

論文 膨張コンクリートの圧縮強度・耐凍害性・中性化抵抗性に及ぼす拘束の影響

黒岩 笑海歌*1・Nguyen Duc Van*2・崔 享吉*3・濱 幸雄*4

要旨: 実構造物においてコンクリートは拘束状態で用いられ、特に膨張材を用いたコンクリートにおいては、その性能を適切に判断するためにも拘束状態で評価することが望まれている。そこで、本研究では、膨張材の使用量が異なるコンクリートにおいて、圧縮強度、耐凍害性、中性化抵抗性に及ぼす拘束の影響を実験的に把握し、空隙構造の観点からもその機構について検討を行った。その結果、膨張材の使用量により異なるが、拘束の有無は、圧縮強度、耐凍害性に影響を与え、中性化抵抗性に与える影響は小さく、その空隙構造に変化を及ぼす可能性が示された。

キーワード: 膨張コンクリート、拘束、圧縮強度、耐凍害性、中性化抵抗性、空隙構造変化

1. はじめに

コンクリート構造物の基本的な問題点として、美観の悪化や機能、耐久性の低下に繋がるひび割れがある。我が国では、このひび割れ抑制のため、1978年に日本建築学会¹⁾が「膨張材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針案・同解説」を発刊して以来、長年にわたり様々な場面で膨張材（以下 Ex）を使用することがすすめられてきた。さらに、近年では、使用量が少なくても従来のものと同程度の膨張率を付与できるため、比較的安価に使用できる低添加型の Ex も開発され、その使用場面はますます増加するものと思われる。

しかし、Ex を用いたコンクリート（以下膨張コンクリート）の耐久性の評価方法に関して、これまで様々な議論がなされてきたが、十分に確立しているとは言えない。それというのも、コンクリートは実構造物では鉄筋コンクリートとして拘束状態で用いられることが多いが、膨張コンクリートの耐久性評価に関する既往の研究では、無筋状態で行われることがほとんどで、拘束が膨張コンクリートの耐久性に及ぼす影響が明らかになっていないことによる。例えば辻ら²⁾は、膨張コンクリートに対して三軸拘束下では、普通コンクリートに比べて圧縮強度を 30~50%増加させることも可能であることを示している。また國府³⁾は、耐凍害性を向上させるために拘束養生を行うことの重要性を、庄司ら⁴⁾、竹下ら⁵⁾は、拘束を行わない状態で耐凍害性に優れない場合でも、拘束を行うことで耐凍害性は向上することを示している。そのため、膨張コンクリートの耐久性を適切に評価する際、拘束による影響も検討することが必要であると考えられる。さらに盛岡ら⁶⁾は、Ex を混和したセメント硬化体について、Ex の混和率の増加に伴い、空隙率が増加するこ

とを示している。また李ら⁷⁾は、Ex を用いたモルタルにおいて、拘束を行うことにより粗大な径の細孔量が減少し、微細な径の細孔量が増加することを示している。これらのことより、Ex について検討する上で、その細孔構造も把握する必要があると考えられる。

そこで本研究では、膨張コンクリートの圧縮強度、耐凍害性、中性化抵抗性に及ぼす拘束の影響を実験的に把握するとともに、その機構について空隙構造変化の観点からも検討を行った。

2. 実験計画および方法

2.1 実験計画および拘束治具

表-1 に実験計画を示す。W/B は普通強度コンクリートを想定し 50%とした。また、Ex の使用量による違いを確認するため、Ex を使用しないもの (EX0)、Ex を標準量使用したもの (EX20)、Ex を多量に使用したもの (EX40) の計 6 水準の調合とした。そして、拘束の影響を把握するため、それぞれの調合に対して、拘束有り（以下拘束）および拘束無し（以下非拘束）の試験体を作製し各実験を行った。

表-1 実験計画

供試体記号	W/B (%)	単位量 (kg/m ³)		拘束条件	試験項目
		OPC	Ex		
EX0	50	370	0	有り (拘束) 無し (非拘束)	長さ変化 水銀圧入法 アルキメデス法 リニアトラバース法 圧縮強度試験 水中凍結融解試験 促進中性化試験
EX20		350	20		
EX40		330	40		

*1 室蘭工業大学 工学部 建築社会基盤系学科 (学生会員)

*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科工学専攻 博士後期課程

*3 慶北大学校工科大学 建築工学科 助教授 (正会員)

*4 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)

図-1～図-3 に実験に使用した拘束治具を示す。本実験で用いた拘束治具は、図-1 に示す JIS A 6202 の A 法（以下 A 法）によるもの、原田ら⁸⁾の実験を参考に作製した図-2 に示すもの、試験体の全面を拘束した（以下三軸拘束）図-3 に示すものとした。なお、図-2 の拘束治具について、100×100×400mm 試験体には D13 の異形鉄筋（以下 D13_10 角）を、75×75×400mm 試験体には D10 の異形鉄筋（以下 D10_7.5 角）を用いた。これは、試験体の断面寸法に対する鉄筋比を 1.3% に統一するためである。

2.2 使用材料および調査

表-2 に使用した材料の物性を示す。結合材は普通ポルトランドセメント（以下 OPC）および Ex を使用し、細骨材は白老産陸砂、粗骨材には敷生川水系安山岩を用いた。なお、Ex は、標準使用量 20kg/m³ であるエトリンガイト・石灰複合系の低添加型 Ex を用いた。

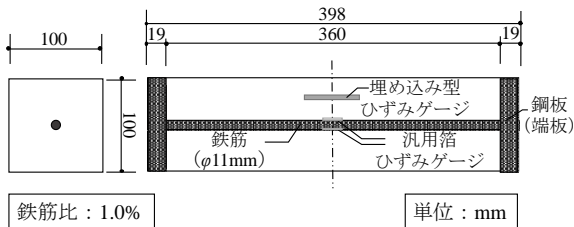


図-1 拘束治具（A法）

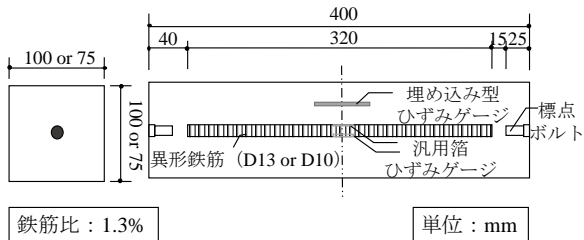


図-2 拘束治具（D13_10角およびD10_7.5角）

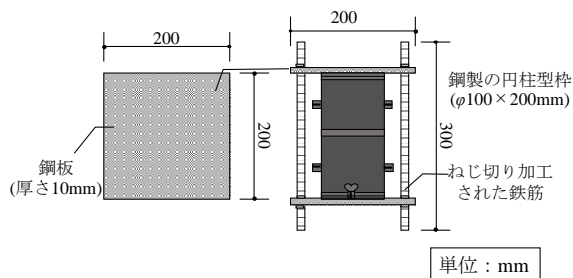


図-3 拘束治具（三軸拘束）

表-2 使用材料

材料種類	記号	分類および物性
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント 密度：3.17(g/cm ³)
混和材	Ex	エトリンガイト・石灰複合系の 低添加型膨張材 密度：3.05(g/cm ³) 標準使用量：20(kg/m ³)
細骨材	S	白老産陸砂 表乾密度：2.68(g/cm ³) 絶乾密度：2.62(g/cm ³) 吸水率：2.17(%)
粗骨材	G	敷生川水系安山岩 表乾密度：2.68(g/cm ³) 絶乾密度：2.63(g/cm ³) 吸水率：1.78(%)
化学混和剤	-	AE減水剤 (リグニンスルホン酸化合物と ポリオール複合体) 密度：1.23～1.27(g/cm ³)

表-3 にコンクリートの調査およびフレッシュ性状を示す。目標空気量を 4.5±1.5%，目標スランプを 18±2cm とし、化学混和剤を用いて各値の調整を行った。

2.3 実験項目および方法

(1) 長さ変化測定

長さ変化は、試験体内部にひずみゲージを取り付け測定を行った。拘束有りの試験体（以下拘束試験体）には、A 法、D13_10 角、D10_7.5 角の拘束治具を用い、鉄筋の中心に汎用箱ひずみゲージを 2 つ、打込み面と鉄筋の中心部に埋め込み型ひずみゲージを 1 つ取り付け、これら 3 つのひずみゲージで測定された値の平均値を長さ変化率とした。また、拘束無しの試験体（以下非拘束試験体）は、試験体の中心部とその上部に埋め込み型ひずみゲージを取り付け、これら 2 つのひずみゲージで測定された値の平均値を長さ変化率とした。なお、脱型は拘束試験体、非拘束試験体ともに、打込み後 1 日で行い、20℃封緘養生中で材齢 4 週まで測定した。

(2) 空隙測定

水銀圧入法は、混練したコンクリートにウェットスクリーニングを施して、粗骨材を取り除いたモルタルを用

表-3 コンクリートの調査およびフレッシュ性状

供試体 記号	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					AE 減水剤 (ml/m ³)	フレッシュ性状		
			W	B		S	G		空気量 (%)	スランプ (cm)	温度 (°C)
				OPC	Ex						
EX0	50	47.1	185	370	0	855	959	925	4.8	20.0	15.0
EX20				350	20				4.9	19.4	15.5
EX40				330	40				4.9	19.5	16.2

いて行った。アルキメデス法はコンクリートを用いて行った。拘束試験体は三軸拘束を行い、試験直前に脱型を行った。非拘束試験体は、40×40×160mmの角柱試験体を作製した。(脱型は打込み後1日)各試験体は、20℃封緘養生・材齢4週後、5mm角程度に切断し、1週間のエタノール置換による水和停止、凍結させた試料の周囲を真空状態に近づけることにより水分が昇華することを利用した乾燥方法である真空凍結乾燥法(F-dry法)による乾燥を行った。なお、材料分離の影響を避けるため、試験体表面は取り除いて試料を採取した。

上記の試料を用い水銀圧入法により、細孔系分布の測定を、上記の試料を水に浸漬させて真空脱気したものをを用い、アルキメデス法による全空隙率の測定を行った。

(3) 気泡間隔係数

気泡間隔係数はASTM C 457に準じて測定を行った。なお、拘束試験体は、D13_10角の拘束治具を用いて行い、脱型は打込み後1日で行った。

(4) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、φ100×200mm円柱試験体を20℃封緘養生したものを用い、材齢3, 7, 28日にJISA 1108に準じて測定を行った。なお、拘束試験体は、三軸拘束を行い、脱型は測定直前に行った。非拘束試験体は、鋼製の円柱型枠を用い、打込み後1日で脱型を行ったものを用いた。

(5) 水中凍結融解試験

凍結融解試験は、75×75×400mm角柱試験体(D10_7.5角)で長さ変化測定(20℃封緘養生・材齢4週)後、20℃水中吸水・1週したものを用いて、JIS A 1148のA法に準じて測定を行った。なお、脱型は拘束試験体、非拘束試験体ともに、打込み後1日で行った。

(6) 促進中性化試験

促進中性化試験は、100×100×400mm角柱試験体(D13_10角)で長さ変化測定(20℃封緘養生・材齢4週)後、20℃気中養生・4週したものを用いて、JISA 1153に準じて、促進中性化期間26週で測定を行った。なお、脱

型は拘束試験体、非拘束試験体ともに打込み後1日で行った。

3. 実験結果および考察

(1) 長さ変化率

図-4に長さ変化率の測定結果を示す。Exの使用量増加に伴い長さ変化率は増加しており、Exを使用したものにおいては、非拘束試験体に比べ拘束試験体の長さ変化率は小さくなった。また、Exの使用量が多いほど、拘束試験体と非拘束試験体の長さ変化率の差が大きくなった。さらに、拘束方法および試験体寸法によらず、同一調合において、鉄筋比が1.0%と1.3%と異なるにもかかわらず、拘束試験体における長さ変化率の値は同程度の結果となった。これは、A法の場合、鉄筋比は小さいが、両端部から端板により拘束が行なわれているのに対して、D13_10角およびD10_7.5角の場合、この端板がないため、これが拘束の程度に影響を及ぼしたことが原因であると考えられる。

(2) 細孔径分布

図-5に水銀圧入法による細孔径分布の測定結果を示す。Ex使用量増加に伴い、ピーク時の細孔量が減少しており、Exを多量に使用したEX40においては100~1000nm程度の細孔量が増加することが確認できた。これにより、ExはOPCとは異なる細孔径範囲で空隙を生成するのではないかと考えられる。また、EX40においては、非拘束試験体に比べ、拘束試験体のピーク時の細孔径が若干密実側にシフトする傾向を示したが、Ex使用により生成されたと考えられる100~1000nm程度の細孔量にはほとんど変化が見られなかった。Exを多量に使用した場合のピーク時の細孔径の密実側へのシフト傾向は、Exによる膨張力が外部の拘束治具による拘束圧によって内部組織を密実化するとされるケミカルプレス効果²⁾によるものではないかと推察される。また、このケミカルプレス効果を確認するためには、一定程度のExが必要であると考えられ、本研究の範囲内では、標準使用量においてはそ

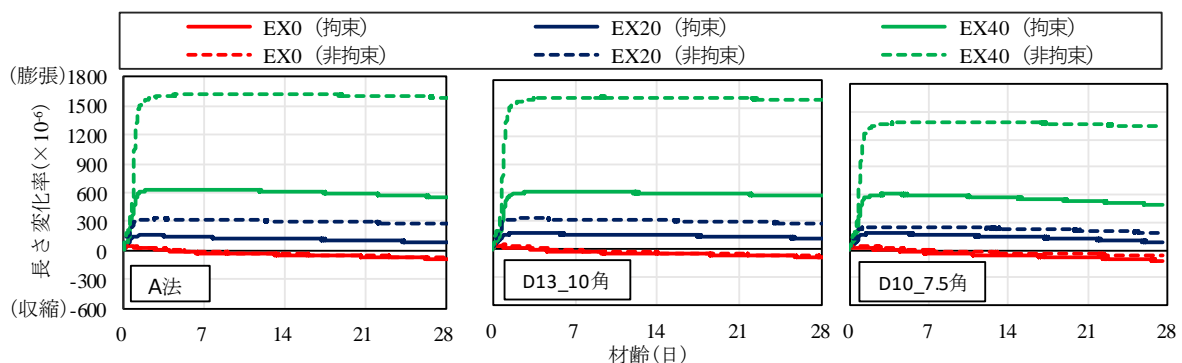


図-4 長さ変化率

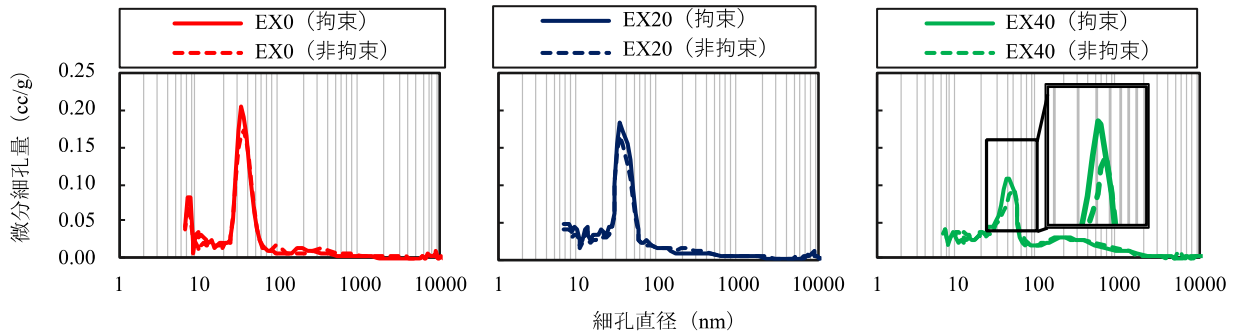


図-5 細孔径分布

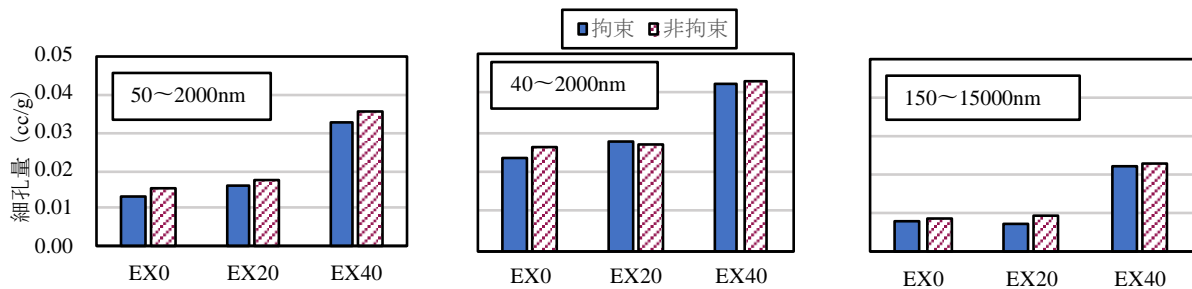


図-6 直径 50~2000nm, 直径 40~2000nm, 直径 150~15000nm 細孔量

の効果を確認できず、その2倍の量の多量に使用した場合のみ確認することができた。

細孔構造とモルタルおよびコンクリートの各種性状との関係について、これまで様々な検討がなされてきた。例えば、内川ら⁹⁾は直径 50~2000nm 細孔量が増加すると圧縮強度が低下することを、鎌田ら¹⁰⁾は直径 40~2000nm 細孔量が増加すると耐凍害性が低下することを、鄭ら¹¹⁾は直径 150~15000nm 細孔量が増加すると中性化抵抗性が低下することを示している。そこで本研究でも、拘束がこれらの細孔量に与える影響を検討した。図-6 に直径 50~2000nm 細孔量, 直径 40~2000nm 細孔量, 直径 150~15000nm 細孔量を示す。直径 50~2000nm 細孔量は、EX0 と EX20 との差は小さいが、Ex を多量に使用すると増加し、拘束を行うことで減少することが確認できた。直径 40~2000nm 細孔量は、EX0 と EX20 との差は小さいが、Ex を多量に使用すると増加し、EX0 においては拘束を行うことで減少、EX20 においては、拘束を行うことで若干増加するかほとんど変化がなく、EX40 においては、拘束を行うことで若干減少するかほとんど変わらない結果となった。直径 150~15000nm 細孔量は、EX0 と EX20 との差は小さいが、Ex を多量に使用すると増加し、拘束による細孔量の減少を確認することができた。以上のことより、拘束はコンクリートの耐久性に影響を及ぼすとされる細孔径範囲の細孔量にも影響を与える可能性があることが確認された。

(3) 全空隙率

図-7 にアルキメデス法による全空隙率を示す。EX0 は拘束により全空隙率が若干増加あるいはほとんど変わらず、EX20 は拘束により全空隙率が若干減少あるいはほとんど変わらない傾向であるのに対して、EX40 は拘束を行うことで全空隙率が減少することが確認された。盛岡ら¹²⁾によると硬化体が完全拘束されている場合、膨張材の膨張作用が拘束によって硬化体内部に向けられ、大きな空隙を押しつぶす可能性があることを示しており、本研究においても、膨張率が大きい膨張材を多量に使用した場合には、硬化体内部の空隙が押しつぶされたことによる空隙構造の変化が空隙率に違いを及ぼしたものと考えられる。

(4) 気泡組織

図-8 にリニアトラバース法による気泡間隔係数の測定結果を示す。拘束により若干の気泡間隔係数の減少が確認できた。これも前述に示した拘束による硬化体内部の空隙構造の変化によるものではないかと考えられる。

(5) 圧縮強度

図-9 に圧縮強度の試験結果を示す。Ex の使用により圧縮強度が減少する傾向が確認された。また、EX0, EX20 においては拘束による圧縮強度への影響はほとんど確認できなかった。一方、EX40 では材齢 28 日において、非拘束の場合に比べて拘束の場合に圧縮強度が約 12%向上をすることが確認できた。これは前述の拘束を行ったことによる細孔径の密実側へのシフト傾向および全空隙率

の減少など空隙構造の変化が関係しているのではないかと考えられる。

(6) 耐凍害性

図-10 に水中凍結融解試験による測定結果を示す。Ex の使用により相対動弾性係数の低下が見られ、EX0 および EX20 に関しては、拘束による相対動弾性係数の低下にほとんど違いがないのに対して、EX40 の場合、EX0 および EX20 に比べ、拘束を行うことにより相対動弾性係数低下を抑制することが確認された。なお、膨張材を使用していない EX0 において、十分な空気量を確保しているにもかかわらず、相対動弾性係数が 60%以下と低い結果になっており、これはひずみゲージのコードとコンクリートのペーストとの間に隙間ができ、その隙間から水分が侵入したことにより、凍結融解による劣化が進んだことが原因ではないかと考えられるが、詳細は不明である。長さ増加比について、拘束を行うことで、EX0 および EX20 に関しては、拘束により長さ増加比が若干小さくなるがその違いは小さいのに対して、EX40 に関しては大きく減少しているという耐凍害性向上の傾向が確認できた。質量変化率についても、長さ変化率同様の傾向が確認できた。以上の凍結融解試験の結果より、EX0、EX20 においては、拘束により耐凍害性低下を若干抑制することが確認できたもののその影響は小さいが、EX40 においては EX0、EX20 に比べはつきりと拘束により耐凍害性低下を抑制する傾向を確認できた。

前述の直径 40~2000nm 細孔量と耐凍害性の関係について、膨張材を多量に使用したことによる直径 40~2000nm 細孔量の増加と耐凍害性の低下には対応関係がある可能性が確認できたが、拘束による耐凍害性の変化と直径 40~2000nm 細孔量については、本研究においてはその傾向をはつきりと確認できなかった。膨張コンクリートの拘束による耐凍害性向上の傾向と直径 40~2000nm 細孔量の関係については今後も慎重に検討していきたいと考えている。

また、一般的に、気泡間隔係数が小さい方が耐凍害性に優れている¹³⁾とされており、本研究の範囲においても、拘束を行ったものの方が気泡間隔係数は若干小さく、凍結融解試験の結果からも耐凍害性に優れていることを確認できた。

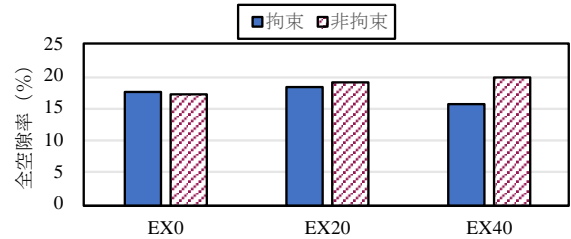


図-7 全空隙率

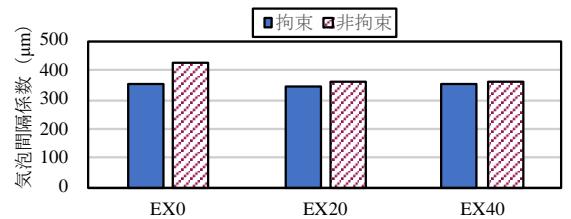


図-8 気泡間隔係数

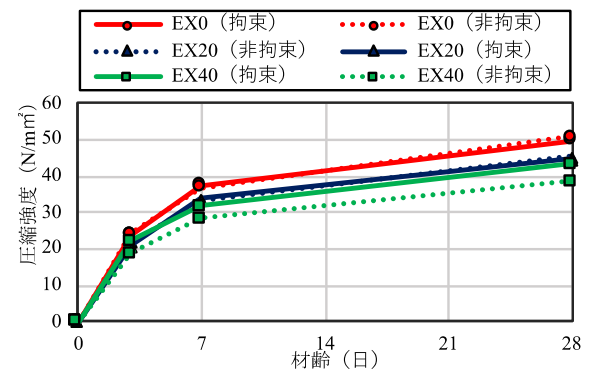


図-9 圧縮強度

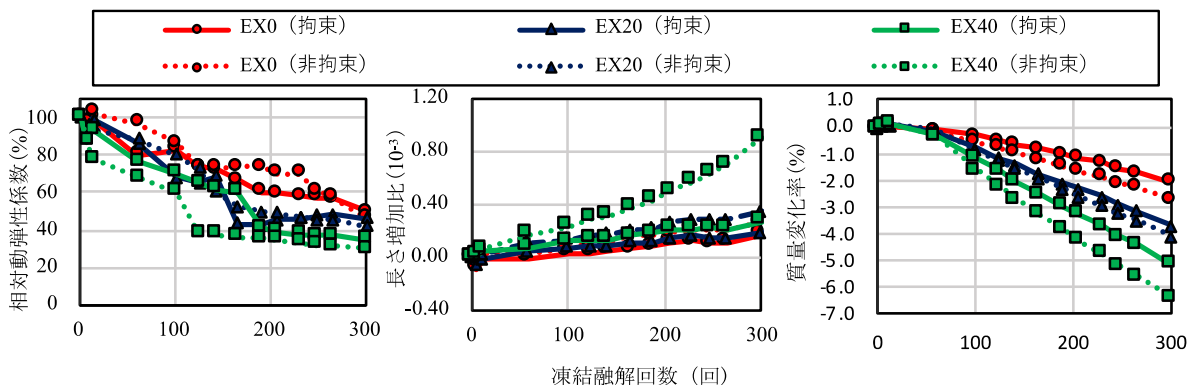


図-10 凍結融解試験結果

(7) 中性化抵抗性

図-11 に促進中性化試験による中性化深さの結果を示す。EX0 と EX20 の中性化深さにほとんど違いは見られないが、Ex を多量に使用した場合は中性化深さが大きくなることが確認された。また、EX0 および EX20 においては、拘束による中性化深さの違いはほとんどなく、EX40 においても拘束により中性化深さは若干小さくなるかほとんど変わらない傾向を示しており、本研究の範囲内においては、拘束が中性化抵抗性に与える影響は小さいものと考えられる。さらに、前述の直径 150~1500nm 細孔量と中性化抵抗性の関係について、膨張材を多量に使用したことによる直径 150~1500nm 細孔量の増加と中性化抵抗性の低下には対応関係がある可能性が確認できたが、本研究の範囲内においては、拘束による直径 150~1500nm 細孔量の変化と中性化抵抗性についてははっきりとした傾向は見られなかった。拘束が膨張コンクリートの中性化抵抗性と直径 150~1500nm 細孔量に与える影響については今後も慎重に検討していきたいと考えている。

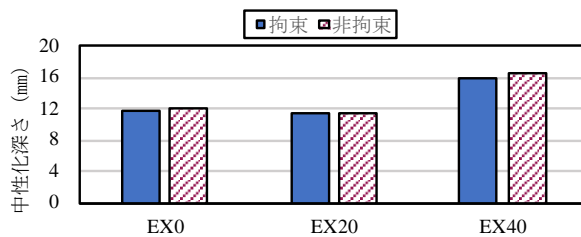


図-11 中性化深さ

4. まとめ

本研究では、Ex の使用量が異なるコンクリートにおいて、圧縮強度、耐凍害性、中性化抵抗性、に及ぼす拘束の影響を実験的に把握し、空隙構造の観点からもその機構について検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) Ex を多量に使用した場合 (EX40)、拘束を行うことで Ex の使用による圧縮強度の低下を抑制することができる。また、拘束によりピーク時の細孔径の密実化および全空隙率の減少を図ることができ、コンクリートの耐久性に関係があるとされる細孔径範囲の細孔量に影響を与える可能性がある。
- (2) Ex を標準量使用した場合 (EX20) には、拘束を行うことによる耐凍害性へ及ぼす影響は小さい。一方で、Ex を多量に使用した場合には、拘束を行うことで Ex の使用による耐凍害性の低下を抑制することができる。
- (3) 膨張コンクリートの中性化抵抗性に与える拘束の影響は小さい。

参考文献

- 1) 日本建築学会：膨張材を使用するコンクリートの調合設計・施工指針案・同解説，1978
- 2) 辻幸和，丸山久一：膨張コンクリートの力学的特性に及ぼす拘束方法の影響に関する基礎研究，第6回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.341-344，1984
- 3) 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
- 4) 庄司慎，栖原健太郎，平井吉彦，吉野亮悦：膨張コンクリートの凍結融解抵抗性，土木学会第67回回年次学術講演会，pp.955-956，2012
- 5) 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評価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
- 6) 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，No.2，pp.169-174，1998
- 7) 李春鶴，田中佳宏，横塚清規：膨張モルタルの細孔構造および酸素拡散係数に関する基礎的研究，Cement Science and Concrete Technology，No.65，pp.111-117，2011
- 8) 原田彩加，濱幸雄：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（関東），2006，9
- 9) H. Uchikawa, S. Uchida, S. Hanchara, "Researches on the Composition and Structure of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete Related to their Performance", 2nd INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CEMENT AND CONCRETE (Beijing), Vol.1, pp.314-330, 1989
- 10) 鎌田英治，千歩修，田畑雅幸，田中宏和：コンクリートの耐凍害性におよぼす細孔構造の役割についての統計的解析，日本建築学会構造系論文集，No.487，pp.1-9，1996
- 11) 鄭載東，平井和喜，三橋博三：中性化速度に及ぼすコンクリートの調合及び細孔構造の影響に関する実験的検討，コンクリート工学論文集，第1巻第1号，pp.61-73，1990.1
- 12) 盛岡実，樋口隆行，中島康宏，坂井悦郎：拘束条件下における膨張材混和ペーストの微細構造，第55回セメント技術大会講演要旨，pp.82-83，2001
- 13) 坂田昇，菅俣匠，林大介，橋本学：コンクリートの気泡組織と耐凍害性の関係に関する考察，コンクリート工学論文集，第23巻第1号，pp.35-47，2012.1