論文　凍害環境で５年間曝露した膨張コンクリートの耐久性評価

竹下　永造[*1]・長塩　靖祐[*2]

要旨：膨張材を使用したコンクリート（膨張コンクリートと略す）は 30 年以上の使用実績があり，様々な場所で広く利用されている。しかしながら，膨張コンクリートの耐久性に関する報告は，促進試験によるものが多く，曝露試験による報告は少ないのが現状である。そこで，本論文は，膨張コンクリートを凍害環境にて 5 年間曝露を行い，様々な試験手法を用いて，膨張コンクリートの相対的な耐久性評価を実施した。その結果，凍害環境で曝露した膨張コンクリートは，普通コンクリートと同等の耐久性が確保されていることが確認された。

キーワード：曝露試験，膨張材，膨張コンクリート，耐久性

1. はじめに

近年，我が国の社会状況は，高度経済成長期の終了に伴い社会資本への投資額の減少傾向が続いている。そのため，良いものを作って長く使用するという社会風潮が広まり，長期の耐久性が確実に担保されるような材料設計や維持管理が期待されつつあるといえる。例えば，材料の観点からは，長期耐久性の高い材料として，高炉スラグ微粉末やフライアッシュを利用したコンクリート等が挙げられる。これら材料については，環境負荷低減という一面もあり，多方面からの研究および検討が行われている。最近では，土木学会から「混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案）」[1)] が発刊され，業界全体での前向きな取組みが見受けられる。また，維持管理の観点からは，一例として山口県の表層品質向上に向けた取組み [2)] が挙げられる。これは，目視評価を活用したひび割れ抑制システムであり，①打込み時期による抑制，②材料等による抑制，③施工の基本事項の遵守の 3 項目をチェックするものである。本方式は山口方式と呼ばれ, 国土交通省東北地方整備局や新潟県, 群馬県，沖縄県でも運用されており，今後も全国に普及していくものと想定される。

このように，材料面や維持管理面からも耐久性確保が望まれている中，これらの根底には，最優先される要求性能としてひび割れの発生を抑制する必要があるとの認識がある。なぜなら，コンクリート構造物に発生するひび割れは，劣化因子の侵入に対する抵抗性を低下させ，それにより耐久性が損なわれると考えられているからである [3)]。そのため，コンクリート構造物のひび割れ抑制を目的として膨張材が使用されるケースが多くなってきており，多様化するコンクリートへの対応が膨張材に求められている。例えば，膨張材に関する最近の動向として，JIS A 6202:2017「コンクリート用膨張材」[4)] が 2017 年に改正され，膨張材の性能による区分が新しく設けられるとともに，各区分により性能および品質が新たに規定されている。また，2017 年に建築学会より「膨張材・収縮低減剤を使用するコンクリートの調合設計・製造・施工指針（案）・同解説」[5)] が発刊され，目標とする乾燥収縮率の級及び乾燥収縮率の上限値が定められたことに加え，製造・運搬・施工・品質管理などの方法を合理的に決定するための手順が示されている。このように，膨張材を取り巻く環境は時代の流れに対応しつつあるといえよう。しかしながら，膨張材を使用したコンクリートそのものの耐久性については未だに不明な点が多く，また，報告事例も促進試験によるものが多く，曝露試験によるものが少ないのが現状である。特に，凍結融解抵抗性については，膨張材を使用したコンクリートは普通コンクリートと比較して劣ると報告 [6)] されているが，膨張材の性能を評価するためには拘束の有無が重要との報告 [7)] もあり，膨張コンクリートの耐久性評価を総合的に判断する必要があると考えられる。

そこで，本論文では膨張コンクリートを凍害環境にて 5 年間曝露を行い，様々な試験手法を用いて，膨張コンクリートの相対的な耐久性評価を実施した。その結果について報告するものである。

2. 試験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

試験に使用した材料一覧を**表－1** に示す。また，コンクリートの配合を**表－2** に示す。膨張材は石灰系膨張材（区分：膨張材 20 型）を 20kg/m^3 にて使用した。コンクリートの配合については, 水セメント比は 55%と設定し, 目標スランプは 15±2.5(cm), 目標空気量は 5.0±0.5(%) と設定した。使用した AE 減水剤はリグニンスルホン酸系，AE 剤はアルキルアリルスルホン化合物系とし，そ

*1 太平洋マテリアル株式会社　開発研究所　工修　(正会員)
*2 太平洋マテリアル株式会社　開発研究所　工博　(正会員)

れぞれ適宜調整した。

2.2 試験水準

試験水準を**表－3** に示す。試験水準は，膨張材の有無と拘束鉄筋比の違いとした。試験体への拘束鉄筋導入については，**図－1** に示すように，竹下ら[8] による報告で使用されている拘束治具を内部に格納できる 2 通りの方法（拘束主鉄筋がφ4.0mm もしくは 6.0mm のもの）を選択した。**写真－1** に拘束主鉄筋がφ6.0mm の拘束治具の外観を示す。

2.3 曝露環境

写真－2 および**写真－3** に各種試験体の曝露状況を示す。曝露場所は北海道北斗市の凍害危険度 2 の地域における建屋屋上とし，2013 年から 2018 年までの 5 年間にわたり曝露を実施した。曝露中の凍結融解サイクル数の確認については, 10×10×40cm のコンクリート試験体中心に熱電対を設置し, 0℃を境界とした凍結融解サイクル数を計測した。ちなみに，5 年間で 514 回の凍結融解サイクルが行われていたことを確認している。**図－2** に例として 1 年間分のコンクリート試験体中心温度を降雪合計と併せて示す。

2.4 評価および試験項目

評価および試験項目を**表－4** に示す。強度特性については，曝露試験体を各材齢分用意して試験に供した。凍結融解抵抗性については，同一の試験体 3 本を 5 年間の材齢終了まで使用し，測定終了後，細孔構造評価に用いる試験体とした。細孔構造評価に用いた試験断面については，試験体中央より採取した。

3. 試験結果

3.1 フレッシュ性状

表－5 にフレッシュ性状一覧を示す。各々の配合において，AE 減水剤の使用量を(C+EX)×0.6%，AE 剤の使用量を 2.5A で調整し，目標のフレッシュ性状を満足した。

3.2 強度特性

図－3 に各材齢における圧縮強度試験結果を示す。図より，膨張材の有無によるコンクリート圧縮強度への影響は見受けられず，また，その経時変化においても差は見られない。従って，膨張材を使用したコンクリートの強度特性は，普通コンクリートと同等であった。

写真－2　円柱試験体曝露状況

写真－3　角柱試験体曝露状況

表－1　使用材料一覧

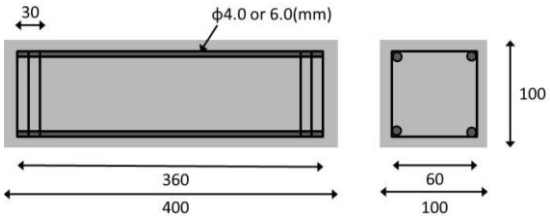
材料名	記号	備考
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm^3
膨張材	EX	石灰系膨張材，膨張材 20 型 密度 3.16g/cm^3
細骨材	S	掛川産山砂，密度 2.56g/cm^3 吸水率 2.2%，F.M. 2.78
粗骨材	G	桜川産砂岩砕石，密度 2.65g/cm^3 吸水率 0.67%，F.M. 6.74

表－2　コンクリートの配合

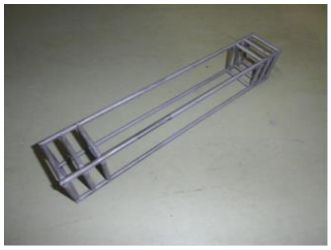
配合	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				
			W	C	EX	S	G
PL5.0%	55	46	172	313	0	803	968
EX5.0%				293	20		

表－3　試験水準

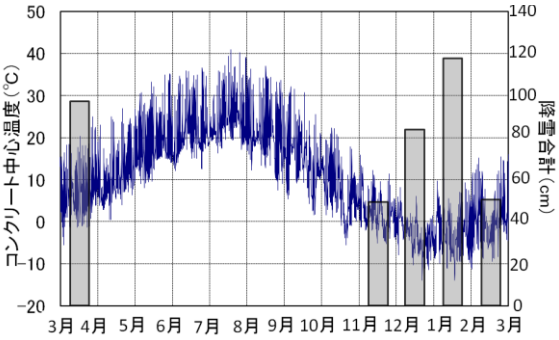
試験水準	膨張材 (kg/m^3)	拘束鉄筋比 (%)
No.1（PL－拘束なし）	0	0.0
No.2（EX－拘束なし）	20	
No.3（PL－拘束 0.5%）	0	0.5
No.4（EX－拘束 0.5%）	20	(φ4.0mm)
No.5（PL－拘束 1.1%）	0	1.1
No.6（EX－拘束 1.1%）	20	(φ6.0mm)



図－1　拘束治具の概要（単位:mm）



写真－1　拘束治具の外観（φ6.0mm）



図－2　コンクリート試験体中心温度

表－4　評価および試験項目

評価	試験項目	試験体および測定概要
強度特性	圧縮強度の経時変化	・φ10×20cm（JIS A 1108 準拠） ・材齢 28 日，1 年，3 年，5 年で強度測定 ・試験体数は N=3 にて実施
拘束膨張・収縮特性	拘束膨張・収縮率の経時変化	・B 法（JIS A 6202 附属書 B 準拠） ・材齢 28 日，1 年，2 年，5 年で測定 ・試験体の温度調整のため 1 日間室内静置，後日測定 ・試験体数は N=3 にて実施
凍結融解抵抗性	相対動弾性係数の経時変化 質量変化率 目視による表面観察	・10×10×40cm（JIS A 1148 準拠） ・測定は型枠側面の左右 2 点（平均値）で実施 ・試験体数は N=3 にて実施 ・表面の観察は成形面および型枠面にて実施
細孔構造	試料調整 水銀圧入式ポロシメーター	・凍結融解抵抗性の試験終了後に中央より採取 ・乾式コンクリートカッターを用いて試料切断後，中心部および表層部の 5mm 試験片を取り出し，アセトン浸漬にて水和停止を実施した後，D-dry 乾燥を行い試料に供した ・細孔径分布の測定範囲は 0.003～30μm ・試験数 N=2 の平均値を測定値とした

3.3 拘束膨張・収縮特性

図－4 に拘束膨張・収縮率の経時変化を示す。図の曝露前の拘束膨張率は，PL5.0%が＋25×10^{-6} であるのに対し，EX5.0%が＋186×10^{-6} という結果であった。これより，収縮補償用コンクリートの膨張率 [9] の範囲（150～250×10^{-6}）となる性能が膨張材により導入されていることが分かる。その後の曝露環境での経時変化については，すべての材齢において膨張材による収縮補償効果が残存していることが確認され，曝露材齢 5 年後の段階では，PL5.0%が－213×10^{-6} であるのに対し，EX5.0%が－119×10^{-6} という結果となり，PL5.0%と EX5.0%の差において約＋100×10^{-6} 程度の収縮補償効果が確認された。

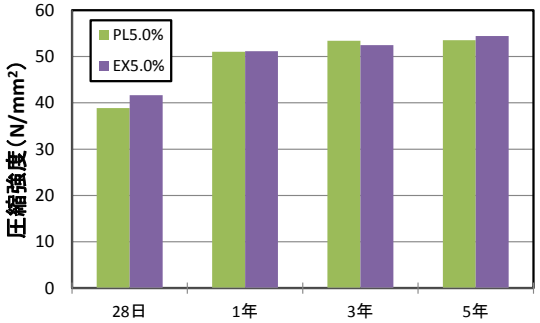
3.4 凍結融解抵抗性

図－5 に相対動弾性係数と質量減少率の経時変化図を示す。また，**写真－4** に試験体表面観察状況を示す。

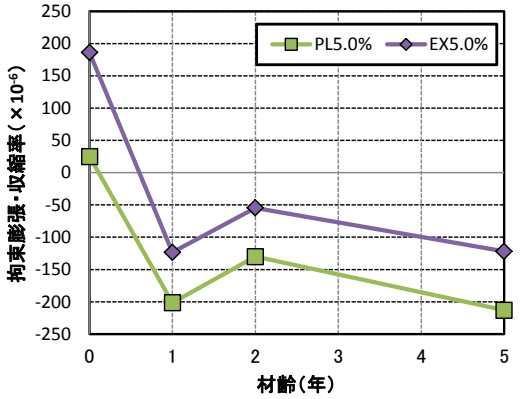
まず，相対動弾性係数の結果より，拘束なしの水準である No.1 試験体（PL）および No.2 試験体（EX）において，特に膨張コンクリートの相対動弾性係数の著しい低下は確認されず，普通コンクリートとほぼ同等の相対動弾性係数であることが確認された。既往の文献によると，膨張コンクリートに所定の空気量を確保することや良質なエントレインドエアが導入される混和剤を使用することで普通コンクリートと同程度の耐凍害性が確保されるとの報告 [7] がある。本試験に使用した混和剤は，先述した既往の文献で用いられた系と同一であることより，所定の空気量および良質なエントレインドエアが確保でき

表－5　フレッシュ性状一覧

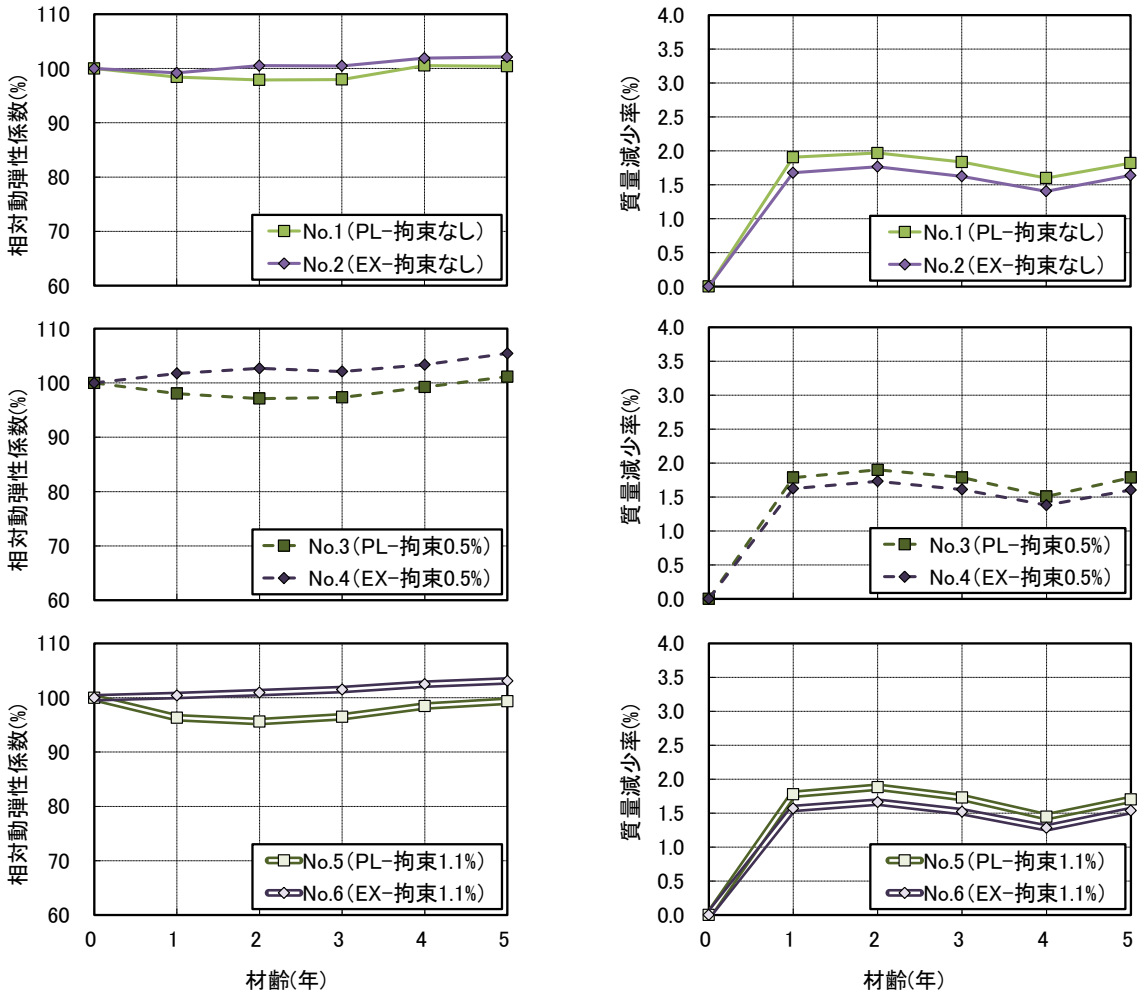
	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (℃)
PL5.0%	15.0	4.8	21
EX5.0%	15.5	4.9	22



図－3　圧縮強度の経時変化



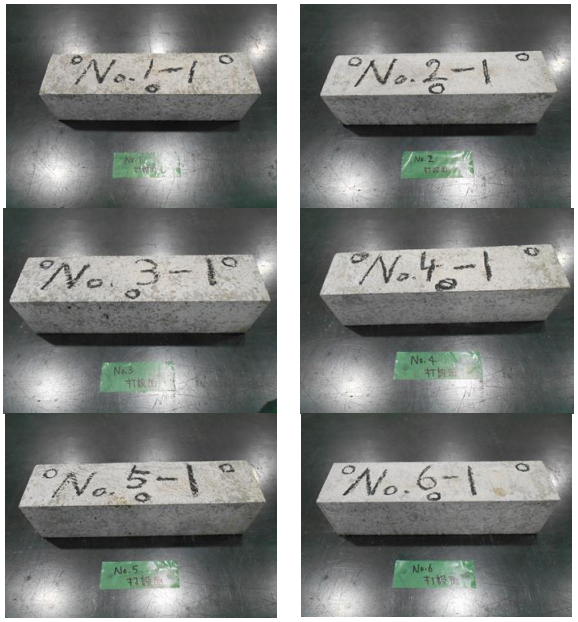
図－4　拘束膨張・収縮率の経時変化



図－5　凍結融解抵抗性（左：相対動弾性係数，右：質量減少率）

ていたものと推察される。従って，本試験における範囲となるが，曝露試験による膨張材を使用したコンクリートの耐凍害性は，良質なエントレインドエアの導入およびその量の確保によって担保され，その条件にて普通コンクリートと同等な耐凍害性を有するものと考えられる。

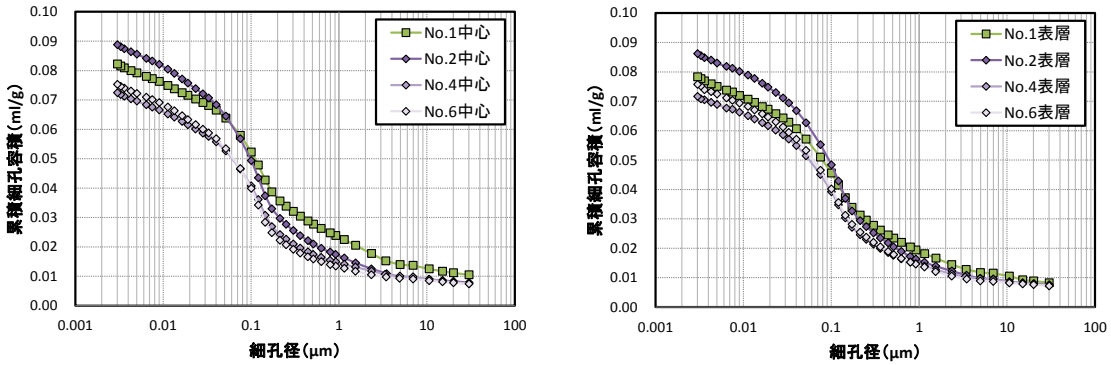
次に，拘束鉄筋の影響についてだが，普通コンクリートとなる No.1，No.3，No.5 は，拘束鉄筋の有無によらず曝露 5 年後は同様な相対動弾性係数（No.1=100.4%，No.3=101.2%，No.5=99.4%）となっていることが確認できる。しかし，膨張コンクリートでは，No.2 の曝露材齢 5 年後の相対動弾性係数が 101.6%に対し，拘束鉄筋を設置した No.4 および No.6 は 105.4%と 103.3%（N=3 による標準偏差:1.0%未満）となっており，相対動弾性係数の増加傾向が確認された。既往の文献による膨張コンクリートの拘束効果については，相対動弾性係数の大幅な低下抑制に関しての報告[6]がなされており，拘束効果による相対動弾性係数の向上については報告されていない。ただし，本試験が室内試験ではなく曝露試験であることや，**図－4** で示した通り，膨張材による収縮補償効果が曝露 5 年後も残存していることを踏まえ，膨張コンクリートの内部微細ひび割れの抑制やケミカルプレス効果に



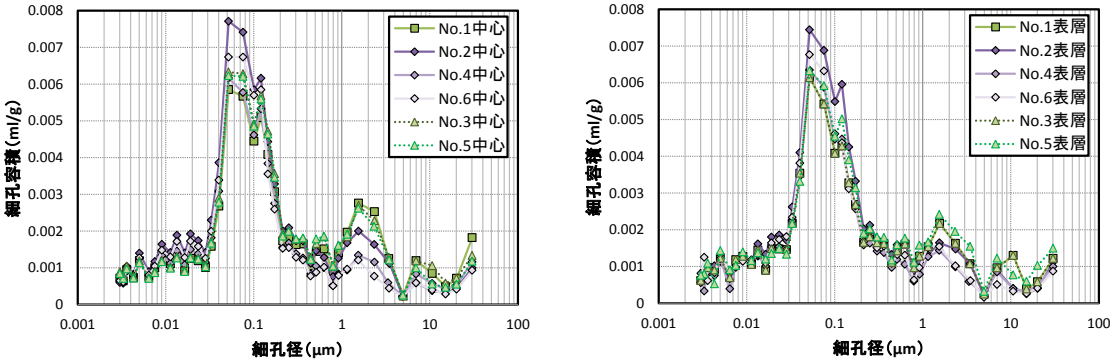
写真－4　曝露 5 年後の試験体表面観察状況

よりコンクリート中における膨張作用が硬化体の内部構造に向けられ，その影響で巨視的欠陥が減少し，相対動弾性係数の向上につながった可能性があると考えられる。

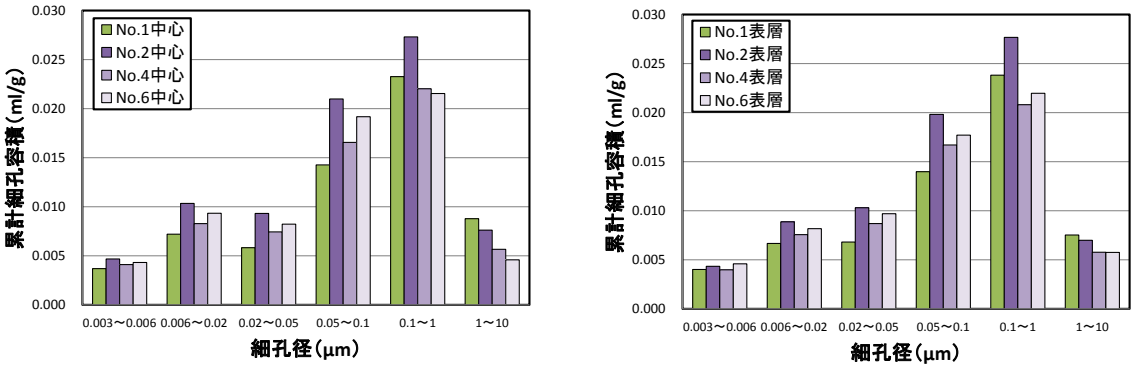
最後に，質量減少率については，**図－4** で示した曝露材齢 1 年目における乾燥による水分逸散の影響により，



図－6　細孔径と累積細孔容積の関係（左：コンクリート中心部，右：コンクリート表層部）



図－7　細孔径分布（左：コンクリート中心部，右：コンクリート表層部）



図－8　それぞれの細孔径範囲における累計細孔容積（左：コンクリート中心部，右：コンクリート表層部）

大幅な質量減少が確認されたものの，それ以降の経時変化はどの水準も同じ傾向を示しており，拘束鉄筋の有無や膨張材の有無による影響は確認できない結果となった。また，**写真－4** による試験体表面観察状況からも，拘束鉄筋の有無や膨張材の有無によるスケーリング等の劣化の違いは見受けられなかった。

これらの結果をまとめると，曝露による膨張材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性は，良質なエントレインドエアの確保や鉄筋拘束の付与などの条件はあるものの普通コンクリートと同等の性能を有するものと考えられる。

3.5 細孔構造

図－6 に細孔径と累積細孔容積の関係，**図－7** に細孔径分布，**図－8** にそれぞれの細孔径範囲における累計細孔容積の関係を示す。ここで，膨張材なしの水準である No.1，No.3，No.5 についてだが，**図－7** の細孔径分布に示した通り試験結果がすべて同じ傾向にあったため，他のグラフについては，代表例として No.1 の試験結果のみを示した。また，図中にある表層部とは，100×100mm 断面（20mm 程度）を対象とし，中心部とは，100×100mm 断面の中心部分 30×30mm を対象としたものである。最後に，**図－8** における細孔径の区分については，既往の文献[10] を参考に 6 段階に分けて示した。

まず，累積細孔容積の関係において，膨張材の有無および拘束の有無により大きな違いが現れている。無拘束条件で膨張材を使用した No.2 は普通コンクリートである No.1 と比較して累積細孔容積が増加し，一方で，拘束鉄筋の影響を受けた No.4 および No.6 は累積細孔容積が大幅に減少することが分かった。既往の文献でも，膨張材の使用により累積細孔容積が増加し，拘束を付与することで累積細孔容積が減少することが報告[11) 12)] されている。本試験においても同様な傾向が確認できたものと推察される。また，拘束条件下における膨張コンクリート中心部と表層部の比較では明確な差が確認されなかっ

たことより，本治具を使用した膨張材による拘束効果は全ての断面に対し均一であったことが推察される。

次に，細孔径分布と 6 段階に分けた累計細孔容積において，無拘束条件である No.1 と No.2 の比較をすると，膨張材の使用により 1μm 以下の範囲における累計細孔容積が全て増加しており，特に 0.02～0.1μm の細孔径で最も細孔容積が大きくなることが分かった。一方で，1～10μm の範囲では膨張材の混和により細孔容積が減少していることが分かった。これは，1～10μm の空隙に膨張材による水和物が生成され，その水和物の間に毛細管レベルの空隙を多量に抱え込みながら結晶生成と成長がなされるため，0.02～0.1μm の毛細管レベルの空隙が増加したものと考えられる。既往の文献 [6] でも，0.024~0.075μm の細孔容積が増加すると報告されており，本試験でも同様な現象が確認されたものと考える。

一方で，膨張材を使用し拘束鉄筋の影響を受けた No.4 および No.6 の場合では，0.1～1μm の範囲における累計細孔容積が大幅に減少するとともに，1μm 以上の粗大径の範囲でも No.1 と比較して累計細孔容積が減少していることが分かった。また，0.006～0.02μm の累計細孔容積については増加する傾向が確認された。既往の文献 [13] によると，0.1～1μm の毛細管空隙は凍結融解抵抗性の悪化に関与し，0.006～0.02μm の微細毛細管空隙は凍結融解抵抗性の向上に寄与することが報告されており，累計細孔容積の変化からも，膨張コンクリートにおける拘束効果が相対動弾性係数の向上に寄与する可能性を示唆できるものと考えられる。

これらの結果をまとめると，曝露 5 年後の評価において，膨張材の効果は累積細孔容積の増減や細孔径分布の変化をもたらすが，拘束鉄筋の効果により，粗大な細孔径が減少し，耐久性が向上することを示唆した。しかし，膨張コンクリートの耐凍害性が劣るという報告があるのも明らかであり，本論文で影響因子として考えられる膨張コンクリートの鉄筋拘束の程度や良質なエントレインドエアの数値的な評価については今後の課題としたい。

4. 結論

本論文では膨張コンクリートを凍害環境にて 5 年間曝露を行い，様々な試験手法を用いて，膨張コンクリートの相対的な耐久性評価を実施した。その結果，以下の結論を得た。

(1) 膨張材を使用したコンクリートの強度特性は，普通コンクリートと同等であった。

(2) 膨張材の収縮補償効果は曝露環境下でも継続的に残存し，さらに，導入された収縮補償効果は，曝露 5 年経過後もその数値をある程度維持する。

(3) 膨張材を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性は，良質なエントレインドエアの確保や鉄筋拘束の付与といった条件下において，普通コンクリートと同等の性能を有していた。

(4) 膨張材の効果は累積細孔容積の増減や細孔径分布の変化をもたらすが，拘束効果の付与により，粗大な細孔径が減少し，耐久性が向上することを示唆した。

参考文献

1) 公益社団法人土木学会：混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案）コンクリートライブラリー 152，2018.10

2) 細田 暁，坂田 昇，田村隆弘，二宮 純：目視評価を活用した山口県のひび割れ抑制システムによる表層品質向上の分析，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1837-1842，2013

3) 東北地方整備局：コンクリート構造物の品質確保の手引き（案），2015.12

4) 日本産業規格：JIS A 6202:2017「コンクリート用膨張材」

5) 一般社団法人日本建築学会：膨張材・収縮低減剤を使用するコンクリートの調合設計・製造・施工指針（案）・同解説，2017.2

6) 國府 勝郎：膨張コンクリートの凍結融解抵抗性に関する基礎研究，土木学会論文報告集，第 334 号，pp.145-154，1983.6

7) 小林 正几：膨張性セメント混和材を用いたコンクリートの凍結融解に対する抵抗性について，コンクリートライブラリー，第 39 号，pp.69-73，1974.10

8) 竹下 永造，長塩 靖祐：膨張材を混和したコンクリートの凍結融解抵抗性に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.817-822，2015

9) 公益社団法人土木学会：膨張コンクリート設計施工指針，コンクリートライブラリー第 75 号，1993

10) 一般社団法人セメント協会：わかりやすいセメント科学，1993

11) 盛岡 実，萩原 宏俊，坂井 悦郎，大門 正機：膨張材を混和したセメント硬化体の微細構造，コンクリート工学年次論文報告集，VoL.20，No2，1998

12) 樋口 隆行，盛岡 実，坂井 悦郎，大門 正機：膨張材を混和したセメントペーストの膨張挙動におよぼす膨張材混和時期の影響，セメント・コンクリート論文集，No.54，pp.105-110，2000

13) 鎌田 英治：セメント硬化体の微細構造とコンクリートの凍害，コンクリート工学，Vol.19，pp.36-42，1981