

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04209

研究課題名（和文）コンクリート構造物の施工に伴う空気量の変化と耐凍害性に関する研究

研究課題名（英文）Research on the air content and frost resistance of concrete structures with the construction

研究代表者

小山田 哲也（OYAMADA, Tetsuya）

岩手大学・理工学部・教授

研究者番号：70361045

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：コンクリートの施工による耐凍害性への影響について連行空気に着目し、3つの重要な成果を得た。1つ目は、同等な強度レベルのコンクリートのスケーリング抵抗性は、使用材料に関わらず、硬化後の連行空気量と強い相関があり、特に150 $\mu\text{m}$ 以下の連行空気が必要であることが分かった。次に、スケーリング抵抗性に必要なコンクリート中の空気の径は150 $\mu\text{m}$ 以下であり、一般強度の場合、コンクリート中に3%程度の空気量を確保すれば、目標上限値を満足することが分かった。3つ目はバイブレータによる連行空気の移動であり、コンクリート中の連行空気は、気泡の大小の別に関わらず、バイブレータから離れる方向へ移動することが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

コンクリートの凍害劣化は復興・復興支援道路の長期耐久性確保に向けた取組みの中で重要視した課題の一つであった。特に施工工程を経たコンクリートの耐凍害性確保における本研究の知見は、国内でその妥当性が評価されるなど学術的な反響は大きい。またコンクリートの施工に伴う連行空気を明確に位置付け、そもそも硬化コンクリートの空気量を確保しなければならない点、どの程度の質と量を確保すれば良いかの点、施工に伴う連行空気の移動を実験的に検証した点など、今後のコンクリート構造物の施工方法の改善に対する留意点も挙げている。国土交通省東北地方整備局では、この研究結果を手引きとして通知しており、社会的な貢献も大きい。

研究成果の概要（英文）：It was obtained three important findings regarding the effect of entrained air on the freeze-thaw resistance of concrete construction. Firstly, there is a strong correlation between the amount of entrained air after curing and the scaling resistance of concrete at equivalent strength levels, regardless of the materials used, particularly noting the necessity of entrained air below 150 micro meter. Secondly, it was found that the diameter of air in concrete necessary for scaling resistance is below 150 micro meter, and for normal strength concrete, ensuring around 3% air content in the concrete satisfies the target upper limit. Thirdly, the movement of entrained air by vibrators was observed, indicating that entrained air in concrete moves away from the vibrator direction regardless of the size of bubbles.

研究分野：土木材料、建設マネジメント

キーワード：スケーリング抵抗性 連行空気 振動締固め 微細気泡 セメントコンクリート

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

積雪寒冷地域のコンクリート構造物は、凍害により一般地域と比較して長寿命化が難しい。耐凍害性確保に向けて連行空気が必要であることは一般常識であるが、近年凍結防止剤散布環境下で顕在化している表面損傷に対する問題提起はほとんどなく、日本産業規格のレディミクストコンクリートには  $4.5 \pm 1.5\%$  の空気量を確保するように明記されているものの、3% 台の空気量では、表面損傷を抑制できない。また復興道路の長寿命化を図るべく行った各種試行工事では、施工工程に伴ってコンクリート中の空気量は低減することが分かってきてはいるものの、これらの検討の成果によって正に今連行空気に関する議論がなされている段階で、硬化後のコンクリートの連行空気を主題にした学術的・社会的な見解は皆無に等しい状況であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、生コンクリート工場から出荷されたコンクリートを対象とし、運搬、圧送、振動締固め、養生を施工工程と呼ぶ。これらコンクリート工事の施工工程の中でも振動締固めがコンクリートの連行空気の質と量および強度に及ぼす影響を整理し、コンクリート構造物の耐凍害性との関連を求めるのが本研究の目的である。

コンクリートの耐凍害性のための連行空気は界面活性剤により導入される。コンクリート中に導入される連行空気は、まだ固まらないコンクリートの中で浮上しやすい。この結果は筆者らの研究によって明らかにして問題提起してきたが、実施工の影響を整理されている例は国内外を問わず極めて少なく、更なる発展的研究が必要である。

本研究では、硬化後のコンクリートの空気量のもとより、コンクリート中の気泡径分布を検討する。施工によるコンクリート中の連行空気の変化の原因とその対応策をまとめ、耐凍害性確保に関する対策を明らかにする。

### 3. 研究の方法

本研究は大きく2つの実験で構成する。

1つ目は凍害によるコンクリートの表面損傷を防ぐための必要空気量とその気泡径分布であり、次に続く2つめの実験の重要な基礎実験となる。配合は、水：セメント：砂を 0.5：1：3 の質量比とした。供試体は  $40 \times 40 \times 160\text{mm}$  の型枠に打込んだ後、材齢 28 日まで水中養生を行った。養生終了後に 6 面すべて切断面となるようにダイヤモンドカッターで 8mm 立方体に切断し、これを小片凍結融解試験の供試体とした。試験に用いた溶液は 3% の塩化ナトリウム水溶液とした。供試体の体積に対して 10 倍の水溶液に浸漬させ、 $-20$  の冷凍庫内で凍結 16 時間、 $20$  の恒温室内で融解 8 時間を 1 サイクルとした凍結融解繰り返しを 10 サイクル与え、スケリング量は質量残存率で評価した。また同様に作製したモルタルについては、硬化後の空気量および気泡間隔係数を、ASTM C 672 法に順じてリニアトラバース法を用いて測定した。

2つ目は施工における連行空気の移動に関する研究であり、 $200 \times 200 \times 200\text{mm}$  の角柱型枠にコンクリートを打込み、コンクリートに対して内部から棒状パイプレータで振動を与える内部振動と型枠を振動させる外部振動により、それぞれのコンクリートに振動締固めを施して所定の材齢の間養生した。養生後には、この供試体を切断、研磨することによりコンクリート内外の振動に伴う空気の移動を計測した。気泡の測定は1つ目の実験と同様とした。

### 4. 研究成果

#### (1) コンクリートに必要な連行空気

モルタルの空気量と耐久性指標の関係を図-1 に示す。縦軸は凍結融解試験による質量減少の程度を百分率示したものである。総体的には連行空気量と耐久性指標には空気量 10% 程度までは相関が認められ、それより空気量が多くなると飽和が見られる。凡例は界面活性剤の種類であり、異なる種類の場合でこの傾向には相違があることも読み取れる。

耐久性指標において 85% を劣化抵抗性の有無の閾値として、Type-B の界面活性剤の場合でモルタルの気泡径分布を区別して示したのが、図-2 である。気泡弦長は連行空気の範囲と考えられる  $300\mu\text{m}$  を最大とした。85% 以上を優性とした場合、優性には微細空気が多く残存しているが、粗大側には相違がそれほど見られないことが分かった。

そこで図-2 を微細空気から累積して示すことにした。結果を図-3 に示す。この実験結果から

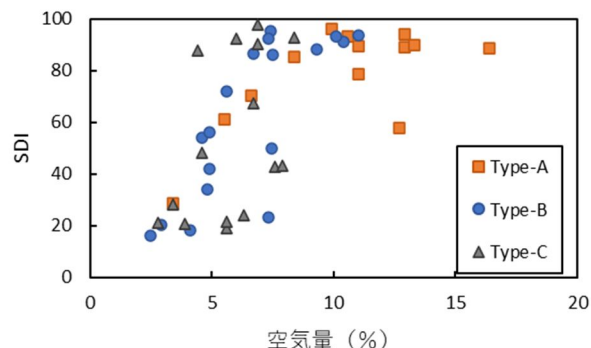


図-1 モルタルの空気量と耐久性指標の関係

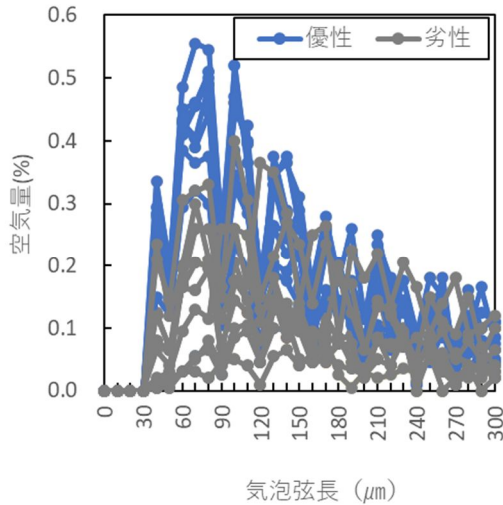


図-2 気泡径分布（気泡径別）

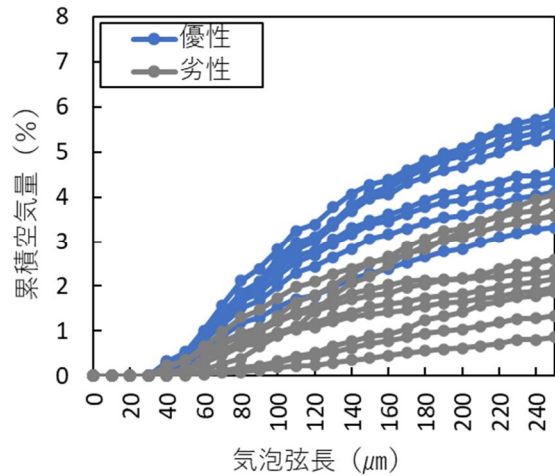


図-3 気泡径分布（累積）

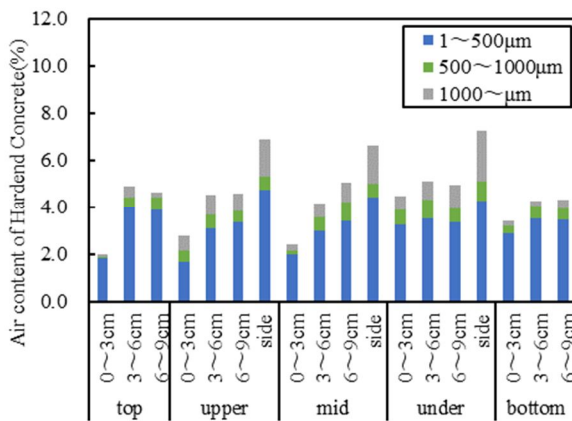


図-4 内部振動に伴う気泡の移動

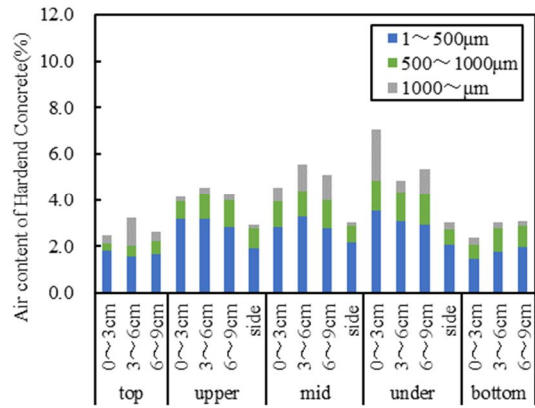


図-5 外部振動に伴う気泡の移動

（凡例は気泡径、topが打込み面、bottomが底面、その間は切断面、それぞれの観測面に対して供試体中央が0~3cmで中心から離れる方向に区別して気泡を採取、sideは型枠面）

微細側の空気量が多いほど、優性となることは明白であり、コンクリートの表面損傷には微細気泡を多くすることが重要であることが明らかとなった。

#### （2）振動に伴う連行空気の移動

内部振動機で10秒振動したコンクリートを硬化させて計測した連行空気の気泡径分布を図-4に示す。全体的に見れば10秒間締め固めたコンクリートでは、一定の関係が見いだせる。まずは底面に着目する。その直上の下部と比較すると500 $\mu\text{m}$ 以上の粗大な気泡は排除され、エントレインドエアが残っていると読み取ることが出来る。次に上部、中部、下部、すなわちコンクリート内部を比較すると、すべての高さでほぼ気泡径分布は同等と言え、それぞれが中心から外側に行くほど空気量が多くなった。すなわち連行空気が型枠中心部のコンクリートに少なくなっていることが分かる。一方で上面も同様の分布となった。それぞれの高さにおける側面を見ると、空気量が最も多くなり、特に粗大な空気が多い傾向にある。

外部振動の振動時間10秒の結果を図-5に示す。外部振動では、他の測定位置と比較して底面に粗大空気が少ない。底面はテーブルバイブレータにより直接的に振動を受けるからと推察される。一方で、コンクリート内部、すなわち上部、中部、下部に着目してみる。コンクリート内部では、いずれの高さでも中心部の空気量が多くなることが分かる。他方で内部振動の場合で空気量の多かった側面では、6~9cmとほぼ変わらないあるいはそれより少ない気泡量となり、粗大空気も少ない結果となった。

このように振動締め固めによる気泡の移動は、バイブレータの振動と気泡の浮力の合力により、振動から遠ざかりながら上方に移動するものと考えられる。

以上のように、連行空気を可視化して分析することにより、コンクリートの凍害による表面損傷への対策として必要な最低限の連行空気の質と量を明確にすることができ、またそれらの連行空気を残すための振動締め固めに伴う空気の移動が明らかとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 小山田 哲也, 佐藤 栄司, 中村 敏之, 加藤 陽菜	4. 巻 76
2. 論文標題 収縮低減剤を用いた高強度コンクリートの耐凍害性	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 386-392
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 小山田 哲也, 藤齋 祐希, 青山 桃子, 羽原 俊祐	4. 巻 76
2. 論文標題 小片凍結融解試験法によるコンクリートのスケーリング抵抗性の評価	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 セメント・コンクリート論文集	6. 最初と最後の頁 372-378
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 小山田哲也, 味噌作知樹, 高橋慧, 椎名貴快	4. 巻 44
2. 論文標題 施工の各種工程がトンネル覆工コンクリートの連行空気とその耐凍害性に及ぼす影響	5. 発行年 2022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 526-531
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 小山田哲也, 味噌作知樹, 高橋慧, 椎名貴快	4. 巻 44
2. 論文標題 施工の各種工程がトンネル覆工コンクリートの連行空気とその耐凍害性に及ぼす影響	5. 発行年 2022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 掲載可
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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤いずみ、小山田哲也、一戸暖生、中村大樹
2. 発表標題 棒状バイブレータを用いた振動締固めによるコンクリート内外の気泡径分布の経時的変化
3. 学会等名 セメント協会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 澤田拓真、小山田哲也、中村大樹、五十嵐岐英
2. 発表標題 膨張材を使用したコンクリートのスケーリング特性とその要因の検討
3. 学会等名 セメント協会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 青山桃子、小山田哲也、中村大樹、藤齊祐希
2. 発表標題 スケーリング抵抗性に対するコンクリート中の必要空気量の基礎的実験
3. 学会等名 セメント協会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小山田哲也
2. 発表標題 施工の各種工程がトンネル覆工コンクリートの連行空気とその耐凍害性に及ぼす影響
3. 学会等名 日本コンクリート工学会年次大会2022
4. 発表年 2022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	羽原 俊祐  (Hanehara Shunsuke)  (10400178)	岩手大学・理工学部・嘱託教授   (11201)	

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