)	4.0	7.0	4.0	4.0
扉体単体のたわみ (mm)	25.9	1.4	0.4	1.6
たわみ度	1/29	1/581	1/1695	1/464
最大水圧 p_{max} (kPa)	46.1	165.9	421.7	620.9
設計水圧に対する比率 p_{max}/p_d	2.3	8.8	21.3	31.4

め、載荷を終了した。

設計水圧近傍の構造特性として、表-6に、設計水圧、最大水圧の比較を示す。表-6、図-11 (b)より、FRPスキンプレートの変位は約30mmと大きい、実構造扉体では、FGMが最も大きく、8.4mm、FPG、SPGでは4.4mm、5.6mmであった。また、設計水圧時の水密ゴムの変位を差し引いて、扉体単体のたわみを算定すると、FGM、FPG、SPGでそれぞれ1.4mm、0.4mm、1.6mmとなった。

たわみ度を算定すると、扉体構造のたわみ度は1/464～1/1695の範囲にあり、FPG以外は1/600を若干上回った。計測された扉体の変位が小さいこと、水密ゴムの変位は圧縮試験に基づいていることから、たわみの計算精度に依存するところもあり、たわみ度は概略値となる。一方、FRPスキンプレート(FPL)のたわみ度は1/30程度であるが、この程度のたわみが生じても漏水が生じなかった。以上のことから、扉体構造のたわみ度は1/400～1/500の範囲では、使用性で問題は生じないといえる。

(2) 各部位に生じるひずみ

a) FRPスキンプレート

図-12に、FRPスキンプレートにおける作用水圧とひずみの関係を示す。ひずみゲージの配置は、対称構造に、ひずみゲージも対称に設置したため、ひずみゲージの値は、対称点の平均値で示した。図よ

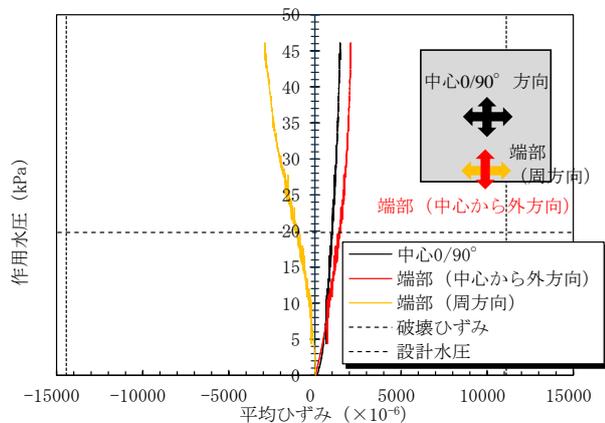


図-12 作用水圧とひずみの関係 (FPL)

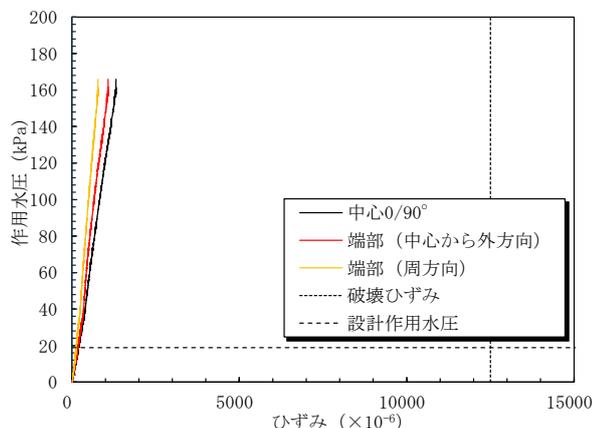
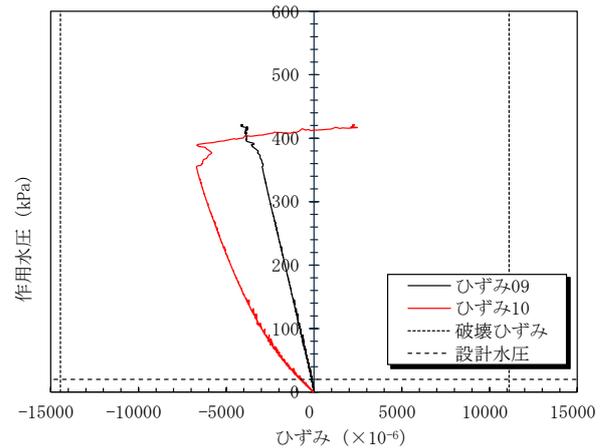


図-13 作用水圧とひずみの関係 (FGM)

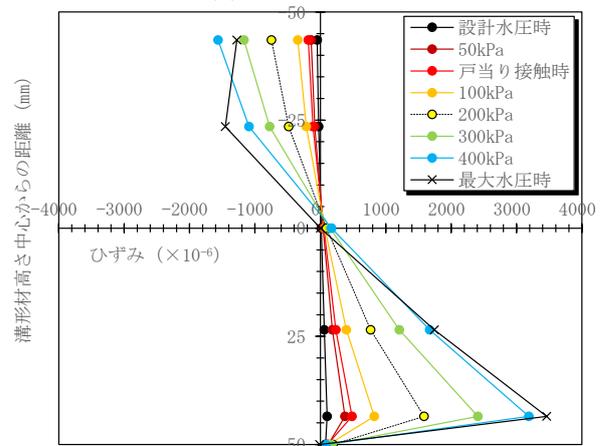
り、中心の0/90°方向のひずみは、引張側となり、比較的小さかった。一方、端部において、中心から外側へ向かう放射方向では、引張、側方向では圧縮となり、圧縮のひずみが若干大きかった。図中には、引張・圧縮強度に対する破壊ひずみを示すが、いずれも破壊ひずみ対して十分に小さいことがわかる。

b) グリッドモールド形式FRP扉体

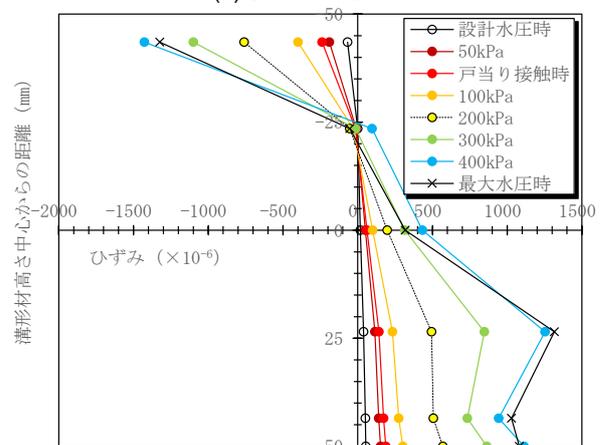
図-13に、FRPスキンプレートにおける作用水圧とひずみの関係を示す。2軸対称のプレート構造に、ひずみゲージも対称に設置したため、ひずみゲージの値は、対称点の平均値で示した。図より、FRPスキンプレートとは異なり、全ての計測点で引張ひず



(a) スキンプレート



(b) 横桁 (断面1)



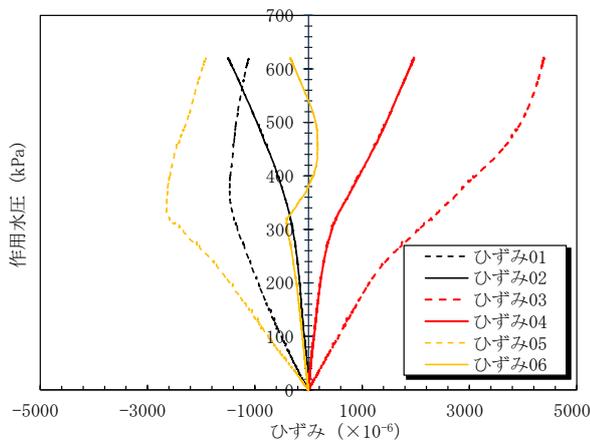
(c) 横桁 (断面2)

図-14 作用水圧とひずみの関係 (FPG)

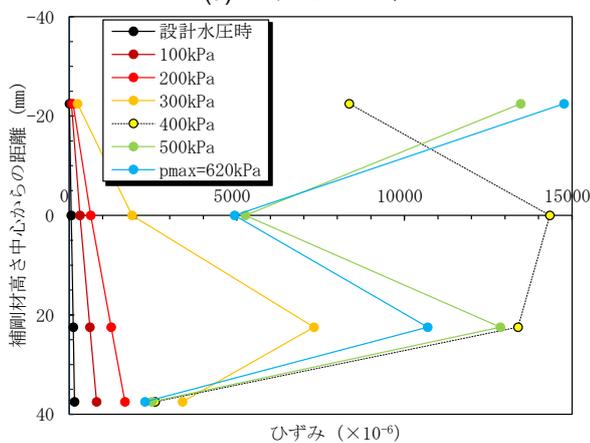
みとなった。これはグリッドで区切られるFRPスキンプレートの中心に2軸ひずみゲージを設置しており、グリッド内でスキンプレートが四辺支持となっているためと考えられた。扉体中心の0/90°方向のひずみが最も大きいこと、端部では中心から放射方向のひずみが大きいことがわかる。図中には、引張強度に対する破壊ひずみを示すが、最大ひずみの大きさは破壊ひずみに対して十分に小さいことがわかる。

図-14に、プレートガーダ形式FRP扉体における作用水圧とひずみの関係を示す。図-14 (a)は、FRPスキンプレートで、最もひずみが大きかった箇所の値を示している。図より、圧縮ひずみが生じ、No.10では最大水圧付近で急激にゼロに近づく挙動となった。最大水圧時には、横桁と交差するFRPスキンプレートでせん断破壊が生じていることから、部分的な破壊が最大水圧に至る前に生じていたと考えられる。

図-14 (b), (c)は、横桁の断面1, 2における曲げひずみ分布を示している。図より、概ね平面保持しているといえるが、断面1は、扉体中心に近く、作用する曲げモーメントも大きくなるが、中立軸はほぼ溝形材の中心であり、圧縮側のスキンプレートとの合成効果はないと考えられる。断面2では、中立軸が上側にあり、スキンプレートと合成していると考えられた。なお、断面1では、最大水圧で、圧縮縁側のひずみが低下することがわかる。これは、近傍のスキンプレートの破壊によるものと考えられた。



(a) スキンプレート



(b) 補剛材 (断面1)

図-15 作用水圧とひずみの関係 (SPG)

d) プレートガーダ形式鋼製扉体

図-15に、プレートガーダ形式鋼製扉体における作用水圧とひずみの関係を示す。図-15 (a)は、補剛材で縦に区切られる鋼製スキンプレートの中央断面の水平方向に設置した2軸ひずみゲージの値を示している。図より、区分された中央部のNo.01, 02では引張ひずみとなること、扉体中心近くの補剛材近傍のNo.05, 06では補剛材の影響を受けて、圧縮ひずみとなることがわかる。No.03, 05では、300 kPa付近で降伏ひずみに達していることがわかる。

図-15 (b)は、補剛材の断面1における垂直ひずみ分布を示している。図より、作用水圧が200kPaまでは、弾性範囲内にあり、平面保持の仮定を満足していること、また、中立軸は、補剛材の中心から上側に22.5mmの位置にあり、スキンプレートと一体となって挙動していることがわかる。作用水圧が300kPa以上では、引張側から降伏が生じ、断面内で大きな塑性ひずみが生じることがわかる。

(3) 最大水圧時における破壊形式

図-16に、最大水圧時 (46.1kPa) のFRPスキンプレート (FPL) の状態を示す。FRPスキンプレートに破壊は生じなかったが、スキンプレートの中央で約50mmの面外変形が生じ、戸当りの押え板の変形が大きくなって、隙間ができ、漏水が発生した。漏水量が水圧ポンプによる給水量を超え、加圧できなくなった時点で試験を終了した。

グリッドモールド形式FRP扉体 (FGM) の状態に関しては、図を略したが、FRPスキンプレートと同様に、最大水圧時 (165.9kPa) に破壊は生じなかつ

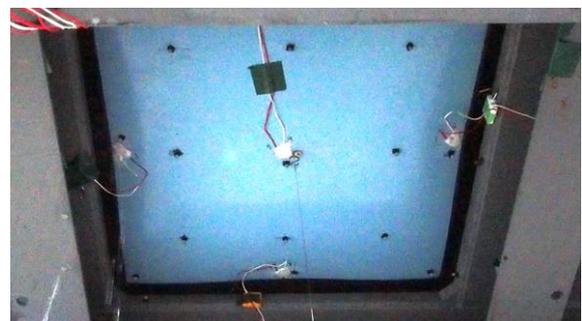
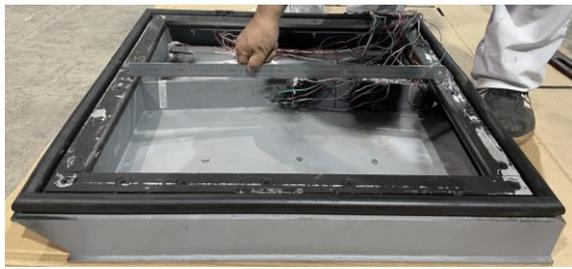


図-16 最大水圧時のFRPスキンプレート (FPL) の状態



図-17 プレートガーダ形式FRP扉体 (FPG) の破壊形式



(a) 戸当り側



(b) スキンプレート側

図-18 プレートガーダ形式鋼製扉体 (SPG) の破壊形式

たが、押え板のボルト接合部から漏水が発生した。漏水量が水圧ポンプによる給水量を超え、加圧できなくなった時点で試験を終了した。

図-17に、プレートガーダ形式FRP扉体 (FPG) の破壊形式を示す。図より、最大水圧時に、横桁・縦桁とスキンプレートとの交差部の扉体中央側で、スキンプレートのせん断破壊が生じた。

図-18に、プレートガーダ形式鋼製扉体 (SPG) の破壊形式を示す。スキンプレートを2つに区分する補剛材が、300kPa程度で降伏し、面外変形が増大し、図に示すように、補剛材、スキンプレートの塑性変形が生じた。なお、塑性変形に伴って漏水も見られたが、圧力計の破壊限界 (600kPa) を超えたため、試験を終了した。

(4) 実験に基づいた限界値と設計安全率

設計水圧、最大水圧の比較を示した表-6より、FRPスキンプレート、グリッドモード形式FRP扉体では、最大水圧時に破壊は生じなかったが、漏水が発生して、加圧できなくなった時点で試験を終了している。

手動水圧ポンプの加圧能力は26ml/sec (13ml/ストローク×2ストローク/sec) 程度と推察され、加圧能力の限界で終了したが、実構造では問題とならない漏水量であるといえた。なお、グリッドモード形式FRP扉体では、漏水が生じる水圧は、設計水圧に対して8.8倍であり、十分に余裕があるといえる。

一方、破壊が生じた、プレートガーダ形式のFRP扉体、鋼製扉体では、設計水圧に対して、21.3倍、31.4倍の水圧であり、十分な安全性が確保されていることが確かめられた。

6. まとめ

鋼製扉体を含む、2つの形式のFRP小形水門扉を対象に、高圧水槽を用いて破壊に至るまで水圧試験を実施した。その結果、設計水圧では、たわみ度を概ね満足すること、一部の形式で、破壊まで加圧ができなかったが、実験で得られた最大水圧は、設計水圧に対して、かなり高いことが確かめられた。今後、さらに詳細な分析を行って、設計に用いるより合理的な安全率やたわみ制限について再検討し、設計・施工に反映していく必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：FRP水門設計・施工指針 (案)，2014。
- 2) ダム・堰施設技術協会：ダム・堰施設技術基準 (案) (基準解説編・設備計画マニュアル編)，2014。
- 3) ダム・堰施設技術協会：水門・樋門ゲート設計要領 (案)，2001。
- 4) 日本規格協会：JIS K7164 プラスチックー引張特性の試験方法一第4部：等方性及び直交異方性繊維強化プラスチックの試験条件，2005。
- 5) 中村一史，中村俊太，松井孝洋，松本幸大，松浦真一，遠藤良裕：面外方向の水圧を受ける鋼製タンクの炭素繊維シート接着補強に関する実験的検討，土木学会第70回年次学術講演会，pp.1035-0136，2015。

(Received September 10, 2021)

EXPERIMENTAL STUDY ON SERVICEABILITY AND SAFETY OF SMALL FRP HYDRAULIC GATES

Hideki HIBI, Hitoshi NAKAMURA, Kunitomo SUGIURA and Masayoshi NASU

The hydraulic gates used in facilities such as rivers and agricultural waterways are designed based on "Dam / weir facility technical standards". FRP hydraulic gates have many advantages such as light weight, high corrosion resistance and reduction of LCC due to durability. Their strength, deflection limits, safety factors etc., are stipulated "Guidelines for Design and Construction of FRP Hydraulic Gates", published by the Japan Society of Civil engineers to fulfil function for hydraulic gates. On the other hand, since there are no reports on renewal or repair in the construction results due to dysfunction. it can be considered that FRP hydraulic gates designed based on with the guideline is sufficiently safe. However, experimental validation of actual gate leaf structure has not yet been carried out.

Therefore, in this study, actual gate leaf in a high-pressure hydraulic tank was tested until it's ultimate stat to verify the strength limit, dysfunction due to water leakage and the form of breakage of FRP. The practical strength, deflection limits and safety factors are discussed on the experimental results. It is concluded that more effective structural design concepts, point can be taken into consideration and the initial cost of FRP hydraulic gates can be reduced.