

寒冷地の水路更生工法における補強効果

The Effect of Water Channel Reinforcement Renovation in Cold Regions

北川 武* 竹田 誠* 藤本光伸*

Takeshi Kitagawa Makoto Takeda Mitsunobu Fujimoto

寒冷地のコンクリート開水路では、側壁背面から浸透した水により、凍結融解作用による凍害劣化（コンクリート開水路の側壁に背面土から浸入した雨水等が、凍結温度に達し体積膨張と融解を繰り返すことによって劣化が生じる現象）が問題となっている。既存の水路更生工法では、コンクリートの劣化因子となる水を水路側壁内部に滞留させてしまうため、凍害劣化の対策工法にはなっていない。そこで、コンクリート開水路の更生工法で実績のあるFRPM板を、既設水路内面に設置し、既設水路とFRPM板の間に、透水性および保温性に優れたポーラスコンクリートを充填することで、側壁背面から浸透する水を排出できる対策工法の開発に取り組んでいる。本報では、その水路更生工法における補強効果の検証結果について報告する。

In open concrete water channels in cold regions, rain water percolates from the back face of the side wall, which causes freezing and thawing and eventually leads to frost deterioration (the effect of rain water that percolates from the back face of the side wall of the concrete open water channel reaching to the freezing point and causing degradation by the repetition of cubical expansion and fusing). Current water channel renovation methods make water remain in the water channel, which is the reason for degradation of concrete, therefore these are not considered to be solutions for frost deterioration. There are business results in a renovation method of open concrete water channels using FRPM plates. Accordingly, we are working on developing of a new renovation method by fixing FRPM plates to the inside of the existing channels and filling porous concrete that has superior permeability and heating retaining properties in the interstice of the concrete bodies and FRPM plates, which is able to control percolating water from the back face of the side wall. In this report, we will report test results from using this water channel reinforcement method.

1 はじめに

寒冷地における凍害劣化したコンクリート開水路の対策工法として、農林水産省官民連携新技術研究開発事業により水路更生工法の開発が進められている¹⁾。本工法は、既設コンクリート躯体にFRPM板を金属拡張アンカーによって固定し、躯体とFRPM板の間にポーラスコンクリートを充填することで、ポーラスコンクリートの透水性や保温性による凍害抑制効果および補強材（FRPM板+ポーラスコンクリート）としての補強効果を目指すものである。

本報では、コンクリート躯体に対する補強効果を確認するため、フリューム供試体および梁供試体の荷重実験による数値解析を試み、仮想開水路に対する補強効果の検証結果について報告する。

なお、この検証結果については、鳥取大学、株式会社ドーコンおよび寒地土木研究所との共同研究の成果として、水と土（農業土木技術研究会）²⁾に掲載されている。

2 荷重実験

2.1 フリューム供試体による荷重実験

供試体は、プレキャストコンクリート製のフリューム水路をもとに、FRPM板の厚さは10mmとし、中込

材として使用するポーラスコンクリートの厚さは、厚さ違いによる補強効果への影響を検証するため、厚さ30mm、50mmおよび70mmの3種類を製作した（図1）。なお、ポーラスコンクリートは、間隙内に浸透した水を速やかに排出するための透水性、側壁内部に凍結融解作用を生じさせないための保温性、そして凍結融解環境下での耐久性を確保するための凍結融解抵抗性を個別に検討し配合を決定している（表1）。また、ポーラスコンクリートの最小厚さである30mmは、ポーラスコンクリートの充填性を検討した上で設定した。

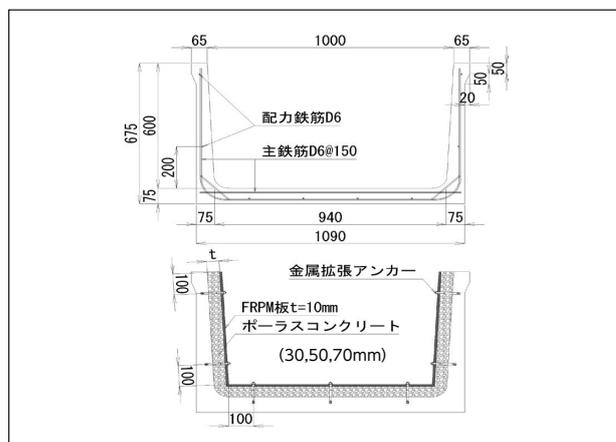


図1 フリューム供試体の形状寸法

表1 ポーラスコンクリートの配合

目標空隙率 (%)	W/B (%)	Vm/Vg (Vol.%)	Vs/Vm (Vol.%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	B		S	G
					C	P		
20.0	30.0	47.5	17.5	103	322	20	129	1464

Vm/Vg：モルタルと粗骨材の体積比
 Vs/Vm：細骨材とモルタルの体積比
 W：水道水
 C：普通ポルトランドセメント（住友大阪セメント、密度 3.15g/cm³）
 P：無機系混和材（住友大阪セメント、密度 2.55g/cm³）
 S：細骨材（山口県蓋井島産の海砂、密度 2.865g/cm³、F.M.2.05）
 G：粗骨材（京都府亀岡産の砕石7号、密度 2.70g/cm³）

載荷実験は、JIS A 5363³⁾ に準拠して実施した。

図2に示す通りフリューム供試体を設置し、長手方向に一樣に負荷されるよう荷重を加え、ひび割れ発生時および最大荷重時を記録した。試験後のフリューム供試体状況を図3に示す。

ひび割れの発生順序および発生位置は、補強材 (FRPM 板+ポーラスコンクリート) による補強なしおよび補強ありで、同じ結果であった。第1ひび割れは側壁の配力鉄筋位置で発生したことから、配力鉄筋によるコンクリートの断面減少により、応力集中が生じたと考える。また、第2・第3ひび割れは曲げモーメントが最大となる側壁と底版の付け根付近で、ほぼ同じ荷重時に発生した。

ひび割れ発生時の荷重比較から、ポーラスコンクリートの厚さが増すにつれ、補強効果も大きくなる傾向が見られた (表2)。これは、ポーラスコンクリートによる断面増加の影響によるものと考えられる。なお、補強効果は第1ひび割れの発生荷重時が最も顕著であり、ひび割れ本数が増えるのにつれて、その差は小さくなる傾向が見られた。フリューム供試体の載荷実験結果により、補強材 (FRPM 板+ポーラスコンクリート) の合成構造による補強効果を確認した。

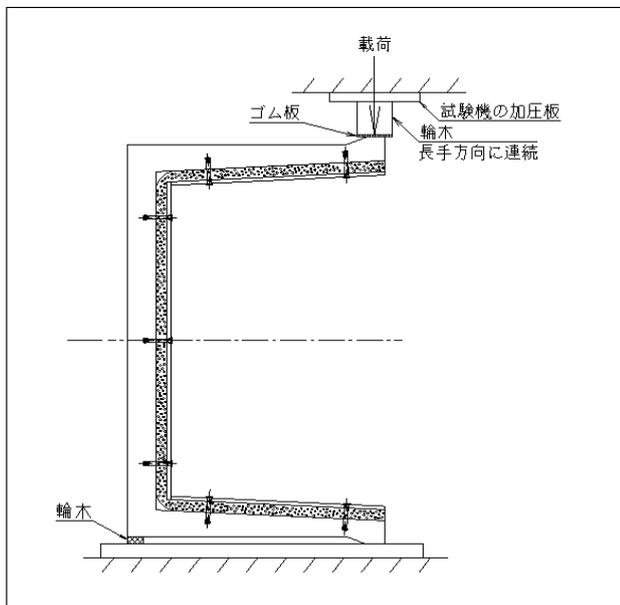


図2 フリューム供試体による載荷実験方法

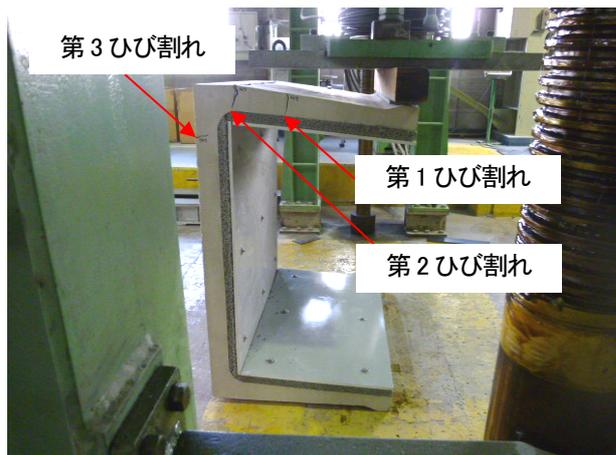


図3 試験後のフリューム供試体状況

表2 フリューム供試体による載荷実験結果

測定項目	補強なし	補強あり					
		t=30mm		t=50mm		t=70mm	
第1ひび割れ	9.65	11.60	(1.20)	16.25	(1.68)	17.85	(1.85)
第2ひび割れ	11.50	14.55	(1.27)	16.30	(1.42)	18.00	(1.57)
第3ひび割れ	11.80	14.55	(1.23)	16.30	(1.38)	18.30	(1.55)
最大荷重	14.70	17.20	(1.17)	19.35	(1.32)	20.60	(1.40)

注 tはポーラスコンクリート厚さを示す。
 注 単位：kN、()内は補強なしを1とした場合の比率を示す。

2.2 梁供試体による載荷実験

本工法を適用した際の補強効果について、数値解析により検証することを目的に、単純化した梁の供試体を用いた載荷実験を実施した。梁供試体による載荷実験の概要を以下に示す。

梁供試体は、幅 400mm、高さ 200mm、スパン 2,000mm の矩形 RC 梁とし、補強ありの供試体は、梁の上面に FRPM 板とポーラスコンクリートを配置した。フリューム供試体の載荷実験と同様に FRPM 板は厚さ 10mm、ポーラスコンクリートの厚さは 30mm、50mm および 70mm の3種類とし、補強なしの供試体と合わせて4種類、各ケース3体の実験を実施した。載荷実験は、スパン中央部の1点に載荷する3点曲げ載荷とし、載荷点位置の鉛直荷重および鉛直変位を計測した (図4)。

実験の結果、補強ありの梁供試体において、供試体各部材の境界面で軸方向の滑り、FRPM 板とポーラスコンクリートの境界面で剥離が確認された (図5)。

補強ありおよび補強なしにおける最大荷重を比較すると、FRPM 板とポーラスコンクリートによる合成効果によって最大荷重が約 1.3 倍向上したが、ポーラスコンクリート厚さを増加しても、最大荷重はほとんど変化しなかった (表3)。これは、補強材 (FRPM 板+ポーラスコンクリート) が、金属拡張アンカーを用いて梁と固定しており、ポーラスコンクリート厚さの増加に伴って、アンカーの変形量は大きくなり、その結果、合成効果が低減し、補強材と梁の接触界面におけるせん断剛性が低下したことによるものと考えられる。

この結果は、フリウム供試体の載荷実験において、ポーラスコンクリート厚さによるひび割れ発生荷重の差が、ひび割れ本数が増えるにつれて、小さくなった結果と一致する。すなわち、ひび割れが発生する載荷初期段階では、躯体とポーラスコンクリートの接着による合成作用が耐力に寄与するが、荷重-変位の増加、ひび割れの進展に伴い、躯体とポーラスコンクリート、あるいは、ポーラスコンクリート骨材間の接着が途切れ、補強効果が失われたものとする。

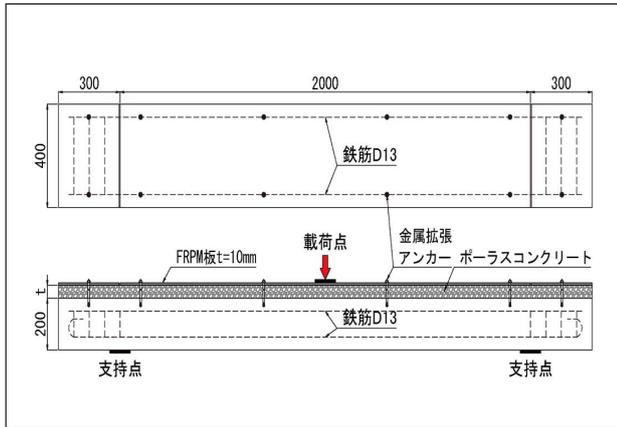


図4 梁供試体による載荷実験方法

表3 補強前後の最大荷重値の比較

	補強なし	補強あり		
		t=30mm	t=50mm	t=70mm
実験結果 (比率)	46.2kN (1.00)	60.6kN (1.31)	58.9kN (1.27)	60.0kN (1.30)

注 t はポーラスコンクリート厚さを示す。
注 実験結果は3体の平均値を示す。



図5 試験後の梁供試体状況 (補強あり)

3 数値解析

3.1 梁供試体の同定解析

数値解析は、2次元非線形有限要素解析コード WCOMD を用い、解析モデル (要素分割図) を図6に示す。

解析に適用した有限要素は、8節点平面要素とし、FRPM板-ポーラスコンクリート間およびポーラスコンクリート梁上面の要素間には接触、剥離および滑りを考慮できるジョイント要素を配置し、スパン中央部に単調増加の強制変位を与えた。

材料構成則には、岡村・前川⁴⁾によって開発された分散ひび割れの仮定に基づく多方向固定ひび割れモデルおよびコンクリートと鉄筋の非線形材料構成モデルを用い、FRPM板は弾性体とし、数値解析で与えた各構成材料の物性値は、材料試験結果とした (表4)。

ジョイント要素には、接触剛性とせん断剛性を与え、荷重-変位関係、境界面の接着挙動 (滑りや剥離) が、実験結果と整合するよう、トライアル解析により剛性を決定した。

ここで、補強材 (FRPM板+ポーラスコンクリート) の有無による差が明瞭な最大荷重を、補強効果の評価指標と位置付け、初期の荷重-変位関係における解析結果と、実験値の変位差が解消する変位 20mm から最大荷重となる変位 60mm までの範囲において、実験と解析により得られた荷重値の残差平方和が最小となるよう、ポーラスコンクリート厚さのケース毎に、せん断剛性を同定した (表5)。

なお、ポーラスコンクリート厚さ 30mm とした場合の載荷点位置の荷重-変位関係を図7に示す。

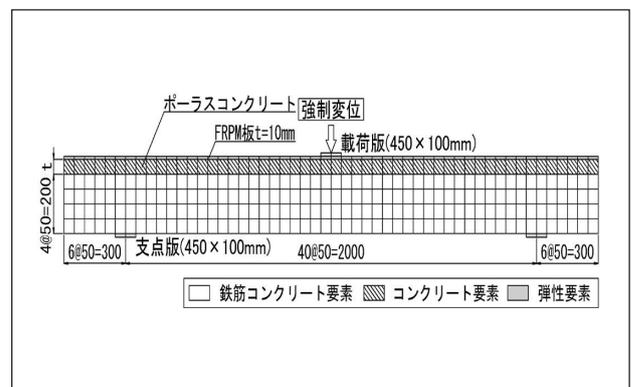


図6 梁供試体の解析モデル

表4 構成材料の物性値 (梁供試体の同定解析)

コンクリート (普通コンクリート)	単位体積重量	23.2 (kN/m ³)
	圧縮強度	36.0 (N/mm ²)
	弾性係数	30.6 (kN/mm ²)
	ポアソン比	0.2
鉄筋 (SD345)	引張降伏強度	398 (N/mm ²)
	弾性係数	200 (kN/mm ²)
ポーラスコンクリート	単位体積重量	20.0 (kN/m ³)
	圧縮強度	33.7 (N/mm ²)
	弾性係数	26.7 (kN/mm ²)
	ポアソン比	0.2
FRPM板	単位体積重量	19.6 (kN/m ³)
	弾性係数	15.9 (kN/mm ²)
	ポアソン比	0.3

表5 部材境界の剛性設定

ポーラスコンクリート厚さ		t=30mm	t=50mm	t=70mm	
躯体- ポーラスコン クリート境界	閉口時	せん断	0.15	0.05	0.03
		接 触	0.10	0.10	0.10
	開口時	せん断	0.15	0.05	0.03
		接 触	1.00	1.00	1.00
ポーラスコン クリート- FRPM 板境界	閉口時	せん断	0.15	0.05	0.03
		接 触	10.00	10.00	10.00
	開口時	せん断	0.00	0.00	0.00
		接 触	0.00	0.00	0.00

単位：せん断剛性 N/mm²/mm、接触剛性 kN/mm²/mm

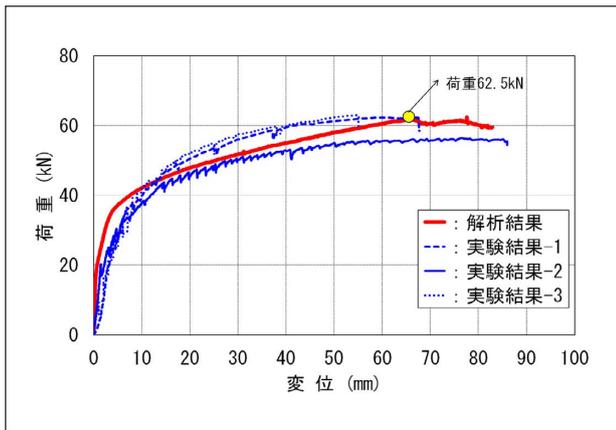


図7 荷重-変位関係 (t=30mm)

3.2 仮想開水路における補強効果

本工法の仮想コンクリート開水路に対する補強効果について、梁供試体の同定解析結果をもとに、数値解析による検証を行った。本検証で想定した水路は、内空高1.0m×内空幅2.0mであり、構造物の対称性からモデル化の範囲は1/2とした。

補強効果の検証は、側壁天端背面に強制変位を与え、側壁基部（曲げ破壊が生じる構造的弱部）の要素における健全状態、劣化後および補強後の主応力度を比較評価した。なお、健全状態の躯体におけるコンクリートおよび鉄筋の物性値は、土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「水路工」⁵⁾における一般値とした。

ここで、劣化後の状態は凍害劣化を想定し、側壁天端から側壁高の1/2の領域で、相対動弾性係数が60%に低下した状態に加え、スケーリングによって側壁内面が10mm減厚した状態を仮定とした。凍害劣化した領域の物性値は、既往の研究結果⁶⁾による相対動弾性係数との関係式を用いて設定した。

補強後については、劣化後のコンクリート躯体に、FRPM板厚さ10mm、ポーラスコンクリート厚さ30mmを配したものとした。ポーラスコンクリートの物性値は、実験により普通コンクリートと同等の圧縮強度が得られていることから、普通コンクリートの一般値とした。また、各部材境界の剛性は梁供試体の同定解析（ポーラスコンクリート厚さ30mm）により得たものとした。

補強後の開水路を模擬した解析モデルを図8に、構成材料の物性値を表6に示す。

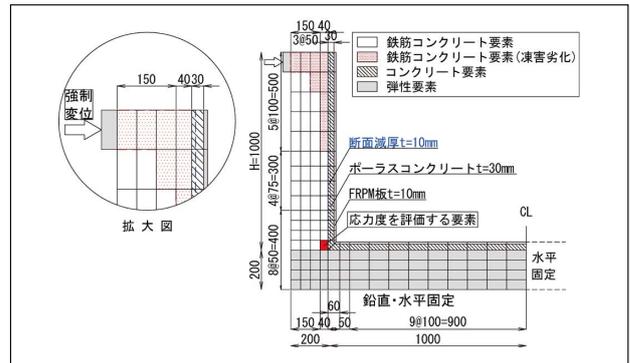


図8 補強後の開水路を模擬した解析モデル

表6 構成材料の物性値（仮想開水路の補強効果）

コンクリート (普通コンクリート)	圧縮強度	21.0 (N/mm ²)
	弾性係数	23.5 (kN/mm ²)
	ポアソン比	0.2
コンクリート (劣化後)	圧縮強度	17.4 (N/mm ²)
	弾性係数	12.0 (kN/mm ²)
	ポアソン比	0.2
鉄筋 (SD345)	引張降伏強度	345 (N/mm ²)
	弾性係数	200 (kN/mm ²)
ポーラスコンクリート	圧縮強度	21.0 (N/mm ²)
	弾性係数	23.5 (kN/mm ²)
	ポアソン比	0.2
FRPM 板	弾性係数	15.9 (kN/mm ²)
	ポアソン比	0.3

補強効果の検証結果として、載荷点位置の荷重-側壁基部の最小主応力度の関係を比較して示す。(図9)

最小主応力度ピーク時の荷重は、劣化後は50.1kNから45.5kNに9%低下する一方、補強後は、健全状態と比較して50.1kNから51.8kNに3%増加した。さらに、応力度ピーク以降も補強材が圧縮応力を負担することで、最大荷重の増加が認められた(表7)。

よって、本工法は、凍害劣化が生じたコンクリート開水路に対して、補強効果が見込めるものと考えられる。

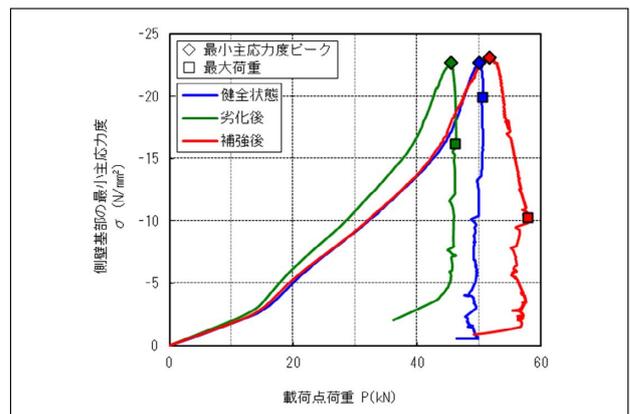


図9 荷重-側壁基部最小主応力度の比較

表7 補強前後の荷重値の比較

	健全状態	劣化後	補強後
最小主応力度 ピーク荷重	50.1kN (1.00)	45.5kN (0.91)	51.8kN (1.03)
最大荷重	50.7kN (1.00)	46.3kN (0.91)	57.9kN (1.14)

注 () 内は健全状態を1とした場合の荷重の比率を示す。

4 まとめ

寒冷地における凍害劣化したコンクリート開水路の対策工法として、FRPM板とポーラスコンクリートから構成される水路更生工法は、凍害抑制効果のみならず、著しい凍害劣化が生じたコンクリート開水路に対しても補強効果を得られることが確認できた。

参考文献：

- 1) 石神暁郎ら：寒冷地における開水路の更生工法、
水土の知、83 (9)、2015、pp.37
- 2) 渡部浩二ら：寒冷地における水路更生工法の補強効果、
水と土、第177号、2016、pp.63
- 3) JIS A 5363：プレキャストコンクリート製品 - 性能試験方法通則、
日本規格協会、2010
- 4) 岡村甫、前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、
技報堂出版、1991
- 5) 農林水産省農村振興局：土地改良事業計画設計基準設計「水路工」
基準書 技術書、2001
- 6) 周藤将司ら：凍害劣化の生じたコンクリートの力学特性および
現地非破壊試験による動弾性係数の評価法に関する研究、
農業農村工学会論文集 Vol.84、No.3、2016、p.I_291-I_299

執筆者：

北川 武

1995年入社

FRP関連の開発に従事



竹田 誠

1999年入社

FRP関連の開発に従事



藤本光伸

Mitsunobu Fujimoto

1992年入社

FRP関連の開発に従事

