

研究成果報告書

研究開発課題名	寒冷地におけるコンクリート開水路の 将来的なモニタリングが可能な更生工法の開発
研究総括者	株式会社栗本鐵工所 化成品事業部 技術開発部長 裕 昌也
研究開発組合	株式会社栗本鐵工所 株式会社ドーコン
試験研究機関	国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 国立大学法人鳥取大学

1 事業の実施内容

1. 1 事業の背景及び目的

農業用排水施設は、施工後数十年を経た施設が多く、将来にわたり施設が有する機能を確保するためには現状の診断結果に基づいた補修・補強による対策を行う必要があり、場合によっては改築を検討しなければならない。幹線で約 5 万 k m、支線を含めると約 40 万 k m に及ぶ農業用水路は、農業用水を農地に供給する上で不可欠な施設であり、水路の機能低下による水路網の断線は確実に避けなければならない。水路の主要な建設材料はコンクリートであり、時間の経過と共に徐々に劣化が進行することで機能低下を引き起こすことが顕在化している。特に、北海道・東北だけでなく滋賀県以北における寒冷地では、農業に身近な存在である水が劣化因子となる凍害が水路に発生している。凍害が生じた水路の機能保全対策としては、温暖な府県での実績を踏まえて種々の工法が適用されているものの、水路の構造形式と供用環境に応じて特徴的に発生する凍害のメカニズムが考慮されておらず、現在ある補修工法では水路の機能を回復することは困難である。

凍結融解作用により発生する水路側壁のひび割れは、側壁の表面と内部で異なる形態で発生するのが特徴的であり、内部ひび割れは部材方向に層状に発生する。部材内部の層状ひび割れは、背面から供給される水により側壁内部の飽水度が高まり、水路内面から作用する気象作用が面的に伝導することにより発生するために、背面から浸透した滞留水を効率的に排出し、内面から伝導する熱を抑制することが、水路側壁の凍害劣化を助長しないためにも重要になる。しかしながら、従来の水路内面を対象にした補修工法では、プライマーや表面被覆材が排水抑制層となり背面から供給された水を側壁内部に滞留させるために、将来的に凍害劣化を助長される要因となっていた。つまり、従来の表面被覆工法は、結果として凍害の劣化因子である水を排除するのではなく滞留させていたために、水路側壁の凍害発生メカニズムに即した対策工法になり得ていなかったと言える。

そこで、本研究開発事業では、寒冷地での表面被覆工法で実績のある工場で製作した二次製品（FRPM板）を既設水路内面に設置することで形づくられる合成構造により既設水路を補強し、既設水路とFRPM板の間隙には、透水性及び保温性に優れた中込材を充填する更生工法を開発する。本工法は、補修・補強では対応できない状況にある開水路の機能を回復する更生工法であり、将来にわたっては、FRPM板及び透水性材料を撤去することで、再度同断面による更生を繰り返し行うことが可能な工法である。

また、本工法は、FRPM板を容易に脱着することができる構造であるため、施工後における既設水路の内部状況及び追加施工した材料の経時変化を長期的にモニタリングすることができる特徴を有する従来にない工法である。そこで、この特徴とライフサイクルコストとの関係について留意すると共に、他工法との適用区分について明確にすることを視野に入れながら開発を進めていくものとする。

1. 2 事業の内容及び実施方法

(1) 研究開発の内容

当官民連携新技術開発事業テーマでは、日本国内の寒冷地における農業用コンクリート水路を対象とした更生工法を開発し、その設計及び施工方法を確立するために以下の内容で進めるものとする。

1) 水路側壁に浸透した水の排水工法の開発

側壁内部の凍害劣化は、水路側壁に浸透した水を劣化因子として起こる。そこで、透水性に優れた中込材をFRPM材と既設水路の隙間に充填した排水工法を開発する。

2) 側壁天端の補修工法の開発

側壁天端は融雪水などが側壁内部に浸透する箇所となる。そこで、水が浸透しにくい材料による補修工法を開発する。

3) 合成構造の断面設計の確立

本研究開発事業で開発する更生工法は、FRPM板及び中込材による合成構造であり、その断面設計の確立を行う。

4) FRPM板の脱着機構の開発

現行の各種補修工法では、既設水路の内部状況及び追加施工した材料の経時変化のモニタリングが行えない。そこで、FRPM製板を容易に脱着できる工法を開発する。

5) 試験施工

1)～4)の項目を北海道及び本州の現地で試験施工することで、現場適用に関する技術的課題を明らかにする。

6) 実証試験

1)～4)の項目の有効性並びに経済性を評価するために実証試験を行う。

7) 機能監視

1), 2), 4)の効果を確認するために、実証試験の現場において2年間の機能監視を行う。本研究開発事業で開発する更生工法は、寒冷地における農業用コンクリート水路が対象であることから、冬期の監視を複数年行うために、機能監視期間として2年間を設ける。

1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

(1) 基礎となる試験研究の概要

これまでに明らかになっている本研究開発事業に関わる知見は、次のとおりである。

①水路側壁の凍害発生メカニズム

側壁内部の凍害劣化である層状ひび割れは、寒地土木研究所と鳥取大学の共同研究により、背面から供給される水により側壁内部の飽水度が高まり、水路内面から作用する気象作用が面的に伝導することにより発生することが明らかになっている。そのために、背面から浸透した滞留水を効率的に排出し、内面から伝導する熱を抑制することが、水路側壁の凍害劣化を助長しないためにも重要になる。

②側壁天端の凍害劣化

側壁天端は、隅角部でもあるために凍結融解作用によるスケーリングが著しい。また、天端は融雪水などが側壁内部に浸透する箇所となることが、寒地土木研究所と鳥取大学の共同研究により明らかになっている。天端の補修は、水路側壁の凍害劣化を助長しないためにも重要になる。

③FRPM板の既設水路内面への設置

FRPM板(二次製品)を金属拡張式アンカーで既設水路内面に固定する技術は栗本鐵工所が有しており、実績としては沖縄を除く日本全国にある。

(2) 技術的問題点

基礎となる試験研究の成果を本研究開発事業に取り入れる上で解決しなければならない技術的問題点には、次のものがある。

①水路側壁に浸透した水の排水

従来の表面被覆工法は、結果として凍害の劣化因子である水を排除するのではなく滞留させていたために、水路側壁の凍害発生メカニズムに即した対策工法になり得ていない。本研究開発事業では、FRPM材と既設水路の隙間に背面から供給された水を排水するための中込材を充填するが、その中込材に要求される性能を明らかにしなければならない。

②側壁天端の補修

側壁天端はスケーリングが進行していることから、劣化部の適切な除去や断面修復が不可欠であり、補修材として水が浸透しにくい材料を選択する必要がある。

③合成構造の断面設計

FRPM板及び中込材で更生した合成構造に対して、既設水路の補強の観点からFRPM板及び中込材に必要となる強度や厚みを明らかにしなければならない。

④FRPM板の脱着機構

現在の金属拡張式アンカーによる固定では、FRPM板を容易に脱着することはできない。

(3) 対応策

これらの課題を解明するための対応策として、下記に示す個別テーマの研究を遂行する。

①水路側壁に浸透した水の排水

FRPM材と既設水路の隙間に充填する中込材に要求される排水性を確保するとともに、凍結融解抵抗性並びに保温性を考慮した中込材としてポーラスコンクリートを選択し、その配合を決定する。また、中込材の断熱効果については、ポーラスコンクリート以外の材料についても確認し、比較検証を進めていく。

②側壁天端の補修

側壁天端はスケーリングが進行していることから、劣化部の適切な除去や断面修復が不可欠であり、補修材として水が浸透しにくい材料を選択する。

③合成構造の断面設計

既設水路の補強の観点からFRPM板及びポーラスコンクリートの強度や厚みを決定する。FRPM板及びポーラスコンクリートで更生した合成構造に対して、外力が作用した時を想定した有限要素法による破壊解析を行い、補強効果を確認する。

④FRPM板の脱着機構

材料の経時変化を長期的にモニタリングするために、ボルトまたはナットで締結できるFRPM板固定方法を開発し、FRPM材を容易に脱着できるようにする。

1. 4 事業の実施体制

試験研究機関と研究開発組合の役割分担

研究開発の項目	事業実施主体 (新技術研究開発組合)		試験研究機関	
	栗本鐵工所	ドーコン	寒地土木 研究所	鳥取大学
水路側壁に浸透した 水の排水工法の開発	◎	○	◎	◎
側壁天端の補修工法 の開発	◎	○	○	○
合成構造の断面設計 の確立	○	◎	○	○
F R P M板の脱着機 構の開発	◎	○	—	—
試験施工	◎	○	○	○
実証試験	◎	○	○	○
機能監視	◎	○	○	○

(注) ◎は主担当, ○は担当

1. 5 事業の年度計画と実績

研究開発の項目	平成 25 年度		平成 26 年度		平成 27 年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
水路側壁に浸透した水の排水工法の開発			 ————	 ————	 ————	
側壁天端の補修工法の開発			 ————	 ————		
合成構造の断面設計の確立			 ————	 ————	 ————	
F R P M板の脱着機構の開発			 ————	 ————		
試験施工				 ————		
実証試験					 ————	
機能監視(平成 28 年度～29 年度に実施予定)						

注) は計画, ——— は実績

1. 6 研究開発の概要, 結果, 課題等

(1) 水路側壁に浸透した水の排水工法の開発

(1) - 1 排水性向上に対する基本的な考え

1) 流入経路

既設水路面とパネル面の間への流入経路は, 主に融雪による地表面水と開水路背面における地下水の浸出水である。

2) 現状

従来の表面被覆工法では, 被覆材の水密性により開水路背面等からの浸出水を排除できず, 凍害発生の一因となっている。

3) 基本構造

排水性向上のためにはパネル面に排水用の孔(以下, 排水孔という)を設置するなど, 開水路へ自由に排水できる構造とする。

4) 排水対象

中込材及び排水孔の排水対象は, 以下のとおりとする。

- ①短時間に多量の流入が考えられる地表面からの融雪等による流入
- ②長時間に渡り常時流入する水路躯体を介しての地下水の浸出水

(1) - 2 排水性

(1) - 2 - 1 中込材としてのポーラスコンクリートの透水性

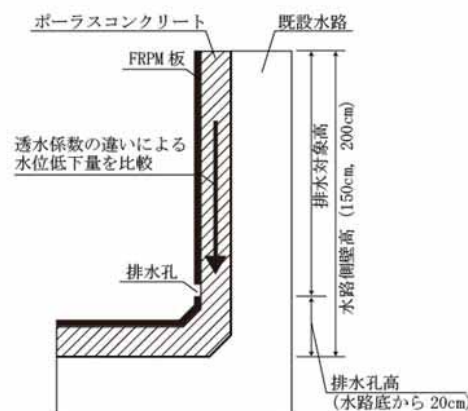
水路更生工法の中込材には, 既設水路の凍害劣化を進行させないように側壁背面から浸透した水を排水するための透水性が求められ, この要求性能を満足する材料としてはポーラスコンクリート挙げられる。中込材に浸透する水の流入経路は, 側壁背面から地下水が浸透する経路と, 融雪や降雨の地表面水による水路天端からの経路がある。融雪や降雨の地表面水は短時間で多量に流入するため, 中込材の部分において一時的な水位上昇が想定されるため, 一時的に上昇した水位を効率よく排水し, 水位低下させることが必要となり, このとき重要となるのがポーラスコンクリートの透水性である。

(1) - 2 - 2 ポーラスコンクリートの透水係数

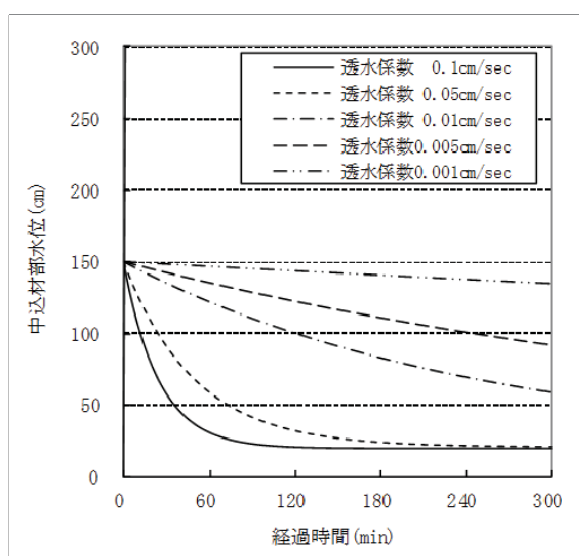
ポーラスコンクリートに求められる透水性（＝透水係数）を把握するため、中込材部分が飽和の状態を初期条件として透水係数の違いによる水位低下を試算した。また、試算での構造的な条件は、水路側壁高 150cm と 200cm の 2 ケースとし、排水孔を水路底から 20cm の位置に設置してここから排水されるものとして、ダルシー則により試算するものとした。

水路側壁高 150cm での試算結果を図（1）－ 1 に、200cm での試験結果を図（1）－ 2 に示す。

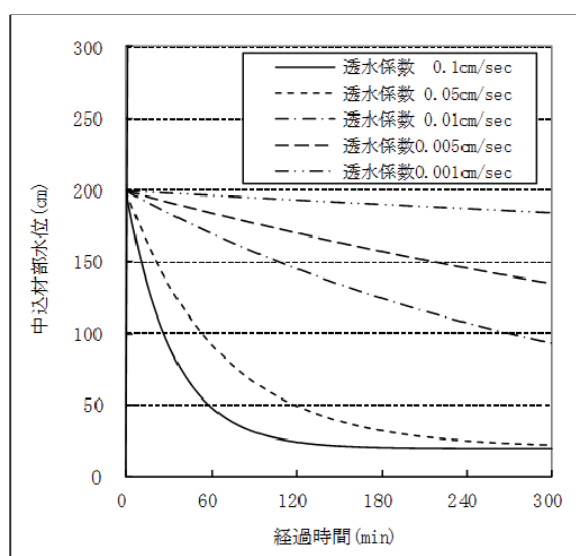
中込材の透水係数が 0.05cm/sec より大きければ、水路側壁高 200cm の場合であっても 3 時間程度でほぼ排水孔と同程度の水位（20cm 地点）まで低下することが期待できる。一方、透水係数 0.01cm/sec より小さい場合では、透水係数 0.05cm/sec と比較し大きく水位低下の傾向は異なり、5 時間後でも完全に排水されない。融雪期においては日中の気温上昇に伴い融雪し、日没後の気温低下とともに凍結するサイクルを繰り返すため、融雪から凍結までにはある程度の時間を要する。また、現場の実現象としては融雪や降雨による表面水の流入中においても、常時排水がなされるため中込材部分が飽和状態となることはごく稀であると考えられる。以上から、透水係数 0.05cm/sec を確保することで、十分な透水性が確保されると判断する。



図（1）－ 1 透水性試算条件断面



図（1）－ 2 透水係数の違いによる水位低下の試算結果（水路側壁高 150cm）



図（1）－ 3 透水係数の違いによる水位低下の試算結果（水路側壁高 200cm）

(1) - 2 - 3 側壁背面から浸透する水量の確認

側壁背面から中込材部分へ常時浸透する水量を確認するため、水路側壁高 $L=200\text{cm}$ 、開水路背面土の地下水位を地表面とした場合の浸出面に対する圧力水頭 $h=200\text{cm}$ 、健全なコンクリートの透水係数は $3.0 \times 10^{-9}\text{cm/sec} \sim 1.0 \times 10^{-11}\text{cm/sec}$ 程度（青木ら，2002）であることから、最小値として透水係数 $k_s=3.0 \times 10^{-9}\text{cm/sec}$ 、浸出面積 $A=20,000\text{cm}^2$ （水路側壁高 $200\text{cm} \times$ 奥行き 100cm ）を条件としてコンクリート面からの浸出量を試算すると、式(1)より 1 日あたりの浸出量は約 $5.2\text{cm}^3/\text{day}$ と極めて少量であることを確認した。

$$Q=A \times V, V=k_s \times h \div L \text{ より,}$$

$$Q=A \times K_s \times h \div L \cdots (1)$$

Q : 1 日当たりの排出量(cm^3/day)

A : 浸出面積(cm^2) V : 排出流速(cm/day)

k_s : コンクリートの透水係数

$$(3.0 \times 10^{-9}\text{cm/sec} = 2.592 \times 10^{-4}\text{cm/day})$$

h : 圧力水頭(cm)

L : 水路側壁高(200cm)

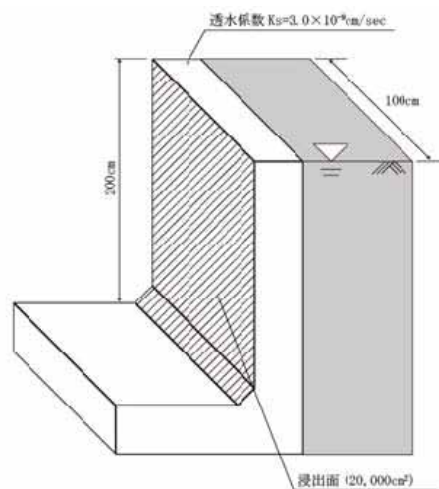


図 (1) - 4 側壁背面からの浸透水量検討断面

参考文献

青木秀行，村上祐貴，大下英吉：水セメント比の違いによる鉄筋近傍の透水性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，vol.24，No.1，pp.519-524，2002

(2) ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性および熱的性質

(2) - 1 寒冷地で用いるポーラスコンクリートの評価

水路更生工法の中込材には、既設水路の凍害劣化を進行させないように、側壁背面から浸透した水を排水するための透水性、側壁内部の温度変化を緩慢にするための保温性が求められ、これらの二つの要求性能を満足する材料としてポーラスコンクリートが選択された。

多孔質体であるポーラスコンクリートには、独立空隙だけでなく連続空隙が存在し、ポーラスコンクリートの透水性は連続空隙率との相関性が高い（梶尾ら，2007）ことから、中込材に要求される透水性は連続空隙率を調整することで容易に確保することができる。ただし、多孔質体であるポーラスコンクリートは、間隙中に入った水が凍結時に膨張することで破壊が進行（西林ら，2009）するために、間隙中の水の保持状態によっては寒冷地で用いる材料に求められる耐久性である凍結融解抵抗性が低下する。ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性は普通コンクリートよりも一般に低く、特に水中凍結融解試験（A 法）では低くなるのが既往の研究で示されている（小尾ら，2003）。したがって、本更生工法の中込材としてポーラスコンクリートを用いるためには、間隙の飽和・不飽和状態を踏まえた凍結融解抵抗性の評価が必要となる。一方で、ポーラスコンクリートに要求される保温性についても、凍結融解抵抗性と同様に、間隙中の水の保持状態により異なることが考えられるために、保温性に関わる熱的性質についても間隙の飽和・不飽和状態を踏まえた評価が必要となる。

本章では、寒冷地において間隙中に水が浸透する環境条件下にあるポーラスコンクリートを対象に、間隙の飽和・不飽和状態が凍結融解抵抗性および熱的性質に及ぼす影響について考察を加える。試験対象のポーラスコンクリートは、水路更生工法の中込材に要求される透水性（ $0.5 \times 10^{-1} \text{cm/s}$ 以上）を踏まえて設定した目標空隙率 20%（粗骨材 7 号碎石）である。

(2) - 2 ポーラスコンクリートの概要

目標空隙率 20%のポーラスコンクリートの配合を表（2） - 1 に示す。材料は、水（W）が水道水、セメント（C）が普通ポルトランドセメント（住友大阪セメント、密度 3.15g/cm^3 ）、混和材（P）が無機系混和材（住友大阪セメント、密度 2.55g/cm^3 ）、細骨材（S）が山口県蓋井島産の海砂（密度 2.865g/cm^3 ，F.M.2.05）、粗骨材（G）が京都府亀岡産の碎石 7 号（密度 2.70g/cm^3 ）

である。このポーラスコンクリートの密度は 2.006g/cm^3 、空隙率は 18.2%，連続空隙率は 17.6% である。作製した供試体は、凍結融解抵抗性の評価において $10 \times 10 \times 40 \text{cm}$ の角柱供試体、熱的性質の評価において T 型の熱電対温度計を供試体中心に埋設した $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ の円柱供試体である。

表（2） - 1 ポーラスコンクリートの配合

W/B (%)	V_m/V_g (Vol.%)	V_s/V_m (Vol.%)	単位量 (kg/m ³)			
			W	B		G
				C	P	
30.0	47.5	17.5	103	322	20	129
						1,464

V_m/V_g : モルタルと粗骨材の体積比

V_s/V_m : 細骨材とモルタルの体積比

(2) - 3 ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性

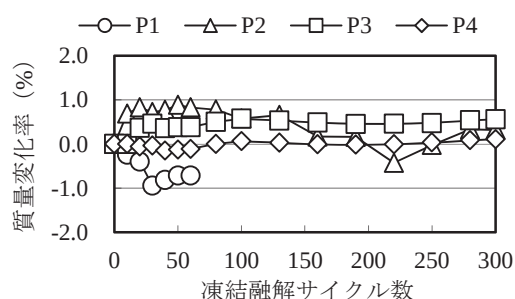
ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性を評価するための試験条件は、表（2） - 2 に示す 4 パターンである。P1 と P2 は、JIS A 1148 : 2010「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠した水中凍結融解試験（A 法）（間隙飽和）および気中凍結水中融解試験（B 法）（間隙不飽和）である。P2 は凍結時に試験槽から水が排水されており供試体の連続空隙中の水も概ね排水されていると思われることから供試体の状態としては間隙不飽和に分類している。P3 と P4 は、凍結融解試験前の供試体の水分状態が凍結融解抵抗性に及ぼす影響を考察するために実施した気中凍結融解試験である。P3 は A 法においてゴムスリーブの中に水を充填しない試験（間隙

不飽和・供試体湿潤), P4 は P3 と同様の気中凍結融解試験であるが供試体は試験開始 24 時間前に水槽から取り出し室内で気乾状態にした試験(間隙不飽和・供試体乾燥)である。ここで, 試験開始材齢は 28 日であり, P4 を除く全ての供試体は試験開始直前まで水温 20℃ の水槽内で水中養生を行っている。各試験パターンの供試体数はそれぞれ 3 本であり, 結果はその平均値として示す。

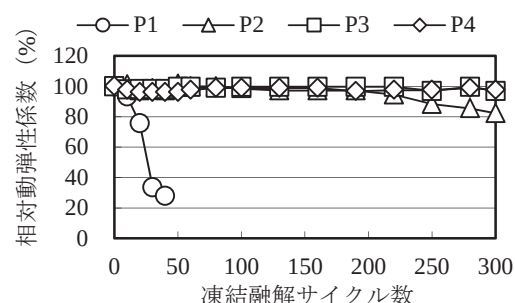
凍結融解 300 サイクルまでの各試験パターンの質量変化率, たわみ振動の一次共鳴振動数による相対動弾性係数を図(2) - 1 に示す。いずれのパターンにおいても質量変化率はほとんど変化しておらず, スケーリングが生じていないことがわかる。相対動弾性係数に関しては, P1 のみが急激に低下し, 一次共鳴振動数は 40 サイクルまでしか測定できず, 80 サイクルで崩壊した。崩壊時の P1 の状況を図(2) - 1 (c) に示す。供試体の長さ方向にひび割れが発生していることから, 間隙中の水が凍結時に膨張した内部膨張圧による破壊(西林ら, 2009)であることがわかる。したがって, 凍結時に間隙が飽和している状態のポーラスコンクリートでは, 凍結融解抵抗性を確保することが困難である。一方, 間隙が不飽和状態である P2 の相対動弾性係数は, 220 サイクルから徐々に低下しはじめたが 300 サイクルで 82.2%あり, 凍結時に間隙が水で満たされていなければ十分な凍結融解抵抗性を有することがわかる。P1 と P2 の間にこのような違いが生じた直接的な原因は, 凍結時における間隙中の水の保持状態の違いによるものであるが, その前提としてポーラスコンクリートの空隙構造の特徴が関係していると考えられる。前述のとおり今回のポーラスコンクリートの空隙のほとんどは連続空隙であり, この空隙構造の特徴のために, P1 ではゴムスリーブ内の水が間隙内に入り, P2 では融解時に間隙内に浸透した水が凍結前に排出されたためであると推察される。気中凍結融解試験である P3, P4 については, 凍結膨張圧を生じさせる水が間隙中になく, また P2 のように融解時に水が浸透しポーラスコンクリートを湿潤させる条件でもないことから, 相対動弾性係数は低下せず凍結融解の繰返し作用による劣化がほとんど生じてい

表(2) - 2 ポーラスコンクリートの凍結融解試験の条件

パターン	試験方法	供試体の状態
P1	水中凍結融解試験 (A 法)	間隙飽和
P2	気中凍結水中融解試験 (B 法)	間隙不飽和
P3	気中凍結融解試験	間隙不飽和・ 供試体湿潤
P4	気中凍結融解試験	間隙不飽和・ 供試体乾燥



(a) 質量変化率



(b) 相対動弾性係数



(c) P1 の 80 サイクル時の崩壊状

図(2) - 1 ポーラスコンクリートの凍結融解試験の結果

ない。

以上のことから、多孔質体であるポーラスコンクリートは、間隙が水で満たされた飽和状態であるのか、不飽和状態であるのかにより凍結融解抵抗性が異なり、凍結時に間隙中に水が満たされていなければ十分に凍結融解抵抗性を有すると考察できる。

(2) - 4 ポーラスコンクリートの熱的性質

ポーラスコンクリートの熱的性質については、飽和状態および不飽和状態の熱拡散率を測定し、その結果を踏まえて熱伝導率に対する考察を加える。ここで、本報では、供試体を 48 時間以上水中に浸漬し飽水させた状態を飽和状態、供試体を 48 時間以上空中に静置し間隙中の水を十分に取除いた状態を不飽和状態としている。

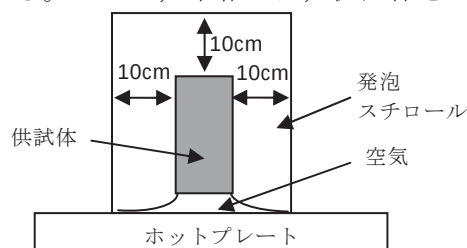
(2) - 4 - 1 熱拡散率の測定方法

1) 飽和状態 コンクリートの熱拡散率の測定方法としては、Glover 法が最も一般的である。本報においても、飽和状態については、建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室の研究成果（建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室，1994）を踏まえた Glover 法で行う。測定手順としては、材齢 28 日経過した供試体を温度 20℃の水槽内で一定温度にした後、温度 60℃の水槽内に移して供試体中心温度を測定する。次に、供試体中心温度が 20℃から 60℃に至る過程の時間を全測定時間で除し無次元化した上で、無次元時間 0.2～0.6 の範囲の熱拡散率の平均値を供試体の熱拡散率とする。

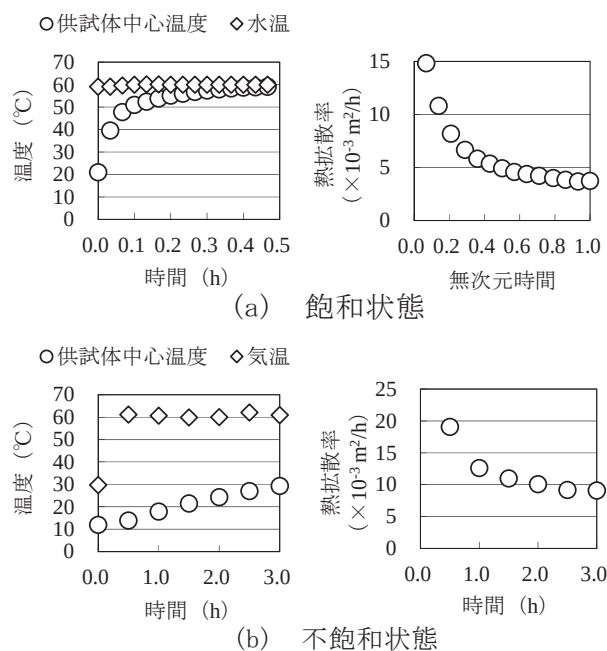
2) 不飽和状態 多孔質体であるポーラスコンクリートでは、Glover 法のように供試体を水中浸漬する測定条件では不飽和状態が再現できない。そこで、本報では、既往の研究（関ら，2008）を参考にし、円柱供試体の片方向の端面を除く全面を厚さ 10cm の発泡スチロールで囲い、ホットプレートを用いて露出している端面から一次元の熱を加えることで、式(1)から熱拡散率を評価する。図(2) - 2 に試験の概略図を示す。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \quad (2.1)$$

ここに、 $C(x, t)$ ：任意の位置 (x) および時刻 (t) における温度 (℃)， C_0 ：表面温度 (℃)， x ：表面からの深さ (cm)， t ：経過時間 (sec)， D ：熱拡散率 (m^2/h)， erf ：誤差関数



図(2) - 2 不飽和状態のポーラスコンクリートの温度測定



図(2) - 3 ポーラスコンクリートの温度変化

表(2) - 3 ポーラスコンクリートの熱拡散率 ($\times 10^{-3} \text{m}^2/\text{h}$)

飽和状態	不飽和状態
5.182 (1.00)	9.061 (1.75)

()：飽和状態の数値との比

試験に用いた供試体は、水温 20℃の水槽内で材齢 28 日まで水中養生し、事前に不飽和状態にしたものである。測定手順としては、まず加熱面に接する空気の温度がほぼ 60℃になるようにホットプレート进行调整し、供試体中心温度を測定する。次に、各時刻における供試体中心温度の実測値と式(2.1)の計算値との差の二乗平方和が最小となる熱拡散率を非線形最小二乗法により逆解析し、各時刻の熱拡散率を算出する。そして、収束値を供試体の熱拡散率とする。

(2) - 4 - 2 ポーラスコンクリートの熱拡散率と熱伝導率

ポーラスコンクリートの飽和状態の供試体中心温度と無次元時間の熱拡散率、不飽和状態の供試体中心温度と各時刻で算出した熱拡散率の時間変化を図 (2) - 3 に示す。また、各 3 本の供試体の測定値の平均値を表 (2) - 3 に示す。

普通コンクリートの熱拡散率は、材料の種類や配合などにより異なるが概ね $2 \sim 6 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{h}$ の範囲にあるとされている (西林ら, 2009; 徳田, 1984)。これを踏まえて考察を行うと、間隙が飽和状態のポーラスコンクリートの熱拡散率は、普通コンクリートとほぼ同じになることがわかる。また、間隙が不飽和状態のポーラスコンクリートの熱拡散率は、飽和状態に比べて 1.75 倍大きくなる。このことから、不飽和状態のポーラスコンクリートは飽和状態に比べて温度が変化しやすいことがわかる。

一方、本試験により評価した飽和状態と不飽和状態のポーラスコンクリートの熱拡散率を踏まえて、熱の伝わりやすさの熱的性質である熱伝導率を評価すると次のようになる。ここで、熱拡散率と熱伝導率の間には式(2.2)の関係がある (国分, 2002)。

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho c} \quad (2.2)$$

ここに、 α : 熱拡散率 (m^2/h)、 κ : 熱伝導率 ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)、 ρ : 密度 (kg/m^3)
 c : 比熱 ($\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$)

間隙を満たす水と空気の熱拡散率は、常温において水が $0.04 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{h}$ 、空気が $6.03 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{h}$ であり空気は水よりも約 150 倍大きい (日本熱物性学会, 2008)。また、熱伝導率は、水が $0.61 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ 、空気が $0.026 \text{ W}/\text{m} \cdot \text{K}$ であり空気は水よりも約 23 倍小さい (10)。これは、空気と水の密度 (空気 $1.18 \text{ kg}/\text{m}^3$ 、水 $996 \text{ kg}/\text{m}^3$) と比熱 (空気 $1.006 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$ 、水 $4.181 \text{ kJ}/\text{kg} \cdot \text{K}$) (日本熱物性学会, 2008) の違いによるものであり、空気は熱拡散率が大きいことから水よりも温度が変化しやすく、熱伝導率が小さいために熱が伝わりにくいことは、一般に知られていることである。したがって、水、空気の熱拡散率と熱伝導率の倍率の違いを踏まえても、ポーラスコンクリートの熱伝導率は、不飽和状態が飽和状態に比べて小さくなり、間隙中に水が保持されていなければ熱は伝わりにくくなることが考察できる。

参考文献

- 梶尾聡, 古屋貴之, 宇治公隆, 國府勝郎 (2007) : 流動性の異なるモルタルを用いたポーラスコンクリートの研究, コンクリート工学論文集 29(2), pp.289-294
- 西林新蔵, 小柳洽, 渡邊史夫, 宮川豊章 (2009) : コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, p.805
- 小尾聡, 田口史雄 (2003) : ポーラスコンクリートの耐凍害性に関する基礎的研究, 北海道開発土木研究所月報 598, pp.36-40
- 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室 (1994) : コンクリートの熱伝導特性に関する調査, 土木研究所資料 3245, pp.1-37
- 関俊力, 山田和夫 (2008) : コンクリートの熱伝導特性に及ぼす調合の影響, コンクリート工学年次論文集 30(1), pp.543-548

西林新蔵, 小柳治, 渡邊史夫, 宮川豊章 (2009) : コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp.484-485

徳田弘 (1984) : コンクリートの熱的性質, コンクリート工学 22(3), pp.29-37

国分正胤 (2002) : 土木材料実験, 技報堂出版, pp.307-310

日本熱物性学会 (2008) : 新編熱物性ハンドブック, 養賢堂, pp.65-75

(2) - 5 ポーラスコンクリートの透水性能

透水性試験は, アスファルト現場透水試験器 (LA-206 : 三洋試験機工業株式会社製) によりポーラスコンクリートの透水量を測定することで評価を行った。なお, 試験は, フリュームの補強効果で使用した供試品を使用し, ポーラスコンクリートの厚さの違い及び底版並びに側壁について試験を実施した。

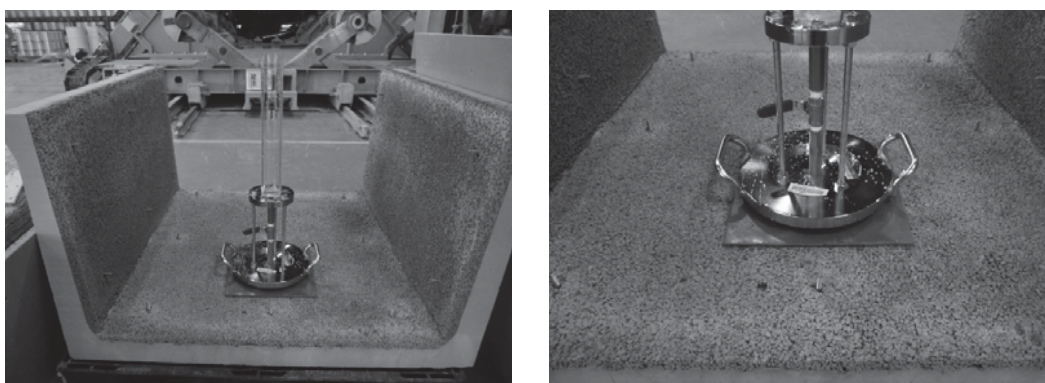


図 (2) - 4 透水性試験概要図

水路側壁背面からの地下水による浸透量 Q は, 水路高 $L=200\text{cm}$, 開水路背面土の地下水位を地表面とした場合の浸出面に対する圧力水頭 $h=200\text{cm}$, コンクリートの透水係数 $k_s=3.0 \times 10^{-9}\text{cm/sec}$, 浸出面積 $A=20,000\text{cm}^2$ (水路高 $200\text{cm} \times$ 奥行き 100cm) であると仮定し, 式[1]から $Q=5.2 (\text{cm}^3/\text{日})$ と試算しているが, それに対し今回の確認試験で得られたポーラスコンクリートの透水量は $1000 (\text{cm}^3/15 \text{ 秒})$ 以上であり, 想定している浸透量に比べ遙かに大きいことから, 問題なく側壁背面からの浸透水を排出できることを確認した。

表 (2) - 4 透水性確認試験の結果

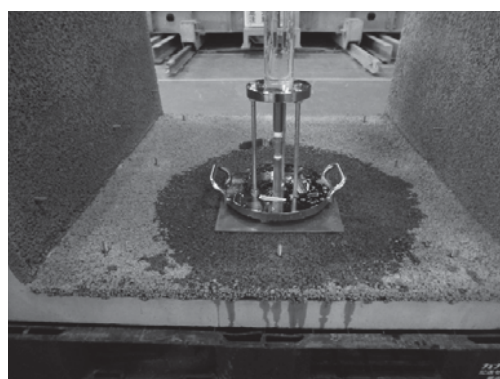


図 (2) - 5 透水性確認試験の状況

ボラコンの厚さ (mm)	測定箇所	流下時間				透水量 ($\text{cm}^3/15 \text{ 秒}$)
		2回目 (秒)	3回目 (秒)	4回目 (秒)	平均値 (秒)	
30	底版	4.44	4.42	4.53	4.46	1344.3
	側壁	4.87	4.79	4.79	4.82	1245.7
50	底版	4.98	4.87	4.98	4.94	1213.8
	側壁	5.20	5.43	5.40	5.34	1122.9
70	底版	5.23	5.32	5.42	5.32	1127.1
	側壁	5.51	5.63	5.81	5.65	1061.9

$$Q = A \cdot V \quad V = k_s \cdot h / L \quad \text{より}$$

$$Q = A \cdot k_s \cdot h / L \quad [1]$$

(3) 側壁天端の補修

(3) - 1 要求事項

側壁天端の使用材料に求められる要求は、以下のとおりである。

- ①耐水性に優れる。
→屋外環境下にて水路側壁上部に使用されるため、耐水性は必要となる。
- ②耐候性に優れる。
→1年中屋外に暴露された環境下にて設置されるため、耐候性は必要となる。
- ③耐食性(耐アルカリ性)に優れる。
→水路の主要材料であるコンクリートと接するため、耐アルカリ性は必要となる。
- ④取り扱いが容易で、施工性に優れる。

(3) - 2 側壁天端に使用する材料の設定

側壁天端に使用する材料は、上記要求事項を満足できる材料としては、FRPM 板の主要材料である FRP に決定した。理由としては、FRP 製品は、船舶並びに水輸送管等古くから多方面で使用されている実績がある。また、屋外に暴露された条件下での使用実績も多く、プラスチック材料特有の耐食性にも優れているためである。

参考までに、(財)新エネルギー財団にて、FRPM 管並びに FRP 板について、サンシャインウェザーメータによる耐候性試験を実施した結果、6000 時間(60 年相当)においても、表面はわずかに黄変するものの、強度劣化は認められなかったと報告されている。

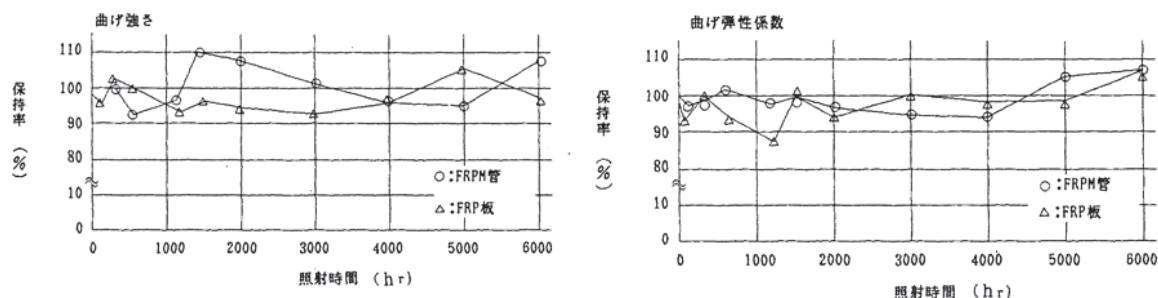


図 (3) 試験結果例(右：曲げ強さ、左：曲げ弾性率)

(4) 合成構造の断面設計

(4) - 1 はじめに

水路更生工法は、既設躯体コンクリートに 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コンクリート躯体に対する補強効果（構造的耐力の回復または向上）を目指すものである。

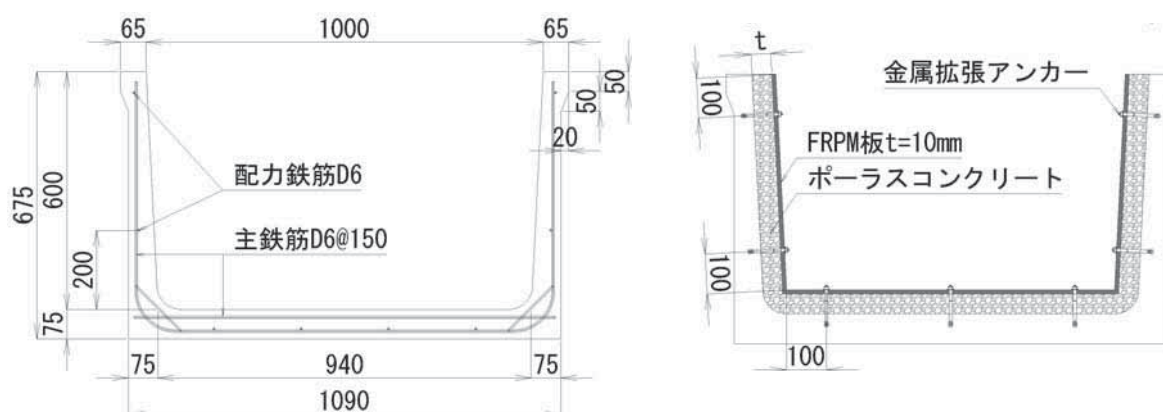
本章では、フリューム供試体および梁供試体による載荷実験を行うとともに、梁供試体による載荷実験の数値解析を試み、その上で仮想開水路に対する補強効果を検証した結果について示す。

(4) - 2 載荷実験

(4) - 2 - 1 フリューム供試体による載荷実験

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、中込材として使用するポーラスコンクリートの厚さの違いによる補強効果への影響を検討するため、ポーラスコンクリートの厚さを 30mm、50mm 及び 70mm の 3 種類で作成した（図（4） - 1）。

なお、FRPM 板の厚さは 10mm とし、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た上で配合を決定している（表（4） - 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（4） - 1 フリューム供試体の形状寸法

表 (4) - 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	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(京都府亀岡産の碎石 7 号，密度 2.70g/cm³)

載荷実験は，JIS A 5363 (2010) に準拠して行った。図 (4) - 2 に示すように供試体を設置し，長手方向に一様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時の荷重を記録した。図 (4) - 3 に試験後の供試体状況を示す。

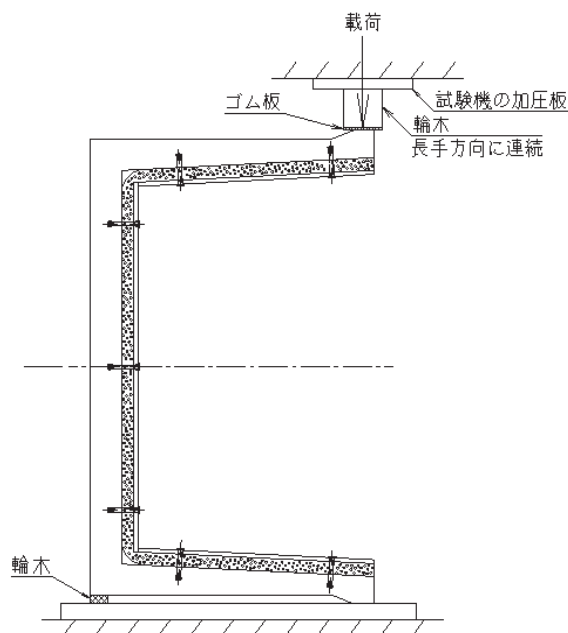


図 (4) - 2 フリウム供試体による
載荷実験方法

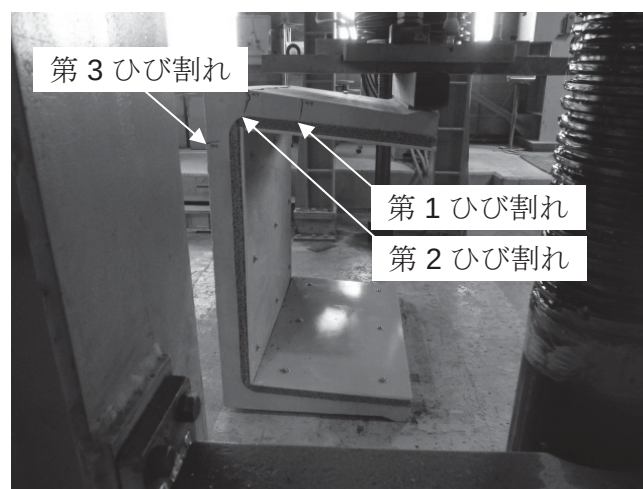


図 (4) - 3 試験後のフリウム
供試体状況

ひび割れの発生順序および発生位置は、補強なしと補強ありで同じであった。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、応力集中が生じた影響と考えられる。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（4）－ 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において最も顕著であり、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。この要因については次項において考察を加えることとする。

表（4）－ 2 フリューム供試体による載荷実験の荷重値比較

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)

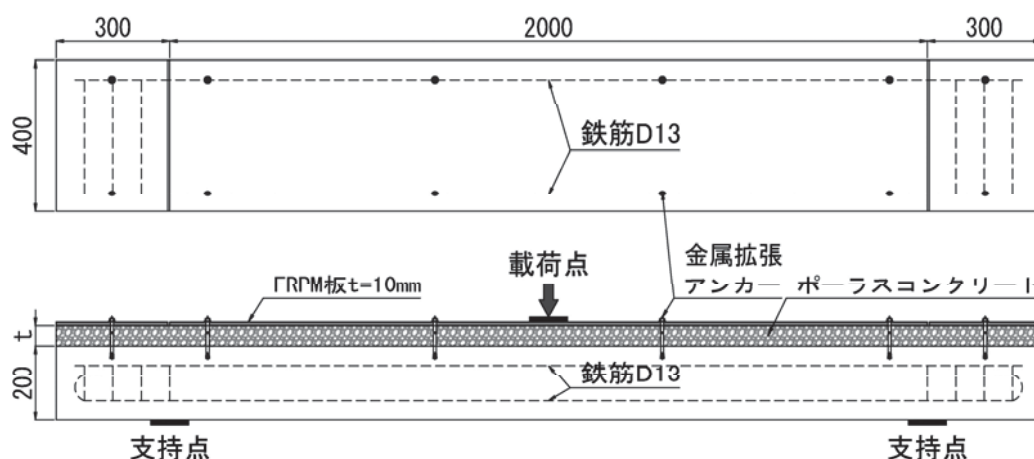
※t はポーラスコンクリート厚さを示す

※単位：kN、()内は補強なしを1とした場合の荷重の比率を示す

（4）－ 2－ 2 梁供試体による載荷実験

フリューム供試体の載荷実験により、ポーラスコンクリートと FRPM 板との合成構造による補強効果が確認された。本工法を凍害劣化したコンクリート開水路に適用した際の補強効果を、数値解析により検証することを目的に、まず単純化した梁の供試体を用いた載荷実験を行い、次に数値解析により同定した部材境界のパラメータを踏まえて、仮想開水路における補強効果を検証した。ここでは、梁供試体による載荷実験の概要を示す。

梁供試体は幅 400mm、高さ 200mm、スパン 2,000mm の矩形 RC 梁とし、補強した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。ここで、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 及び 70mm の 3 種類とし、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）－ 4）。



図（4）－ 4 梁供試体による載荷実験方法

実験の結果、補強ありの供試体において、各部材の境界面で軸方向の滑り、FRPM 板－ポーラスコンクリートの境界面で剥離開口が確認された（図（４）－５）。補強ありと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 倍向上するが、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い（

表（４）－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されており、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が大きくなることで合成効果が低減し、その結果として補強材と梁の接触界面におけるせん断剛性が低下するためと考えられる。

この結果は、フリュー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の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付着による合成作用が耐力に寄与するが、荷重－変位の増加とひび割れの進展に伴い、躯体とポーラスコンクリートの付着あるいはポーラスコンクリート骨材間の付着が途切れ、アンカーの変形の影響を受けるようになったと考えられる。



図（４）－５ 部材境界面における滑り・開口（ポーラスコンクリート厚さ $t=70\text{mm}$ ）
（左：載荷前，右：載荷後）

表（４）－３ 補強前後の最大荷重値の比較

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

※ t はポーラスコンクリート厚さを示す

※実験結果は 3 体の平均値を示す

(4) - 3 数値解析

(4) - 3 - 1 梁供試体の同定解析

数値解析には 2 次元非線形有限要素解析コード WCOMD を用いた。図 (4) - 6 に解析モデル (要素分割図) を示す。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, ポーラスコンクリート梁上面の要素間には, 接触・剥離や滑りを考慮できるジョイント要素を配置した。解析はスパン中央部に単調増加の強制変位を与えた。

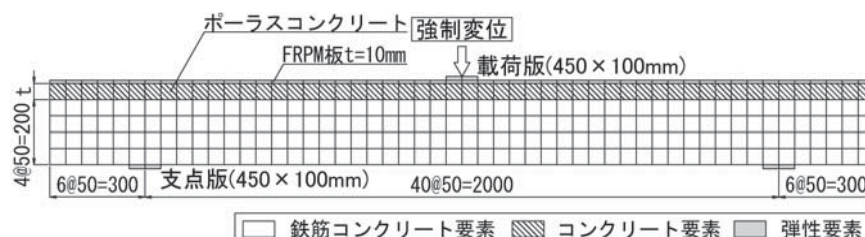


図 (4) - 6 梁供試体の解析モデル

材料構成則には, 岡村・前川ら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 (岡村ら, 1991) 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 (表 (4) - 4) とした。

表 (4) - 4 構成材料の物性値 (梁供試体の同定解析)

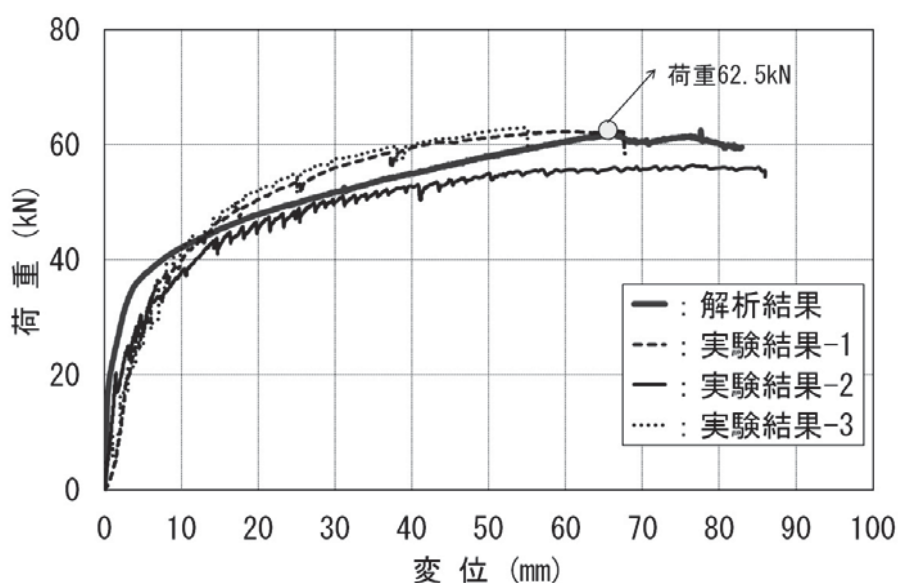
コンクリート (普通コンクリート)	単位体積重量	23.2 (kN/m ³)
	圧縮強度	36.0 (N/mm ²)
	弾性係数	30.6 (kN/mm ²)
	ポアソン比	0.2
鉄筋(SD345)	引張降伏強度	398 (N/mm ²)
	弾性係数	200 (kN/mm ²)
ポーラスコンクリート	単位体積重量	20.0 (kN/m ³)
	圧縮強度	33.7 (N/mm ²)
	弾性係数	26.7 (kN/mm ²)
	ポアソン比	0.2
FRPM 板	単位体積重量	19.6 (kN/m ³)
	弾性係数	15.9 (kN/mm ²)
	ポアソン比	0.3

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, 境界面の付着挙動 (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, 荷重-変位関係の変曲点となる変位 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 (4) - 5)。ポーラスコンクリート厚さ 30mm とした場合の载荷点位置の荷重-変位関係を図 (4) - 7 に示す。

表（４）－ 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
供試体～ ポーラコンクリート境界	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 $\text{N/mm}^2/\text{mm}$, 接触剛性 $\text{kN/mm}^2/\text{mm}$



図（４）－ ７ 荷重－変位関係（ポーラスコンクリート厚さt=30mm）

（４）－ ３－ ２ 仮想開水路における補強効果の検証

梁供試体の同定解析結果をもとに、本工法の仮想コンクリート開水路に対する補強効果を数値解析的に検証した。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、補強後の主応力度を比較評価した。

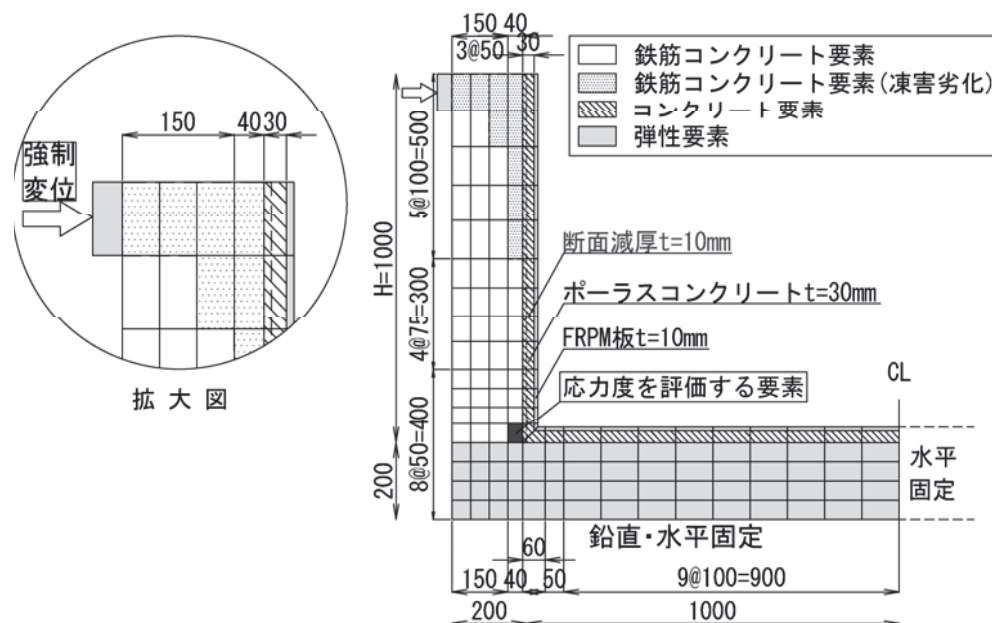
健全状態の躯体におけるコンクリートおよび鉄筋の物性値は、土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「水路工」（2001）における一般値とした。

劣化後は、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した。ここで、凍害劣化した領域の物性値は、既往の研究成果（周藤ら、投稿中）による相対動弾性係数との関係式を用いて設定した。

補強後は、劣化後の状態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 を配したものである。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）により得たものである。

図(4)－8に補強後の開水路を模擬した解析モデルを、表(4)－6に構成材料の物性値を示す。



図(4) - 8 補強後の開水路を模擬した解析モデル

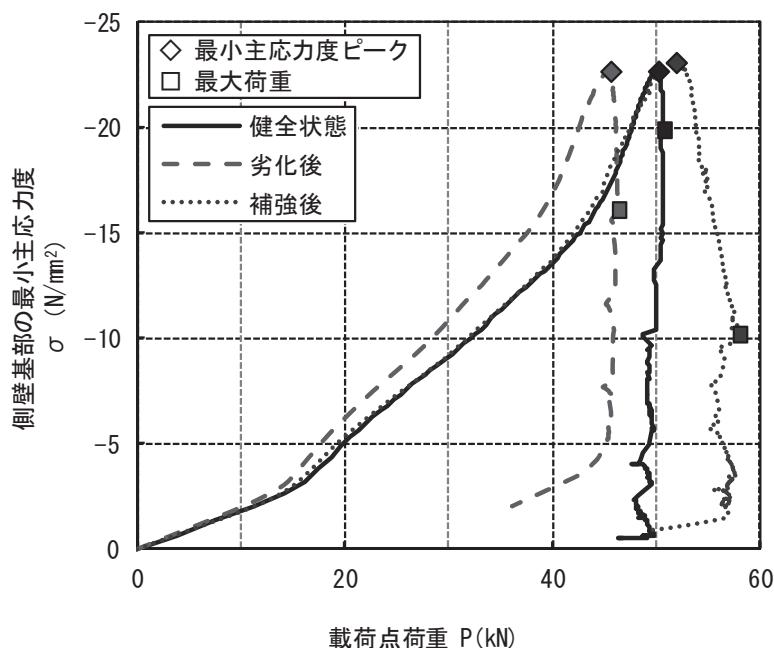
表（４）－ ６ 構成材料の物性値（仮想開水路の補強効果検証）

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

図（４）－ ９に載荷点位置の荷重－側壁基部の最小主応力度の関係を比較して示す。

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（４）－ 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（４）－ ９ 荷重－側壁基部最小主応力度の比較

表（４）－ 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	50.1 kN (1.00)	45.5 kN (0.91)	51.8 kN (1.03)
最大荷重	50.7 kN (1.00)	46.3 kN (0.91)	57.9 kN (1.14)

※()内は健全状態を 1 とした場合の荷重の比率を示す

(参考文献)

JIS A 5363 (2010) : 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

岡村甫, 前川宏一 (1991) : 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版

農林水産省農村振興局 (2001) : 土地改良事業計画設計基準 設計「水路工」基準書
技術書

周藤将司ら (投稿中) : 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

(5) FRPM板の脱着機構

本工法は、既設水路の内面に所定の隙間を設けた状態で FRPM 板を固定し、既設水路と FRPM 板の隙間に排水性に優れた中込材を充填する工法である。本工法で使用するアンカーは「あと施工アンカー」に属するものを使用し、既設水路に固定するものとする。

(5) - 1 要求事項

アンカーに求められる要求は以下のとおりである。

- ①汎用品であること
- ②耐水性(耐腐食性)に優れること
- ③締結については、特別な工具を使用しないこと
- ④繰り返し脱着することができ、その構造は容易であること

(5) - 2 アンカーの選定

アンカーについては、施工性を勘案し、金属拡張式アンカーを使用するものとする。金属拡張式アンカーとは、施工方式、固着方式により、金属拡張アンカーとその他の金属系アンカーに分類されている。また、金属拡張アンカーは、その施工方法により打込み方式と締付け方式に分類され、さらにそれらを作動形式により図(5) - 1のように分類される。本工法では、図(5) - 1に示した金属系アンカーの分類において、その施工性の良さから、芯棒打込み式のアンカーを採用するものとする。



図(5) - 1 金属系アンカーの分類※

※あと施工アンカー技術資料 ((社)日本建築あと施工アンカー協会) から引用

(5) - 3 形状の決定

アンカーの形状は、以下の要求事項を満足し、さらに、パネル工法として多数実績のある FRPM 板ライニング工法で使用しているアンカーを考慮し、表 (5) - 1 の形状とした。

要求事項①：汎用品であること

→アンカーは、既存製品である拡張子打込み型である芯棒打込み式の金属拡張式アンカーを採用する。

要求事項②：耐水性(耐腐食性)に優れること

→材質は、ステンレス製(SUS304)を使用するものとする。

要求事項③：締結については、特別な工具を使用しないこと

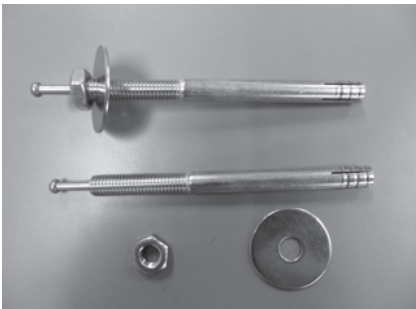
→市販の工具であるラチェットレンチ等にて締結できる構造とする。

要求事項④：繰り返し脱着することができ、その構造は容易であること

→ナットにて FRPM 板を締結することで、簡便な構造であり、繰り返し脱着することができる。

以上から、アンカーは表 (5) - 1 の形状に決定した。

表 (5) - 1 アンカーの形状決定

芯棒打込み式 金属拡張式アンカーボルト	材質：SUS304 寸法：φ8 ナット：M8用低頭ナット ワッシャー：幅広タイプ (外径：φ30) その他：止水ゴム	
--------------------------------	---	--