

令和 5 年 4 月 29 日現在

機関番号：23201
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20K04645
研究課題名（和文）アルカリ骨材反応を生じたコンクリート構造物の水分除去による再劣化抑制技術の開発

研究課題名（英文）Development on technology to restrain re-deterioration by removing moisture of ASR deterioration concrete structure

研究代表者
伊藤 始（Ito, Hajime）

富山県立大学・工学部・教授

研究者番号：10553133
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：北陸地方等のコンクリート構造物の維持管理上の問題であるアルカリシリカ反応ASRを対象とした。湿度80%以下で進行しにくくなる知見に着目し、湿度を減少させ膨潤性ゲルから水分を取り除く劣化防止策【除湿法】を実施するために3つの課題を検討した。ASR膨張抑制の評価では、低い湿度で膨張が抑制され表面ひずみが低下すること、圧縮強度が回復することを確認した。除湿法の確立では、送風による方法の除湿効果が除湿材に比べて高いことを確認し、解析に用いる湿気移動特性を提案した。湿度管理法の確立では、湿気移動特性の妥当性を検討し、のと里山海道の橋脚モデルに2.1年で目標湿度まで低減できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

劣化防止策の開発にあたり、3つの課題を検討した。ASR膨張抑制の評価では、コンクリート内部の湿度低下による収縮量や力学性能について各種要因が与える影響を明らかにするとともに、それらの変化を定量的に評価した。除湿法の確立では、除湿法ごとの湿気移動特性を確立するとともに、内部乾燥によるコンクリートひずみの変化も評価した。湿度管理法の確立では、湿気移動特性の妥当性を示し、解析を用いた実構造物モデルの設計法を提示した。

本研究の成果から、実構造物に【除湿法】を実施する場合に、その設計法が適用可能になるとともに、その効果を内部湿度、収縮量、力学性能の変化として把握することが可能になる。

研究成果の概要（英文）：This research is intended for the alkali silica reaction (ASR) which is the problem in the maintenance of the concrete structures of the Hokuriku districts. This research proposed the deterioration preventive method [the dehumidification method] that remove water from expansive gel with humidity decrease. In this research, three problems were examined. (1) In evaluation of the ASR expansion restraint, it was confirmed that the shrinkage strain was controlled by the low humidity, and that the compressive strength increased. (2) In establishment of the dehumidification method, it was confirmed that the dehumidification effect of the method by the ventilation was higher than the materials to dehumidify, and the moisture movement properties were suggested to use for analysis. (3) In establishment of the humidity management, the validity of moisture movement properties was examined, and it was shown that humidity of bridge pier model was decreased to the target humidity in 2.1 years.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：コンクリート アルカリシリカ反応 劣化抑制対策 除湿 湿気移動 強度回復 収縮

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物のアルカリシリカ反応 (ASR) は 1980 年代に危険性が指摘され、新設構造物に対しては予防策が明文化された。一方、既設構造物には劣化因子が潜在し、2000 年代に建設後 20~30 年の構造物で鉄筋破断や大きなひび割れが発生し、補強が施されている。申請者は、土木学会の既設構造物の構造性能評価委員会¹⁾や金沢大学との北陸 SIP の研究²⁾を通じて、富山県や能登地域での ASR 劣化の進行を調査・分析した。特に、「のと里山海道」³⁾では十数年前に PCa 巻立て工法で補強された複数の橋脚に、丸く膨らむような膨張性変形を伴う再劣化が見られ、内部では ASR が今なお進行している状況を把握した。

ASR は (a)反応性骨材、(b)高アルカリ量、(c)水分、(d)温度を要因に生じる。このうち (c)水分の影響として断面内に相対湿度分布が生じて、内部が大きく膨張し表面がそれほど膨張しないメカニズムであるため、表面側のひび割れの幅や量が大きくなる特徴がある。この (c)水分の除去が ASR 抑制に結び付くと考えている (図-1)。現状の対策は、構造物表面から被覆材を塗布することで外部からの水分や塩分の供給を遮断する方法である。従来法では劣化速度を抑えるものの内部膨張を抑止できないために根本的に対処できていない。加えて、表面から施工しづらい土中の橋脚基礎や背面地盤からの水分供給がある壁状構造物での対策が求められる (図-2)。

2. 研究の目的

本研究の目的は、コンクリートの内部湿度を 80%以下に低減する ASR 劣化防止策⁴⁾を開発することである (図-1、図-2)。この対策は、根本的な膨張原因である水を除去し再劣化を生じず、膨張抑制効果を根拠に基づき説明できる対策である。実構造物への適用を念頭に、除湿法と湿度管理法を構築する (図-3)。劣化防止策の開発の根幹を成す学術的目的として、コンクリート内部の除湿による水分移動ならびに湿度低下による膨張抑制の関係性を定量評価する。さらに内部乾燥による表面ひび割れ幅の変化も評価する。研究では、3つの課題を設定した (図-3)。

3. 研究の方法

(1) ASR 膨張抑制の評価 (課題①)

ASR 膨張が内部除湿することでどれほど低減するか、また力学特性が回復するかの問いを設定している。ASR 膨張供試体を、様々な湿度環境に置いて長さ変化率試験と強度試験を実施し、各種要因 (表-1) が膨張ひずみの低減や、圧縮強度と静弾性係数の回復割合に与える影響を検討した。各種要因には、水セメント比 (W/C)、粗骨材最大寸法 (G_{max})、初期膨張量、および除湿時の湿度を用いた。供試体の水セメント比を 45、55%、粗骨材最大寸法を 13、25、40mm とした。

試験では、初期膨張量を 0.05% (ひび割れなし) ~0.20% (あり) とした角柱供試体を、湿度 40、60、80、100% の環境に置き、ひずみと質量を測定した (図-4)。同環境に円柱供試体を置き、圧縮強度と静弾性係数を測定した。

(2) 除湿法の確立 (課題②)

どのような除湿法を用いれば効果的に除湿が可能か、収縮によってひび割れ幅が縮小するかの問いを設定している。除湿孔を削孔した供試体に対して、湿度 60% の乾燥空気を送風する除湿

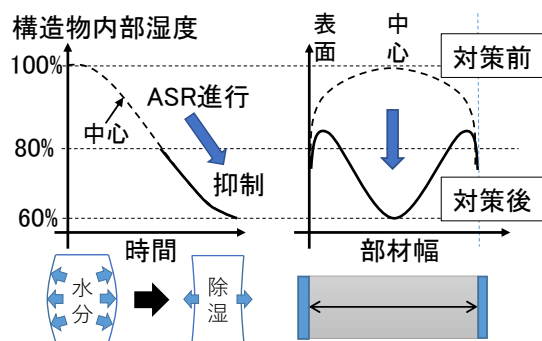


図-1 ASR 抑制効果の定量評価

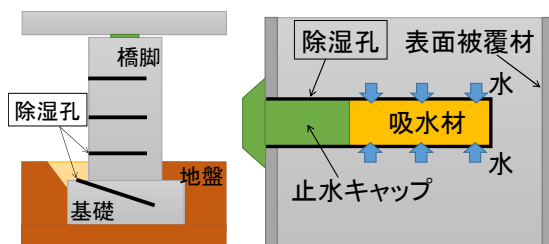


図-2 内部除湿法の開発

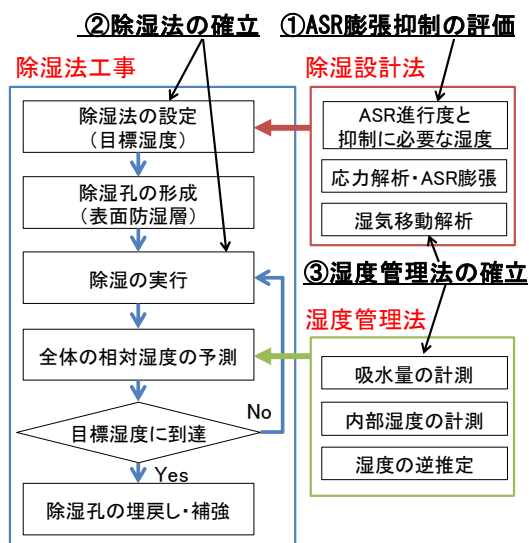


図-3 研究の全体構想と
研究課題①、②、③

条件で、湿気移動試験を実施している。除湿孔の直径と送風の有無をパラメータに試験することで、除湿条件ごとに除湿時間と除湿孔からの距離が内部湿度の低下に与える影響を検討した。また吸水材を封入する除湿条件の試験を実施した。一次元的な移動を検討するための角柱供試体に加えて、平面的な湿気移動やひずみを測定するための平板供試体（2次元）を作製し、湿気移動試験を実施した。

(3) 湿度管理法の確立（課題③）

湿気移動と膨張挙動の予測シミュレーションのために、不飽和浸透や湿気拡散等の解析法をどのように連携させ、入力物性値をどのように改良すればよいかの問いを設定している。「(1) ASR膨張抑制の評価」と「(2) 除湿法の確立」の試験結果から、湿気移動解析と応力解析を連携させた解析法を、試験値との比較に基づき改良して、除湿設計法と湿度管理法を検討した。実構造物としてのと里山海道の橋脚をモデルに試設計を実施した³⁾。

4. 研究成果

(1) ASR 膨張抑制の評価（課題①）

ASR 劣化させたコンクリート供試体を対象に、水セメント比、粗骨材最大寸法、初期膨張量、および除湿湿度の各種要因（表-1：試験ケース）が、収縮ひずみと力学的性能に与える影響の把握を目的に除湿試験を行った（図-4：試験の流れ）。本研究で得られた知見を以下に示す。

① 収縮量

各種要因の違いにかかわらず ASR 膨張したコンクリートを湿度の低い環境に静置することで ASR による膨張を抑制し、表面ひずみが低下した（図-5）。表面ひずみの収縮量は初期膨張量 1500×10^{-6} 程度まで増加し、それ以降は減少すると判断された。収縮量は除湿する相対湿度が 40%と 60%の場合に 80%に比べて大きくなることを確認した。

② 圧縮強度

除湿後の圧縮強度は、すべてのケースで材齢 28 日の値および除湿開始点の値に比べて大きくなった（図-6）。加えて、圧縮強度は、除湿日数が経過すること、すなわち収縮量が大きくなることに伴って大きくなった。

除湿による圧縮強度の増加量は、初期膨張量 500×10^{-6} で小さく、 1000×10^{-6} で最大になり、 1000×10^{-6} 以上で初期膨張量が大きくなることに伴い小さくなった（図-6）。また、除湿による圧縮強度の増加量は除湿湿度が低いほど大きくなり、水セメント比 (W/C) および粗骨材最大寸法 (G_{max}) の違いによる影響は小さかった。

③ ヤング係数

除湿後のヤング係数は、材齢 28 日の値に比べて小さくなり、初期膨張量が大きくなることに

表-1 試験ケース（除湿試験）

シリーズ名	ケース名	W/C (%)	G_{max} (mm)	初期膨張量 ($\times 10^{-6}$)	除湿湿度 (%)	
M 配合	M55-25*	55	25	1500	60	
	M55-13					
	M55-40					
	M45-25	45	25			
H 初期膨張量 除湿湿度	H05-60	55	25	500	60	
	H10-60			1000		
	H15-60*			1500		
	H20-60			2000		
	H10-40	55	25	1000		40
	H10-80			1000		80

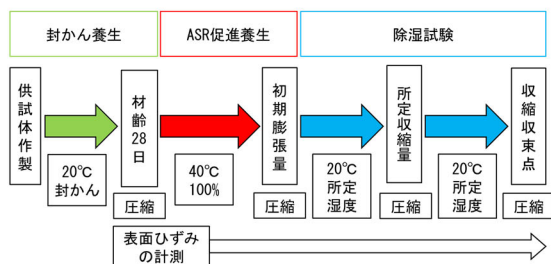


図-4 試験の流れ

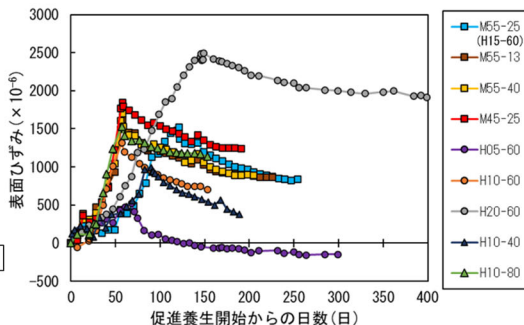


図-5 表面ひずみの履歴

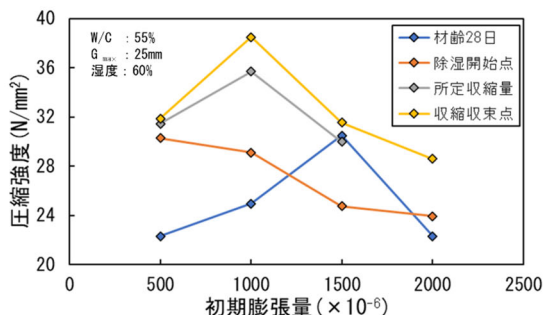


図-6 初期膨張量と圧縮強度の関係

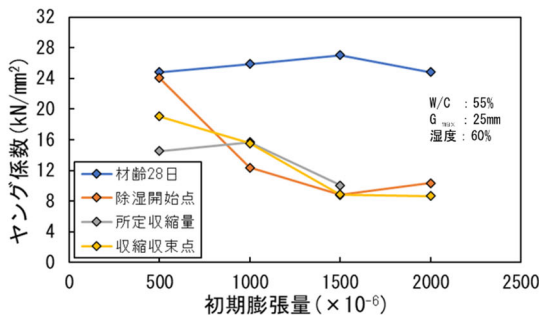


図-7 初期膨張量とヤング係数の関係

伴い小さくなった (図-7)。水セメント比 (W/C)、粗骨材最大寸法 (G_{max})、除湿湿度の違いが除湿後のヤング係数に与える影響は小さかった。

④ NaCl 添加が圧縮強度に与える影響

ASR 促進のために、NaCl を添加したコンクリートを封かん養生した場合に、材齢初期の圧縮強度が小さくなり、材齢 91 日頃に NaCl 未添加のものと同程度になるように増加する知見が得られた。

(2) 除湿法の確立 (課題②)

周囲の乾湿条件や除湿条件がコンクリートの相対湿度と含水率に与える影響を明らかにすることを目的に、異なる形状の供試体と複数の除湿方法を用いて乾燥・吸湿試験および湿気移動試験を実施した。

① 水分と湿度の関係

乾燥試験と吸湿試験は、円柱供試体 (直径 100mm) を厚さ 25mm、50mm、100mm に切断した円盤供試体を用いて行った。その結果、コンクリート内の含水率が 3.9%前後を下回ったとき、湿度が 100%から下がり始めた (図-8)。また、含水率と湿度の関係は、乾燥試験 (WA ケース) と吸湿試験 (DB ケース) でおおむね同じ経路を通ることが確認された (図-8)。

② 除湿法が湿度低下に与える影響

湿気移動試験は、除湿法 (送風、除湿材) や除湿孔の直径 (25mm、40mm) を変えた角柱供試体 (100-100-400mm) を用いて行った。その結果、コンクリート内部の湿度は、除湿法を送風ケース (図-9 凡例: 25-C-1, 40-C-1, 40-D-1) とすることで低下しやすくなることを明らかにした (図-9)。除湿孔から 50mm の測点では除湿方法が湿度低下速度に影響を与え、湿度 85%以上で送風ケース (25-C-1, 40-C-1, 40-D-1) の湿度低下速度が大きかった (図-10)。また、除湿孔が多いほど、除湿孔の直径が大きいほど湿度が低下した。

③ 供試体形状の影響

除湿法 (B: 除湿材, C: 送風, D: 自然乾燥) を適用した平板供試体 (200-200-100mm) を用いて湿気移動試験を実施し、湿度や含水率を測定した (図-11)。含水率の測定は除湿開始から 231 日以降に開始した。含水率は除湿孔から 30mm 位置の送風ケース (C) が他の 2 ケース (B, D) に比べて小さくなった。60mm 位置の含水率は、送風 (C) と自然乾燥 (D) で小さくなった。平板供試体においても、送風ケースで除湿効果が高い傾向がみられ、角柱供試体と同様の傾向であった。

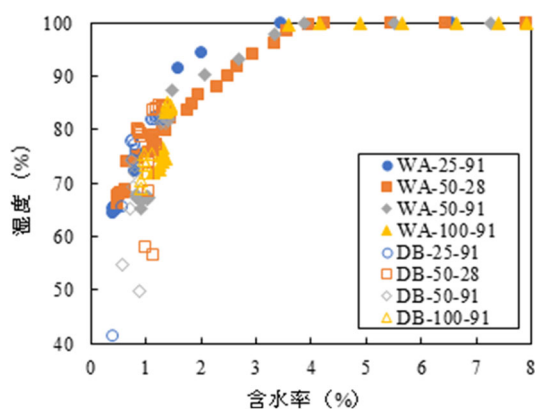


図-8 含水率と相対湿度の関係 (円盤供試体)

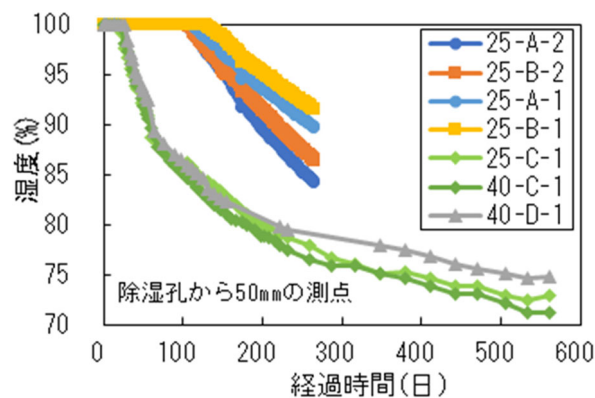


図-9 相対湿度の履歴 (角柱供試体・50mm)

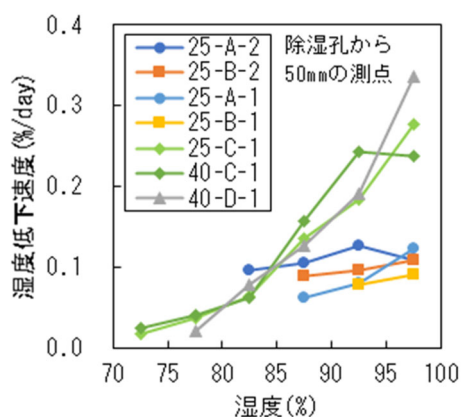


図-10 湿度と湿度低下速度の関係 (角柱・50mm)

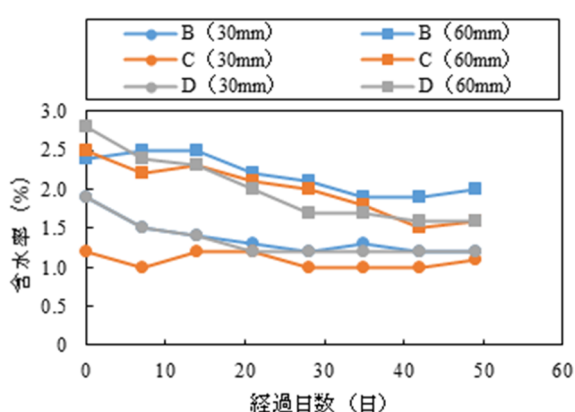


図-11 含水率の履歴 (平板・30mm)

(3) 湿度管理法の確立 (課題③)

① 湿気移動特性の妥当性の検討

除湿法を適用した平板供試体を用いて湿気移動試験を実施した後に、試験を模擬した湿気移動解析を行った。試験ケースは除湿方法 (B: 除湿材、C: 送風、D: 自然乾燥)、被覆面 (A: 全面、P: 上下面 (200×200mm)) を変化させた 5 ケースとした。解析では角柱供試体の試験で推定した蒸発率および湿度とひずみの関係 (乾燥収縮特性) を入力し、解析モデルは平板供試体の 1/4 モデルとした。湿度低下速度が比較的高い値を示す除湿初期において、D-A を除く 4 ケースの湿度低下速度に差が生じた (図-12: 0.4%/day 以上)。一方、湿度が低下すると、同程度の値を示した (図-12: 0.0~0.4%/day)。この結果から、入力した蒸発率は、除湿初期を除いて湿度の低下傾向の予測に適用でき、有用であることを確認した。

② 乾燥収縮特性の妥当性の検討

図-13 に示す C-A (送風・全面被覆) ケースの関係から、3 測点の測定値と解析値の乾燥収縮特性は類似した。入力した乾燥収縮特性 (日本コンクリート工学会の算定式) は、ひずみの収縮傾向の予測に適用でき、有用であることを確認した。

③ 実橋脚モデルを対象とした湿気移動解析

湿度管理システムのフローを設定し、湿気移動解析を用いて除湿法の試設計を行った。解析モデルは ASR 劣化が報告されていると里山海道にある A 橋の P1 橋脚³⁾の充実部の 1/4 モデルとした。解析ケースは除湿孔間隔を 3 水準、除湿方法を 5 水準に設定した計 15 ケースとした。ケース名は 04-40 のように、除湿孔間隔 (400mm: 04、600mm: 06、800mm: 08)、除湿方法 (通気湿度 40%: 40、60%: 60、80%: 80、除湿材 A 型: A、B 型: B) を示している。

図-14 に中間点の湿度が目標湿度 80%⁴⁾を下回るまでに要する期間 (対策年数) を示す。04-40 の対策年数が最短であり、2.1 年となった。図-15 に除湿開始から 2.1 年後の湿度分布を示す。除湿から 2.1 年で中間点の湿度は 79%を示すことが確認された。中間点のひずみは収縮側に 346×10^{-6} を示し、膨張の抑制に効果的であった。

<引用文献>

- 1) 土木学会:既設コンクリート構造物の構造性能評価研究小委員会報告書およびシンポジウム講演概要集, コンクリート技術シリーズ, No. 116, 2018
- 2) 金沢大学他: コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネジメントシステムの開発 成果報告書, SIP 戦略的イノベーション創造プログラム, 2019
- 3) 津田誠, 浦修造, 湊俊彦, 鳥居和之: ASR が発生したコンクリート橋の調査診断と補強・代替技術の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 2, pp. 1555-1560, 2016
- 4) 鍵本広之, 川村満紀: 大型コンクリート円柱内部における湿度およびひずみの測定による ASR 表面ひびわれ発生過程の解明, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 1225-1230, 2009

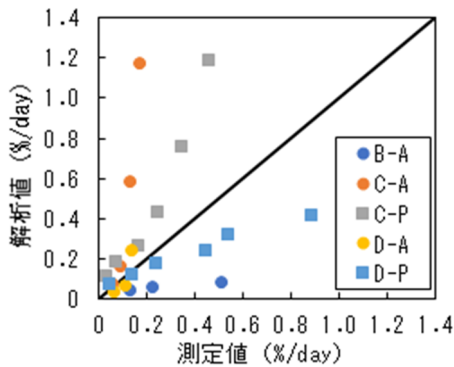


図-12 湿度低下速度の比較 (平板・30mm)

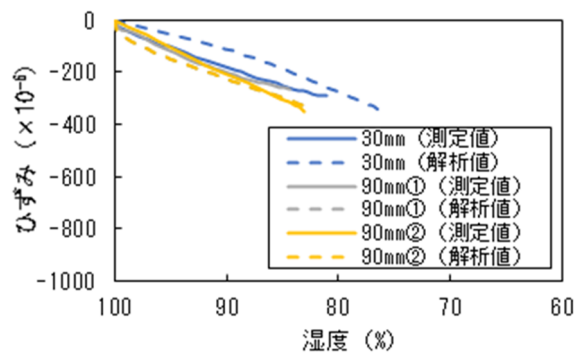


図-13 乾燥収縮特性の比較 (平板・C-A)

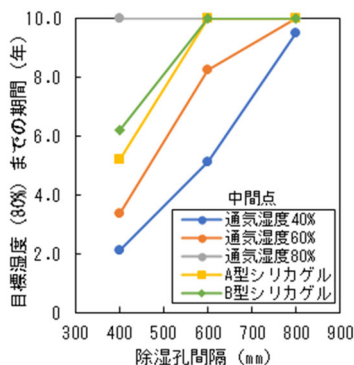


図-14 目標湿度を下回るまでの期間

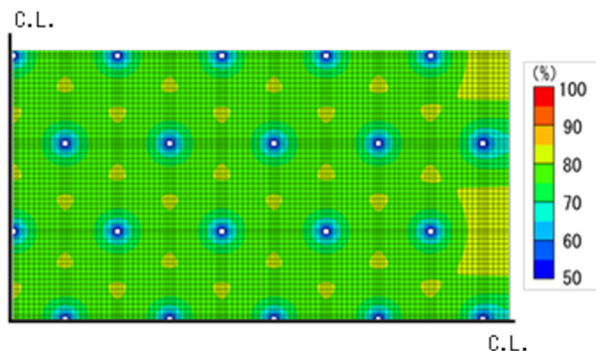


図-15 除湿 2.1 年の湿度分布 (間隔 0.4m、湿度 40%)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 山岸 祥希, 佐川 孝広, 伊藤 始	4. 巻 78 巻
2. 論文標題 NaCl添加コンクリートの封かん養生下での圧縮強度発現メカニズムに関する研究	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木学会論文集	6. 最初と最後の頁 1, 12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejmcs.78.1_1	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10件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 達柊介、伊藤始、南亮多、巴野寛貴、白上新、細野恭成
2. 発表標題 アルカリシリカ反応による膨張ひずみがコンクリート中の湿度低下量に与える影響
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 塚西弘輝、伊藤始、相良明日香
2. 発表標題 ASR 劣化したコンクリートの最大膨張量と空気量が除湿による収縮量に与える影響
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会講演概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 南亮多、伊藤始、達柊介
2. 発表標題 乾燥過程におけるコンクリートの厚さや材齢が内部の相対湿度と含水率の関係に与える影響
3. 学会等名 土木学会中部支部研究発表会講演概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 達柊介、伊藤始、南亮多、塚西弘輝、白上新、細野恭成
2. 発表標題 除湿法を適用したコンクリートの湿気移動特性の評価と湿度管理システムの構築
3. 学会等名 土木学会第78回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松井淳史、伊藤始、塚西弘輝
2. 発表標題 除湿により収縮したASR 劣化コンクリートの圧縮破壊特性に関する実験的検討
3. 学会等名 土木学会第78回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 塚西弘輝、伊藤始、大澤紀久、安藤陽子
2. 発表標題 コンクリートの水分量がASR 膨張ひずみと除湿時の収縮ひずみに与える影響
3. 学会等名 土木学会第78回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 南亮多、伊藤始、達柊介、塚西弘輝、白上新、細野恭成
2. 発表標題 乾湿過程や材齢がコンクリート内の含水率と相対湿度、ひずみの関係に与える影響
3. 学会等名 土木学会第78回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 達柊介、伊藤始、南亮多、巳野寛貴、白上新、細野恭成
2. 発表標題 アルカリシリカ反応による膨張ひずみがコンクリート中の湿度低下量に与える影響
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 達柊介、伊藤始、遠藤雅樹、白上新、細野恭成
2. 発表標題 送風除湿法によるコンクリートの湿気移動特性に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山岸祥希、伊藤始、遠藤雅樹
2. 発表標題 養生方法がNaClを添加したコンクリートの力学性能に与える影響に関する基礎的検討
3. 学会等名 土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2021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

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
---------	---------