

## 論文 EPS を骨材として用いた軽量コンクリートの凍結融解抵抗性

山崎 順二\*<sup>1</sup> 二村 誠二\*<sup>2</sup> 仲嶋 一郎\*<sup>3</sup> 大杉 久美子\*<sup>3</sup>

**要旨：**骨材として吸水性をほとんど持たない小粒形のポリスチレン発泡ビーズ(EPS)を用いた軽量コンクリート(MLC)は、断熱性に優れ吸水率が小さいために、凍結融解に対して優れた抵抗性を有していると考えられる。本報は、まずMLCの凍結融解抵抗性について評価を行い、その結果、優れた凍結融解抵抗性を有することを確認した。さらに、この軽量コンクリートを汎用性の高いものとするために、MLCと人工軽量骨材とを複合化させたコンクリートについても評価を行ったが、現時点では問題があり、今後、吸水率の小さい人工軽量骨材を使用して検討することが必要である。

**キーワード：**ポリスチレン発泡ビーズ, 軽量コンクリート, 凍結融解, 人工軽量骨材

## 1. はじめに

近年のコンクリート技術の発展により、コンクリートの高強度化および高耐久性化が進められてきている。コンクリートを高強度化することは、コンクリート構造物の早期劣化問題に対するあるひとつの改善策としては有効であるが、これは経済性を最優先させ、力学的性質にのみ重点をおいた材料開発ではないかと思われる。コンクリートには多くの優れた機能を付与することが可能であり、単に高強度化だけでなく、構造面・耐震面・施工面においてより有用な「軽量化」への取り組みも必要である。コンクリートを軽量化し、かつ構造体として十分な強度を得ることにより、部材断面を小さくでき、建物の重量を軽減することができるので、自重による地震力の軽減や地盤への負担軽減にも有効である。

このようなことを背景に、著者らはコンクリートを軽量化するために、小粒形のポリスチレン発泡ビーズ(以下EPSと略)を主骨材として利用することを計画し研究を進めてきた。その結果、低水結合材比を基本調合とすることによって、断熱性・施工性・難燃性など多くの優れた機能を有する高耐久性の軽量コンクリート(以下MLCと略)を開発した[1]。EPSの使用は、天然骨材の枯渇化対策を考えた場合にも有効であり、通常のコンクリートよりも高い断熱性を付与することができるので、冷暖房負荷を軽減することにもなる。ゆえにこのMLCの開発は、未利用資源の開発および地球温暖化対策としての省エネルギー住宅の普及などに貢献することができると考えられる。また中低層程度の構造物への利用やPC板等の二次製品としての利用等が大いに期待されるものである。

このような軽量コンクリートをより汎用性のあるコンクリートとするためには、寒冷地でも十分に耐えられる凍結融解抵抗性を有することが必要である。

そこで本報では、<実験I>としてMLCの凍結融解抵抗性について評価を行う。さらに、MLCを人工軽量骨材と複合化することにより、汎用性の高いコンクリートにすることができると

\*1 (株)浅沼組 技術研究所 研究員 工修 (正会員)

\*2 大阪工業大学講師 工学部建築学科 工修 (正会員)

\*3 鐘淵化学工業(株) 大阪工場 樹脂製品研究部 研究員

考えられる。人工軽量骨材と複合化したコンクリートは、構造体コンクリートやコンクリート二次製品への利用に有効であるので、＜実験Ⅱ＞として、MLCと人工軽量骨材とを複合化させたコンクリートの凍結融解抵抗性について評価を行う。

## 2. 実験の概要

MLCの各種性能を表-1に示す。MLCは表乾密度1.25(kg/l)において圧縮強度が25MPaであり、大きい強度が得られている。乾燥収縮率については大きめの値であるが、収縮低減剤や膨張材を使用することによりほぼ改善できることがわかった[2]。またALCや軽量コンクリートと比べて吸水率が小さく、高断熱性の軽量コンクリートである。

表-1 各種コンクリートの性能比較

	MLC	ALC	軽量コンクリート2種	普通コンクリート
表乾密度 (kg/l)	1.25	0.6	1.6	2.3
圧縮強度 (MPa)	25	4	21	30
曲げ強度 (MPa)	55	1.0	1.5	5.0
乾燥収縮率 (%)	0.20	—	0.08	0.08
吸水率 (vol%)	10	40	15	10
断熱性 (kcal/m <sup>2</sup> h°C)	0.23	0.13	0.6	1.3
中性化	◎	×	△	○
不燃性	○	◎	◎	◎

(◎:極めて良好、○:良好、△:あまり良くない、×:不適)

### 2.1 実験計画

今回の実験としては、

＜実験Ⅰ＞MLCの水結合材比25・30・35・40%の違い、および表乾密度1.00・1.25・1.50(kg/l)の違いによる比較、

＜実験Ⅱ＞MLCと人工軽量骨材とを複合化したコンクリートの水結合材比30・35・40%の違い、および材質の違う3種類の人工軽量骨材の違いによる比較、

を行った。実験要因の組み合わせを表-2および表-3に示す。

### 2.2 使用材料および試験方法

実験に使用した材料を表-4に示

す。供試体は長さ測定用プラグ付きの10×10×40cmの角柱型枠を使用し、打ち込み後20°C-80%RHの恒温恒湿室内に静置し、24時間後に脱型した。脱型後、温度20°Cで材齢14日まで水中養生を行い、供試体長さ・質量・たわみ振動の一次共鳴振動数を測定し、基準値とした。なお試験方法

表-2 実験要因の組み合わせ(MLC)

MLC密度 (kg/l)	水結合材比 (%)			
	25	30	35	40
1.00	—	○	○	—
1.25	○	○	○	○
1.50	—	○	○	—

表-3 実験要因の組み合わせ(人工軽量骨材混入)

MLC密度 (kg/l)	人工軽量骨材 種類	水結合材比 (%)		
		30	35	40
1.50	膨張頁岩系	○	○	○
	抗火石系A	○	—	—
	抗火石系B	○	—	—

は、ASTM C 666 A法(水中凍結融解試験方法)に準じた。凍結融解の繰り返しは1サイクル4時間とし、30サイクルごとに測定を行い、300サイクルに達するまで試験を継続した。

### 2.3 コンクリートの調合

MLCの調合表を表-5に、人工軽量骨材と複合した場合の調合表を表-6に示す。本調合は、練り上がりの密度がそれぞれ1.00・1.25・1.50(kg/l)になるように設計したものである。高性能AE減水剤の添加量については、MLCのフロー値の目標を220±20mmに設定し、各水結合材比に応じて混入量を調整した。なお人工軽量骨材は、コンクリート容積に対して40%の割合で混入した。コンクリートの練混ぜは1バッチ約20Lとし、容量30Lのオムニミキサーを用いて約3分間行った。

### 3. <実験I>における結果 および検討

MLCの凍結融解試験結果(300サイクル)を表-7に、またMLCの水結合材比25・30・35・40%と相対動弾性係数の関係を図-1に、密度1.00・1.25・1.50(kg/l)と相対動弾性係数の関係を図-2および図-3に示す。MLCの凍結融解抵抗性は、水結合材比25~40%の範囲および密度1.00~1.50(kg/l)の範囲において300サイクル終了後、耐久性指数が97.1以上、質量減少率が2.91%以下、膨張率が0.04%以下であった。供試体表面もMLC密度1.00(kg/l)の供試体にややポップアウトが認められただけで、それ以外の供試体においてはほとんど変化がなく健全であった。これらより今回の実験の範囲内においては、MLCは優れた凍結融解抵抗性を有していると考えられる。

表-4 使用材料

材 料	品 名	
結合材	早強ポルトランドセメント	
水	上水道水	
骨 材	ポリスチレン発泡ビーズ®(EPS)<直径1.5mm以下>	
	人 工 軽 量 骨 材	膨張頁岩系 絶乾密度:1.4(kg/l) 吸水率 :9.6% 粒 径 :5~15(mm)
		抗火石系A 絶乾密度:1.0(kg/l) 吸水率 :1.2% 粒 径 :2.5~5(mm)
抗火石系B 絶乾密度:0.6(kg/l) 吸水率 :4.1% 粒 径 :2.5~5(mm)		
混和剤	高性能AE減水剤(特殊アニオン系)	

表-5 MLCの調合表

設計 密度	W/C (%)	セメント (kg)	水 (kg)	EPS (l)	混和剤 (kg)
1.00	30	769	225	524	7.7
	35	741	256	505	3.7
1.25	25	964	222	452	19.3
	30	929	269	426	9.3
	35	896	309	401	4.5
	40	866	346	378	—
1.50	30	1132	328	302	11.3
	35	1092	377	272	5.5

表-6 人工軽量骨材と複合化した場合の調合表

MLC密度 (kg/l)	W/C (%)	セメント (kg)	水 (kg)	EPS (l)	混和剤 (kg)	人工軽量骨材 (l)
1.50	30	679	197	181	6.8	400
	35	655	226	163	3.3	400
	40	632*	253	145	—	400

コンクリート中の気泡や骨材の周囲には、それらをつなぐキャピラリー空隙が存在すると言われている。普通強度のコンクリートと比べて高強度コンクリートになるほど、キャピラリー空隙は極めて微細になるか、もしくは閉塞される

と考えられる。キャピラリー空隙の径が小さくなるほど内部の水分の凍結点が低くなるということが一般的に知られており、気泡内の水が凍結する温度であっても、キャピラリー空隙中の水は未凍結である場合がある。このような場合、気泡内の氷とキャピラリー空隙中の水との界面で毛管力が発生し、キャピラリー空隙の径が小さくなるほど毛管力は大きくなる。この毛管力がマトリックスの引張強度より大きくなると、コンクリート表面にスケーリングが発生したり、気泡や骨材の周囲に微細なクラックが発生すると考えられる。また、水が凍結することにより9%の容積膨張を生じるが、気泡内の水や骨材周囲の水の凍結による膨張圧は、キャピラリー空隙を通じて周囲の気泡に伝わることになる。しかし、それぞれの気泡がこのような挙動をするために、凍結による膨張圧をキャピラリー空隙内で緩和しきれなくなる。その膨張圧がマトリックスに作用することによっても、スケーリ

表-7 MLCの凍結融解試験結果(300サイクル)

(マイナスは減少)

MLC密度 (kg/l)	項目	水結合材比(%)			
		25	30	35	40
1.00	相対動弾性係数(%)	-	102.81	98.67	-
	質量変化率(%)	-	-2.66	-2.91	-
	膨張率(%)	-	0.04	-0.01	-
1.25	相対動弾性係数(%)	97.99	97.82	98.87	108.44
	質量変化率(%)	-1.34	-0.71	-0.63	-1.19
	膨張率(%)	0.03	0.02	0.01	0.01
1.50	相対動弾性係数(%)	-	97.17	106.26	-
	質量変化率(%)	-	-0.46	-0.87	-
	膨張率(%)	-	0.04	-0.01	-

(ここでは「相対動弾性係数」=「耐久性指数」となる)

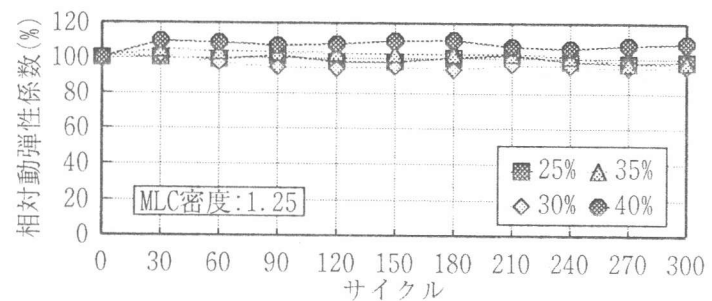


図-1 水結合材比と相対動弾性係数の関係(密度1.25)

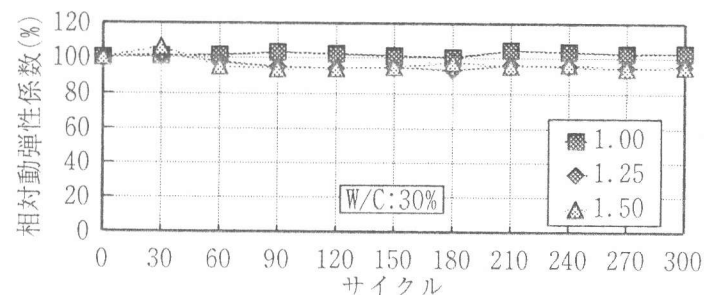


図-2 MLC密度と相対動弾性係数の関係(W/C 30%)

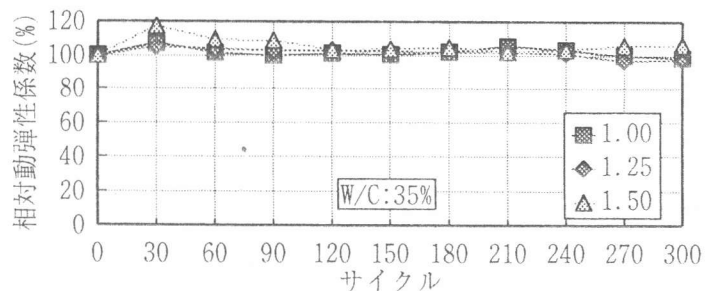


図-3 MLC密度と相対動弾性係数の関係(W/C 35%)

ングが発生すると考えられる。

MLCの場合、水結合材比が小さいためにキャピラリー空隙は極めて微細であるかもしくは閉塞していると考えられるが、①EPSは通常の骨材と違い吸水性をほとんど持たないということが、凍結融解抵抗性に優れる最大の要因である。また二次的な要因としては、②余剰水が凍結することによる膨張圧は周囲のEPSや微細な気泡に伝えられ、それらがクッション的な役割を果たすことにより膨張圧を緩和している、などが考えられる。

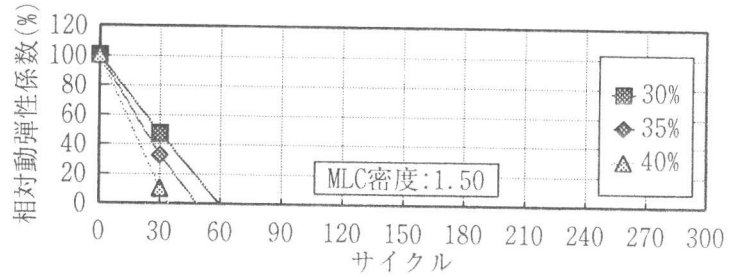


図-4 水結合材比と相対動弾性係数の関係(膨張頁岩系人工軽量骨材)

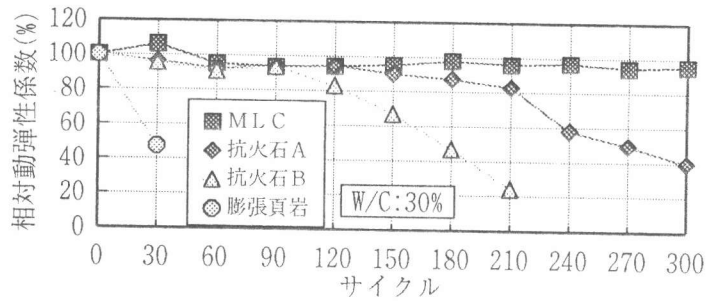


図-5 人工軽量骨材の種類と相対動弾性係数の関係

#### 4. <実験Ⅱ>における結果および検討

MLCと人工軽量骨材を複合化することにより、MLCをより汎用的な軽量コンクリートにすることができると考えられる。そこで、表-4に示すような、比重および材質の違う3種類の人工軽量骨材とMLCを複合化させたコンクリートについて実験を行った。MLCと人工軽量骨材を複合化させたコンクリートの凍結融解試験結果を表-8に、図-4に膨張頁岩系人工軽量骨材の水結合材比と相対動弾性係数の関係を、図-5に骨材の種類と相対動弾性係数の関係を示す。また、凍結融解試験終了後の供試体断面の写真を写真-1, 2, 3に示す。

この結果より、

MLCと人工軽量骨材を複合化した場合、全体的に凍結融解抵抗性が低下し、吸水率の大きい人工軽量骨材を使用したものは相対動弾性係数の低下が大きくなる傾向にあることがわかった。特に膨張頁岩系人工軽量骨材を使用した場合、図-4に示すようにいずれ

表-8 人工軽量骨材と複合化したコンクリートの凍結融解抵抗性

(マイナスは減少)

MLC密度 (kg/l)	人工軽量 骨材種類	項 目	水 結 合 材 比 (%)		
			3 0	3 5	4 0
1.50	膨張頁岩系	サイクル	3 0	3 0	3 0
		相対動弾性係数(%)	47.30	32.28	10.24
		質量変化率(%)	-4.68	-3.63	-3.05
		膨張率(%)	0.61	0.33	0.81
	抗火石系A	サイクル	3 0 0	—	—
		相対動弾性係数(%)	39.34	—	—
		質量変化率(%)	-2.53	—	—
		膨張率(%)	0.21	—	—
	抗火石系B	サイクル	2 1 0	—	—
		相対動弾性係数(%)	23.85	—	—
		質量変化率(%)	-2.55	—	—
		膨張率(%)	0.18	—	—

の水結合材比においても凍結融解抵抗性が極めて低く、それらの耐久性指数が4.60~2.80となり、供試体が容易に破損する状態であった。また図-5より、抗火石系人工軽量骨材を使用したものについては、膨張頁岩系のものと比較すると良好であるが、耐久性指数は抗火石系Aで47.4、抗火石系Bで32.0であった。このように耐久性指数が低下したのは、骨材内部の水の凍結により発生する膨張圧を、EPSや気泡が緩和しきれなかったためと考えられる。つまり、吸水率が大きくなるほど水の膨張量も大きくなり、その結果大きい膨張圧が骨材周囲のマトリックスに作用し、写真-2のように骨材やその周囲にクラックを発生させたために、極端に耐久性指数が低下したと考えられる。また写真-3に示す抗火石系A人工軽量骨材の場合、吸水率があまり大きくないために骨材自体は破壊しておらず、水の凍結による膨張圧を少しは緩和していると思われるが、骨材周囲にマイクロクラックが発生し表層部でスケーリングが認められたために、凍結融解抵抗性が低下したと考えられる。

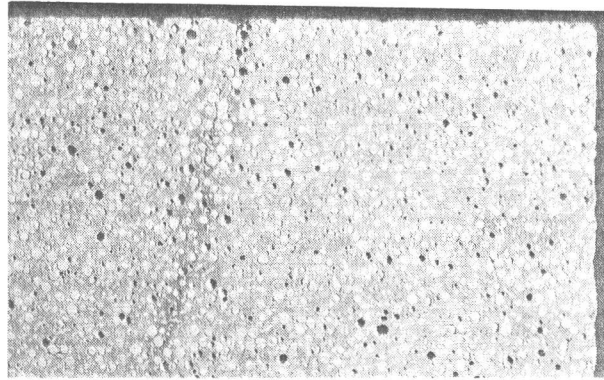


写真-1 MLC (300サイクル終了後)

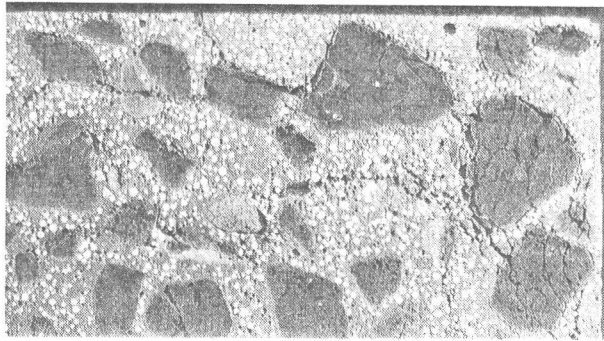


写真-2 膨張頁岩系人工軽量骨材 (30サイクル終了後)

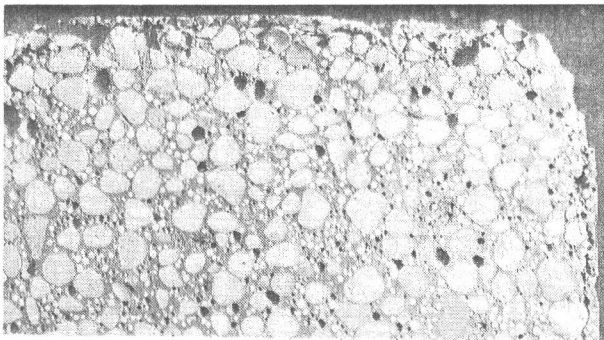


写真-3 抗火石系A人工軽量骨材 (300サイクル終了後)

## 5. まとめ

今回の実験の結果から、以下のようなことが確認できた。

- 1) MLCの凍結融解抵抗性は、水結合材比25~40%の範囲、および密度1.00~1.50(kg/l)の範囲において、優れた凍結融解抵抗性を有していることが確認できた。
- 2) MLCと人工軽量骨材を複合した場合、吸水率の大きい骨材を使用したものほど凍結融解抵抗性が低下した。これより吸水率の小さい軽量骨材の使用が望まれ、現在開発中である。

## 【参考文献】

- 1) 山崎順二・二村誠二・仲嶋一郎・大杉久美子：特殊軽量コンクリートの研究開発について、材料、Vol.43、No.491、pp.990~996、1994.8
- 2) 仲嶋一郎・大杉久美子・二村誠二・山崎順二：多機能軽量コンクリートの開発 その8,9、日本建築学会大会学術講演梗概集（東海）、pp.395~398、1994.9