

蒸気養生コンクリートのスケーリング抵抗性のパラフィン系混和剤による改善

維持管理工学研究室 尾鍋智哉

1. 研究背景と目的

コンクリートの工場製品の製造においては、生産性の向上を目的として、高温の蒸気によって早期にコンクリートの強度を発現させる蒸気養生が実施されている。蒸気養生を行ったコンクリート（以下、蒸気養生コンクリート）は、蒸気養生後、およびその後の気中養生中に微細ひび割れの発生やモルタル界面の脆弱化、細孔構造の粗大化等により、耐凍害性が低下する可能性が指摘されている。さらに、スケーリングも含めた凍害の対策として最も有効な手段は、エントレインドエアの適切な連行であるとされているが、工場製品の場合には締固めや表面気泡の低減のために過剰な振動が加えられ、硬化コンクリート中の空気量が大幅に減少しているとも報告されている。

近年、空気連行に依存しない凍害対策として、パラフィンエマルジョン (P) および亜硝酸塩 (CN) を主成分とする混和剤（以下、耐久性向上混和剤）の研究が行われている。耐久性向上混和剤をコンクリート中に添加することにより、塩害および凍害に対する抵抗性が向上することが明らかにされている。しかしながら、蒸気養生コンクリートに対する耐久性向上混和剤の研究はこれまでほとんど行われていない。

本研究では、12種類の普通コンクリートおよび耐久性向上混和剤を添加したコンクリートに対し蒸気養生を行い、供試体を作製した。それらに対し、凍結融解試験によるスケーリング量の測定、細孔構造の評価等を行い、耐久性向上混和剤の添加が蒸気養生コンクリートのスケーリング抵抗性に与える影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

表-1にコンクリートの配合を示す。水セメント比は、耐久性向上混和剤の添加によるスケーリング抵抗性の向上が容易に評価できるよう、通常の工場製品より高い $W/C=50\%$ を基本とした。また、s38-nonAE, s38-nonAE-M1, s38-nonAE-M3 に関しては、通常の工業製品で採用される水セメント比での耐久性向上混和剤の影響を検討するため、 $W/C=38\%$ の配合とした。w50-AE, w50-nonAE は、養生方法によるスケーリング抵抗性の違いを確認するために、水中養生を行った。その他の供試体については、すべて蒸気養生を行った。耐久性向上混和剤を添加する供試体に関しては、M1の添加量を基準に、M2 (P: 基準量, CN: 無添加), M3 (P: 2倍量, CN: 基準量), M4 (P: 3倍量, CN: 無添加) と、添加量を変化させ、PとCNの添加量の違いによるスケーリング抵抗性への影響を検討することとした。

2.2 養生方法

蒸気養生を行う供試体は、コンクリート打ち込み後、図-1に示す温度条件のもとで蒸気養生を行った。翌日に脱型し、材齢7日まで無蓋の屋外に静置した後、材齢28日まで 20°C の実験室内で気中養生を行った。水中養生を行う供試体は、材齢1日で脱型後、材齢7日まで $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ の恒温水槽内で水中養生を行い、材齢28日まで 20°C の実験室内にて気中養生を行った。

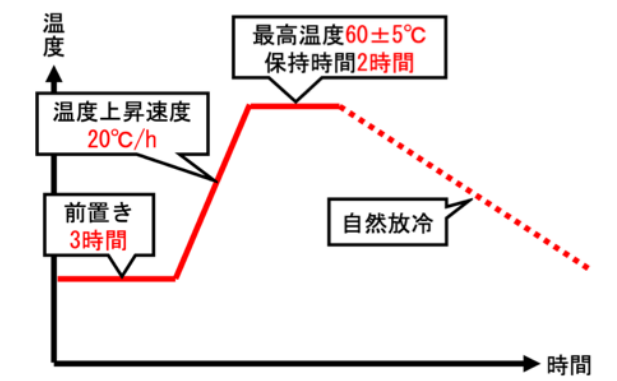


図-1 供試体概要

2.3 スケーリング試験概要

本試験では、RILEM CDF法に準拠し、 $150\times 150\times 80\text{mm}$ の供試体を各配合3体ずつ用いて凍結融解試験を行った。試験面は最も脆弱と考えられるコテ仕上げ面とした。養生終了後、供試体の側面に防水アルミテープを貼り、試験面を7日間3%NaCl水溶液に事前浸漬した。事前浸漬は図-2に示すように、蓋つきのステンレス容器内に、高さ10mmのスペーサーの上に試験面を下にして供試体を置き、試験面より5mmの位置まで3%NaCl水溶液に浸漬した。引続き、この浸漬状態のまま凍結融解試験を実施した。 $+20^{\circ}\text{C}$ から

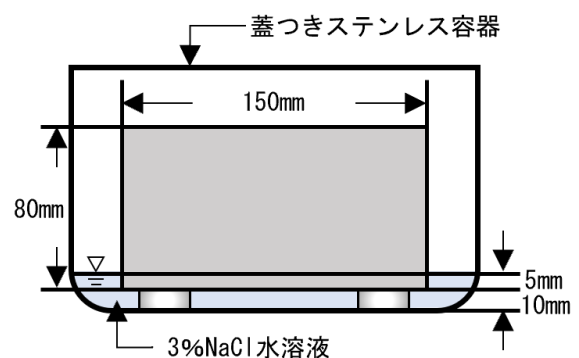


図-2 凍結融解試験供試体概要

表-1 配合表

| 名称 | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | | | SL (cm) | air (%) | | | | |
|---------------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|------|------|-----|------|------|---------|---------|------|-----|------|-----|
| | | | W | C | S | G | SP | AE | Pa | CN | | | | | | |
| w50-AE | 50 | 45 | 150 | 300 | 856 | 1054 | 1.35 | 8A | — | — | 10.5 | 4.0 | | | | |
| s50-AE | | | | | | | 1.35 | 8A | — | — | | | | | | |
| s50-AE-M1 | | | | | | | 1.35 | 13A | 4.5 | 3.8 | | | | | | |
| w50-non AE | 50 | 48 | 155 | 310 | 948 | 1034 | 2.64 | — | — | — | 10.0 | 1.6 | | | | |
| s50-non AE | | | | | | | 2.64 | — | — | — | | | | | | |
| s50-non AE-M1 | | | | | | | 2.64 | — | 4.5 | 3.8 | | | 12.0 | 2.4 | | |
| s50-non AE-M2 | | | | | | | 2.64 | — | 4.5 | — | | | | | | |
| s50-non AE-M3 | | | | | | | 2.64 | — | 9.0 | 3.8 | | | | | | |
| s50-non AE-M4 | | | | | | | 2.64 | — | 13.5 | — | | | | | 14.5 | 4.2 |
| s38-non AE | 38 | 47 | 155 | 408 | 889 | 1010 | 2.86 | — | — | 10.0 | 1.7 | | | | | |
| s38-non AE-M1 | | | | | | | 2.45 | — | 4.5 | | | 3.8 | | | | |
| s38-non AE-M3 | | | | | | | 2.45 | — | 9.0 | | | 3.8 | | | | |

−20℃までの凍結工程を4時間、−20℃の凍結保持を3時間、−20℃から+20℃までの融解工程を4時間、+20℃の温度保持を1時間とする計12時間を1サイクルとし、60サイクル繰り返した。6サイクルごとに試験面より剥落したスケーリング片を採取し、乾燥させた後、その質量を測定した。

2.4 細孔径分布

細孔径分布は、凍結融解試験用の供試体とは別の150mm×150mm×80mmの供試体のコテ仕上げ面近傍から5mm程度の小片試料を採取して行った。試料をアセトン処理およびD-dry処理後、水銀圧入ポロシメータにより細孔径分布を測定した。0.004~412MPaの加圧過程のみで0.35mm~3.1nmの細孔量を測定した。

2.5 気泡間隔係数

細孔径分布測定用の試料を採取した供試体から、ダイヤモンドカッターを用いて気泡間隔係数測定用試料を切り出し、表面研磨を実施した。その後、測定面側を洗浄、乾燥させた後、硬化コンクリート気泡計測装置を用いて、リニアトラバース法により側線を横切る気泡の個数および弦長を測定し、気泡間隔係数を算出した。

3. 実験結果

3.1 スケーリング試験結果

(1) AE コンクリート

図-3にAEコンクリートのスケーリング試験結果を示す。

耐久性向上混和剤を添加せず、蒸気養生を行ったs50-AEは、水中養生を行ったw50-AEと比較し、スケーリング量が多くなった。また、耐久性向上混和剤を標準量添加したs50-non AE-M1は、s50-AEよりスケーリング量が少なくなり、水中養生を行ったw50-AEと同程度のスケーリング抵抗性を示した。

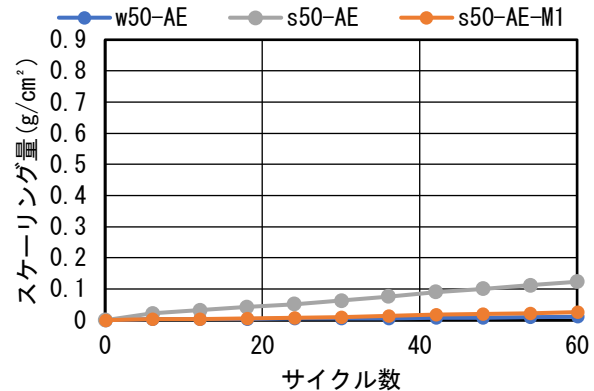


図-3 スケーリング試験結果 (AE コンクリート)

(2) non AE コンクリート (W/C=50%)

図-4にW/C=50%のnon AEコンクリートのスケーリング試験結果を示す。

W/C=50%のnon AEコンクリートにおいては、水中養生を行ったw50-non AE以外は、全体的にAEコンクリートよりスケーリング量が多くなった。パラフィン添加したコンクリートの中で、パラフィンを標準量の2倍量添加したs50-non AE-M3のみ、パラフィン無添加のs50-non AEよりスケーリング量が多くなった。これは、打設時に激しいブリーディングの発生が見られたことから、ブリーディングの影響により表面が脆弱化したためであると考えられる。パラフィンを標準量添加したs50-non AE-M1、s50-non AE-M2は、s50-non AEと比較して若干スケーリング量が低下した。また、パラフィンを標準量の3倍量添加したs50-non AE-M4は、s50-non AEの1/3程度のスケーリング量であり、比較的高いスケーリング抵抗性を示した。しかしながら、蒸気養生を行ったnon AEコンクリートの中で最も高いスケーリング抵抗性を示したs50-non AE-M4であっても、耐久性向上混和剤無添加のAEコンクリート(s50-AE)よりスケーリング量が多くなった。また、亜硝酸カルシウムの添加の有無で比較すると、s50-non AE-M1とs50-non AE-M2の

スケーリング量に大きな差は無く、したがってこの条件では亜硝酸カルシウムの効果はほとんど認められなかった。

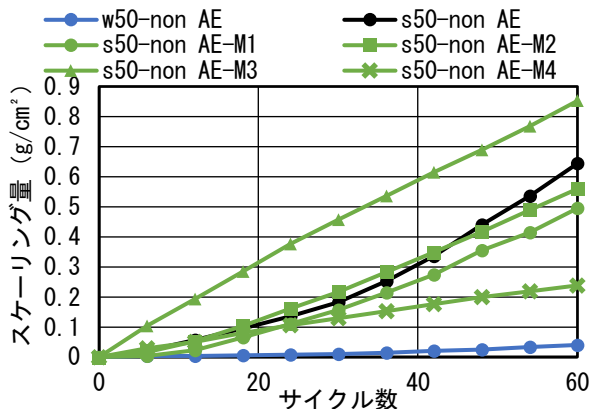


図-4 スケーリング試験結果 (W/C=50% non AE コンクリート)

(3) non AE コンクリート (W/C=38%)

図-5 に W/C=38%の non AE コンクリートのスケーリング試験結果を示す。

30 サイクル目までは、耐久性向上混和剤無添加の s38-non AE と、耐久性向上混和剤を標準量添加した s38-non AE-M1 は同程度のスケーリング量であったが、30 サイクル目以降 s38-non AE のスケーリング量が急激に増加し、60 サイクル終了時には、s38-non AE-M1 の 8.5 倍のスケーリング量となった。このスケーリング量は W/C=50%の配合も含めた全配合中で最も多かった。一般的に、水セメント比を小さくすることでスケーリング抵抗性が高くなるとされているが、本実験では逆の結果となった。パラフィン標準量の 2 倍量添加した s38-non AE-M3 は、始めから低い値で推移していき、60 サイクル終了時のスケーリング量は、s38-non AE の 1/17 程度となった。W/C=50%の non AE コンクリートのスケーリング量と比較すると、耐久性向上混和剤が無添加のものは、W/C=38%の方が 2 倍程度多くなり、耐久性向上混和剤を添加した場合には、W/C=50%の non AE コンクリートの中で最もスケーリング量が少なくなった s50-non AE-M4 よりも、s38-non AE-M1 の方が少なくなった。パラフィンの添加によるスケーリング抵抗性の向上が、W/C=50%のコンクリートよりも顕著に現われる結果となった。

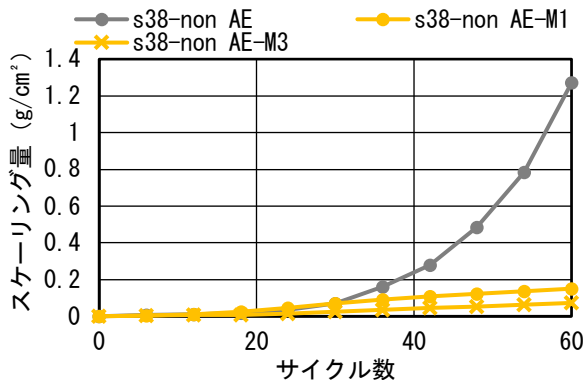


図-5 スケーリング試験結果 (W/C=38% non AE コンクリート)

3.2 細孔径分布

一般に、細孔直径 0.04~2μm の細孔がコンクリートの耐凍害性に影響を及ぼすとされていることから、細孔系分布の測定結果より、その範囲の細孔量を抽出したものが図-6 である。AE コンクリート、non AE コンクリートともに、水中養生を行ったものに比べ、蒸気養生を行ったものはこの範囲の細孔量が増えており、蒸気養生コンクリートが水中養生コンクリートに比べスケーリング抵抗性が低い原因の 1 つであると考えられる。また、スケーリング抵抗性の向上が見られた耐久性向上混和剤を添加したコンクリートに関しては、0.04~2μm の細孔量が、無添加のコンクリート s50-AE、s50-non AE、s38-non AE より大きくなるという結果となった。このことから、耐久性向上混和剤によるスケーリング抵抗性向上には、この範囲の細孔構造の変化は寄与していないと考えられる。

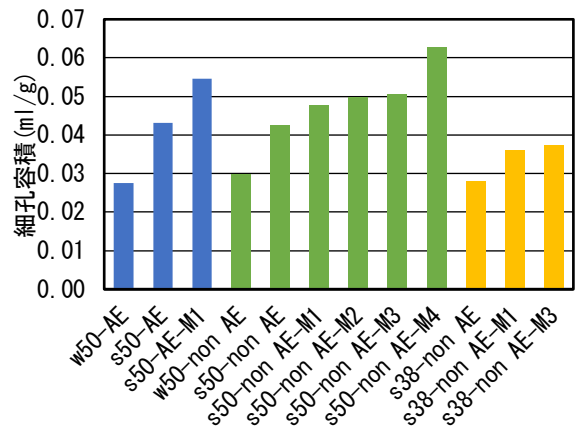


図-6 0.04~2 μm の細孔容積

3.3 気泡間隔係数

図-7 にリニアトラバース法による硬化コンクリート中の気泡径の分布を、図-8 に気泡間隔係数を示す。

AE コンクリートに関して、s50-AE に比べ s50-AE-M1 は、気泡径 0.1~0.35mm の気泡個数が多くなった。non AE コンクリートに関しては、耐久性向上混和剤を添加した s50-non AE-M1、s50-non AE-M4 は、s50-non AE に比べ、0.4mm までの気泡径の気泡個数が大幅に増えた。また、パラフィンの添加率が増加すると、気泡個数も増加する傾向が見られた。気泡間隔係数は、AE コンクリート、non AE コンクリートともに、耐久性向上混和剤の添加により値が小さくなった。また、その傾向は non AE コンクリートの方が顕著で、さらにパラフィンの添加率が増加した方が、気泡間隔係数の値も小さくなった。これは前述のようにコンクリート中に分散して存在するパラフィン粒子も気泡として計測されている可能性があり、また、パラフィンに付着して微小気泡が連行されている可能性も考えられる。

西ら²⁾は、疎水性化合物がコンクリート中に油滴として存在し、それらが気泡と同様に圧力を緩和することで対凍害性を向上させると報告している。また、福田ら³⁾は、パラフィンは粘度が小さいため、細孔水の凍結膨張圧によって移動することで凍結融解抵抗性の向上に大きく寄与すると考察している。本研究においても、疎水性化合物であるパラフィンの油滴がコンクリート中に分散しており、それらが水の凍結により生じる膨張圧を緩和しスケーリング抵抗性を高めたと考

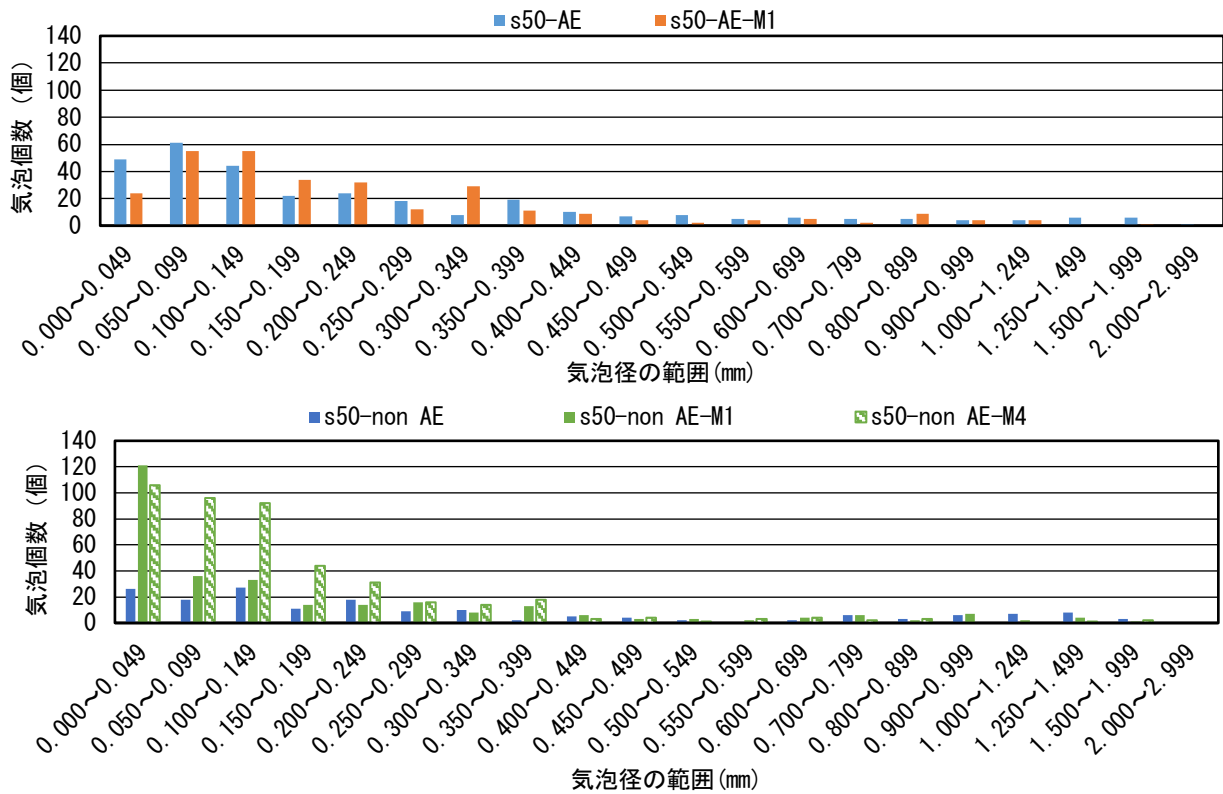


図-7 硬化コンクリート中の気泡径の分布

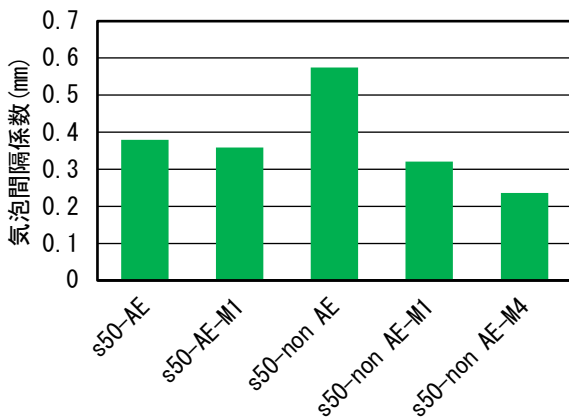


図-8 気泡間隔係数

えられる。

パラフィンを添加していない AE コンクリートである s50-AE より、気泡個数も多く、気泡間隔係数の値も小さい s50-non AE-M4 のスケーリング量の方が多くなったことから、スケーリング抑制に対するパラフィンの油滴の効果は、エントレインドエアを完全に代替できるほどではない。しかしながら蒸気養生した AE コンクリート s50-AE-M1 は、フレッシュ時の空気量が少ないにもかかわらず、水中養生した w50-AE と同等であることから、AE コンクリートにおける振動締め固めによる空気量の減少や蒸気養生による品質の低下を補うことは十分に可能であると考えられる。

4. 結論

本研究では、蒸気養生コンクリートのスケーリング抵抗性に対するパラフィンエマルジョン及び亜硝酸塩

が与える影響について検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) AE コンクリートの場合には、蒸気養生によるスケーリング抵抗性の低下を耐久性向上混和剤の添加で補うことができた。non AE コンクリートでは、耐久性向上混和剤の添加で蒸気養生コンクリートを水中養生と同程度のスケーリング抵抗性まで改善することはできなかったが、パラフィンの添加量を増やすことで改善の傾向が見られた。
- (2) W/C=50%と比較し、W/C=38%の方が、パラフィンの添加によるスケーリング抵抗性の向上効果が顕著に現れた。
- (3) リニアトラバース法による計測より、パラフィンの添加による気泡量の増加が確認された。
- (4) 耐久性向上混和剤の添加によるスケーリング抵抗性の向上は、パラフィンがコンクリート中に油滴として存在し、凍結膨張圧を緩和するためであると考えられる。

参考文献

- 1) 鈴木篤, 小林正凡, 田中弘: 高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートの耐凍害性について, セメント・コンクリート論文集, Vol.45, No.74, pp.454-459, 1991
- 2) 西祐宜, 名和豊春: 疎水性化合物系を用いたセメント硬化体の凍害劣化抑制に関する研究, Vol.79, No.704, pp.1415-1424, 2014.10
- 3) 福田悠人, 森下将吾, 本多大希, 濱幸雄: 新型凍害抑制剤を添加した高強度コンクリートの凍結融解抵抗性の評価, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 第21巻, pp.161-166, 2021.10