

# 論文 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

竹下 永造\*1・長塩 靖祐\*2

**要旨：**一般的に、コンクリートの凍結融解抵抗性は、適切な空気量の確保により担保されるとされている。しかし、膨張材を混和したコンクリートの凍結融解抵抗性は、JIS等の規定された方法である「無拘束状態の試験体」での評価では、普通コンクリートよりも劣るとされており、適切な空気量を確保して評価したとしても、正しい評価が出来ないという指摘もある。そこで本論文では、膨張材を混和したコンクリートの凍結融解抵抗性を実際の使用状況を考慮した拘束条件やその有無により実験的に検討し、その評価方法について検討したものである。

**キーワード：**膨張材, 凍結融解抵抗性, 凍結膨張ひずみ, 拘束条件

## 1. はじめに

近年、乾燥収縮を主原因としたひび割れに対する社会的関心は益々高まっており、コンクリート材料による乾燥収縮低減へのアプローチ技術は日々進化している状況にある。その中でも、膨張材を混和したコンクリートの使用実績は30年以上となっており、様々な環境や条件にて使用されることにより、その技術も進歩し現在に至っている。しかし、膨張材を混和したコンクリートの耐久性評価に関する技術については、その評価手法の確立が成されていないため、正しい評価が出来ないといった現状にある。これは、膨張材を混和したコンクリートは、一般的に拘束がある条件で使用されるが、耐久性の評価手法としては、拘束がない条件にて評価されることが多いためである。耐久性評価手法の中で、特に、凍結融解抵抗性については、国府<sup>1)</sup>は、膨張材を混和したコンクリートにおいて、拘束養生の重要性を示しており、また、天谷ら<sup>2)</sup>は、JIS等の規格で示されている無拘束条件による方法と比べ、膨張材を混和したコンクリート試験体を拘束条件にすることにより内部劣化が抑制され、普通コンクリートと同程度の凍結融解抵抗性を付与することができるとしている。これらの結果に関する理由について、三宅ら<sup>3)</sup>は、膨張材を混和したコンクリートは、凍結融解抵抗性にとって重要な因子である細孔空隙の分布度と気泡間隔係数を大きくさせながら膨張する特性を持つためであるとし、さらに、拘束条件の違いによる影響を大きく受けるためであるとしている。

そこで、本論文では、膨張材を混和したコンクリートの凍結融解抵抗性を実際の使用状況を考慮した拘束条件やその有無により実験的に検討し、その評価方法の検討とその妥当性を検証したものである。

## 2. 試験概要

### 2.1 拘束治具の概要

実験に使用した拘束治具は、JIS A 6202:1997「コンクリート用膨張材 附属書 2(参考) 膨張コンクリートの拘束膨張及び収縮試験方法の A 法」(以下 A 法と略す)によるものと、図-1 に示した拘束治具により評価した。JIS A 6202 の A 法については、写真-1 に示す通り、φ11mm の PC 鋼棒(鉄筋比 1.0%)と断面が 100×100mm で板厚 20mm の拘束端板 2 枚を一体に溶接したものであり、コンクリート部分の長さは 360mm(拘束端板を含めると 400mm)となっている。本論文で用いた拘束治具は、実際の使用状況を考慮して 100×100×400mm のコンクリート内部に収まるかご型の寸法としており、両端部にコンクリートを拘束するための横方向鉄筋を溶接にて設置した。かぶりは 20mm とし、縦方向の鉄筋比はφ4mm で 0.5%、φ6mm で 1.1%と設定した。拘束治具の外観を写真-2 に示す。

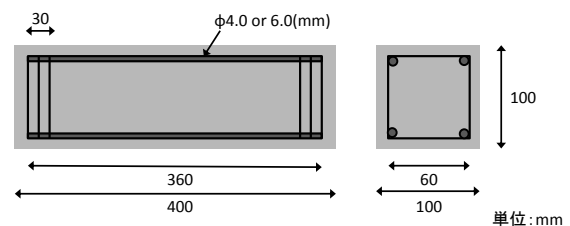


図-1 試験体概要(拘束治具)



写真-1 A 法外観



写真-2 拘束治具外観

\*1 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 工修 (正会員)

\*2 太平洋マテリアル(株) 開発研究所 博士(工学) (正会員)

## 2.2 使用材料とコンクリートの配合

### (1) 使用材料一覧

表-1 にコンクリートに使用した材料一覧を示す。セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、膨張材は石灰系低添加型膨張材を使用した。

### (2) コンクリートの配合

表-2 にコンクリートの配合を示す。膨張材なしの配合を PL とし、膨張材ありの配合を EX とした。膨張材の単位使用量は、標準使用量である  $20\text{kg/m}^3$  と使用量が多い場合の検討として  $30\text{kg/m}^3$  を設定した。コンクリートの目標フレッシュ性状として、スランプは  $15\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は  $4.5\pm 1.0\%$  と設定し、混和剤にて適宜調整した。

## 2.3 試験水準

試験水準を表-3 に示す。拘束条件による評価を行うため、拘束なしの条件に対し、文献で使用されている A 法による方法と 2 種類の拘束治具による方法を比較した。また、膨張材の有無による評価を行うため、コンクリート配合にて膨張材の有無と膨張材の単位使用量の違いにより比較した。

## 2.4 試験方法

表-4 に試験内容と試験方法を示す。試験体の作製や

表-1 コンクリート使用材料一覧

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 $3.16\text{g/cm}^3$
膨張材	EX	石灰系低添加型膨張材 密度 $3.16\text{g/cm}^3$
細骨材	S	掛川産山砂、密度 $2.56\text{g/cm}^3$ 吸水率 2.2%, F.M.2.78
粗骨材	G	桜川産砂岩砕石、密度 $2.65\text{g/cm}^3$ 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( $\text{kg/m}^3$ )				
			W	C	EX	S	G
PL	55	46	172	313	0	803	968
EX20				293	20		
EX30				283	30		

表-3 試験水準

配合	拘束条件(鉄筋比)			
	A 法	拘束治具		拘束なし
	(1.0%)	$\phi 4\text{mm}$ (0.5%)	$\phi 6\text{mm}$ (1.1%)	(0.0%)
PL	—	○	○	○
EX20	○	○	○	○
EX30	○	○	○	○

養生、凍結融解試験方法については、JIS A 1148:2010「コンクリートの凍結融解試験方法(A 法)」に準拠して行うものとした。ひずみゲージ貼付による測定は、拘束治具にある主鉄筋 4 本のうちの 2 本の中央にひずみゲージを貼付し測定を行った。(※ 試験値は 2 本の値の平均値)

## 3. 材料試験結果

### 3.1 コンクリート詳細

#### (1) フレッシュ性状

表-5 にフレッシュ性状一覧を示す。

#### (2) 圧縮強度と割裂引張強度

表-6 に材齢 28 日における圧縮強度と割裂引張強度の試験結果を示す。

### 3.2 鋼材詳細

表-7 に使用した鋼材詳細を示す。

## 4. 試験結果

### 4.1 拘束膨張試験

図-2~図-4 に拘束膨張ひずみの測定結果を示す。A

表-4 試験内容と試験方法

試験内容	試験方法
拘束膨張試験	JIS A 6202 準拠(A 法) ひずみゲージにて測定(拘束治具)
凍結融解試験	相対動弾性係数測定 JIS A 1148 準拠
	質量変化 JIS A 1148 準拠 外観観察 (写真による評価)
凍結膨張試験	凍結膨張ひずみをひずみゲージにて測定
気泡間隔係数	ASTM C 457 準拠

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 ( $^{\circ}\text{C}$ )
PL	15.0	4.8	21
EX20	15.5	4.9	22
EX30	15.5	4.9	22

表-6 強度試験結果 (材齢 28 日)

	圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	割裂引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )
PL	39.7	3.5
EX20	37.9	3.4
EX30	31.2	3.1

表-7 鋼材詳細

	備考
拘束治具	SS400 ミガキ丸棒( $\phi 4\text{mm}$ , $\phi 6\text{mm}$ )
A 法	PC 鋼棒 JIS G 3109 の C 種-1 号

法による拘束膨張ひずみの測定結果と拘束治具φ6mmを使用した場合の結果がほぼ同等となっており、φ4mmを使用した結果については、φ6mmを使用した場合に比べ拘束膨張ひずみが大きくなることが分かった。これらの結果は鉄筋比によるものと考えられ、鉄筋比が同じであるA法と拘束治具φ6mmの結果は同等であるのに対し、鉄筋比が小さくなる拘束治具φ4mmでは、拘束膨張ひずみが大きくなったものと考えられる。また、鉄筋比による効果は、拘束膨張ひずみの経時変化にも影響を及ぼしており、拘束治具φ4mmを使用した場合、拘束膨張ひずみが経時変化とともに漸増していく傾向が伺える。

#### 4.2 凍結融解試験

##### (1) 相対動弾性係数

図-5～図-7に相対動弾性係数の測定結果を示す。また、表-8にサイクル数300回時における相対動弾性係数を示す。文献等にて言われている通り、拘束なしの条件による評価では、膨張材を混和したコンクリートの相対動弾性係数が大きく低下しており、測定不可能な状況(試験体の崩壊)になっていることが分かる。さらに、基準値とされている300サイクルでの相対動弾性係数60%以上を満足できていないことも分かる。ただし、同条件の膨張材なしのコンクリート(PL)については、基準値を満足する結果となっている。拘束治具を用いた場合、拘束なしの条件(図-5)において確認された膨張材を混和したコンクリートの相対動弾性係数の大きな低下を抑制することができていることが分かる。鉄筋比0.5%である拘束治具φ4mmの場合、膨張材なしのコンクリート(PL)が相対動弾性係数81%に対し、膨張材を20kg/m<sup>3</sup>混和したコンクリート(EX20)が60%、膨張材を30kg/m<sup>3</sup>混和したコンクリート(EX30)が41%となっていた。鉄筋比1.1%である拘束治具φ6mmの場合、膨張材なしのコンクリート(PL)が相対動弾性係数79%に対し、膨張材を20kg/m<sup>3</sup>混和したコンクリート(EX20)が69%、膨張材を30kg/m<sup>3</sup>混和したコンクリート(EX30)が61%となっていた。このように、拘束条件や拘束の程度、膨張材の単位使用量により、膨張材を混和したコンクリートの相対動弾性係数は大きく影響を受けていることが分かる。

膨張材の単位使用量が20kg/m<sup>3</sup>で鉄筋比が同じである拘束治具φ6mmとA法との比較については、図-7より、A法を用いた場合の方が相対動弾性係数の低下は小さいことが分かる。この影響については、A法の2つの端板により全断面が挟まれている条件となっている完全拘束状態と、コンクリート内部に埋め込まれた拘束治具による拘束状態での違いであると考えられる。

##### (2) 質量変化率と外観観察

図-8～図-10に質量変化率を測定した結果を示す。また、表-9にサイクル数300回時における質量減少率

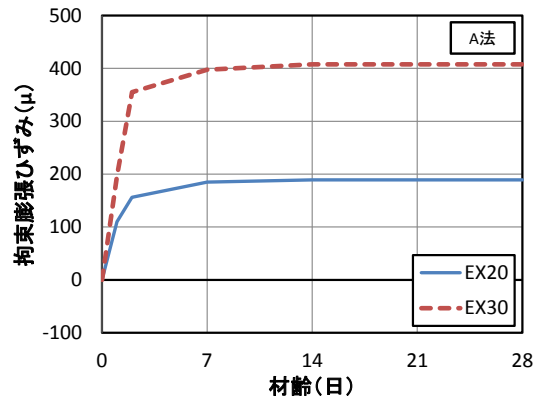


図-2 拘束膨張ひずみ (A法)

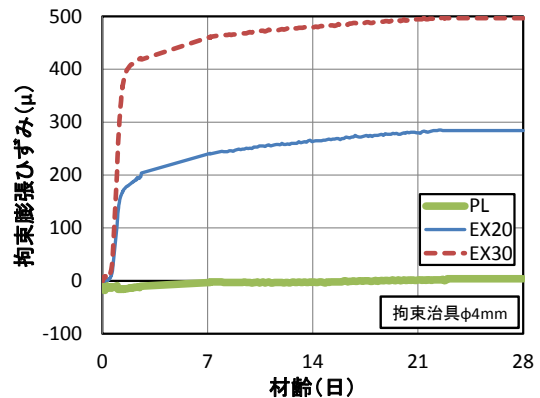


図-3 拘束膨張ひずみ (拘束治具φ4mm)

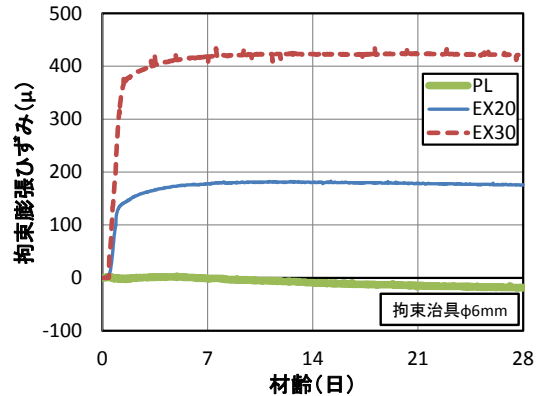


図-4 拘束膨張ひずみ (拘束治具φ6mm)

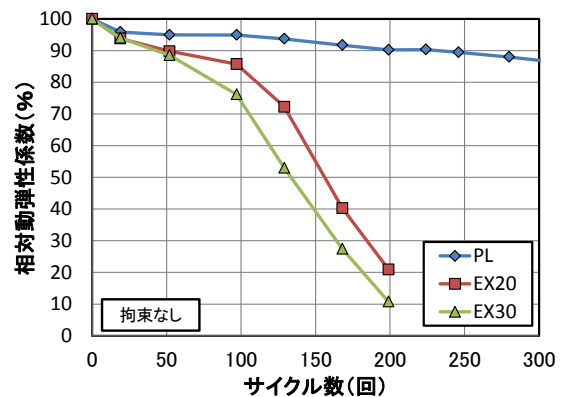


図-5 相対動弾性係数 (拘束なし)

を示す。さらに、拘束治具φ6mm と A 法を使用した試験体におけるサイクル数 300 回終了時の外観観察(写真)を写真-3 に示す。質量減少率の結果は、相対動弾性係数の低下傾向と相関関係にあることが確認でき、相対動弾性係数が大きく低下する程、質量減少率も大きくなること分かる。拘束条件による影響も顕著に表れており、拘束なしの条件では、膨張材を混和したコンクリートの質量減少率は 200 サイクル程度で測定不可能な状況(試験体の崩壊)となっているが、拘束治具を使用することで質量減少率が抑制されており、拘束治具φ4mm の場合、膨張材なしのコンクリート(PL)の質量減少率 1.8%に対し、膨張材を 20kg/m<sup>3</sup> 混和したコンクリート(EX20)が 2.3%、膨張材を 30kg/m<sup>3</sup> 混和したコンクリート(EX30)が 2.9%となっていた。また、拘束治具φ6mm の場合、膨張材なしのコンクリート(PL)の質量減少率 2.5%に対し、膨張材を 20kg/m<sup>3</sup> 混和したコンクリート(EX20)が 2.5%、膨張材を 30kg/m<sup>3</sup> 混和したコンクリート(EX30)が 3.5%となっていた。写真-3 により試験体のスケーリング状況を確認すると、成形底面の状況では、膨張材の単位使用量を増加させると、試験体のスケーリング状況は進行していることが分かる。

膨張材の単位使用量が 20kg/m<sup>3</sup> で鉄筋比が同じである拘束治具φ6mm と A 法との比較については、相対動弾

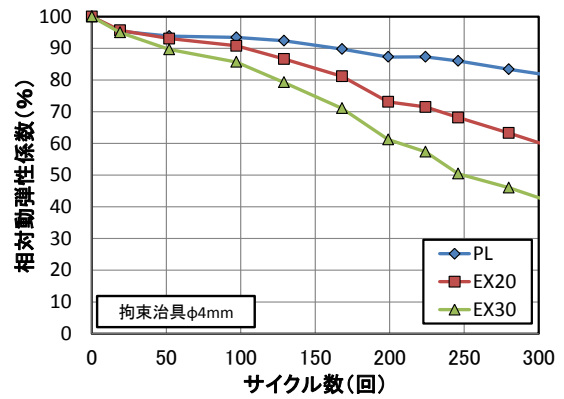


図-6 相対動弾性係数 (拘束治具φ4mm)

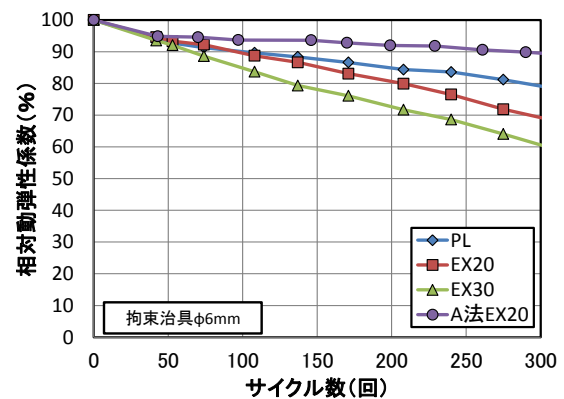


図-7 相対動弾性係数 (拘束治具φ6mm)

表-8 サイクル数 300 回時における相対動弾性係数

	拘束なし	拘束治具φ4mm	拘束治具φ6mm
PL	86%	81%	79%
EX20	測定不能	60%	69%
EX30	測定不能	41%	61%

表-9 サイクル数 300 回時における質量減少率

	拘束なし	拘束治具φ4mm	拘束治具φ6mm
PL	2.1%	1.8%	2.5%
EX20	測定不能	2.3%	2.5%
EX30	測定不能	2.9%	3.5%

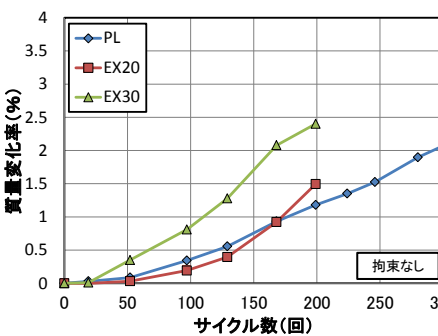


図-8 質量減少率 (拘束なし)

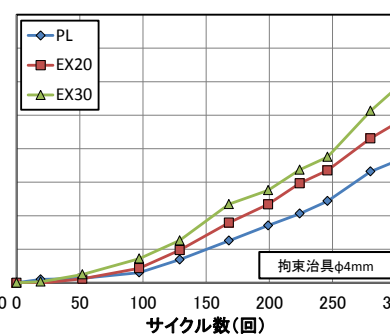


図-9 質量減少率 (拘束治具φ4mm)

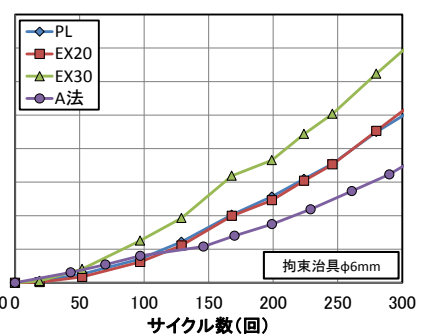


図-10 質量減少率 (拘束治具φ6mm)

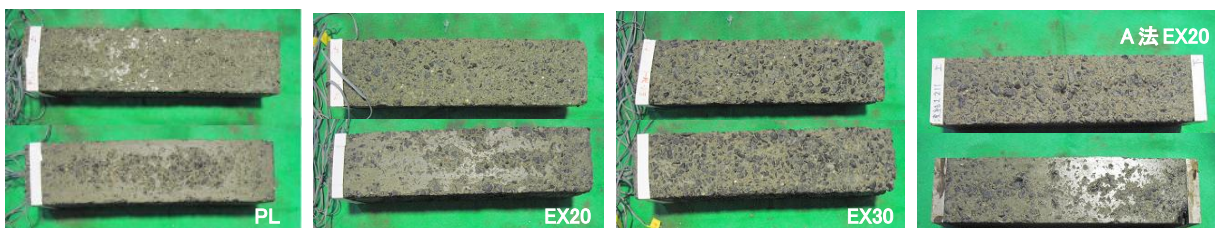


写真-3 サイクル数 300 回終了時の外観観察結果 (上: 打設面, 下: 成形底面)

性係数の結果と類似しており、A法を用いることで質量減少率は抑制されることが分かる。また、写真-3で示した試験体のスケーリング状況でも、A法を用いることでスケーリング進行が抑制されることが分かる。

#### 4.3 凍結膨張試験

図-11～図-16に拘束凍結膨張ひずみの測定結果を示す。図より凍結融解の繰り返しとサイクル数増加に従い、拘束治具の主鉄筋に発生する拘束ひずみが膨張と収縮を繰り返しながら膨張側に漸増していることが分かる。まず、拘束治具φ4mmで膨張材を混和したコンクリート(EX20, EX30)では、サイクル数150回前後において、大きな拘束凍結膨張ひずみへと変化する変曲点が存在し、サイクル数300回時において拘束凍結膨張ひずみで400

μ以上となる大きなひずみとなっていることが分かった。ただし、同じ拘束条件でも膨張材なしのコンクリート(PL)ではその影響を確認できなかった。これは、図-3で示している通り、膨張材を混和したコンクリートでは、既にコンクリート内部に大きな拘束膨張ひずみを生じており、それに加え、図-12や図-13のような拘束凍結膨張ひずみがさらに生じたこと<sup>4)</sup>により、コンクリート内部に生じる膨張破壊が加速度的に進行し<sup>5)</sup>破壊過程の拘束膨張ひずみが助長される変曲点として現れたことによる影響であると考えられ、図-6で示した相対動弾性係数の低下が他と比べ急であることから示唆されていると考えられる。次に、拘束治具φ6mmを使用した場合、膨張材の有無によらず、同様な拘束凍結膨張ひずみの漸

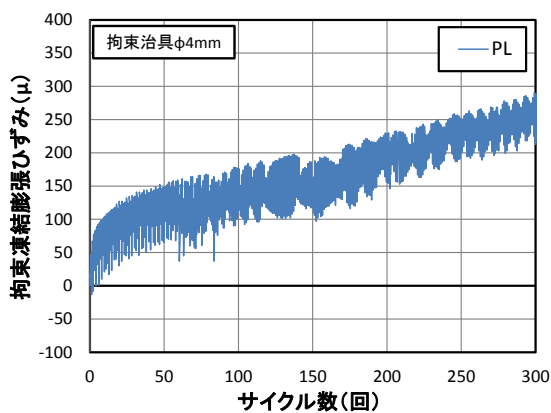


図-11 凍結膨張ひずみ(PL-拘束治具φ4mm)

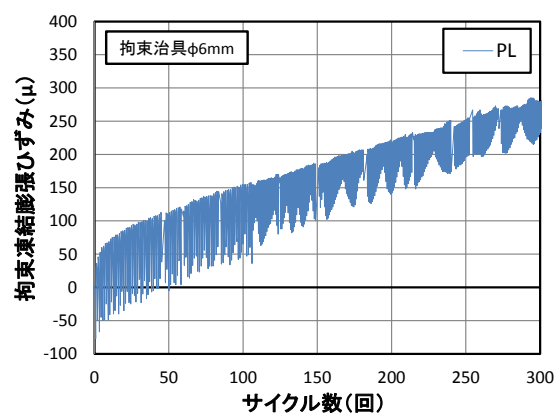


図-14 凍結膨張ひずみ(PL-拘束治具φ6mm)

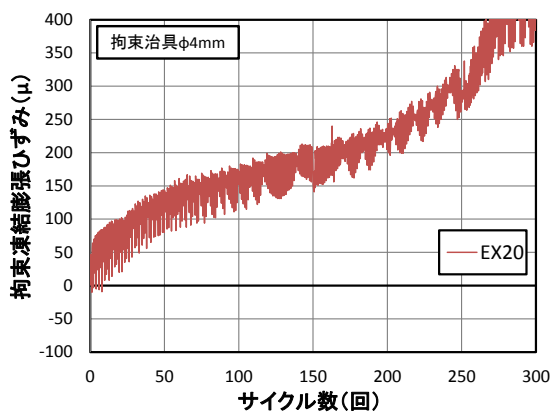


図-12 凍結膨張ひずみ(EX20-拘束治具φ4mm)

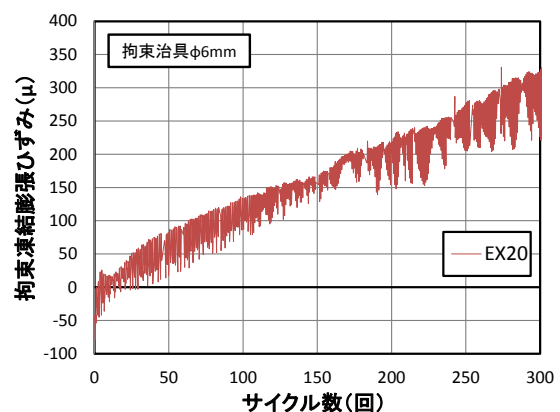


図-15 凍結膨張ひずみ(EX20-拘束治具φ6mm)

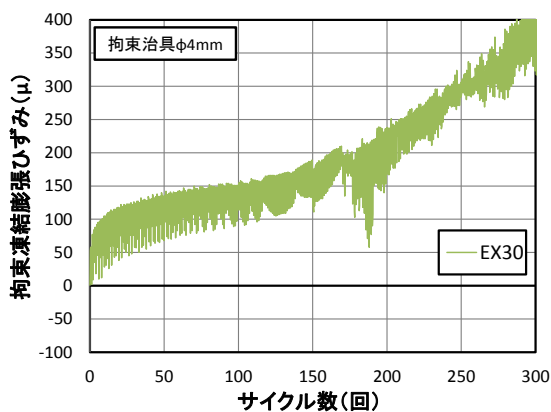


図-13 凍結膨張ひずみ(EX30-拘束治具φ4mm)

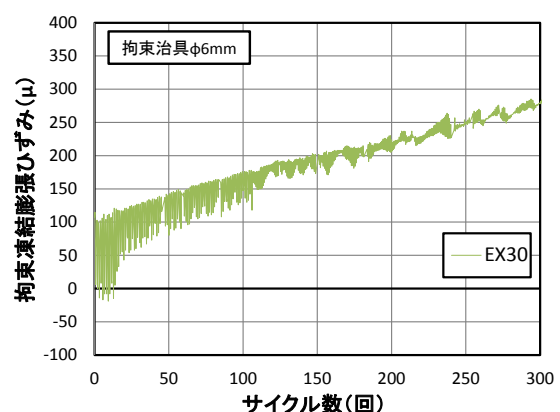


図-16 凍結膨張ひずみ(EX30-拘束治具φ6mm)



表-10 気泡間隔係数測定結果

	気泡間隔係数( $\mu$ m)
(拘束なし)PL	218
(拘束なし)EX20	229
拘束治具 $\phi$ 6mm EX20	214
A法 EX20	209

増傾向を確認できた。その拘束凍結膨張ひずみの増加量は、サイクル数 300 回時において概ね 200~300 $\mu$  程度であることが分かる。これらの結果より、膨張材の有無によらず凍結融解作用を受けたコンクリートのひずみ挙動は概ね一致するが、膨張材を混和したコンクリートの場合、凍結融解試験開始前の段階でコンクリート内部に大きな膨張ひずみを生じているかどうか、また、適切な拘束条件を付与しているかどうかにより、凍結融解抵抗性が大きく変わることが示唆されている。つまり、凍結融解試験は、凍結膨張が進行することによるコンクリートの劣化であり、事前にコンクリートに導入されている膨張ひずみの程度や、凍結膨張ひずみの進行を鋼材等で拘束する拘束条件が大きく影響するため、評価するコンクリートの特性や実際の使用状況等を十分考慮して評価する必要があると言える。本論文内では、拘束治具  $\phi$ 4mm 使用時と比べ、拘束治具  $\phi$ 6mm 使用時には、拘束凍結膨張ひずみの変曲点等が確認できなかつたこと、相対動弾性係数の低下度合いが緩やかなことから、膨張材を混和したコンクリートの凍結融解抵抗性は、かご型で  $\phi$ 6mm の拘束治具を用いて評価するのが望ましいと考えられる。

#### 4.4 気泡間隔係数

表-10 に気泡間隔係数測定結果を示す。一般的に、気泡間隔係数は小さい方が凍結融解抵抗性に優れているとされており<sup>6)</sup>、表より、本試験の範囲内では大きな差はないものの、拘束なしで膨張材を 20kg/m<sup>3</sup> 混和したコンクリートの気泡間隔係数が一番大きくなった。膨張材なしのコンクリート(PL)と、拘束治具  $\phi$ 6mm で膨張材を 20kg/m<sup>3</sup> 混和したコンクリートでは、気泡間隔係数はほぼ同等となる結果となり、A法で膨張材を 20kg/m<sup>3</sup> 混和したコンクリートの気泡間隔係数が一番小さくなった。

図-7 の相対動弾性係数測定結果と比較すると、気泡間隔係数と相対動弾性係数の測定結果による凍結融解抵抗性の評価は一致していることが分かる。A法で膨張材を 20kg/m<sup>3</sup> 混和したコンクリートの凍結融解抵抗性が優れている理由は、左右 2 つ端板により全コンクリート断面が完全に拘束される拘束条件によるものと考えられ、膨張材を混和したコンクリートにおいて安全側の評価と判断される可能性がある。また、実構造物等との使用状況に乖離があること、コンクリート外部から拘束条件を付与していること、試験体のコンクリート部分の長さを小

さくしなくてはならないこと等の課題がA法を使用した方法にはあり、本論文では、これらの課題を考慮し、拘束治具をコンクリート内部に埋め込んで試験体とする評価方法を示した。この方法に対する妥当性は、膨張材なしのコンクリートである PL と同様の気泡間隔係数となったことや、凍結融解作用時の凍結膨張ひずみの挙動が一致したことから検証できたが、拘束治具形状による拘束条件の付与方法など不明な点が残っており、今後の検討課題としたい。

#### 5. まとめ

膨張材を混和したコンクリートの凍結融解抵抗性を実際の使用状況を考慮した拘束条件やその有無により実験的に検討し、以下の結論を得た。

- (1) 拘束条件の有無により、膨張材を混和したコンクリートの凍結融解抵抗性は大きく変化した。
- (2) 拘束治具形状の違いや鉄筋比のような拘束条件を付与する方法の違いにより、膨張材を混和したコンクリートの凍結融解抵抗性は変化した。
- (3) 膨張材の有無によらず凍結融解作用を受けたコンクリートのひずみ挙動は一致しており、試験開始前にコンクリート内部に膨張ひずみを生じているかどうか、また、適切な拘束条件を付与しているかどうかにより、凍結融解抵抗性が大きく変わることが示唆された。
- (4) 膨張材を混和したコンクリートの凍結融解抵抗性を評価する手法として、拘束治具をコンクリート内部に埋め込んで試験体とする方法を検討し、その妥当性を確認した。

#### 参考文献

- 1) 国府勝郎：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
- 2) 天谷公彦，片平博，渡辺博志：膨張材を使用したコンクリートの拘束度と凍結融解抵抗性に関する実験的研究，土木学会第 65 回年次学術講演会，V-432，pp.863-864，2010.9
- 3) 三宅将，中村泰誠：膨張コンクリートの膨張が及ぼす組織構造の変化と凍結融解抵抗性，寒地土木研究所平成 17 年度技術研究発表会，コー9，2006.2
- 4) 鈴木邦康，濱幸雄，原田彩加：コンクリートの長さ変化及び凍害劣化に及ぼす鉄筋拘束の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，pp.1149-1154，2007
- 5) 洪悦郎，鎌田栄治，田畑雅幸：鉄筋拘束のあるコンクリートの耐久性に関する研究，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.197-198，1973 年 10 月
- 6) 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