

# 報告 コンクリートの耐凍害性確保のための必要空気量に関する文献調査

本多 大希\*1・金 志訓\*2・濱 幸雄\*3

**要旨：**本報告では、JIS や JASS5 等の各規格において凍害環境におけるコンクリートの必要空気量 4.5% を標準と定められていることに対して、高強度コンクリートも含めて十分な耐凍害性を確保するために必要となる空気量を再検討するために、国内外の文献を対象とした調査を行った。その結果、空気量 3.0% 以上で優れた耐凍害性を示したことから、各規格と同様、凍害環境における目標空気量は 4.5%（許容差±1.5%）であることが確認できた。また、水セメント比が 25% 以下の場合、空気量 2.0% 以上で優れた耐凍害性を示したことから、凍害環境における目標空気量を 3.5%（許容差±1.5%）にすることが可能であることを示した。

**キーワード：**高強度コンクリート、耐凍害性、空気量、水セメント比、養生方法

## 1. はじめに

1960 年代に作業に適するワーカビリティを有する範囲内で、単位水量をできるだけ少なくすることを目的に開発された高性能減水剤や、1980 年代にその欠点であったスランプロスを補う形で開発された高性能 AE 減水剤の出現により、従来レディーミクストコンクリートでは実現できなかった高い減水性でかつ、スランプ保持が良好な低水セメント比のコンクリートの施工が容易になり高強度コンクリートが普及してきた<sup>1)2)3)</sup>。高強度コンクリートは、高い強度発現性と優れた流動性を持ち合わせており、建築物の高層化・大型化・耐震性の向上および構造物の高耐久化等を可能とした<sup>4)5)</sup>。近年、都市部への人口集中とそれに伴う利用可能な土地の減少という社会的背景により、建築物の高層化が進んでおり、今後、高強度コンクリートの更なる発展が望まれている。

表-1 に各規格における空気量を示す。「JISA 5308 レディーミクストコンクリート」で、普通コンクリートおよび高強度コンクリートの荷卸し地点での空気量は 4.5%（許容差±1.5%）、「JASS5 5 節 調合」で、AE コンクリートの調合条件での空気量は特記のない場合 4.5%、「同 17 節 高強度コンクリート」で、練り上がり時の空気量は、良好なワーカビリティが得られる範囲で空気量 3.0% 以下とし、激しい凍害を受けるおそれがある場合は空気量 4.5% を標準、「同 26 節 凍結融解作用を受けるコンクリート」で、AE コンクリートで空気量の下限値を 4.0% 以上、低水セメント比の AE コンクリートの場合は下限値を 3.0% 以上とすることを各規格で定めている。これら全てに共通して、高強度コンクリートにおいても普通コンクリートと同様、凍害環境では空気量 4.5% を標準としている。一方、高強度コンクリートでは空気量が 2.0% 程度の non-AE コンクリートであっても優れた耐凍

表-1 各規格における空気量

| 規格         | 空気量   |
|------------|---|
| JIS A 5308 | 普通コンクリート : 4.5%(許容差±1.5%)<br>高強度コンクリート : 4.5%(許容差±1.5%)                     |
|            | 5 節 AE コンクリート : 4.5%  |
| JASS5      | 17 節 激しい凍害を受けるおそれのある<br>高強度コンクリート : 4.5%<br>凍害のおそれのない高強度コンクリート<br>: 3.0% 以下 |
|            | 26 節 低水セメント比 AE コンクリート<br>: 下限値 3.0% 以上<br>AE コンクリート : 下限値 4.0% 以上          |

害性を示すことは広く一般に知られており、高強度コンクリートでの必要空気量を低減できる可能性も指摘されており<sup>6)</sup>、空気連行による強度低下のデメリットを解消する意味でも、高強度コンクリートでの必要空気量を再検討する必要がある。

また、藤井ら<sup>7)</sup>は、1979 年に JISA 1148 (ASTM C 666) A 法に基づく促進凍結融解試験のそれまでの既往のデータを整理し、空気量・水セメント比・スランプが耐久性指数に及ぼす影響について明らかにした。その後、コンクリートに使用される材料の多様化や乾湿繰返し等によりコンクリートの耐凍害性が低下する報告<sup>8)</sup>を受け、米田ら<sup>9)</sup>は、2008 年に同様のそれまでの既往のデータを整理し、空気量・水セメント比・気泡間隔係数が耐久性指数に及ぼす影響について明らかにし、現在の JASS5・26 節における空気量の下限値の参考資料となっている。しかし、米田らは 2 週水中、乾湿繰返し及び長期暴露のみでの検討であり、その他の養生方法での検討を踏まえ、コンクリートの耐凍害性を総合的に評価する必要がある。

以上を踏まえ、高強度コンクリートの空気量と耐凍害性の関係について幅広く文献調査を行い、収集したデータから再検討を行うことを本報告の目的とする。

\*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科 環境創生工学系専攻 (学生会員)

\*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科 もの創造系領域 助教 (正会員)

\*3 室蘭工業大学大学院 工学研究科 もの創造系領域 教授 (正会員)

## 2. 文献調査概要

### 2.1. 文献調査方法

文献収集を行うためのデータベースとして、「Google scholar」「J-STAGE」「CiNii Articles」「AIJ」「Web of Science」「American Concrete Institute」「Science Direct」を用いた。

また、検索ワードとして、「凍結融解」「耐凍害性」「耐久性指数」「相対動弾性係数」等、コンクリート・高強度コンクリートの凍害に関する文献を国内・海外問わず幅広く収集できるものとした。

### 2.2. 文献調査過程

表-2 に検索ワードの詳細および総検索ヒット数を示す。延べ 493,495 件の文献が見つかり、内訳としては、国内で延べ 43,038 件、海外で延べ 450,457 件だった。収集した文献のうち、コンクリートで凍結融解試験を行い、その結果を掲載している文献は 749 件あり、内訳としては、国内で 573 件、海外で 176 件だった。

さらに、高強度コンクリートの空気量と耐凍害性の関係について再検討を行う上で、評価対象を一般的な材料を用いている高強度コンクリートに限定した。その条件として、セメントとして「普通ポルトランドセメント (OPC)」、骨材として「天然骨材・砕石・砕砂」、水セメント比 (W/C) として「 $W/C \leq 35\%$ 」、試験方法として「JIS A 1148 (ASTM C 666) A 法」を用いている文献とした。表-3 および図-1 にそれらの条件で収集した文献および発行年数を示す。文献は 58 件あり、内訳としては、国内で 49 件、海外で 9 件だった。国内に比べ海外の文献が少ないのは、国ごとに JIS A 1148 (ASTM C 666) A 法とは異なる試験条件を用いていることや質量変化の結果のみを凍結融解試験の目的としていることが挙げられる。また、年によって発行数に多少のばらつきは見られるが、満遍なく文献を収集することができた。本報告では、この 58 件の文献から高強度コンクリートの空気量と耐凍害性の関係について再検討を行う。

表-2 検索ヒット結果

| 検索ワード   | ヒット数<br>(延べ：件) |
|---|----------------|
| 凍結融解  | 26,380         |
| コンクリート 耐凍害性                                   | 2,307          |
| コンクリート 耐久性指数                                  | 1,853          |
| コンクリート 凍結融解                                   | 7,036          |
| コンクリート 相対動弾性係数                                | 3,930          |
| 高強度コンクリート 耐凍害性                                | 267            |
| 高強度コンクリート 耐久性指数                               | 323            |
| 高強度コンクリート 凍結融解                                | 631            |
| 高強度コンクリート 相対動弾性係数                             | 217            |
| 低水セメント比 耐凍害性                                  | 94             |
| concrete frost                                | 282,095        |
| concrete freeze thaw                          | 27,757         |
| concrete frost resistance                     | 48,520         |
| concrete durability factor                    | 45,265         |
| concrete freeze thaw durability               | 23,259         |
| high strength concrete frost                  | 50,537         |
| high strength concrete frost resistance       | 22,520         |
| high strength concrete durability factor      | 61,344         |
| high strength concrete freeze thaw durability | 21,330         |
| 計   | 493,495        |

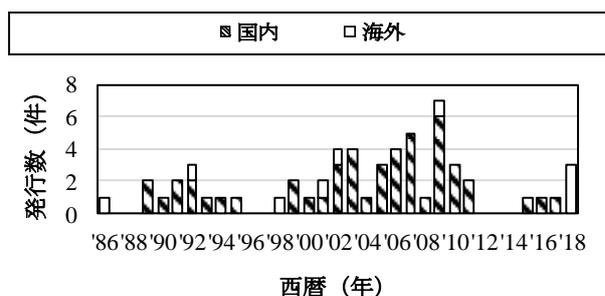


図-1 文献発行数

また、普通強度領域のデータを比較対象として用いるために、上記 58 件の文献のうち「 $W/C > 35\%$ 」の条件でもコンクリートの凍結融解試験を行っている文献を収集した。それらの文献は 34 件あり、内訳としては、国内で 28 件、海外で 6 件だった (No.1-34)。

調査は 2019 年 5 月上旬から 11 月下旬にかけて行った。

表-3 収集した文献一覧

| No. | 文献名  |
|-----|--|
| 1   | ROBERT, E. P.: FREEZING AND THAWING RESISTANCE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE, Transportation Research Board, pp.1-31, Dec.1986   |
| 2   | 高田誠ほか: 高強度コンクリートの品質性状に関する実験的研究その 3 耐久性および断熱温度上昇, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.473-474, 1989.10  |
| 3   | 柏野謙二ほか: 高強度コンクリートの耐凍害性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.1, pp.691-696, 1990   |
| 4   | 権寧瑠ほか: 高強度コンクリートの耐凍害性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.295-296, 1992.8   |
| 5   | 高京潭ほか: 初期凍害を受けた高炉スラグ微粉末混和高流動コンクリートの品質低下とその対策, 土木学会論文集, Vol.46, No.641, pp.1-13, 2000.2   |
| 6   | Roberto, C. A. P. et al.: FROST AND SCALING RESISTANCE OF HIGH-STRENGTH CONCRETE, PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 2001  |
| 7   | Cahngwen, M. et al.: Effect of sulfate solution on the frost resistance of concrete with and without steel fiber reinforcement, Cement and Concrete Research, Vol.32, No.1, pp.31-34, Jan.2002 |
| 8   | 濱田英介ほか: コンクリートの耐凍害性と凍結融解時の吸水性状に及ぼす乾燥の影響, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No.75, pp.9-12, 2002.6  |
| 9   | 塚孝司ほか: ビーライト系セメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性, 土木学会論文集, Vol.57, No.718, pp.33-44, 2002.11  |
| 10  | 千歩修ほか: 乾湿繰返しコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.731-736, 2003  |
| 11  | 田畑雅幸ほか: 石炭灰人工骨材を用いたコンクリートの耐凍害性に関する研究 (その 1 水中凍結融解試験による評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.355-356, 2003.9   |
| 12  | 千歩修ほか: 低水セメント比コンクリートの養生・放置条件と耐凍害性, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.525-526, 2003.9   |
| 13  | 千歩修ほか: 養生・放置条件が低水セメント比コンクリートの耐凍害性におよぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.969-974, 2004  |

|    |   |
|----|---|
| 14 | 青野義道ほか：乾湿繰返しに及ぼすコンクリートの耐凍害性への影響とその劣化メカニズムに関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.607，pp.15-22，2006.9   |
| 15 | 酒井正樹ほか：乾湿繰返しが高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.529-530，2006.9   |
| 16 | 原田彩加ほか：コンクリートの凍害劣化に及ぼす鉄筋拘束の影響に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.531-532，2006.9   |
| 17 | 相川葉月ほか：実環境を考慮した乾湿繰返しに及ぼすコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.899-904，2006   |
| 18 | 米田恭子ほか：乾湿繰返しに各種コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1105-1106，2007.8  |
| 19 | 米田恭子ほか：乾湿繰返しを加えた凍結融解試験による各種コンクリートの耐凍害性，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1131-1136，2007  |
| 20 | 酒井正樹ほか：乾湿繰返し・凍結融解を受けるコンクリートの含水状態および長さ変化，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1107-1108，2007.8   |
| 21 | 菅原奈美ほか：凍結融解作用によるコンクリートのひずみ挙動と凍害劣化に及ぼす鉄筋拘束の影響，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.80，pp.5-8，2007.7   |
| 22 | Hale, W. M. et al.: Examining the frost resistance of high performance concrete, Construction and Building Materials, Vol.23, No.2, pp. 878-888, Feb.2009   |
| 23 | 千歩修ほか：各種コンクリートの乾湿繰返し・暴露による耐凍害性の変化，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.625-626，2009.8   |
| 24 | 張友海ほか：コンクリートの耐凍害背に及ぼす収縮低減剤の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.63，No.1，pp.458-465，2009  |
| 25 | 二宮祐希ほか：粗骨材の基礎性状がコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.633-634，2009.8   |
| 26 | 小山明男ほか：撤去コンクリート電柱を用いた再生骨材コンクリートの性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.74，No.643，pp.1537-1542，2009.9   |
| 27 | 渡邊詩穂子ほか：凍結融解に起因するひび割れ本数が耐久性指数の変化に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.629-630，2009.8  |
| 28 | 宮澤伸吾ほか：化学組成を調整した高炉セメントA種を用いたコンクリートの基礎性状，セメント・コンクリート論文集，Vol.64，No.1，pp.244-250，2010  |
| 29 | 張友海ほか：収縮低減剤を用いた各種配合コンクリートの収縮特性および耐凍害性，セメント・コンクリート論文集，Vol.64，No.1，pp.413-420，2010  |
| 30 | 上本洋ほか：高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する実験（その2 凍結融解抵抗性と気泡組織），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.593-594，2011.8  |
| 31 | 湯浅憲人ほか：プレキャストコンクリート製品の高耐久化，セメント・コンクリート論文集，Vol.70，No.1，pp.450-457，2016   |
| 32 | 山田和希ほか：吸水試験によるコンクリートの物質移動性の評価（その4 コンクリートの劣化度合いの評価），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.585-586，2017.8  |
| 33 | Il, S. K. et al.: Evaluation of durability of concrete substituted heavyweight waste glass as fine aggregate, Construction and Building Materials, Vol.184, pp.269-277, Sept.2018                                   |
| 34 | Kefeng, T. et al.: Frost Resistance of Concrete with Different Strength Grades and Mineral Admixtures, Modern Civil and Structural Engineering, Vol.2, No.1, pp.1-9, Jan.2018                                       |
| 35 | 橋爪進ほか：高強度コンクリートの空気量が圧縮強度及び耐凍害性に及ぼす影響（その2）耐凍害性，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.535-536，1989.10  |
| 36 | 桂修ほか：高強度コンクリートの耐凍害性及び力学性状に影響を与える要因とその効果に関する研究（その1. 耐凍害性に関する検討），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.733-734，1991.9  |
| 37 | 橋大介：シリカフェーム混和および無混和の超高強度コンクリートの耐凍害性，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.737-73，1991.9  |
| 38 | Menashi, D. C. et al.: Non-Air-Entrained High-Strength Concrete-Is It Frost Resistant?, ACI Materials Journal, Vol.89, No.2, pp.406-415, July/Aug.1992  |
| 39 | 梶山毅ほか：超高強度コンクリートの実用化に関する実験研究（その4 乾燥収縮，圧縮クリープ，凍結融解，中性化），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.289-290，1992.8  |
| 40 | 依田彰彦：高炉スラグ微粉末の高強度・高耐久性コンクリートへの利用，石膏と石灰，No.243，pp.82-87，1993   |
| 41 | 小島正朗ほか：超高強度高性能減水剤の開発（その5. 硬化コンクリートの乾燥収縮，クリープ性状および凍結融解抵抗性），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.83-84，1994.9   |
| 42 | 松本範義ほか：高流動コンクリート用高ピーライト系セメントの品質基準および使用基準作成に関する研究—その4. 硬化コンクリートの圧縮強度・乾燥収縮・凍結融解抵抗性—，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.227-228，1995.8   |
| 43 | Roxanne, K. et al.: Freeze-Thaw Durability of High-Strength Concrete, Minnesota Department of Transportation, Oct.1998  |
| 44 | 小山明男ほか：高強度軽量コンクリートの細孔構造に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.516，pp.7-13，1999.2  |
| 45 | 横室隆ほか：生コン工場で製造した高炉スラグ微粉末を用いた高強度コンクリートについて，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.67-72，1999   |
| 46 | 尾崎公則ほか：遠心成形を施したプレキャストコンクリートの耐久性試験，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.331-332，2001.9   |
| 47 | 中村士郎ほか：低熱ポルトランドセメントを用いた高強度コンクリートの凍結融解抵抗性，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.717-722，2002  |
| 48 | 成田健ほか：フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの配合設計法と性状に関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.14，No.1，pp.43-56，2003.1   |
| 49 | 河野政典ほか：遠心成形外殻プレキャストコンクリートの耐凍害性に関する実験的検討，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1143-1144，2005.9   |
| 50 | 三高信吾ほか：高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす気泡間隔係数・気泡径分布の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1141-1142，2005.9  |
| 51 | 木村信孝ほか：暴露条件・粗骨材種別が高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.745-750，2005  |
| 52 | 千歩修ほか：粗骨材体積・粒度分布が高強度コンクリートの耐凍害性におよぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1161-1166，2007  |
| 53 | 濱幸雄ほか：コンクリートの気泡組織に影響する要因と耐凍害性に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.73，No.634，pp.2061-2067，2008.12   |
| 54 | 中野佑樹ほか：高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす材料・試験条件の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.627-628，2009.8   |
| 55 | 中野佑樹ほか：高強度コンクリートの耐凍害性に及ぼす乾燥・湿潤条件の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.869-874，2010   |
| 56 | 二宮祐希ほか：乾燥を考慮したコンクリートの耐凍害性におよぼす粗骨材の影響，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.84，pp.571-574，2011.7   |
| 57 | 伊藤七恵ほか：海水に浸漬したコンクリートガレキの再生骨材としての有効利用に関する研究（その2. 硬化性状），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.127-128，2015.9   |
| 58 | Hyeonggi, L. et al. : Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material, Journal of Cleaner Production, Vol.170, No.1, pp.683-693, Jan.2018 |

### 3. 文献調査結果

#### 3.1. 水セメント比

表-4 に文献から収集した W/C の一覧を示す。W/C は高強度領域 (W/C ≤ 35%) で 20% から 35% で計 12 水準、普通強度領域 (W/C > 35%) で 36% から 65% で計 9 水準用いられていた。

| W/C (%) | 高強度領域 |    |      | 普通強度領域 |    |    |
|---------|-------|----|------|--------|----|----|
|         | 20    | 27 | 30.9 | 36     | 42 | 50 |
|         | 25    | 28 | 32   | 37     | 44 | 55 |
|         | 26    | 29 | 34   | 40     | 45 | 65 |
|         | 26.4  | 30 | 35   |        |    |    |
| 計       | 12 水準 |    |      | 9 水準   |    |    |

#### 3.2. 養生方法

表-5 に文献から収集した養生方法の一覧を示す。養生方法は高強度領域 (W/C ≤ 35%) で 9 水準、さらに養生期間や養生温湿度等で細分化され、計 79 水準、普通強度領域 (W/C > 35%) で 8 水準、同じく養生期間や養生温湿度等で細分化され、計 30 水準用いられていた。

| 養生方法 | 高強度領域                                |                               | 普通強度領域                       |                               |
|------|--------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
|      | 水中養生<br>湿潤養生<br>気中養生<br>蒸気養生<br>封緘養生 | 乾燥養生<br>乾湿繰返し<br>屋内放置<br>屋外暴露 | 水中養生<br>気中養生<br>蒸気養生<br>封緘養生 | 乾燥養生<br>乾湿繰返し<br>屋内放置<br>屋外暴露 |
| 計    | 9 水準 (79 水準)                         |                               | 8 水準 (30 水準)                 |                               |

◇水中養生 ◆湿潤養生 ◆気中養生 ◆蒸気養生 ◆封緘養生 ◆乾燥養生 ◆乾湿繰返し ◆屋内放置 ◆屋外暴露

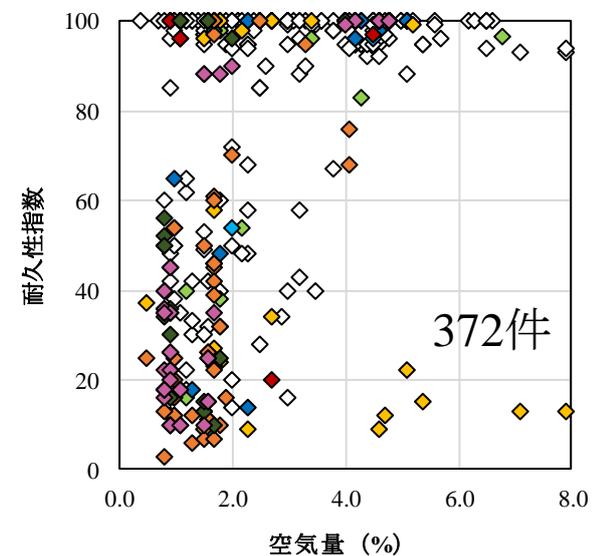


図-2 高強度コンクリートの空気量と耐凍害性の関係

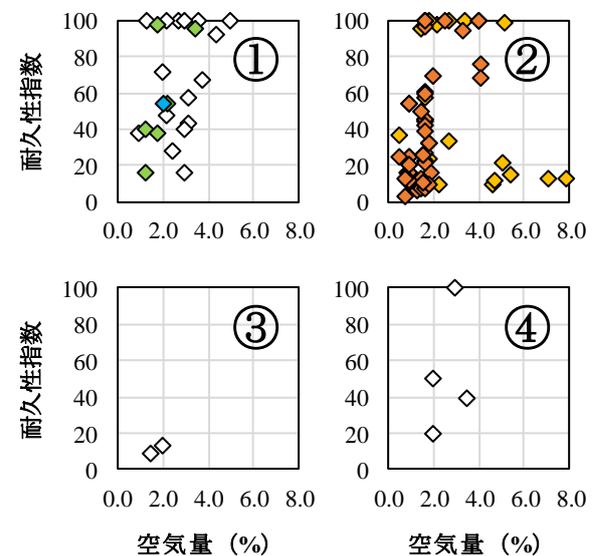


図-3 高強度コンクリートの耐凍害性低下条件

◇水中養生 ◆湿潤養生 ◆気中養生 ◆蒸気養生 ◆封緘養生 ◆屋内放置 ◆屋外暴露

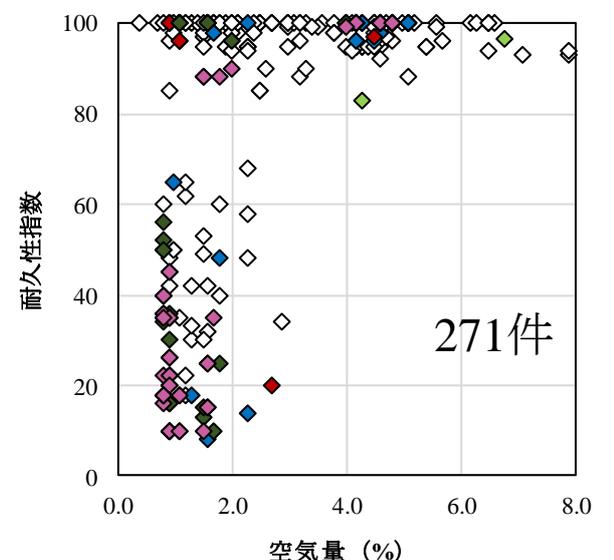


図-4 一般的な材料を用いた高強度コンクリートの空気量と耐凍害性の関係

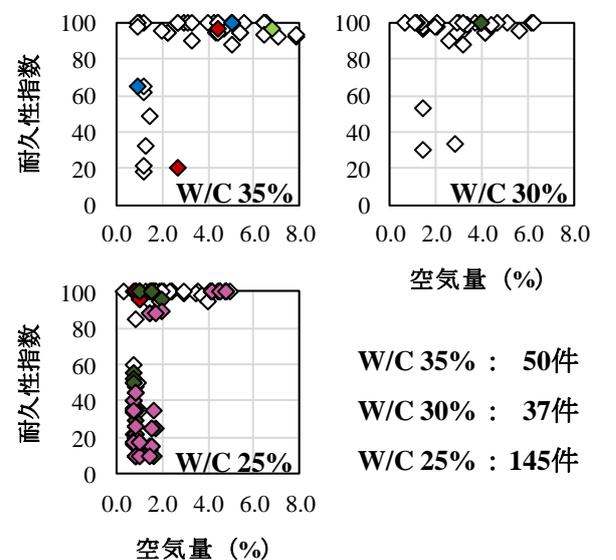


図-5 高強度コンクリートの W/C ごとの空気量と耐凍害性の関係

### 3.3. 高強度領域 (W/C ≤ 35%)

図-2 に文献から収集した高強度コンクリートの全データ (372 件) の空気量と耐凍害性の関係を示す。本報告では、高強度コンクリートの耐凍害性を評価するうえで、耐久性指数 80 を一つの閾値とし、耐久性指数 80 以上を耐凍害性に優れた高強度コンクリートとする。また、高強度コンクリートの Non-AE と AE の空気量の境界が一般に 2.0%付近にあると言われており、現在その空気量 2.0%が高強度コンクリートの適切な空気量を再検討する上で一つの閾値になると考えている。

そこで、空気量 2.0%以上かつ、耐久性指数 80 以下のデータを含む、他の条件と比して一般に耐凍害性が低下すると言われてしている条件を調査した。その結果、4 つの条件が得られた (①高性能 AE 減水剤としてナフタリン系を用いている条件<sup>10)</sup>、②養生方法として乾燥・乾湿繰返し養生を行っている条件<sup>8)</sup>、③粗骨材として風化花崗岩を用いている条件<sup>11)</sup>、④練り上がり温度を 30℃に設定している条件<sup>12)</sup>)。図-3 に各低下条件での空気量と耐凍害性の関係を示す。

これを踏まえ、図-4 にそれらの耐凍害性が低下する条件のデータを除外した、最も一般的な材料を用いた高強度コンクリートのデータ (271 件) の空気量と耐凍害性の関係を示す。前述した通り、各規格で共通して高強度コンクリートにおいても、普通コンクリートと同様、凍害環境においては空気量 4.5%を標準としており、本報告でも、高強度コンクリートにおいて、空気量 3.0%以上で安定して耐久性指数 80 以上を保つこと、つまり、目標空気量 4.5% (許容差 ±1.5%) であることが確認できた。

一方で、コンクリートの耐凍害性は W/C の増減によっても、変化することが一般に知られている。そこで、文献調査から得られた最も一般的な材料を用いた高強度コンクリートのデータを用いて、W/C ごとの最低空気量を検討した。図-5 に W/C ごとの空気量と耐凍害性の関係を示す。W/C35% (データ数: 50 件) および W/C30% (データ数: 37 件) は、上記同様、空気量 3.0%以上で耐久性指数 80 以上を保つこと、つまり、目標空気量 4.5% (許容差 ±1.5%) であることが確認できた。また、W/C25% (データ数: 145 件) 以下の場合には、空気量 2.0%以上で耐久性指数 80 以上を保つこと、つまり、目標空気量を 4.5%から 3.5% (許容差 ±1.5%) に引き下げることが可能と考えられる。

### 3.4. 普通強度領域 (W/C > 35%)

図-6 に普通コンクリートの全データ (213 件) の空気量と耐凍害性の関係を示す。高強度コンクリートと同様、耐凍害性を評価するうえで、耐久性指数 80 を一つの閾値とし、耐久性指数 80 以上を耐凍害性に優れた普通コ

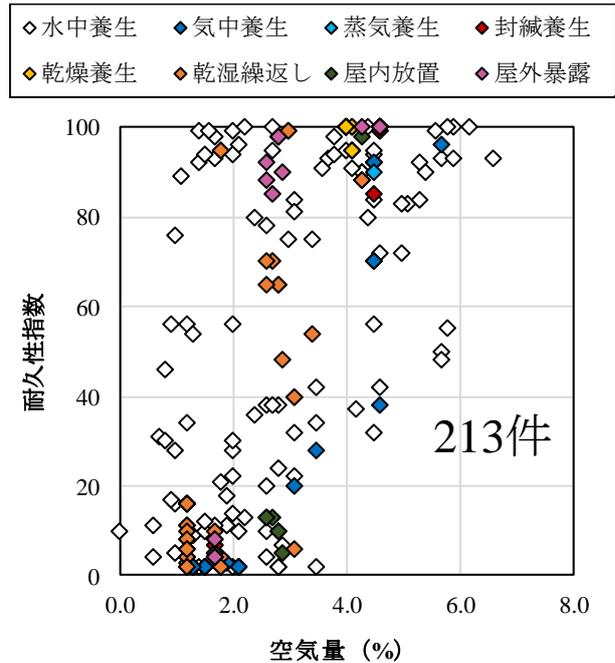


図-6 普通コンクリートの空気量と耐凍害性の関係

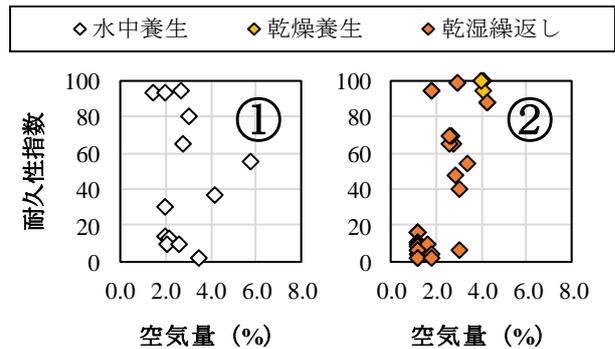


図-7 普通コンクリートの耐凍害性低下条件

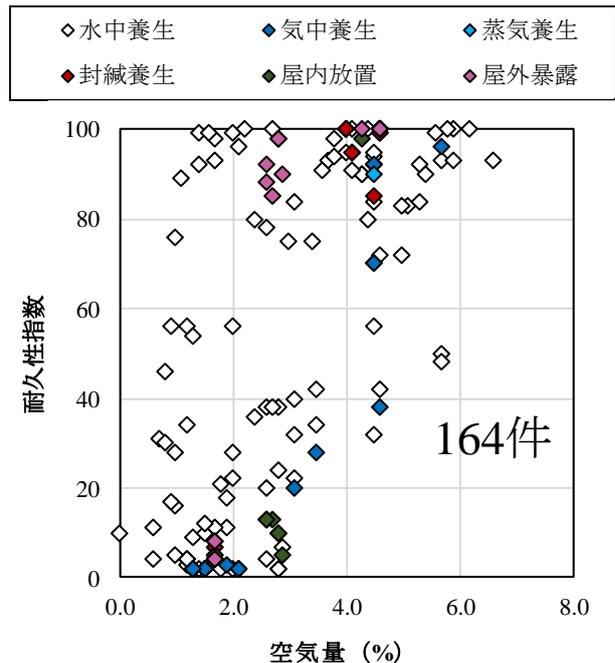


図-8 一般的な材料を用いた普通コンクリートの空気量と耐凍害性の関係

ンクリートとする。高強度コンクリートと比して、空気量 2.0%付近の高い耐久性指数を示すデータが、おおむねなくなり、全体的に右側に推移しているのが見て取れた。

また、図-7 に示すような、高強度コンクリートと同様に、一般に耐凍害性が低下すると言われている条件が 2 つ得られた (①高性能 AE 減水剤としてナフタリン系を用いている条件<sup>10)</sup>、②養生方法として乾燥・乾湿繰返し養生を行っている条件<sup>8)</sup>)。

これを踏まえ、図-8 にそれらの耐凍害性が低下する条件のデータを除外した、最も一般的な材料を用いた普通コンクリートのデータ (164 件) の空気量と耐凍害性の関係を示す。除外前と同様、高強度コンクリートと比して、空気量 2.0%付近の高い耐久性指数を示すデータが、おおむねなくなり、全体的に右側に推移しているのが見て取れた。また、空気量 6.0%以上で安定して耐久性指数 80 以上を保つこと、つまり、目標空気量 7.5% (許容差±1.5%) が妥当であると思われる。しかし、本報告では高強度コンクリートの空気量の再検討を主目的としているため、耐凍害性低下条件は図-7 に示す 2 つとしたが、普通コンクリートの空気量の再検討を行う場合、耐凍害性低下条件には他の要因も考えられる。また、前述した通り、現在 JIS A 5308 で普通コンクリートの荷卸し地点の空気量は 4.5% (許容差±1.5%)、JASS5 26 節で凍結融解作用を受ける AE コンクリートで空気量の下限値を 4.0%以上とすることを定めている。一方で、『凍害環境にある構造物のコンクリートは AE コンクリートとし、目標空気量は、荷卸し時 6.0% (許容差±1.5%) を標準とする。』という東北地方におけるコンクリート構造物設計・施工ガイドライン (案)<sup>13)</sup>を踏まえると、普通コンクリートにおいて、JIS A 5308 や JASS5 26 節に定められる空気量では、十分な耐凍害性が確保されないことが懸念される。そのため、今後普通コンクリートの凍害環境における空気量についても再検討する必要性が示唆された。

#### 4. まとめ

本報告では、高強度コンクリートも含めて十分な耐凍害性を確保するために必要となる空気量に関する文献調査を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) W/C35%および W/C 30%の高強度コンクリートでは、空気量 3.0%以上で優れた耐凍害性を示していることから、凍害環境における目標空気量は 4.5% (許容差±1.5%) が妥当であることが確認できた。
- (2) W/C25%以下の高強度コンクリートにおいては、空気量 2.0%以上で優れた耐凍害性を示したことから、凍害環境における目標空気量を 3.5% (許容差±1.5%) に引き下げることが可能である。

- (3) 普通コンクリートでは、空気量 6.0%以上で優れた耐凍害性を示していることから、JIS A 5308 に定められる目標空気量 4.5% (許容差±1.5%) や JASS5 26 節の凍結融解作用を受ける AE コンクリートでの空気量の下限値を 4.0%以上とすることに対して、目標空気量の再検討を行う必要がある。

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本コンクリート工学協会北海道支部：高性能コンクリート技術講習会 資料集, 1995.2
- 2) 坂井悦郎：化学混和剤, コンクリート工学, Vol.51, No.1, 2013.1
- 3) 清水昭之ほか：座談会『高性能 AE 減水剤のゆくえ』, コンクリート工学, Vol.37, No.6, 1999.6
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 2018
- 5) 日本建築学会：高強度コンクリート施工指針・同解説, 2013
- 6) 濱 幸雄, 平野彰彦, 田畑雅幸, 新 大軌：コンクリートの気泡組織に影響する要因と耐凍害性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.634, pp.2061-2067, 2008.12
- 7) 藤井弘司, 鎌田英治, 洪悦郎：コンクリートの耐凍害性に及ぼす水セメント比, スランプ, 空気量の影響, 日本コンクリート工学年次論文集, Vol.1, pp.33-36, 1979
- 8) 田畑雅幸, 洪悦郎, 鎌田英治：コンクリートの凍害におけるひび割れの役割の考察, 日本建築学会構造系論文集, No.366, pp.11-16, 1986.8
- 9) 米田 恭子, 千歩 修, 長谷川 拓哉：既往の凍結融解試験データに基づくコンクリートの耐凍害性に及ぼす乾湿繰返し・暴露の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.951-956, 2008
- 10) 大川 裕：高性能 AE 減水剤の特徴・種類および性能, コンクリート工学, Vol.37, No.6, pp.15-20, 1999.6
- 11) Roxanne, K. and Mark, S. and Catherine, E.F.: Freeze-Thaw Durability of High-Strength Concrete, Minnesota Department of Transportation, Oct.1998
- 12) 桂 修ほか：高強度コンクリートの耐凍害性及び力学性状に影響を与える要因とその効果に関する研究 (その 1. 耐凍害性に関する検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.733-734, 1991.9
- 13) 東北コンクリート耐久性向上委員会：東北地方におけるコンクリート構造物設計・施工ガイドライン (案), 2009.3