

◆ 報 文 ◆

繊維強化プラスチックの水門設備への適用性に関する検討

富山禎仁* 西崎 到**

1. はじめに

水門や樋門は代表的な河川管理施設として、治水・利水事業に重要な役割を果たしている。これらは常に厳しい腐食環境下に曝されていることから、その腐食・防食は、河川水路の維持および設備の保守管理上重要な課題となっている。今日、水門や樋門における扉体の構成部材には主として鉄鋼材料が使用されており、塗装による防食対策がなされている。塗装による防食は通常、定期的な塗替が必要不可欠であり、これが施設の維持管理費に占める割合は大きい。それゆえ、施設の維持管理労力やコストを縮減し保守管理を合理化させるために、より防食性能の高い新しい材料の開発・導入が求められている。

ところで近年では、高分子系材料の一つである繊維強化プラスチック (FRP) が工業材料として利用されている。これらの材料は軽量、高強度、高耐食性といった優れた特徴を有することから、高い力学的特性が求められる航空機の一次構造部材から、化学プラントの装置材料のような高い耐薬品性が求められる用途まで、既に幅広い分野で実用化されている^{1,2)}。水門分野においても、鉄鋼材料の代替としてFRPの展開が期待され^{3,4)}既に扉体などで活用されている事例もあるが、河川環境における耐久性に関する実証データが無いこと、保守管理方法についての基準化がなされていないことなど、ユーザーが安心して利用できる環境が未だ整備されていないのが現状である。

そこで本研究では、FRPの水門分野への適用性を確認し、普及のための課題点を整理した。一方で、河川環境におけるFRPの長期耐久性に関する基礎資料をまとめるために、既に供用されているFRP水門の経年劣化状況を調査するとともに、実験室における水門用FRPの耐久性試験を行った。

2. FRP水門の施工実績調査

まず、水門分野におけるFRP活用の実態を把握するために、FRP水門の製作実績がある国内の主要メーカー3社の協力を得て、過去のFRP水門施工実績について聞き取り調査を行った。

調査の結果、1961年から2002年の間に438件の施工実績があることが明らかとなった。その内、現存が確認出来たものは59件であった。所在が確認出来ない理由としては「施工が古く資料が入手できない」「ゼネコン等の土木業者への納入が多く据付場所が特定出来ない」等が挙げられる。年代別の施工件数を図-1に示す。1990年以前における実績が8割以上を占めており、近年における実績は極端に少なくなっていることがわかる。

1961~2002年に施工されたFRP水門の扉体寸法の分布を図-2に示す。2.0m×2.0m以下の断面積を持つ扉体の施工実績が多くを占めており、小型のものがほとんどであることがわかる。扉体面積が4m²以下のものが、全体のおよそ9割を占めていることが明らかとなった。一般にFRPは金属材料に比べて曲げ弾性率が小さく(ガラス繊維強化プラスチック(GFRP):7~30GPa程度、鋼:205GPa程度)撓みやすいため、大型扉体には採用しにくいといった特徴を、この結果は反映して

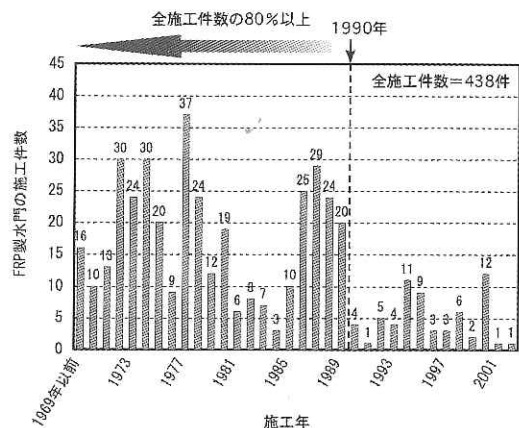


図-1 国内におけるFRP水門の施工実績

いるものと思われる。FRPにおいても扉体の構造を工夫することにより撓みが小さく抑えられるため、大型扉体でも十分な水密性を確保することが可能だが、FRPの軽量性（鋼の約1/4程度）の活用やコスト面を考慮すると10m²以下の小型水門などへの適用が妥当であると思われる。

扉体の軽量性が活かせる用途としては、フラップゲート、スイングゲートなど、自然力（流体力）によって作動させるゲート形式や、角落しのように人力で取り扱われる扉体などが挙げられる。また、扉体自重が軽くなることにより、開閉装置等の付属施設を小型化することも可能である。

ここで、1961～2002年における全施工件数（438件）をゲート形式によって分類したものを図-3に示す。採用された形式のうち最も多いのはスライドゲートであり、全体の半数近くを占めている。次いでフラップゲート、スイングゲート、角落しといった、扉体の軽量性が求められる用途が多い。

聞き取り調査の結果、水門用FRPを構成する素

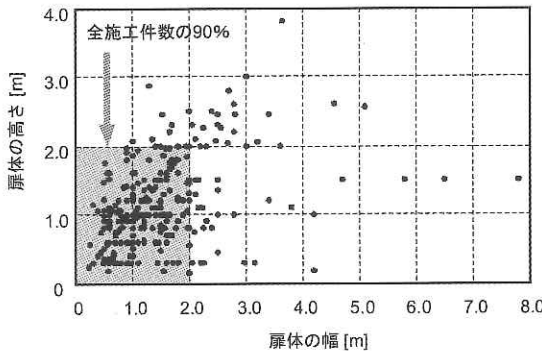


図-2 過去に国内で施工されたFRP製扉体の寸法分布

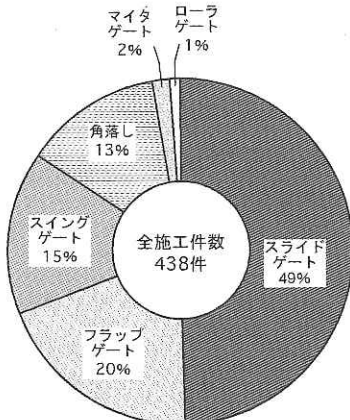


図-3 過去に国内で施工されたFRP水門のゲート形式

材は、強化材としては主にガラス繊維が、また、マトリックスとしては不飽和ポリエステル樹脂、エポキシ樹脂、ビニルエステル樹脂などが用いられていることが明らかとなった。また、FRPの成形方法はハンドレイアップ法、機械成形法（連続引抜成形法）、注型法が利用されている。

3. 河川環境におけるFRPの長期耐久性調査

河川環境に適用される材料では、大気部で生じる紫外線による劣化や、水中部で生じる吸水による膨潤、腐食劣化などが問題となる。これらに加えて、流木の衝撃による損傷や流体による摩損などの機械的損傷が発生する場合もある。水門用部材としてのFRPの適用性を確認するために、現在、供用されているFRP水門の経年劣化状態を調査した。

3.1 現地調査

聞き取り調査で現存を確認出来た59件のFRP水門のうち、およそ半数の31件について、実際に設置されている現地へ赴き、外観調査を行った。調査結果を、水門の稼動状況により以下の3つに分類し検討した。

3.1.1 常時没水状態

常時没水状態にあるゲートには、樋門の出口に設置されたフラップゲート、スイングゲート、マイタゲートなどが挙げられる。現地調査した31件のうち6件がこれに該当した。この状態にある水門では、吸水や水質等による問題が発生しやすい。調査の結果、いずれの水門も若干の退色が認められたものの、著しい劣化箇所は皆無であった。

3.1.2 常時大気中状態

主として農業用水路に設置されたスライドゲートやローラゲートあるいは常時使用状態に無い角落しなどが、このカテゴリーに分類される。現地調査した31件のうち10件がこれに該当した。常時大気中にある水門では、日照による表面劣化が発生する可能性がある。調査の結果、いずれの水門も若干の退色が認められたものの、問題となる箇所は認められなかった。

3.1.3 常時作動状態

自動あるいは手動で、断続的に開閉を繰り返す水門である。調査した水門のうち、15件がこれに該当した。摺動部における損傷や摩耗の発生を重点的に調査したが、著しい外観変化は認められなかった。

今回、調査を行った水門のうち最も古いものは

既に竣工後30年以上経過しているが、汚れの付着や若干の退色以外に目立った外観上の劣化は見受けられず、同程度経過した鋼製の水門と比較して、見かけの耐久性は優れていると考えられる。

3.2 FRP製扉体の解体調査

実際に供用されているFRP水門の経年劣化状態を定量的に評価するため、農業用水の樋門に使用されているFRP製扉体（供用開始から35年以上経過）を回収・解体し、その引張特性を調べた。回収したFRP製扉体の外観写真を写真-1に、概要を表-1に示す。

引張試験は図-4に示すように、解体した扉体の主桁（溝型材）から6×10×250mmの試験片を5本採取し、JIS K 7054「ガラス繊維強化プラ

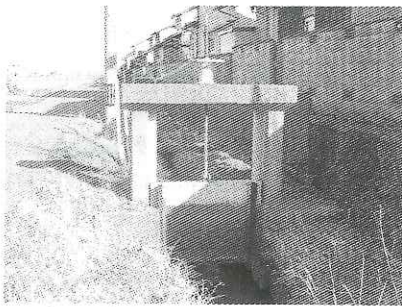


写真-1 解体調査を行ったFRP製扉体

表-1 解体調査を行ったFRP製扉体の概要

施工年度	1969年以前
経過年数	35年以上
ゲート形式	スライドゲート
扉体の構造形式	プレートガーダ形式
扉体の成形方法	ハンドレイアップ法
扉体寸法	縦1m×横1.15m
稼動状況	常時稼動
外観上の変化	<ul style="list-style-type: none"> ・吸水による問題発生は無い ・扉体表面に水垢の付着がある ・摺動部における損傷、摩耗は無い ・若干の変色が認められる

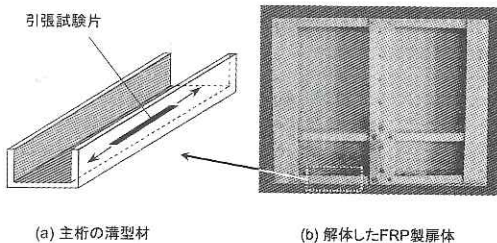


図-4 引張試験片の採取方法

スチックの引張試験方法」に準拠して行った。この扉体については、供用前すなわち初期の強度に関するデータが入手できなかったため、全く同じ積層構成の溝型材を新たに作製し、同様の方法で引張強度を求め、双方のデータを比較した。

表-2は二種類のFRP積層板について、引張試験を行った結果である。二種類のFRP積層板の引張特性について平均値を比較すると、ほぼ同程度になっていることがわかる。回収した扉体は35年以上もの間、補修されていなかったが、それにもかかわらず、強度低下につながる劣化は発生していなかった。なお、データに若干のばらつきが認められるが、これは複数の素材で構成されているFRPの弱点の一つとも言える。このばらつきを小さく抑え、品質を安定化させる技術の開発が今後の課題の一つと考えられる。

以上の現地調査および解体調査結果から、FRPで作製された水門は、いずれも最低限の維持管理のみで竣工後30年以上健全性を保持できる、十分な耐久性を有していることが明らかとなった。この特徴によりFRP水門は、短期間での塗装の更新を余儀なくされるような厳しい腐食環境にある箇所や、塗装の更新自体が困難である箇所などにおいて、従来の鋼製水門に対し優位性を発揮できるものと考えられる。しかしながら前述の通り、近年、その需要が伸び悩んでいる背景にはどのような要因があるのか、具体的に調査することにした。

4. FRP水門に対する認識度調査

関係省庁、関連業界団体、地方自治体、電力会社、水門メーカー、FRP加工メーカーなどを対象として、アンケート調査を実施した。調査では、耐久性、耐摩耗性、現場取付容易性、メンテナンス、生産性、寸法、耐候性、強度、耐食性、インシヤルコスト、ランニングコストなどの項目につ

表-2 二種類のFRP積層板の引張特性

番号	35年以上経過した扉体から採取した積層板		新たに作製した積層板	
	引張強度 [MPa]	引張弾性率 [GPa]	引張強度 [MPa]	引張弾性率 [GPa]
1	175.1	27.2	233.1	22.9
2	179.9	28.6	194.7	25.4
3	221.2	24.2	159.9	26.9
4	218.0	28.1	256.9	24.0
5	210.6	28.2	177.2	26.9
平均	201.0	27.3	204.4	25.2

いて、FRP水門をどの程度認識しているか、また、今後FRPを水門用部材として採用するために必要な条件は何か、などについて質問した。

アンケート調査の結果によると、既存水門の採用素材は鋼製とステンレス製で占められており、FRP水門を新規計画している事例は無かった。

鋼製水門の採用理由としては、強度（衝撃強度）や耐候性、耐久性、イニシャルコストが安い点などが挙げられている。一方、ステンレス製水門は腐食しにくいと、定期的な塗替えが不要なことが採用理由として挙げられているが、イニシャルコストが高いため、採用は概ね防食性が要求される沿岸部に限定されていることが明らかとなった。

FRP水門の認知度に関するアンケート調査の結果を図-5に示す。結果を見ると「認識が無い」の回答が50%を超えている質問項目は耐久性、耐摩耗性、現場取付容易性、耐候性、イニシャルコストの6項目にのぼった。一方、「認識が無い」の回答が50%未満の質問項目はメンテナンス、強度、耐食性の3項目にとどまって

いる。これらの結果から、FRPに対する一般の認識が低いという実態が浮き彫りとなった。この事実が、水門分野においてFRPが普及しない一因になっているものと推察される。今回のアンケート調査では、ユーザーが将来FRP水門を採用する条件として、表-3に示すような内容を求めていることが明らかとなった。

表-3 水門へのFRPの採用条件（アンケート調査結果）

採用条件	回答件数
耐久性やランニングコストなどに関する 詳細なデータが入手できること	16
イニシャルコストがステンレス製ゲートより 安価なこと	3
リサイクル可能であること	2
0.6×0.6～3×3m ² の扉体が生産可能であること	2
紫外線に対する有効な対策が施されていること	2
流木に耐えうる衝撃強度を有すること	1
耐用年数は40年以上であること	1
環境ホルモンの溶出が無いこと	1
補修技術が確立されていること	1

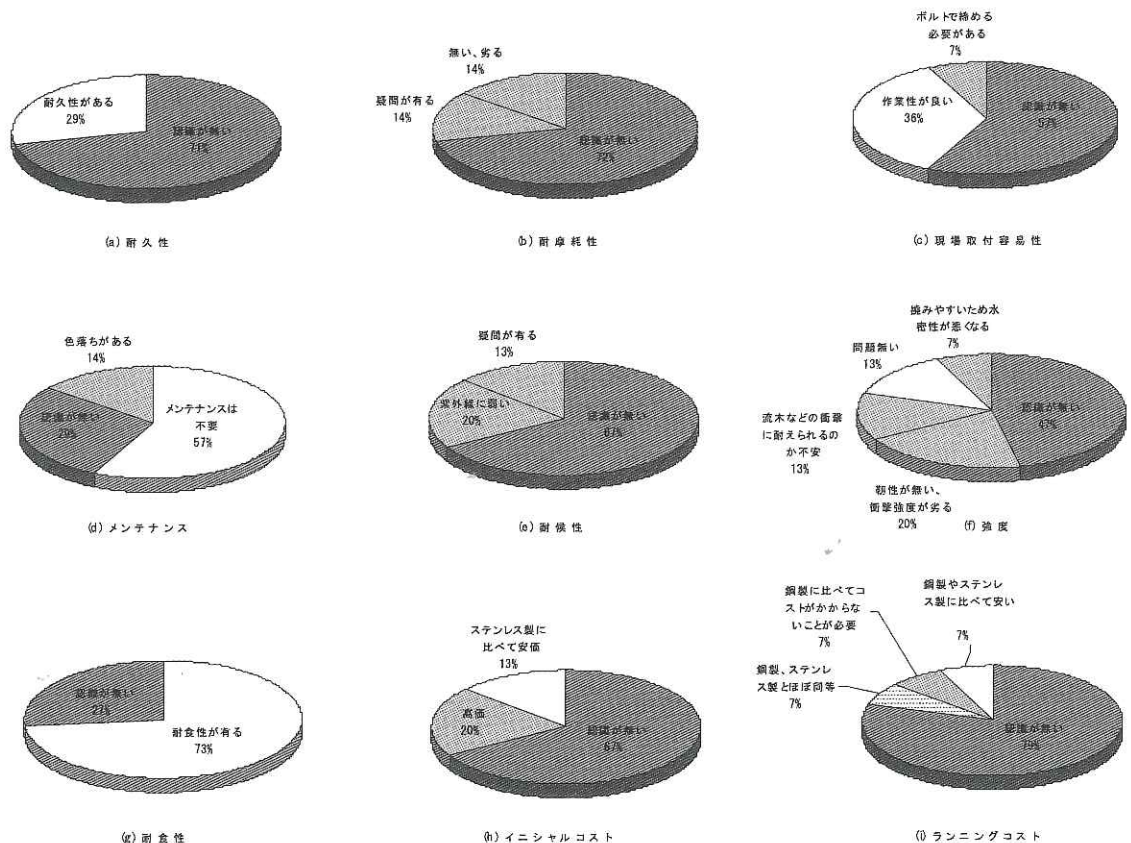


図-5 FRP水門の認知度に関するアンケート調査の結果

5. 室内における水門用FRPの耐久性試験

水門用FRPの耐候性や耐水性に関する基礎的知見を得るために、現在、水門用として主に使われている成形法の異なる3種類のFRPを対象とし、促進耐候性試験および耐水性試験を行った。

5.1 試験方法

5.1.1 促進耐候性試験

水門用FRPの耐候性試験には、ハンドレイアップ法、注型法、引抜成形法で作製したガラス繊維強化プラスチック（GFRP）積層板を使用した。試験片はJIS K 7055「ガラス繊維強化プラスチックの曲げ試験方法」に準拠した短冊状とし、寸法は厚さ4～10mm、幅15mm、長さ200mmとした。この試験片をJIS K 7350-2「プラスチック—実験室光源による暴露試験方法第2部：キセノンアーク光源」に基づき、実験室内に設置した促進耐候性試験機のチャンバー内にセットし、所定の時間キセノンアーク光源（250～800nm）に暴露した。暴露に伴う特性の変化を、試験片表面の光沢度、試験片の曲げ強度、曲げ弾性率などで評価した。

5.1.2 耐水性試験

水門用FRPの耐水性は、促進耐候性試験に用いたものと同じ試験片を使用して浸せき試験を行い、試験片の質量、厚さ、曲げ強度、曲げ弾性率試の変化により評価した。浸せき試験における環境液は、20～25℃に保った蒸留水とした。

5.2 試験結果

5.2.1 促進耐候性試験結果

実験室において人工光源に暴露した際の、FRP表面の光沢度保持率（初期値で無次元化した値）の経時変化を図-6に、曲げ強度保持率の経時変化を図-7に示す。これらの図を見ると、FRPの劣化挙動は成形方法によって若干傾向が異なっていることがわかる。これは、それぞれの成形方法によって用いる繊維の強化形態が異なるとともに、得られるFRPの繊維含有率も異なるためである¹⁾。したがってFRP製品の作製時には、素材の選定はもとより、用途やコストなどを踏まえて最適な成形方法を選択することが重要となる。

図-6を見ると、全てのケースにおいて暴露開始直後から光沢度が著しく低下し、およそ2500時間後には初期の20%以下まで低下していることがわかる。一方、曲げ強度保持率（図-7）では、引抜成形品でわずかに低下が認められたものの、他

は2500時間の暴露後も初期強度からほとんど変化しなかった。これらの結果から、実験を行った範囲内では、紫外線照射によるFRPの劣化は表面のごく近傍でのみしか生じておらず、それゆえほとんど強度低下はなかったものと考えられる。

一般にFRP成形品の表面は「ゲルコート」と呼ばれる樹脂層が0.3～0.5mm程度の厚さで適用される。これはFRP表面への美観付与と、FRP本体の保護を目的とするものである。通常ゲルコートには、成形品の用途に応じて耐熱性、耐薬品性、耐候性等に優れた樹脂が用いられる。例えば、紫外線に対する高い耐性を有する樹脂をゲルコートとして用いることにより、水門用FRPの紫外線による美観低下は大幅に改善されるものと思われる。

5.2.2 耐水性試験結果

2500時間の浸せき試験において、FRPの厚さ変化率（初期値に対する増分の割合）は最大で+0.61%、質量変化率は最大で+1.4%という結果と

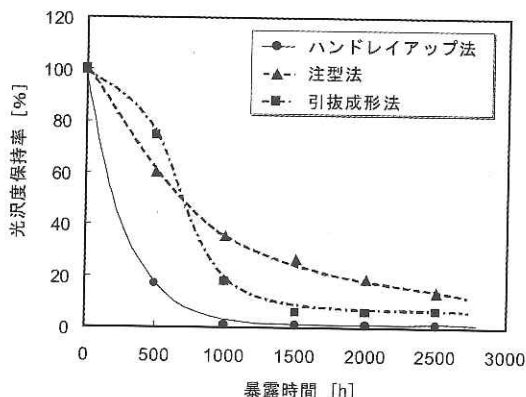


図-6 キセノンアーク光源に暴露した際のFRP表面の光沢保持率の経時変化

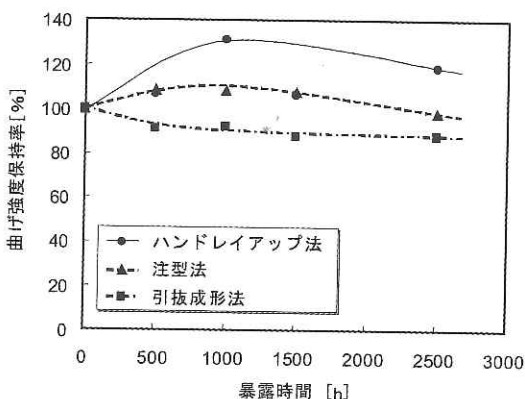


図-7 キセノンアーク光源に暴露した際のFRPの曲げ強度保持率の経時変化

なり、膨潤を伴う若干の吸水が認められた。浸せき過程におけるFRPの曲げ強度保持率の経時変化を図-8に示す。

ハンドレイアップ法で成形したFRP積層板を除き、いずれの曲げ強度も浸せき開始直後から低下しはじめ、およそ500時間経過後までに初期強度のおよそ85%まで低下した後は、ほぼ一定となった。この強度低下は膨潤によるFRPの物理的劣化に起因したものであると考えられる。実際の水門扉には水圧によっておよそ10MPaの応力が作用するが(10m²程度の小型扉体を想定)⁵⁾、これに対し、本試験終了時におけるFRPの曲げ強度の絶対値は120~400MPaと十分大きい。このことから、試験の範囲内ではFRPの吸水量は非常に少なく、許容限度を超えた顕著な強度低下は生じなかったと判断することができる。

以上の耐久性試験の結果から、水門用FRPは紫外線の影響で美観は徐々に低下していく一方で、良好な耐水性を有していることが明らかとなった。このことからFRPは特に、常時没水状態にあるような水門への適用が望ましいと考えられる。

今後、さらに長期間にわたる耐久性試験を実施し、水門用FRPの耐候性や耐水性・耐食性に関する有用なデータを収集していく予定である。

6. まとめ

本研究では、FRPの水門分野への適用性を確認し、普及のための課題点を整理した。一方で、河川環境におけるFRPの長期耐久性に関する基礎資料をまとめるため、既に供用されているFRP水門の経年劣化状況を調査するとともに、実験室における水門用FRPの耐久性試験を行った。得られた

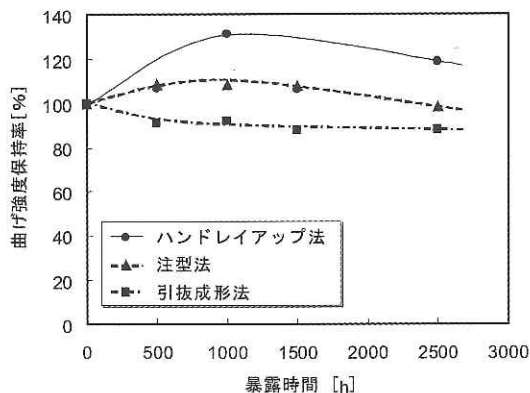


図-8 イオン交換水(20~25℃)浸せき時におけるFRPの曲げ強度保持率の経時変化

結果をまとめると、次の通りである。

- (1) 日本では1960年代から水門用材料としてFRPが利用され始め、2002年度までに400件を超える(その約9割が4m²以下の小型水門である)施工実績がある。
- (2) 現地調査を行った既設FRP水門は、いずれも最低限の維持管理のみで竣工後30年以上健全性を保持できる、十分な耐久性を有していた。
- (3) 水門管理者らのFRPに対する認知度は未だ低く、これが水門分野におけるFRPの普及を妨げる一因となっている。
- (4) 水門用FRPは紫外線による若干の美観低下を生じるものの、良好な耐水性を有している。
- (5) FRPは常時没水状態にあるような小型(10m²程度以下)の扉体などに特に適している。

今後は、引き続き水門用FRPの基本特性に関するデータを収集していくとともに、調査結果に基づき、水門分野におけるFRPの活用技術をまとめた基準類の策定を進める予定である。

参考文献

- 1) (社)強化プラスチック協会：だれでも使えるFRP FRP入門、(社)強化プラスチック協会、平成14年9月
- 2) L. Hollaway: Handbook of polymer composites for engineers, Woodhead Publishing (1994), 3pp.634-641, 1990
- 3) Chowdhury, M. and Hall, R., "Performance Evaluation of Full-Scale Composite and Steel Wickets for use at Olmsted Locks & Dam", Proceedings of the 2nd International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI'98), Vol.1, pp. 667-681, 1998
- 4) 吉田光則、後町光夫、野口達夫、星野順一、百島祐忠、佐伯 昇：超高弾性率炭素繊維を用いたハイブリッド取水堰スライドゲートの開発、強化プラスチック、第36巻第5号, pp.159-162、平成2年5月
- 5) ダム・堰施設技術基準委員会：ダム・堰施設技術基準(案)、(社)ダム・堰施設技術協会、平成11年3月

富山禎仁*



独立行政法人土木研究所
材料地盤研究グループ新
材料チーム研究員, 工博
Dr. Tomonori TOMIYAMA

西崎 到**



独立行政法人土木研究所
材料地盤研究グループ新
材料チーム 首席研究員,
工博
Dr. Itaru NISHIZAKI