

令和 3 年 6 月 3 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H02299

研究課題名（和文）積雪寒冷地における農業水利施設の新たな凍害検診技術と余寿命評価手法の開発

研究課題名（英文）Development of New Screening Diagnosis of Frost Damage and Method of Remaining Life Assessment for Irrigation and Drainage Facilities in Cold Regions

研究代表者

緒方 英彦（OGATA, Hidehiko）

鳥取大学・農学部・教授

研究者番号：90304203

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、積雪寒冷地の開水路を対象に、凍害の発生過程および発生位置の特定、定量的な余寿命評価を行うための新たな指標の探索に関する研究を実施し、次の成果を得た。2018年度は、コンクリート表面のモルタル層がスケーリング抵抗性に及ぼす影響、凍害劣化が進行すると溶出したカルシウムが結晶化することで閉塞した気泡が存在することを明らかにした。2019年度は、微視的観察により気泡およびひび割れを閉塞している析出物がエトリンガイトであること、およびその環境要素を明らかにした。2020年度は、エトリンガイトによる気泡の閉塞に伴う気泡径分布の変化を指標とする凍害検診手法と余寿命評価の妥当性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

積雪寒冷地では、農業に身近な存在である水が劣化因子となる凍害が多く、多くの農業水利施設に発生しており、自然災害が発生した際の施設の大規模な機能喪失、破壊が懸念されている。特に水路については、積雪寒冷地に位置するのは全体の約4割にも及ぶことから、我が国におけるインフラ長寿命化計画を推進する上でも、積雪寒冷地における農業水利施設を対象にした凍害検診技術と余寿命評価手法を開発する重要性は高い。本研究課題では、既存の診断手法を進展させた凍害検診および適切な余寿命評価手法を行うための新たな指標を突き止めた。これにより、農業水利施設の対策として取り組まれる補修あるいは改築の適正な判断ができるようになる。

研究成果の概要（英文）：In this study, studies on the search for new indicators for identification of the process and location of frost damage, and quantitative remaining life evaluation of an open channel in cold regions were carried out. Effect of mortar layer on concrete surface on scaling resistance, and the calcium that leaches into the air-voids near the inner surfaces of cracks and recrystallizes, air-voids were blocked were cleared by a study in 2018. The precipitates were composed of ettringite by microscopic observations were cleared by a study in 2019. The validity of a frost damage screening method has been developed that uses the change in air-void structure as an index due to precipitates of air-void by ettringite, and the remaining life evaluation were evaluated by a study in 2020.

研究分野：農業造構学

キーワード：農業水利施設 凍害検診 余寿命 気泡 微視的観察 炭酸化 暴露試験

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

「強くしなやかな国民生活の実現を図るための防災・減災等に資する国土強靱化基本法（平成25年12月11日法律第95号）」に基づく「国土強靱化基本計画（平成26年6月3日閣議決定）」の策定は、大規模自然災害等から国民の生命や財産を保護し、国民生活及び国民経済を守ることに、国をあげて取り組む姿勢を強く示したものである。そして、農林水産省においても、「インフラ長寿命化計画（平成26年8月）」が策定され、その行動計画から、インフラの維持管理・更新等を着実に推進するための中期的な取り組み（計画期間は平成32年度まで）の方向性が示された。頭首工、ダム、水路などの農業水利施設は、農業生産、国土保全、地域振興を図る上で不可欠なインフラであることから、災害リスクを考慮してこれら施設の長寿命化を図り、確実に次世代へ継承するための研究の取り組みが必要となっている。

大規模自然災害等に対する農業水利施設の被災の状況は、その時に施設に生じている変状の程度、保有している耐力の程度により異なる。耐力が高い施設は災害に耐えられるが、低い施設は耐えられない。つまり、防災、減災を図るためには、施設の変状、保有している耐力を適正に把握することが重要になる。特に、北海道・東北だけでなく西日本の山間部を含めた広い地域も該当する積雪寒冷地では、農業に身近な存在である水が劣化因子となる凍害が多くの農業水利施設に発生しており、通常の供用環境下でも施設の耐力が低下していることから、自然災害が発生した際の施設の大規模な機能喪失、破壊が懸念されている。積雪寒冷地に位置する農業水利施設は数多く、例えば国内の水路の中で積雪寒冷地に位置するのは約4割にも及ぶことから、我が国におけるインフラ長寿命化計画を推進する上でも、積雪寒冷地の農業水利施設に特化した研究の重要性は高い。

現在までに農業水利施設の変状、保有している耐力を評価するための機能診断手法は各種開発されてきたが、既存の手法は施設の健康診断（健康か否かの診断）に留まっており、施設の余寿命に関わる主たる変状（病巣）を検診（病理診断）により特定し、余寿命に見合う対策（治療）方針を決めるレベルまでには至っていない。積雪寒冷地の農業水利施設の凍害で換言するならば、現在までに確立されてきた凍害診断手法は、凍害による劣化の事象は評価できるが、対策（補修、補強、更新）の方針を判定することができない。特に、既存の施設を活かす補修と補強に対して、既存の施設を撤去し新たな施設を建造する更新の判定の根拠となる診断手法を確立することは、農業水利施設を構成要素とする地域の農業水利システムを次世代に継承するためにも重要である。

2. 研究の目的

農業水利施設の部材は、長さ比べて厚さが薄いという構造的特徴がある。代表的なのが開水路の側壁である。この壁状部材に積雪寒冷地に特有の凍結融解の繰返し作用すると、最終的にはひび割れおよび表面からコンクリートが剥離するスケーリングが発生し、構造物の耐久性だけでなく、構造安全性も低下する（図1）。また、部材内部には、側壁を縦に割るような部材厚方向に対して層状のひび割れ（図2）が発生することが研究代表者らのこれまでの研究によって明らかになっている。研究代表者や他の研究者がこれまでに確立してきた凍害診断は、部材表面から実施する非破壊試験などであったために部材内部における局所的な凍害劣化位置の特定ができず、特に凍害が顕在化していない潜伏期の評価および余寿命の定量的評価、そして対策の判定まで行うことができない。これが最大の課題となっている。そこで、本研究の目的は、凍害の位置を特定し、余寿命評価を定量的に行うための指標を探索して定義し、対策の方針を判定するための凍害検診技術を確立することである。



図1 開水路側壁における凍害の変状

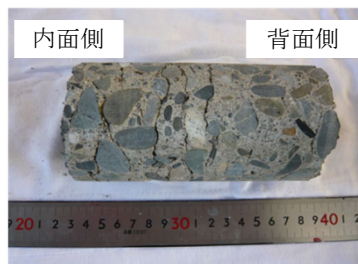


図2 開水路側壁における凍害の内部変状

3. 研究の方法

本研究課題の目的を達成するために、まず、実際の積雪寒冷地にある開水路側壁からコアを採取するとともに、側壁の表面部から薄層を採取し、自然環境下で長期間供用されてきたコンクリートの変質をマクロ的視点（ひび割れ発生位置や弾性波速度の変化位置）、ミクロ的視点（元素分布や微視的観察）から分析した。また、この分析から得られる知見を踏まえ、自然環境下でのコンクリートの変質の過程を明らかにするための暴露試験を開始した。次に、新たな分析試料を加えて、コンクリートの変質が生じる要因を明らかにするとともに、凍害検診の指標と成り得るマーカーを特定した。そして、この特定した指標による余寿命評価および対策の方針の判定について検証した。

4. 研究成果

(1) 自然環境下で長期間供用されてきたコンクリートの変質

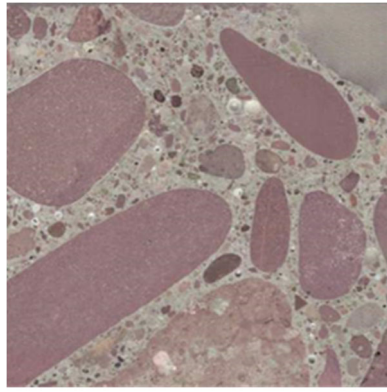


図3 分析試料の可視画像

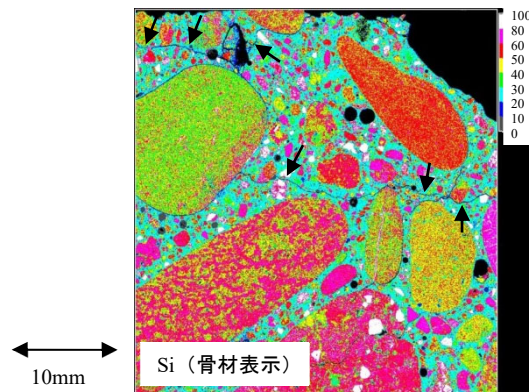


図4 EPMAによる面分析画像

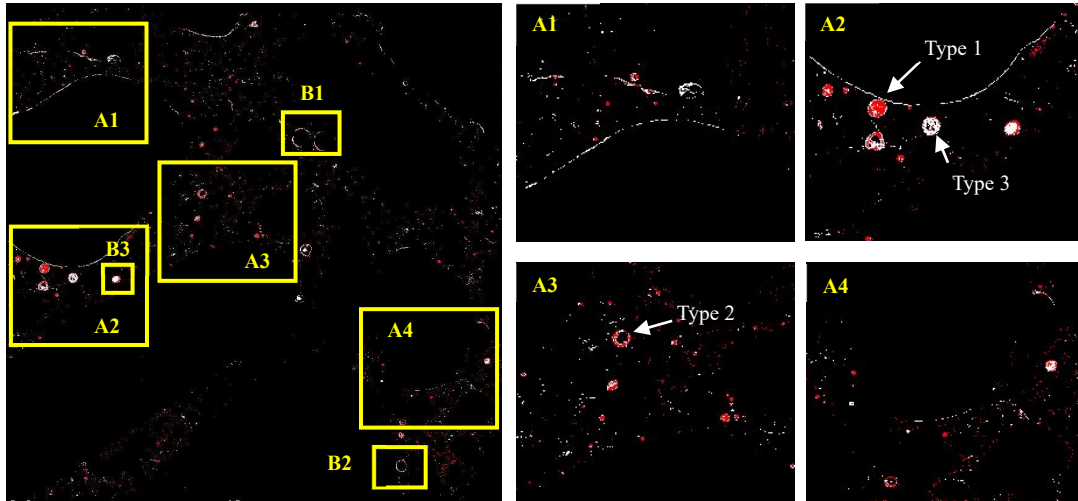


図5 試料における硫黄濃度とカルシウム濃度が高い箇所の分布

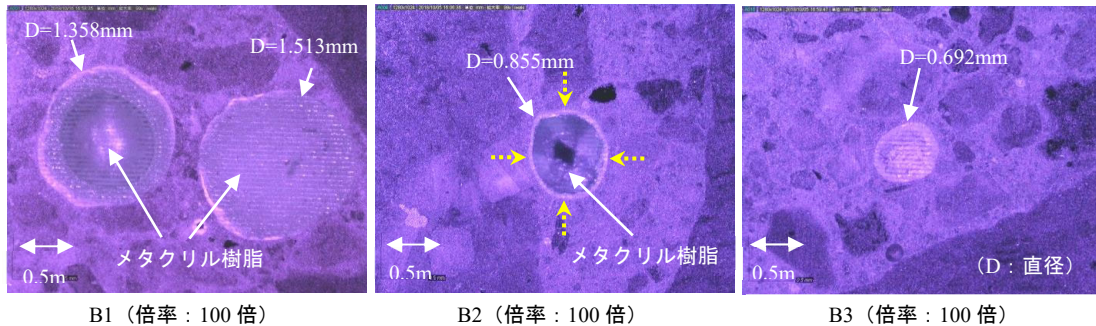


図6 試料における硫黄濃度が高い箇所の気泡の状態

積雪寒冷地で長期供用された開水路を対象に、凍結融解と乾湿の繰返しを受ける側壁の気中部からコアを採取し、JSCE-G 574 : 2013 (EPMA 法によるコンクリート中の元素の面分析方法(案))に準拠した面分析を行い、コンクリートの変質を分析した。図3に分析試料の可視画像、図4に EPMA による面分析画像のうち、ケイ素濃度の画像を示す。ケイ素濃度の画像において 20mass%以下の濃度の低い箇所には、水が侵入、移動できるひび割れが発生しており、このような箇所は線状で見られる(図4の黒色矢印)。このことから、試料には、凍結融解の繰返し作用によるひび割れが発生し、ひび割れ箇所でカルシウム溶脱が生じていることが推察される。ひび割れの周囲を注意深く確認すると、硫黄濃度およびカルシウム濃度の高い箇所が点状で見られる。また、EPMA の面分析に用いた試料を目視で確認したところ、該当箇所に気泡らしき円形の空隙が見られた。そこで、硫黄濃度とカルシウム濃度がともに高い箇所を詳細に検討するために、硫黄濃度が 6mass%以上のピクセルを白色の単色に、カルシウム濃度が 37.5mass%以上のピクセルを赤色の単色にして、両画像を合成してみた。合成画像を図5に示す。また、図中には、A1~A4の領域を拡大した画像も合わせて示す。合成画像からは、硫黄の白色の円の内部がカルシウムの赤色で占められている箇所 (Type 1)、白色の円と赤色の円が重なるように分布している箇所 (Type 2)、白色が円盤状に分布している箇所 (Type 3) があり、いずれにおいても大小様々な硫黄の円が見られ、その内部および周囲にカルシウムが見られた。紫外線照射による顕微鏡で撮影したのが図6である。B1およびB2では、円状に白色の帯が見られ、その内部は試料の調整の際に用いた半透明のメタクリル樹脂で充填されていたことから、EPMA 分析試料調

整前の状態としては円形の空隙であったことがわかる。つまりは、円形で硫黄濃度が高くなっている箇所は気泡である。

本研究の結果として、表面部では、凍結融解の繰返し作用で発生したひび割れを通して水が侵入し、ひび割れ周囲でのカルシウムの溶脱、ひび割れを介して侵入した二酸化炭素によるカルシウムの結晶化および硫黄の拡散が見られ、内部では、ひび割れ近傍の気泡内部に溶出したカルシウムが結晶化しており、閉塞した気泡が存在することが明らかになった。

一方、積雪寒冷地で長期供用された開水路側壁の表面部から薄層を採取し、コンクリートの表層部の状態とスケーリングの関係および薄層の形成について考察を加えた。その結果、薄層の厚さは、粗骨材かぶりとはほぼ同じであること、薄層は凍結融解の繰返し作用を主たる要因とする層状ひび割れが表面部に発生したものであることを明らかにした。また、本研究において、コンクリート表層のモルタル領域を粗骨材かぶりと定義し、測定方法を独自に定めた。粗骨材かぶりは、狭義の意味として「コンクリート中の粗骨材とコンクリート表面の最短距離」、広義の意味として「各測定箇所におけるコンクリート中の粗骨材とコンクリート表面との平均距離」と定義して、JISA1152:2011「コンクリートの中性化深さの測定方法」を参考に測定方法を策定した。

(2) 凍害検診の指標の特定および凍害検診手法

採取コアを対象にした EPMA による元素の面分析結果から、側壁内部のひび割れ近傍にある気泡が硫黄およびカルシウムを主成分とする析出物で閉塞していることが明らかになった。そこで、この析出物を特定するための研究を実施した。新たに開水路の側壁気中から採取したコアに対して、EPMA による元素の面分析を行うとともに、走査型電子顕微鏡 (SEM) およびエネルギー分散型 X 線分光法 (EDX)、粉末 X 線回折法 (XRD) の測定結果から、気泡およびひび割れを閉塞している析出物の特定を行った。SEM による気泡の観察結果を図 7 に示す。C1 は空の気泡、D1 は内部に析出物が存在する気泡である。C1 の内面は概ね滑らかであるが、ひび割れが発生している箇所の近くには拡大画像に示すように僅かに蟹肉状結晶が見られる。この蟹肉状結晶は、エトリングタイトの生成途中の段階であると考えられている。一方、D1 は、結晶でほぼ埋めつくされており、拡大画像から針状結晶であることがわかる。EDX による元素分析の結果を表 1 に示す。表におけるセメントは試料中におけるセメントペースト部、気泡内面は空の気泡の滑らかな箇所、気泡結晶は結晶が存在する気泡の結晶箇所、ひび割れ結晶はひび割れ内の結晶である。原子数濃度は、気泡内面がセメントとほぼ同じであるのに対して、気泡結晶とひび割れ結晶は明らかに異なる。気泡結晶の原子数濃度の比は $Ca : S : Al = 47 : 22 : 15$ 、ひび割れ結晶は $Ca : S : Al = 53 : 25 : 17$ であり、エトリングタイト ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$) における $Ca : S : Al = 6 : 3 : 2$ とほぼ同じであることがわかる。以上の SEM による結晶の形態および EDX による原子数濃度の比から、気泡およびひび割れを閉塞している析出物は、結晶の形態および原子数濃度からエトリングタイトであることが明らかになった。また、気泡およびひび割れにエトリングタイトが生成したのは、ひび割れ周囲からのカルシウムイオンの溶脱と炭酸化領域からの硫酸イオンの移動が関係していると推察した。

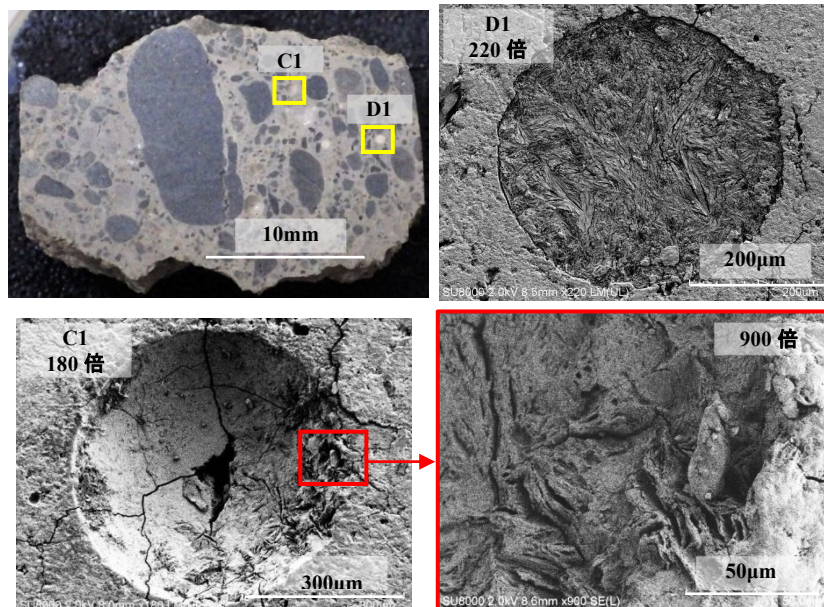


図 7 気泡の SEM 画像

表 1 EDX による元素濃度

元素	標準試料	原子数濃度(at%)			
		セメント	気泡内面	気泡結晶	ひび割れ結晶
Na	Albite	0.81	0.46	0.34	0.21
Mg	MgO	6.61	1.81	0.21	0.13
Al	Al ₂ O ₃	7.88	5.00	14.69	16.94
Si	SiO ₂	36.20	38.42	5.82	4.51
S	FeS ₂	0.78	0.51	21.81	25.46
Ca	Wollastonite	44.32	51.91	46.90	52.60
Fe	Fe	3.41	1.89	0.22	0.14

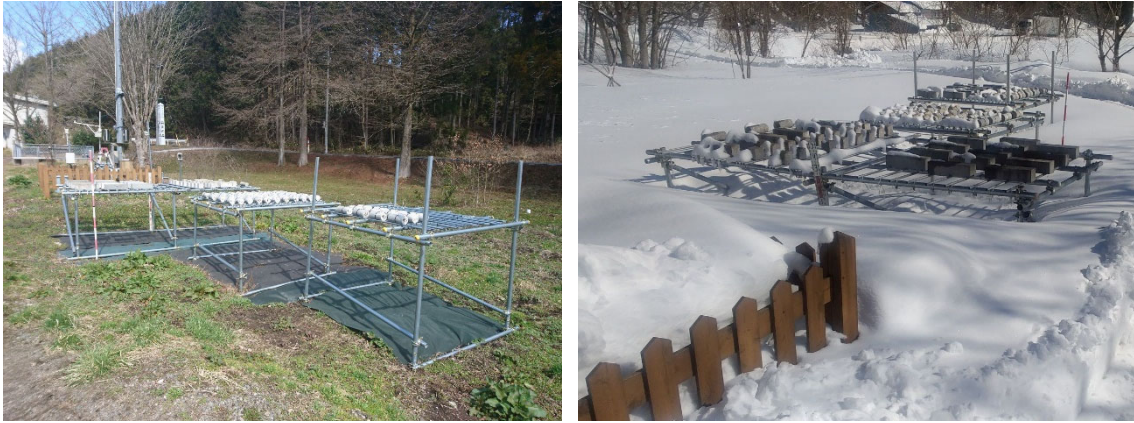


図8 蒜山暴露試験場での暴露試験の状況

本研究により、凍害が生じているコンクリートでは、耐凍害性の確保において重要になる気泡にひび割れが発生し、気泡がエトリンナイトにより閉塞していることが明らかになった。この気泡の変質は、コンクリートの凍結融解抵抗性の担保となる気泡間隔係数が実環境下で変化していることを表しており、構造部材としてのコンクリートの耐凍害性に影響を及ぼしていると考えられる。これまでの耐凍害性の評価は、凍結融解の繰返し作用によるひび割れの発生に基づく相対動弾性係数の変化、飽水度の変化により行われてきたが、本研究の知見として、新たに気泡径分布の変化を加えるべきであることが明らかになった。また、気泡径分布の変化のもととなる気泡の閉塞そのものが、余寿命評価における指標として有用であることが明らかになった。気泡の閉塞割合と残存耐凍害性の関係を明らかにするためには、これから更に試料の分析数を増やす必要があるが、余寿命評価を行うための基礎は本研究により構築できたと考えられる。一方、凍害劣化した構造物における補修と改築・更新の判定基準は今のところ定められていない。補修により耐久性の回復と向上を果たすことができる状態であるのかないのかの判断は、構造物の長寿命化対策において重要になる。ひび割れであるならば補修の対象になるが、気泡を補修することはできない。したがって、気泡の状態を分析し、気泡の閉塞の有無を確認することは、対策の方針を判定する材料になり、この対策の判定方針を本研究により提案することができた。

(3) 暴露試験

自然環境下における凍害劣化の実際を解明するために暴露試験を開始した。長期間に渡る観察および測定を実施することになる暴露試験では、初期段階における設計が重要となる。本研究においては、暴露架台の設置を始めとして、供試体の作製、初期値の測定を実施し、今後数十年に渡って本試験が円滑に遂行できるよう計画し、整備した。暴露試験場は、岡山県真庭市に位置する鳥取大学農学部附属フィールドサイエンスセンター教育研究林(蒜山の森)($35^{\circ} 17'15.5''N$, $133^{\circ} 35'13.1''E$)に整備した。鳥取大学の附属施設であることから、長い年月の試験が可能である。この教育演習林には、気象観測装置が設置してあり、気温、相対湿度、気圧、風速、風向、日射量、降水量、降雪量のデータを入手することができる。また、冬期間には定点カメラを設置し、降雪や融雪状況、供試体の暴露状況を確認することができる。暴露試験の状況を図8に示す。暴露している供試体は、粗骨材かぶりがスケーリング抵抗性に及ぼす影響を評価するための粗骨材かぶりを変えた供試体、気泡の閉塞過程を明らかにすることを目的として標準水中養生(水温 $20 \pm 1^{\circ}C$)した供試体、荷重によりひび割れを導入した供試体および凍結融解融解試験(A法)により相対動弾性係数を低下させた供試体である。

本研究では、凍害劣化による気泡の閉塞の事実を突きとめることはできたが、その過程までは追及できていない。今回計画し、開始した暴露試験を通してこの点は解明していく予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 西田真弓, 石神暁郎, 緒方英彦	4. 巻 41
2. 論文標題 寒冷地のコンクリート開水路における表面保護工法適用後の補修効果の検証	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 833 ~ 838
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Ogata Hidehiko, Hyodo Masahiro, Ishigami Akio, Atarashi Daiki	4. 巻 30
2. 論文標題 A Study on Electron Probe Microanalysis of Concrete Deterioration in Aging Open Channels in Cold Regions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Concrete Research and Technology	6. 最初と最後の頁 53 ~ 63
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/crt.30.53	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 武美伸宗, 酒井麻愛, 緒方英彦, 兵頭正浩, 石神暁郎	4. 巻 1
2. 論文標題 積雪寒冷地で長期供用された開水路におけるコンクリートの変質	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 自然環境下のコンクリート劣化に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 221-228
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 石神暁郎, 西田真弓, 蒔苗英孝, 佐藤 智, 周藤将司, 緒方英彦	4. 巻 86(6)
2. 論文標題 寒冷地の劣化特性に対応したコンクリート施設機能診断手法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 農業農村工学会誌	6. 最初と最後の頁 27 ~ 30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ogata Hidehiko, Hyodo Masahiro, Ishigami Akio, Atarashi Daiki	4. 巻 31
2. 論文標題 A Study on Precipitates in Air Voids and Cracks of Concrete in Aging Open Channels in Cold Regions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Concrete Research and Technology	6. 最初と最後の頁 23 ~ 32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3151/crt.31.23	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 西田真弓, 石神暁郎, 緒方英彦	4. 巻 88(6)
2. 論文標題 寒冷地の開水路における表面保護工法適用に際する一提案	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 農業農村工学会誌	6. 最初と最後の頁 23 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 武美伸宗, 緒方英彦, 兵頭正浩, 橋本学	4. 巻 42(1)
2. 論文標題 コンクリート表層におけるモルタル領域の炭酸化がスケーリング抵抗性に及ぼす影響	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 647 ~ 652
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 加藤諭, 八木沢康衛, 川邊翔平, 緒方英彦
2. 発表標題 無機系補修材の付着性評価における荷重 - 変位曲線の有用性
3. 学会等名 2020年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡山大地, 緒方英彦, 兵頭正浩, 八木沢康衛, 金子英敏
2. 発表標題 コンクリートの凍害劣化診断に用いるねじ固定式金属アンカーのモルタル供試体による評価
3. 学会等名 2020年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西田真弓, 石神暁郎, 緒方英彦
2. 発表標題 寒冷地におけるRC開水路の表面保護工法による母材コンクリートへの影響
3. 学会等名 2019年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武美伸宗, 緒方英彦, 兵頭正浩
2. 発表標題 乾湿繰返しおよび乾燥による含水量の変化がコンクリートのスケーリング抵抗性に及ぼす影響
3. 学会等名 第74回農業農村工学会中国四国支部講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武美伸宗, 兵頭正浩, 緒方英彦
2. 発表標題 中性化と凍結融解作用が壁状コンクリート構造物の薄層の発生に及ぼす影響
3. 学会等名 農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 石神暁郎, 西田真弓, 蒔苗英孝, 佐藤智, 周藤将司, 緒方英彦
2. 発表標題 コンクリート施設の凍害劣化特性に対応した機能診断手法
3. 学会等名 平成30年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 緒方英彦, 清水邦宏, 金子英敏, 八木沢康衛, 石神暁郎, 西田真弓
2. 発表標題 経年した無機系補修材料の付着強さ試験における表面処理の影響
3. 学会等名 平成30年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤諭, 清水邦宏, 金子英敏, 八木沢康衛, 兵頭正浩, 緒方英彦
2. 発表標題 異なる材料における角形治具と円形治具の付着強さの比較
3. 学会等名 平成30年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西田真弓, 石神暁郎, 山田章, 緒方英彦
2. 発表標題 寒冷地における表面保護工法適用後のコンクリート開水路側壁の含水率
3. 学会等名 平成30年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 緒方英彦
2. 発表標題 開水路底版における無機系被覆工法の付着性の評価・管理基準に関する提案
3. 学会等名 2019年度農業農村工学会大会講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 武美伸宗, 緒方英彦, 兵頭正浩
2. 発表標題 乾湿繰返しおよび乾燥による含水量の変化がコンクリートのスケーリング抵抗性に及ぼす影響
3. 学会等名 第74回農業農村工学会中国四国支部講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	兵頭 正浩 (HYODO Masahiro) (60611803)	鳥取大学・農学部・准教授 (15101)	

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	石神 暁郎 (ISHIGAMI Akio)		
研究協力者	西田 真弓 (NISHIDA Mayumi)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------