

## 論文 超高性能コンクリートの長期凍結融解抵抗性

佐藤文則<sup>\*1</sup>・上田 洋<sup>\*2</sup>・出頭圭三<sup>\*3</sup>・牛島 栄<sup>\*4</sup>

要旨：高強度・高耐久および自己充填性（高流動）を保有する超高性能コンクリートを対象として、凍結融解サイクルが 1000 回以上におよぶ長期凍結融解試験を行い、コンクリートの長期的な凍結融解抵抗性を気泡組織および細孔組織の観点より検討した。その結果、凍結融解サイクル 1000 回時に十分な凍結融解抵抗性を得るには、空気量で 3% 以上、気泡間隔係数で  $250\mu\text{m}$  以下に設定する必要があることが分かった。また、凍結細孔量比と所要の相対動弾性係数に至る凍結融解サイクルの関係より、AE コンクリートは、nonAE コンクリートと比較して、凍結細孔量比が同じでも所要の相対動弾性係数に至るサイクル数が長くなることを示した。

キーワード：超高性能コンクリート、長期凍結融解抵抗性、空気量、気泡間隔係数、凍結細孔量

## 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の経年劣化が顕在化するのに伴い、公共構造物の補修・補強などの維持管理が重要視され、これに要する維持管理費用も増加する傾向にある。したがって、今後新設されるコンクリート構造物には、設計・施工段階における経済的合理性だけでなく、構造物の維持管理を含めたライフサイクルも考慮する必要性が生じる。このような背景より、コンクリートの高度化・多様化が求められており、特に高強度・高耐久および自己充填性を特徴としたコンクリートの研究・開発が積極的に行われている。そこで、本研究は、設計基準強度で  $60\text{N/mm}^2 \sim 100\text{N/mm}^2$  の高強度・高流動コンクリートを対象に、長期的な各種耐久性能の評価を目的とした。そのうち、耐凍害性に着目し凍結融解回数で 1000 回以上にわたる実験的な検討を行った結果について報告するものである。

なお、本研究は、「S.Q.C 構造物開発・普及協会」に設置された耐久性部会の調査・研究活動の一環として実施したものである。

## 2. 実験概要

## 2.1 長期凍結融解試験の位置づけ

通常、コンクリートの凍結融解抵抗性を評価する方法として、JSCE-G501 に規定されるコンクリートの凍結融解試験方法が適用されている。本試験における試験開始および終了の判断基準は、供試体を温度  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  の水中で材齢 14 日まで養生した後に試験を開始し、凍結融解の繰り返しりが 300 サイクルに達した時、または相対動弾性係数が 60% 以下になった場合に試験を終了するとしている。しかしながら、コンクリートの耐凍害性を長期的な観点より検討する場合、実験室レベルの試験環境と実環境との関係を考慮する必要性が生じる。例えば、洪、鎌田らの研究によれば、札幌に代表される凍害危険度 3 の箇所では、夏期における乾燥の影響を考慮した場合には、年凍結融解回数は ASTM-A 法に相当する凍結融解回数で 6 回としている<sup>1)</sup>。すなわち、JSCE G501 に準拠して凍結融解回数を 300 回で終了した場合には、耐凍害性として約 50 年を補償したに過ぎない。

\*1 前田建設工業（株）技術研究所研究第 1 グループ主任（正会員）

\*2 (財) 鉄道総合技術研究所材料技術開発推進部 技師 理修（正会員）

\*3 前田建設工業（株）技術研究所研究第 1 グループ部長 工博（正会員）

\*4 (株) 青木建設研究所副所長 工博（正会員）

表-1 コンクリートの配合

| 配合条件  |                      |        |       |       |                                   |      | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |     |      |                   |             |
|-------|----------------------|--------|-------|-------|-----------------------------------|------|--------------------------|------|-----|-----|------|-------------------|-------------|
| 配合名   | 配合強度                 | 目標スランプ | 目標空気量 | 水結合材比 | 粗骨材かさ容積                           | 細骨材率 | 水                        | セメント | 混和材 | 細骨材 | 粗骨材  | 高性能 AE 減水剤<br>B×% | AE 剤<br>B×% |
|       | (N/mm <sup>2</sup> ) | (cm)   | (%)   | (%)   | (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) | (%)  |                          |      |     |     |      |                   |             |
| LC72  | 72                   | 60     | 4.0   | 38.6  | 0.52                              | 52.9 | 165                      | 427  | -   | 891 | 827  | 1.00              | 0.0020      |
| FA72  | 72                   | 60     | 4.0   | 34.9  | 0.52                              | 50.0 | 165                      | 378  | 95  | 809 | 827  | 1.25              | 0.0075      |
| BS72  | 72                   | 60     | 4.0   | 41.5  | 0.52                              | 52.9 | 165                      | 199  | 199 | 891 | 827  | 1.05              | 0.0025      |
| BL96  | 96                   | 65     | 3.5   | 32.6  | 0.51                              | 52.3 | 165                      | 506  | -   | 852 | 811  | 1.35              | 0.0020      |
| SF120 | 120                  | 65     | 3.0   | 25.7  | 0.50                              | 49.6 | 165                      | 578  | 64  | 750 | 795  | 2.00              | 0.0080      |
| BS120 | 120                  | 65     | 3.0   | 22.0  | 0.50                              | 47.2 | 165                      | 675  | 75  | 681 | 795  | 1.75              | 0.0012      |
| OPC29 | 29                   | 12*    | 4.5   | 59.9  | 0.65                              | 45.1 | 160                      | 267  | -   | 813 | 1034 | 0.25              | 0.0030      |

結合材の種類  
 LC72：低熱ポルトランドセメント FA72：普通ポルトランドセメント+フライアッシュ BS72：普通ポルトランドセメント+高炉スラグ微粉末  
 BL96：高強度・高流動用ポルトランドセメント SF120：高強度・高流動用ポルトランドセメント+シリカフェム  
 BS120：高強度・高流動用ポルトランドセメント+高炉スラグ超微粉末 OPC29：普通ポルトランドセメント

B：セメント+混和材 \*スランプの値を示す。

したがって、ある土地の ASTM A 法に相当する年凍結融解回数を数回とし、年を重ねる毎に凍結融解回数が累加されると仮定した場合、より長期的な耐凍害性を把握するために、凍結融解回数を増加させて検討する必要がある。そこで、今回超高性能コンクリートの耐凍害性を検討するために、凍結融解サイクルで 1000 回以上、または相対動弾性係数が 60%になるまでとし試験を実施するものとした。

## 2.2 コンクリートの配合

試験対象としたコンクリートの配合は、計 7 種類とした。配合強度は、高強度コンクリートとして実用的な強度範囲を考慮し、設計基準強度 60,80,100N/mm<sup>2</sup> とし、それらの配合強度に応じて結合材の種類を選定した。なお、配合強度を得る材齢は、結合材の強度発現性を考慮して材齢 56 日とした。また、比較のために普通ポルトランドセメントを用いた通常のコンクリートについても同様の試験を行った。コンクリートの配合を表-1 に示す。なお、各種コンクリートの目標空気量は、コンクリートの高強度化の観点からは、空気量が少ない方が有利なため、予備試験において、空気量をパラメータに凍結融解サイクル 300 回までの凍結融解試験を実施し、その範囲で十分な凍結融解抵抗性が得

られる空気量の下限值を選定している<sup>2)</sup>。また、コンクリートに用いた使用材料は、表-2 に示すとおりである。

表-2 使用材料

| 材料種別 | 材料名および物性                                                                                                                                                                                                                                                               |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| セメント | 普通ポルトランドセメント[OPC] 比重：3.16<br>低熱ポルトランドセメント[LC] 比重：3.26<br>高強度・高流動コンクリート用ポルトランドセメント[BL] 比重：3.20                                                                                                                                                                          |
| 混和材  | フライアッシュ[FA]<br>比重：2.11,比表面積：3480cm <sup>2</sup> /g<br>高炉スラグ微粉末[BS1]72N/mm <sup>2</sup> 用<br>比重：2.89,比表面積：5830cm <sup>2</sup> /g<br>高炉スラグ超微粉末[BS2]120N/mm <sup>2</sup> 用<br>比重：2.91,比表面積：15000cm <sup>2</sup> /g<br>シリカフェム[SF]<br>比重：2.20,比表面積：200000cm <sup>2</sup> /g |
| 細骨材  | 川砂 表乾比重：2.54,吸水率：2.70%,粗粒率：2.61                                                                                                                                                                                                                                        |
| 粗骨材  | 硬質砂岩 2005 砕石 表乾比重：2.54,吸水率：2.70%,実績率：60.1%                                                                                                                                                                                                                             |
| 混和剤  | 高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系)<br>AE 減水剤 (リグニンスルホン酸系)                                                                                                                                                                                                                           |

## 2.3 コンクリートの練混ぜ

コンクリートは容量 100L の 2 軸強制練りミキサーを用いて、1 バッチあたり 60～70L 練混ぜた。練混ぜ時間は、練混ぜ時のミキサーの負荷電流値が安定するのに要する時間を事前に確認し

ておき、各配合に応じて適切に定めた<sup>2)</sup>。

2.4 試験項目および方法

フレッシュ時および硬化後のコンクリートの試験項目および方法を表-3 に示す。フレッシュ時の試験は、土木学会「高流動コンクリートの設計・施工指針」に準拠し、練上がり後 15 分で試験を実施した。硬化後の試験は、図-1 に示す温度サイクルで長期凍結融解試験を行い、加えて、所要材齢において圧縮強度試験を、気泡組織および細孔構造を把握するためにリニアトラバース法による空気量の測定と水銀圧入法による細孔径分布の測定を行った。

3. 試験結果

フレッシュ時および硬化後のコンクリートの試験結果を表-4 に示す。

3.1 凍結融解抵抗性

図-2 に凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係を、図-3 に凍結融解サイクルと重量変化率の関係を示す。これより、凍結融解サイクル 300 回までは、いずれの配合においても相対動弾性係数は約 100%と高い凍結融解抵抗性を示している。しかしながら、より長期的に凍結融解サイクルを重ねることで、配合間の抵抗性

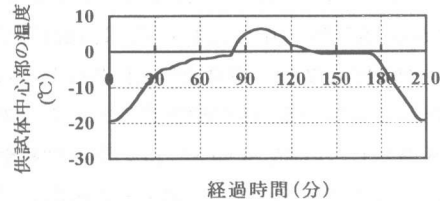


図-1 代表的な温度サイクル（試験体中心部）

表-3 試験項目および方法

| 試験項目   |                  | 試験方法                                        |
|--------|------------------|---------------------------------------------|
| フレッシュ時 | スランプ試験           | JIS A 1101                                  |
|        | スランプフロー試験        | 土木学会「高流動コンクリートの設計・施工指針」に準拠<br>練上がり後 15 分で測定 |
|        | フロー 50cm 到達時間の測定 |                                             |
|        | V 漏斗を用いた流下試験     |                                             |
|        | 空気量試験            |                                             |
|        | コンクリート温度         | 温度計                                         |
| 硬化後    | 凍結融解試験           | JSCE G501<br>1000 サイクル以上                    |
|        | 圧縮強度試験           | JIS A 1108<br>試験材齢<br>7,28,56,91,181 日      |
|        | 硬化後の空気量の測定       | リニアトラバース法                                   |
|        | 細孔径分布の測定         | 水銀圧入法<br>(モルタル部で測定)                         |

表-4 試験結果一覧

| 試験項目  |                                            |          | 配合名   |      |      |       |       |       |       |
|-------|--------------------------------------------|----------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|
|       |                                            |          | LC72  | FA72 | BS72 | BL96  | SF120 | BS120 | OPC29 |
| フレッシュ | スランプ <sup>a</sup> フロー(cm)                  |          | 56.8  | 58.3 | 61.8 | 62.0  | 62.5  | 68.8  | 11.5* |
|       | 50cmフロー到達時間(秒)                             |          | 6.7   | 4.6  | 3.9  | 4.4   | 8.7   | 6.9   | -     |
|       | V漏斗流下時間(秒)                                 |          | 13.1  | 8.0  | 10.6 | 10.5  | -     | 19.2  | -     |
|       | 空気量(%)                                     |          | 4.3   | 4.2  | 3.7  | 4.5   | 3.0   | 3.1   | 4.4   |
|       | コンクリート温度 (°C)                              |          | 20.0  | 19.5 | 20.0 | 22.0  | 22.5  | 22.0  | 20.0  |
| 硬化後   | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> )               | 7 日      | 28.1  | 42.2 | 35.8 | 53.2  | 76.2  | 84.0  | 19.0  |
|       |                                            | 28 日     | 55.4  | 59.2 | 56.2 | 83.8  | 107.3 | 104.7 | 33.8  |
|       |                                            | 56 日     | 70.6  | 67.2 | 67.2 | 95.5  | 122.2 | 112.6 | 39.7  |
|       |                                            | 91 日     | 74.5  | 70.7 | 73.5 | 100.7 | 126.3 | 120.3 | 38.7  |
|       |                                            | 180 日    | 84.8  | 76.7 | 81.2 | 110.2 | -     | 126.4 | 41.0  |
|       | 耐久性指数<br>DF<br>(%)                         | M=300 回  | 102   | 103  | 115  | 104   | 103   | 107   | 100   |
|       |                                            | M=600 回  | 97    | 101  | 114  | 94    | 77    | 106   | 97    |
|       |                                            | M=1020 回 | 45    | 103  | 117  | 52    | 42    | 110   | 97    |
|       | 静弾性係数(×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> ) |          | 3.39  | 3.18 | 3.22 | 3.58  | 3.86  | 3.86  | 3.04  |
|       | 割裂強度(N/mm <sup>2</sup> )                   |          | 4.48  | 3.88 | 4.49 | 5.83  | -     | 6.58  | 3.02  |
|       | 空気量(%)                                     |          | 2.4   | 3.3  | 2.8  | 2.0   | 2.0   | 3.4   | 2.0   |
|       | 気泡間隔係数(μ m)                                |          | 306   | 219  | 247  | 276   | 452   | 296   | 296   |
|       | 総細孔量(×0.01ml/g)                            |          | 6.627 | -    | -    | 5.567 | 4.08  | -     | 7.767 |

に差が表れている。今回の試験では、LC72,BL96,SF120 の配合において、凍結融解サイクル 600 回程度で、相対動弾性係数の急激な低下が起こっている。凍結融解サイクルで 1020 回を基準とし、LC72,BL96,SF120 の耐久性指数 (DF) を評価すると各々 45,52,42% となった。その他の配合では、耐久性指数で約 100% と優れた凍結融解抵抗性を示していた。また、重量変化率をみると、OPC29 は、重量減少が多いにも関わらず相対動弾性係数の低下は小さい。一方、LC72,BL96 は OPC29 に比べて重量減少が少ないが、600 回以後の相対動弾性係数の低下が著しい。SF120 は他の配合と劣化傾向が大きく異なっており、供試体重量が増加し相対動弾性係数が急激に低下している。このように、配合種類によって凍害劣化のモードが異なっている。この凍害劣化モードの相違は、コンクリートの強度特性、気泡組織および細孔構造が大きく関連していると思われる。

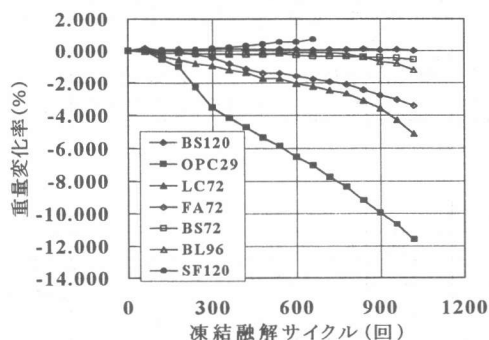


図-2 凍結融解サイクルと相対動弾性係数の関係

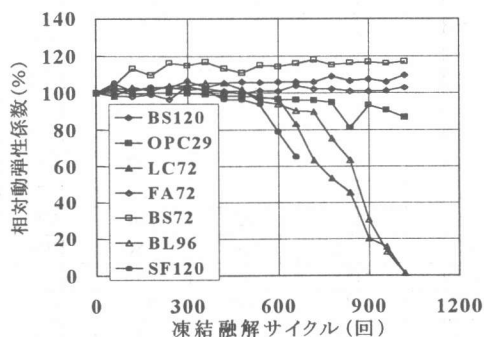


図-3 凍結融解サイクルと重量変化率の関係

### 3.2 気泡組織に関する検討

所要の凍結融解サイクル M を 1020 回に設定した場合のリニアトラバース法によって得られた空気量と耐久性指数の関係を図-4 に、気泡間隔係数と耐久性指数の関係を図-5 に示す。

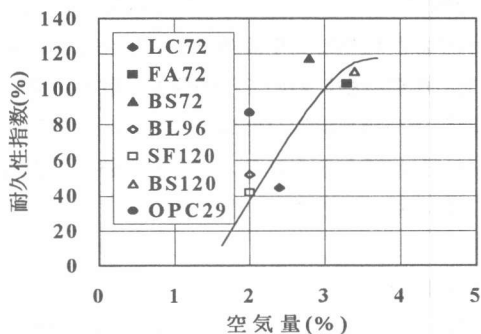


図-4 空気量と耐久性指数 (M : 1020 回)

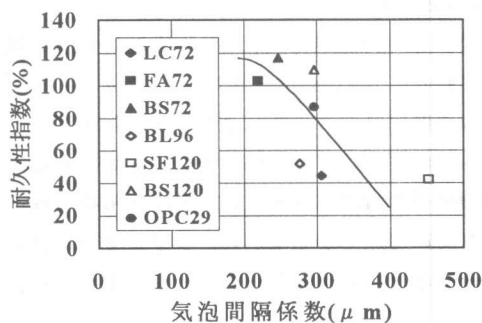


図-5 気泡間隔係数と耐久性指数 (M : 1020 回)

これより、凍結融解サイクルで 1000 回を越えても耐久性指数で約 100% を確保するためには、耐凍害性に寄与する有効な空気量で 3% 以上および気泡間隔係数で 250  $\mu\text{m}$  以下にする必要があることが分かる。この値は、耐凍害性を確保するための一般的な推奨値と一致している。

しかしながら、フレッシュ時にエアメータにより測定した値では、いずれの配合においても 3% 以上を確保しており、LC72,BL96,SF120 の配合では、フレッシュ時の目標空気量を高めに設定しておく必要があると考えられる。これは、コンクリートが高強度になるほど粘性が高まり、それに伴いエントラップトエアが増加したこと

に起因していると思われる。図-6 に各コンクリートの気泡分布の形態を示す。これより、凍結融解サイクルを 1000 回以上受けても、十分な抵抗性を示したコンクリートは、気泡径で 0.2mm 以下の良質な気泡が他のコンクリートに比べて多く混入されていることが分かる。また、BL96 および LC72 の配合は、OPC29 と同程度の気泡形態を示しているが、凍結融解サイクル 1020 回時の耐凍害性は、OPC29 に比べて劣っている。これは、OPC29 の配合は単位ペースト量が他の配合に比べて少ないことに関係していると思われる。

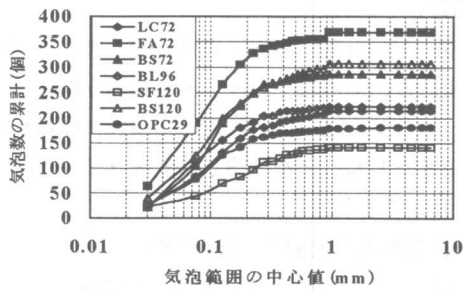


図-6 各コンクリートの気泡分布

3.3 細孔組織に関する検討

長期凍結融解試験において、凍結融解サイクル 1020 回までに耐久性指数が低下した LC72, BL96, SF120 および OPC29 の 4 配合について、水銀圧入法により細孔径分布を測定した。図-7 に測定結果を示す。

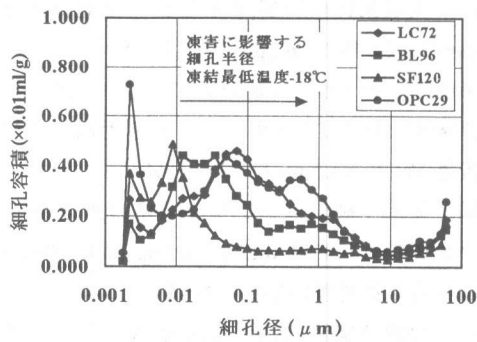


図-7 細孔径分布の測定結果

コンクリートの耐凍害性は、コンクリートが保有する細孔構造、特に凍結水量と凍結温度の観点より細孔径と密接な関係があると言われていいる。鎌田らによって行われた、最低温度を -18℃ とする凍結融解試験結果と硬化セメントペーストの区間細孔量との関係では、0.0178 ~ 1.000 μm の細孔半径が凍結融解による劣化に最も相関性が高い結果を得ている<sup>3)</sup>。また、石井らの研究によれば、nonAE コンクリートの場合ではあるが、凍結細孔量比（コンクリート硬化体の全細孔量に対する、ある最低温度下での凍結細孔量の割合）と破壊サイクル数（相対動弾性係数：ED が 60% となる時のサイクル数）との間に線形関係があることを示している<sup>4)</sup>。この観点より測定を行った各コンクリートの細孔構造をまとめると表-5 の通りとなる。

表-5 凍結融解抵抗性に関わる細孔特性

| 項目                   | 配合    |       |       |       |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|
|                      | LC72  | BL96  | SF120 | OPC29 |
| 総細孔量<br>(×0.01ml/g)  | 6.627 | 5.657 | 4.080 | 7.767 |
| 凍結細孔量<br>(×0.01ml/g) | 4.110 | 3.237 | 1.230 | 4.347 |
| 凍結<br>細孔量比(%)        | 62.0  | 57.2  | 30.1  | 56.0  |
| ED=60%時の<br>サイクル数(回) | 740   | 850   | 700   | -     |
| ED=80%時の<br>サイクル数(回) | 670   | 760   | 600   | 1100* |

\* : OPC29 の予測値

これより、コンクリート中の総細孔量は、コンクリート強度が高いほど小さくなっており、細孔組織としては OPC29 より他の配合の方が緻密である。また、凍結細孔量（最低温度 -18℃ で細孔半径 0.0178 μm 以上のものが凍結していると仮定）の推定値も総細孔量と同様に強度が高いほど小さくなっている。しかしながら、凍結細孔量比は、細孔半径 0.0178 μm をしきい値とした細孔量の比であるため、OPC29 と LC72, BL96 は、ほぼ同じ凍結細孔量比となった。また、SF120 は他の配合に比べて凍結細孔量比は約 30% と非常に小さい値を示した。

図-8 に凍結細孔量比と相対動弾性係数 ED が 60%および 80%に達した時のサイクル数の関係を示す。

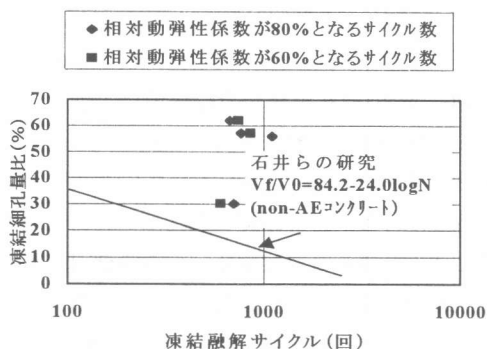


図-8 凍結細孔量比と所要の相対動弾性係数に到達する時の凍結融解サイクル数

図-8 に示すように nonAE コンクリートの場合、石井らの研究によれば、相対動弾性係数が 60%となる時の凍結融解サイクルと凍結細孔量比との間には、図中の実線に示す負の相関関係が存在するとしている<sup>4)</sup>。データが少なく今回の試験結果からは明確な考察はできないが、今回の実験においても、凍結細孔量比が小さいほど、所要の相対動弾性係数に到達する凍結融解サイクルは多くなる傾向を示している。ただし、SF120 については、凍結細孔量比に対する所要の相対動弾性係数に到達するサイクル数が少なく、他のコンクリートと傾向を異にしている。

これは、先にも示したように、重量変化率に対する相対動弾性係数の応答が他のコンクリート異なっており、凍害劣化のモードも含めて、今後更に検討する必要があるものと思われる。

#### 4. まとめ

自己充填性を有する高強度・高流動コンクリートの凍結融解サイクル 1000 以上に及ぶ長期凍結融解試験を実施した。その結果は以下に示すとおりである。

(1)凍結融解サイクル 300 回においては、いずれの配合においても十分な凍結融解抵抗性を示

した。しかしながら長期的な観点より凍結融解サイクル 1020 回で各コンクリートの凍結融解抵抗性を評価するとコンクリート間の性能の差が表れる。

(2)凍結融解サイクル 1020 回で、十分な耐凍害性を得ようとする場合においても、凍害に対する一般の推奨値（有効な空気量で 3%以上、気泡間隔係数で  $250\mu\text{m}$  以下）と同等となった。

(3)細孔組織の検討より AE コンクリートは、nonAE コンクリートと比較して、凍結細孔量比が同じでも、所要の相対動弾性係数に至るサイクル数が長くなることを示した。

#### [謝辞]

本研究の計画・実施に当たって、東京大学岡村甫教授、前川宏一教授、元東京大学助教授小澤一雅氏および（財）鉄道総合研究所の御指導を頂きましたことを付記し、謝辞と致します。

#### [耐久性部会構成会社]（50 音順）

青木建設、奥村組、国光製鋼、熊谷組、サンフロー、新日本製鐵、住金鹿島鋼化、住友大阪セメント、竹本油脂、太平洋セメント、長大、鉄建建設、東亜建設工業、戸田建設、飛島建設、間組、フジタ、不動建設、ポゾリス物産、前田建設工業、三井建設、

〔（株）、（財）省略〕

#### 参考文献

- 1) 洪悦郎ほか：コンクリートの耐凍害性におよぼす環境条件の影響、日本建築学会北海道支部研究報告集 No.62, pp.13-16, 1989
- 2) 田中斉ほか：超高性能コンクリートの耐久性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.1, pp.227-232, 1998
- 3) 鎌田英治：硬化コンクリート中の水分凍結、コンクリート工学, Vol.32, No.9, pp.43-48, 1994.9
- 4) 石井清：長期現地暴露に基づくダムコンクリートの耐凍害性に関する研究、東京大学学位論文, 1997