

論文 海水の作用を受けるモルタルの含水状態がスケーリングに及ぼす影響

加藤 利菜^{*1}・鮎田 耕一^{*2}・猪狩 平三郎^{*3}

要旨：海水中で凍結融解作用を受けるコンクリートはスケーリングが発生しやすいことで知られている。本研究は海水と凍結融解の複合作用を受けるコンクリートのスケーリング発生メカニズムを解明することを目的として微小モルタルを使用して冷却速度や最低温度保持時間が異なる凍結融解試験などを行いセメントペーストの含水状態として、特にセメントペースト中の水分の挙動がスケーリングに及ぼす影響について検討した。

キーワード：スケーリング, 凍結融解, 海水, モルタル, 含水状態, 細孔水率

1. はじめに

海洋コンクリートは海水の作用を受けて劣化しやすいことで知られている。特に寒冷地では海水の作用に加え凍結融解の繰返し作用を受けるため劣化はさらに促進され、その主な劣化形態はスケーリングとして現れる。

凍結融解の繰返し作用によるコンクリートの劣化メカニズムに関しては、凍結時の水圧の影響¹⁾や毛細管空隙の分布²⁾、過冷却水の凍結³⁾、浸透圧の発生⁴⁾の影響などが明らかにされてきた。また、海水や塩化物の作用を受けるコンクリートの劣化機構に関しては、セメント水和物である $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の溶出による多孔化⁵⁾ や C-S-H の分解⁶⁾、静水圧による浸透性と膨張量の増加⁷⁾ などが明らかにされてきた。さらに、海水と凍結融解の複合作用を受ける場合の劣化メカニズムに関しては塩化物の影響⁸⁾ やセメントペーストマトリックスの膨張の影響⁹⁾ などが明らかにされている。海水と凍結融解の複合作用を受けるコンクリートの対策としては適正な空気量¹⁰⁾ などが提案されてきているが、スケーリングの発生メカニズムについてはまだ十分に解明されていない。特に、スケーリングは水分に左右される要素が強くセメントペースト中の水分の挙

動を明らかにすることはスケーリングの発生メカニズムを検討する上で欠かせない。

筆者はこれまで海水と凍結融解の複合作用を受けるコンクリートのスケーリング発生に及ぼす影響についてセメントペースト中の水分の挙動を中心に検討した結果、海水の作用を受けるコンクリートでは細孔の飽水度が高くなり、最低温度が低く冷却速度が遅い凍結融解作用を受けることによってさらに海水が浸入し氷点以下で制御される時間も長くなるためスケーリングが生じることなど^{11) 12)} を明らかにしてきたが、冷却速度が異なる場合では氷点以下で制御される時間が異なるため氷点以下で制御される時間がスケーリングの発生に及ぼす影響については未解明である。そこで、冷却速度が異なる凍結融解試験に加えて氷点以下で保持される時間を一定とした凍結融解試験を行いスケーリングの発生に及ぼす影響について検討した。

2. 実験内容

2.1 供試体

直径 10mm で高さ 20mm のモルタル円柱供試体を使用した。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は JIS R 5201 に規定された標準

*1 北見工業大学 工学部土木開発工学科研究員 工博 (正会員)

*2 北見工業大学 工学部土木開発工学科教授 工博 (正会員)

*3 北見工業大学 技術部

砂を使用した。目標フロー値は $170 \pm 5 \text{ mm}$ とし、配合を表-1に示した。

練混ぜはJIS R 5201に準拠し機械練り用練混ぜ機を使用して行った。

供試体は型詰め後、恒温恒湿室(温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $90 \pm 5\%$)に24時間静置した後脱型し、材齢28日まで約 20°C の海水あるいは淡水に浸した。

表-1 配合

W/C (%)	単位量 (kg/m^3)		
	セメント	水	細骨材
50	508	254	1527

2.2 凍結融解試験

材齢28日まで海水あるいは淡水に浸漬した供試体を用いて海水あるいは淡水中で凍結融解試験を行った。凍結融解試験槽の最高温度を $+10^\circ\text{C}$ 、最低温度を -30°C とした。

(1) 冷却速度が異なり最低温度保持時間を30分間とした場合

凍結融解試験の冷却速度を 0.25 、 0.50 、 $0.75^\circ\text{C}/\text{min}$ の3種類とした。最低温度保持時間を30分間と一定とし、昇温速度を $0.44^\circ\text{C}/\text{min}$ として凍結融解12サイクルまで行った。温度制御プログラムを図-1に示した。

(2) 冷却速度を $0.25^\circ\text{C}/\text{min}$ 、最低温度保持時間を30分間と90分間の2種類とした場合

凍結融解試験の冷却速度を $0.25^\circ\text{C}/\text{min}$ 、昇温速度を $0.44^\circ\text{C}/\text{min}$ とした。最低温度保持時間を30分間と90分間の2種類とし凍結融解6サイクルまで行った。温度制御プログラムを図-2に示した。

(3) 氷点以下で保持される時間を一定とし、冷却速度が異なる場合

冷却速度を 0.25 、 0.50 、 $0.75^\circ\text{C}/\text{min}$ の3種類、昇温速度を $0.44^\circ\text{C}/\text{min}$ とした。氷点以下で制御される時間を一定とするために、冷却速度を $0.25^\circ\text{C}/\text{min}$ とした場合では最低温度保持時間を30分間、冷却速度を $0.50^\circ\text{C}/\text{min}$ とした場合では

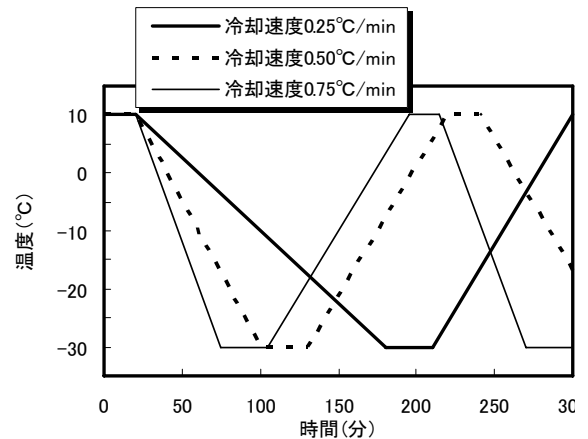


図-1 冷却速度が異なり最低温度保持時間を30分間とした場合の温度制御プログラム

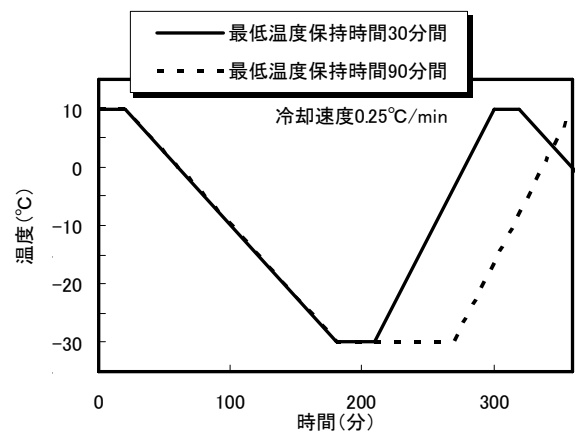


図-2 冷却速度を $0.25^\circ\text{C}/\text{min}$ とし、最低温度保持時間を30分間と90分間とした場合の温度制御プログラム

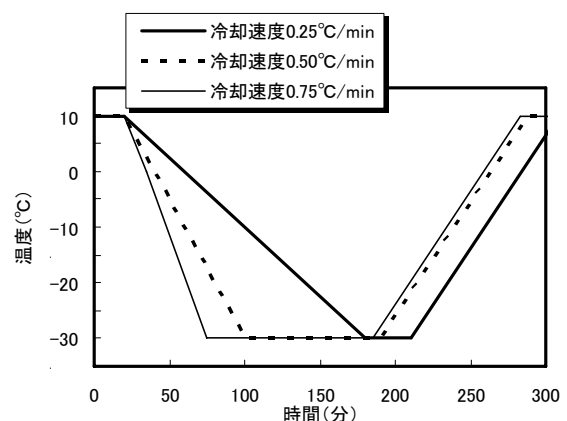


図-3 冷却速度が異なり氷点以下で保持される時間を一定とした場合の温度制御プログラム

90 分間，冷却速度を 0.75°C/min とした場合には 110 分間とした。以上の凍結融解試験を 12 サイクルまで行った。図-3 に温度制御プログラムを示した。

2.3 細孔構造

凍結融解試験後の供試体の水和をアセトン中で停止させ，質量が定量になるまで常温で減圧乾燥を行った。その後供試体を 2.5mm から 5.0mm の大きさに粉砕し，水銀圧入式ポロシメータによって半径 3.75nm から 5.62×10^4 nm の範囲の細孔構造を測定した。

2.4 質量

凍結融解試験開始時の材齢 28 日の海水あるいは淡水浸漬供試体の表乾質量(W_1)，凍結融解試験後の表乾質量(W_2)を測定後，質量が定量になるまで常温で減圧乾燥を行い乾燥質量(W_3)を計量し，式 (1) から総細孔容積(V)当たりの含水率 (以下，細孔水率と表記) (S)を求めた。なお，総細孔容積は細孔半径 3.75nm から 5.62×10^4 nm の範囲の細孔の容積とした。さらに，凍結融解作用によって発生したスケーリング片を気乾状態で一日間乾燥させた後質量(W_4)を計量し，式 (2) から凍結融解試験前の表乾質量当たりのスケーリング片の質量 (以下スケーリング率) (C)を求めた。

$$S = \frac{W_2 - W_3}{W_3} \times 100 \quad (\%) \quad (1)$$

ここに，

S : 細孔水率 (%)

W_2 : 凍結融解試験後の表乾質量 (g)

W_3 : 凍結融解試験後の乾燥質量 (g)

V : 総細孔容積 (mm^3/g)

ρ : 水の密度 ($1.0 \times 10^{-3} \text{g}/\text{mm}^3$)

$$C = \frac{W_4}{W_1} \times 100 \quad (\%) \quad (2)$$

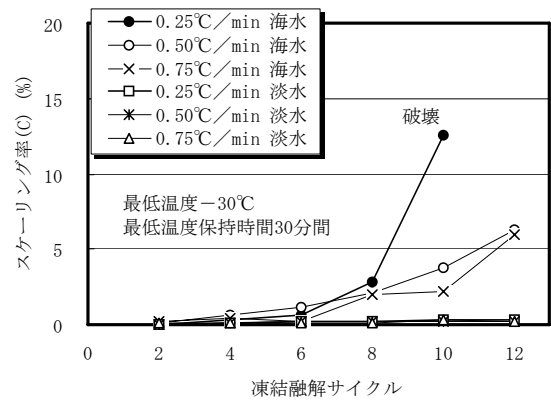


図-4 最低温度保持時間を 30 分間とした場合の海水あるいは淡水浸漬供試体の凍結融解に伴うスケーリング率の変化 (冷却速度別)

C : スケーリング率

W_1 : 凍結融解試験前の表乾質量 (g)

W_4 : スケーリング片の質量 (g)

3. 実験結果及び考察

3.1 冷却速度が異なり最低温度保持時間を 30 分間とした場合

図-4 に冷却速度が異なり最低温度保持時間を 30 分間とした場合の海水あるいは淡水浸漬供試体のスケーリング率を冷却速度別に示した。

海水浸漬供試体では凍結融解サイクルに伴いスケーリング率が増加した。特に，冷却速度を 0.25°C/min とした凍結融解作用を受けた場合に顕著となった。なお，冷却速度 0.25°C/min とした海水浸漬供試体では凍結融解 10 サイクル以降のデータが存在しないが，これは海水浸漬供試体が 10 サイクル以降で破壊したためである。このことから最低温度保持時間を 30 分間と一定にした場合では冷却速度が遅い 0.25°C/min の凍結融解作用を受けると氷点以下で保持される時間が長くなるためスケーリングが多く発生したと考えられる。

3.2 冷却速度を 0.25°C/min, 最低温度保持時間を 30 分間と 90 分間とした場合

図-5 に冷却速度を 0.25°C/min, 最低温度保持時間を 30 分間あるいは 90 分間とした凍結融解

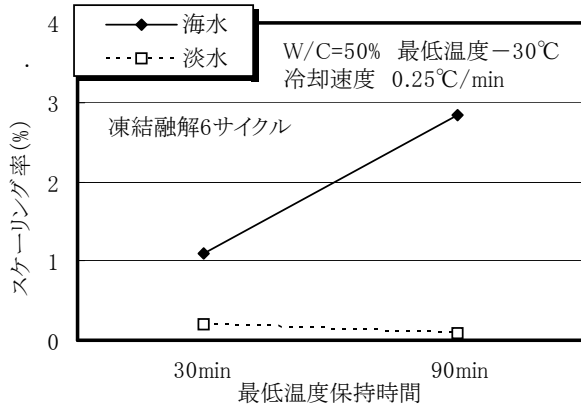


図-5 最低温度保持時間を 30 分間あるいは 90 分間とした場合の海水あるいは淡水浸漬供試体のスケーリング率

作用を受けた場合の海水あるいは淡水浸漬供試体のスケーリング率を示した。

最低温度保持時間に関わらず海水浸漬供試体のスケーリング率が大きい。特に、最低温度保持時間を 90 分間とした場合に顕著となった。一方、淡水浸漬供試体では最低温度保持時間に関わらずスケーリングはほとんど発生していない。

図-6 に最低温度保持時間を 30 分間と 90 分間とした場合における海水あるいは淡水浸漬供試体の細孔水率を示した。

海水浸漬供試体の細孔水率が最低温度保持時間に関わらず大きくなった。特に、最低温度保持時間を 90 分間とした場合における海水浸漬供試体の細孔水率が大きくなった。このことから

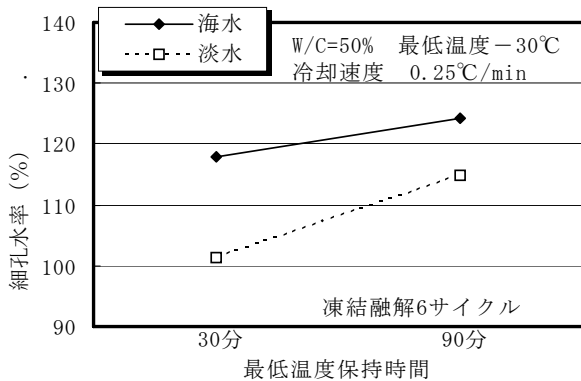


図-6 最低温度保持時間を 30 分間あるいは 90 分間とした場合の海水あるいは淡水浸漬供試体の細孔水率

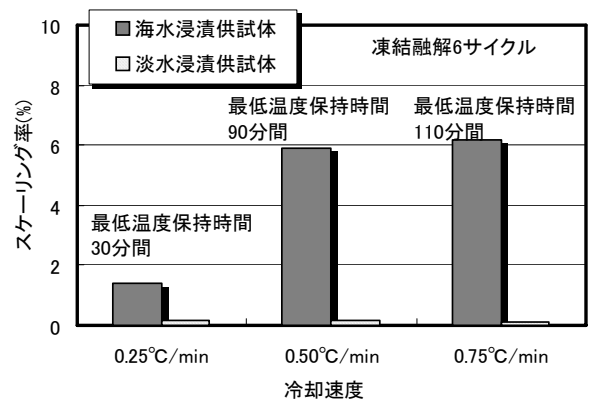


図-7 氷点以下での保持時間を一定とした場合における凍結融解 6 サイクル後の海水あるいは淡水浸漬供試体のスケーリング率 (冷却速度別)

最低温度での保持時間が長い場合ではセメントペーストへ水分が浸入しやすい状態になると考えられる。なお、細孔水率が 100%を超えているのは細孔水率を求めた式に凍結融解作用によって発生する微細ひび割れの影響を考慮していないためである。

3.3 氷点以下で制御される時間を一定とした場合

図-7 に氷点以下で制御される時間を一定とした場合における凍結融解 6 サイクル後の海水あるいは淡水浸漬供試体のスケーリング率を冷却速度別に示した。

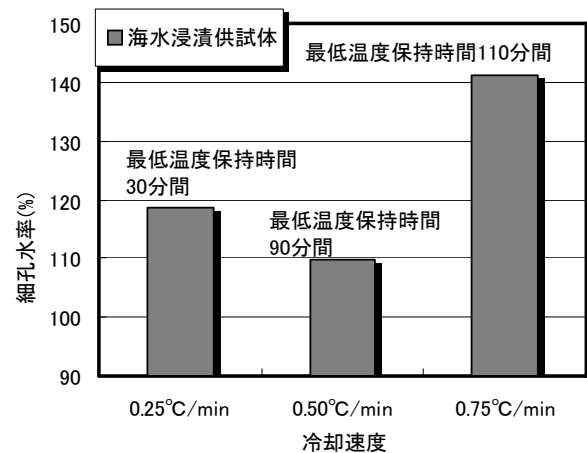


図-8 氷点以下での保持時間を一定とした場合における凍結融解 6 サイクル後の海水浸漬供試体の細孔水率 (冷却速度別)

冷却速度に関わらず海水浸漬供試体のスケーリング率が高い。特に、冷却速度を $0.50^{\circ}\text{C}/\text{min}$ と $0.75^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした場合にこの傾向が顕著となった。

淡水浸漬供試体では冷却速度に関わらずスケーリング率は非常に小さく、淡水の作用を受ける場合ではセメントペーストにスケーリングや微細ひび割れなどの劣化がほとんど発生していないと思われる。

図-8 に氷点以下での保持時間を一定とした場合における凍結融解 6 サイクル後の海水浸漬供試体の細孔水率を冷却速度別に示した。

冷却速度を $0.75^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした場合に細孔水率が最も大きくなった。このことから氷点以下で保持される時間を一定とした場合では冷却速度を $0.75^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とするとセメントペーストへ水分が浸入しやすい状態にあると思われる。

氷点以下で保持される時間を一定とする場合では冷却速度が速いほど最低温度で保持される時間が長くなる。そのため、冷却速度 $0.75^{\circ}\text{C}/\text{min}$ の凍結融解試験を行った場合ではセメントペーストが飽水状態となりスケーリングが発生したと思われる。

3.4 凍結融解作用の各種要因がスケーリングに及ぼす影響

図-9 に海水浸漬供試体の凍結融解 6 サイクル後のスケーリング率を示した。

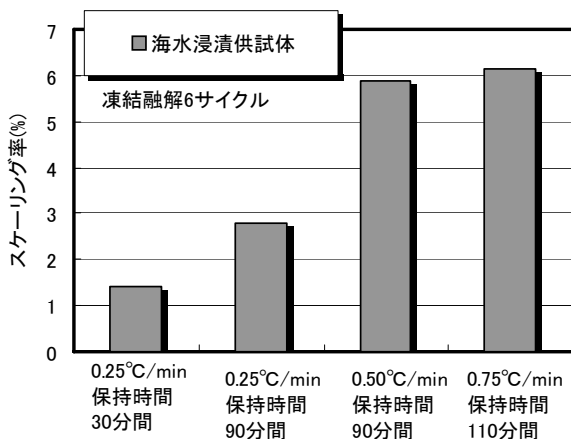


図-9 凍結融解 6 サイクル後の海水浸漬供試体のスケーリング率

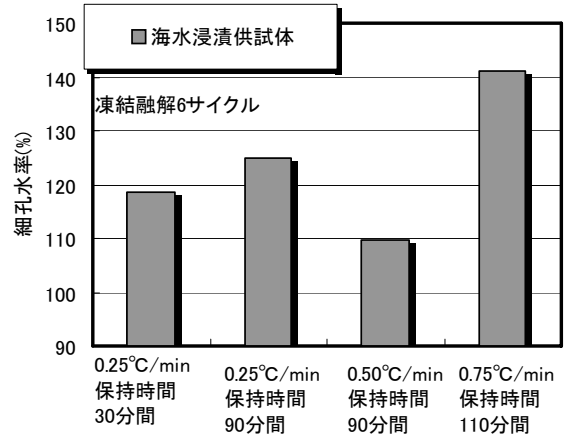


図-10 凍結融解 6 サイクル後の海水浸漬供試体の細孔水率

氷点以下で保持される時間を一定とし冷却速度を $0.50^{\circ}\text{C}/\text{min}$ と $0.75^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とした場合にスケーリング率が大きくなった。このことから最低温度での保持時間が長く、冷却速度が速い場合にスケーリングが多く発生しやすい状態になることが考えられる。

図-10 に凍結融解 6 サイクル後の海水浸漬供試体の細孔水率を示した。

ばらつきはあるものの、冷却速度を $0.75^{\circ}\text{C}/\text{min}$ とし最低温度保持時間を 110 分間とした場合に最も細孔水率が増加した。このことから冷却速度を $0.75^{\circ}\text{C}/\text{min}$ に設定し、最低温度保持時間を 110 分間とした場合ではセメントペーストに水分が浸入しやすい状態になることが考えられる。

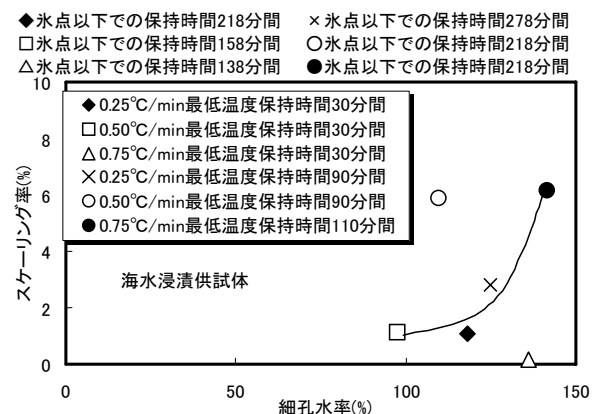


図-11 凍結融解 6 サイクル後の海水浸漬供試体の細孔水率とスケーリング率の関係

図-11 に凍結融解 6 サイクル後の海水浸漬供試体の細孔水率とスケーリング率の関係を示した。

冷却速度を 0.75°C/min, 最低温度保持時間を 30 分間とした場合と冷却速度を 0.50°C/min, 最低温度保持時間を 90 分間とした場合を除けば、細孔水率の増加に伴いスケーリング率が増加する傾向にある。特に、氷点以下で保持される時間や最低温度保持時間が長い場合に細孔水率やスケーリング率が大きくなった。

以上の結果から、海水と凍結融解の複合作用を受ける場合では最低温度で保持される時間や氷点以下で制御される時間が長いほどスケーリングが発生しやすい状態になることが考えられる。

4. まとめ

海水と凍結融解の複合作用を受けるコンクリートのスケーリング発生メカニズムを解明することを目的として冷却速度、最低温度保持時間、氷点以下で制御される時間がスケーリングに及ぼす影響について検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 海水に浸した供試体ではセメントペーストに水分が多く浸入するとスケーリングの発生を助長される。
- 2) 氷点以下で制御される時間や最低温度での保持時間が長いとセメントペーストへ水分が浸入しスケーリングが発生しやすくなる。

参考文献

- 1) T.C Powers :A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete, Journal of American Concrete Institute, Vol.16, No.4, pp.245-272, 1945
- 2) 鎌田英治:コンクリートの凍害と細孔構造, コンクリート工学年次論文報告集, 第 10 巻, 第 1 号, pp.51-60, 1988
- 3) 桂修ほか:過冷却水の凍結を考慮したセメント硬化体の凍害機構, コンクリート工学論文集, 第 10 巻, 第 2 号, pp.51-63, 1999

- 4) 田中享二ほか:セメントモルタルの半透過性に起因する浸透圧の測定, 日本建築学会構造系論文集, 第 495 号, pp.9-13, 1997
- 5) 鈴川諭一ほか:各種セメントの塩化物抵抗性, セメント・コンクリート, No.245, pp.12-19, 1975
- 6) 鈴木一孝ほか:コンクリートの耐久性評価を目的とした水和組織の分析手法に関する研究, コンクリート工学論文集, 第 1 巻, 第 2 号, pp.39-49, 1990
- 7) G.V D Wegen :Behavior of concrete affected by sea-water under high pressure, Materials and Structures, Vol.26, pp.549-556, 1993
- 8) 藤井卓, 藤田嘉夫:硬化セメントペーストの凍結融解劣化に及ぼす塩化物の影響, 土木学会論文報告集, 第 343 号, pp.209-217, 1984
- 9) 王欣ほか:海水の作用を受けるコンクリートの凍結水量と凍結変形挙動, セメント・コンクリート論文集, No.54, pp.404-409, 2000
- 10) 鮎田耕一, 林正道:海水の作用を受けるコンクリートの耐久性確保のための適正空気量, 第 8 回コンクリート工学年次講演会論文集, pp.93-96, 1986
- 11) 加藤利菜ほか:セメントペーストマトリックスへの海水の浸入がスケーリングに及ぼす影響について, セメント・コンクリート論文集, No.57, pp.279-284, 2003
- 12) 加藤利菜ほか:海水の凍結挙動がコンクリートのスケーリングに及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.58, pp.295-300, 2004