

# 論文 改質ビーライト系セメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性

吉田 行\*1・堀 孝司\*2・熊谷守晃\*3

要旨：粒度や鉱物組成を改質したビーライト系セメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に関する検討を行った。その結果、改質した比表面積の大きなビーライト系セメントを用いたコンクリートは、一般のビーライト系セメントを用いた場合よりも、大きな凍結融解抵抗性を示した。

キーワード：ビーライト系セメント、凍結融解抵抗性、空気量、気泡システム、細孔構造

## 1. はじめに

著者らは、ビーライト系セメントの粒度や鉱物組成の改質を行い、それらを用いたコンクリートの基本特性について広範な検討を行い、ビーライト系セメントの多様な性能を明らかにしてきた<sup>1)</sup>。さらに、この改質したビーライト系セメントを用いたコンクリートの強度発熱特性に及ぼす水セメント比の影響について検討を行い、高微粉末化した改質ビーライトセメントを低水セメント比で用いることにより断熱温度上昇量を高めることなく、初期強度を改善し、その後の強度発現も増大させることを明らかにした<sup>2)</sup>。

一方、ビーライト系セメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性についてはこれまでも多くの実験がなされてきたが、これらの結果は必ずしも統一的に説明できるものではなかった<sup>3)~11)</sup>。これは、ビーライト系セメントの鉱物組成やその粉末度に影響される細孔構造によって必要な空気量が異なることに起因していると考えられる。すなわち、気泡分布やそのサイズなど気泡システムを含むコンクリート組織構造の問題であると言える。

このような背景に基づいて、本研究では、著者らが開発した改質ビーライト系セメントを用

いたコンクリートの凍結融解抵抗性について検討することとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

表一および表二に、使用材料およびビーライトセメントの鉱物組成を示す。セメントは、ビーライト系ポルトランドセメント（以後、ビーライトセメントと略記）および普通ポルトラ

表一 使用材料

セメント	ビーライトセメント(B4)	3780*
	ビーライトセメント(B6)	6410*
	普通ポルトランドセメント(OPC)	3310*
細骨材	登別産陸砂	比重 2.68
		吸水率 1.35% FM 2.70
粗骨材	白老産碎石	比重 2.68, 吸水率 1.84%
高性能AE減水剤	水溶性共重合体	
AE助剤	樹脂酸塩系	

\*：ブレン比表面積( $\text{cm}^2/\text{g}$ )

表二 ビーライトセメントの鉱物組成

ビーライトセメントの種類	鉱物組成 (%)			
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
B4	28	50	3	12
B6	25	54	3	12

\*1 北海道開発局開発土木研究所構造部材料研究室研究員 工修（正会員）

\*2 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 工博（正会員）

\*3 北海道開発局開発土木研究所構造部材料研究室室長（正会員）

表-3 コンクリートの配合

セメントの種類	水セメント比 (%)	空気量 目標(実測) (%)	SP* 種類	S P 添加率 (C%)	s/a (%)	コンクリート単位量 (Kg/m <sup>3</sup> )						
						W	C	S	G	SP	AE剤(g)	
B4	30	2.5 (2.1)	HP11	0.8	44	109	363	889	1107	2.90	0	
		3.5 (3.5)						877	1094		16.3	
	40	3.5 (3.3)		0.8	46	119	298	930	1067	2.38	1.5	
		4.5 (4.2)						917	1054		3.0	
B6	30	2.5 (2.2)	HP11	1.0	44	102	340	906	1128	3.40	0	
		3.5 (3.5)						894	1118		15.3	
	40	2.5 (2.8)		HP8	0.8	46	113	283	955	1097	2.26	0
		3.5 (3.9)							943	1084		2.8
OFC	40	3.5 (3.7)			0.8	46	124	310	916	1053	2.48	0

SP\*:高性能AE減水剤

ンドセメント (以後、普通セメントと略記) を用いた。

高性能 AE 減水剤として、カルボキシル基、特殊グラフト基、およびスルホン酸基を含有する水溶性共重合体を主成分とするものをセメントの分散性に依じて2種類用いた。空気量調節のために AE 助剤を用いた。

## 2.2 コンクリートの製造および配合

コンクリートの練混ぜには、容量 55% の 2 軸強制練りミキサを用いた。練混ぜ時間は、全材料投入後 2 分とした。

コンクリートの目標スランプおよび目標空気量は、それぞれ  $8 \pm 2.5$  cm および  $2.5 \sim 4.5 \pm 1$  % とした。コンクリートの練混ぜ温度は 20°C とし、養生は供試体作製後 1 日間湿気養生し、脱型後、所定の材齢まで水中養生を行った。

表-3 に、コンクリートの配合を示す。水セメント比(w/c)は 30%、40%の2種類とした。

## 2.3 実験項目および実験方法

### (1) 圧縮強度

圧縮強度試験は、 $\phi 10 \times 20$  cm の供試体を用い、JIS A1108 に準拠して行った。試験材齢は、14 日および 28 日とした。

### (2) 凍結融解抵抗性

コンクリートの凍結融解試験は、 $10 \times 10 \times 40$  cm の供試体を用い、JSCE-G 501 に準拠して行った。試験開始材齢は、14 日および 28 日とし

た。

### (3) 気泡システム

硬化コンクリートの気泡分布の測定は、ASTM C 457 (リニアトラバース法) に準拠して行った。

### (4) 細孔構造

コンクリート中のセメントペースト硬化体の細孔分布の測定は水銀圧入法により行った。測定に用いた試料は、供試体内部のコンクリートを 2.5~5.0mm になるように切断およびふるい分けし、アセトン中で 20 分間攪拌、洗浄した後 D-dry で 6 日間乾燥させて作製した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 凍結融解試験結果

図-1 に、凍結融解試験結果を示す。試験開始材齢 14 日においては(図-1(a)~(b))、比表面積が小さいビーライトセメント(以後、セメント B4 と略記)を用い、空気量が 4.5% でも相対動弾性係数は著しく低下した。また、目標空気量が 2.5% では w/c=30% としても、その劣化は初期サイクルから著しいものとなった。質量変化率の低下は、スケーリングの発生を、また、その増加はコンクリート組織の緩みによる水の浸透を意味する。図-1 から、比表面積が大きいビーライトセメント(以後、セメント B6 と略記)を用いた場合、コンクリートの耐凍害性は、セ

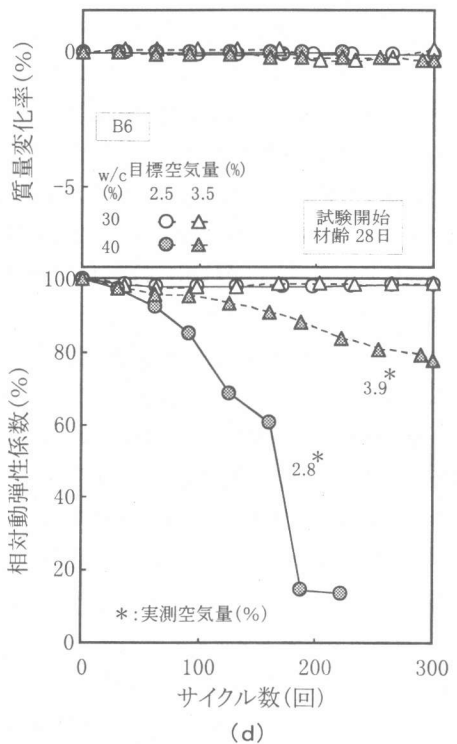
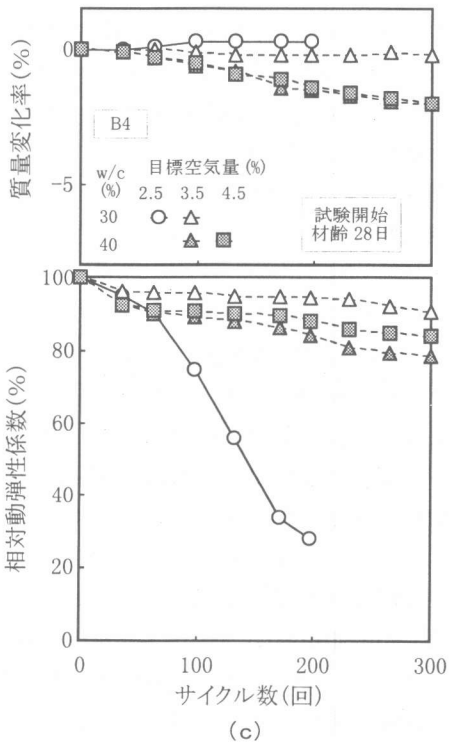
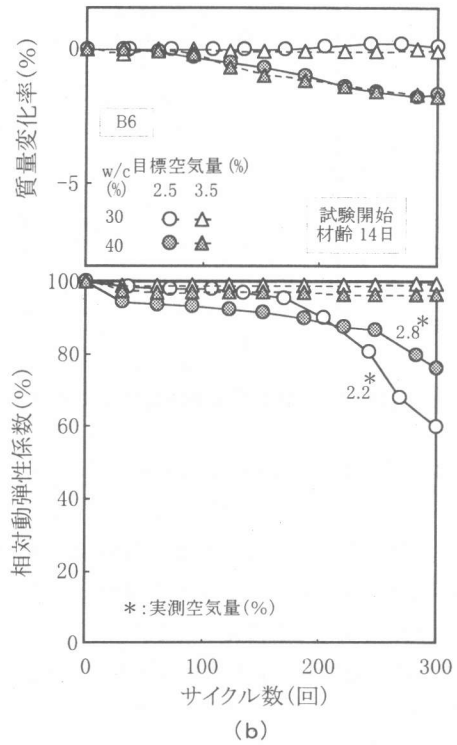
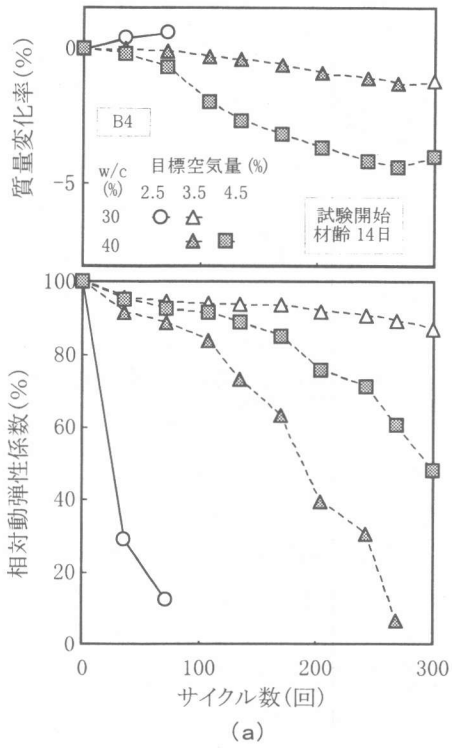


図-1 凍結融解試験結果

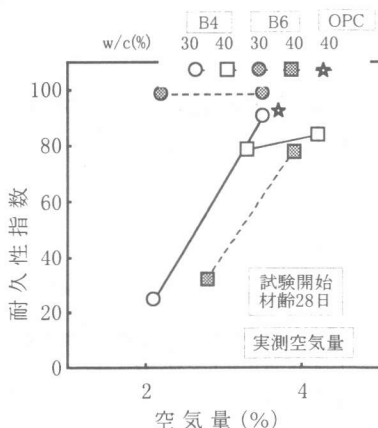


図-2 耐久性指数と空気量の関係

メント B4 を用いた場合よりも著しく改善されていることが分かる。目標空気量が 2.5% の場合、 $w/c=30\%$  と  $40\%$  で相対動弾性係数の低下傾向が逆転しているが、これは実際の空気量の差に起因していると考えられる。

試験開始材齢 28 日における (図-1(c)~(d)) 相対動弾性係数の低下は、材齢 14 日より著しく小さな結果となった。また、セメント B4 を用いた場合、 $w/c=30\%$  でも空気量が十分でないと耐凍害性が劣ることが分かる。これに対して、セメント B6 を用いた場合にはこの条件においても耐凍害性が改善されている。ところが、 $w/c=40\%$  で目標空気量が 2.5% の場合、試験開始材齢 14 日では十分な耐凍害性が確保されているのに対して、28 日では相対動弾性係数が著しく低下した。コンクリートの耐凍害性は、コンクリートの組織構造と強度および、気泡システムに支配される。すなわち、強度が大きくなると発生内圧力も増加し、一定量以上の気泡が必要となる。しかし、組織構造が十分に生成されていない場合には、発生内圧力も小さくなる。上述の結果は、このようなメカニズムに起因したものと考えられる。

### 3.2 空気量の影響

図-2 は、耐久性指数と空気量の関係を示す。明らかに、空気量が多くなるほど耐久性指数が大きくなる傾向にあるが、これらの結果は他の要因が複雑に影響することを示している。なお、

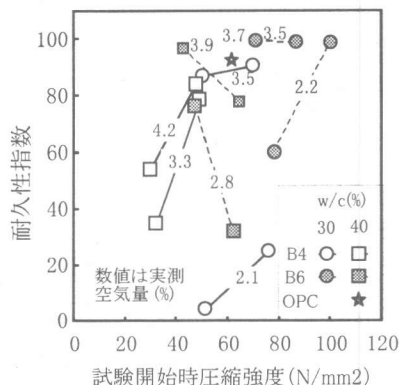


図-3 耐久性指数と試験開始時圧縮強度の関係

材齢 28 日において、耐久性指数として 80 を確保するのに必要な空気量は、セメント B6 を用いた場合、 $w/c=30\%$  では約 2.2% であるが、 $w/c=40\%$  では約 4.0% であった。これに対してセメント B4 を用いた場合、 $w/c=30\%$  では約 3.3% であるが、 $w/c=40\%$  では約 3.5% であった。

### 3.3 圧縮強度の影響

図-3 は、耐久性指数と試験開始時圧縮強度の関係を示す。試験開始時圧縮強度の増加は耐久性を改善する傾向がある。空気量が 4% 程度では試験開始時圧縮強度が  $50\text{N/mm}^2$  で耐久性指数が 80~100 得られた。しかし、空気量が 2% 程度では耐久性指数として 80 得るためには、試験開始時圧縮強度は  $90\text{N/mm}^2$  程度必要となることが明らかになった。

### 3.4 気泡システムの影響

図-4 は、耐久性指数と気泡間隔係数の関係を示す。気泡間隔係数が大きくなると耐久性指数は小さくなる傾向にある。セメント B6 および普通セメントを用いた場合、気泡間隔係数が  $300\mu\text{m}$  程度で耐久性指数は 90 以上得られた。しかし、セメント B4 を用いた場合、 $w/c=40\%$  で試験開始材齢が 14 日においては、耐久性指数は、気泡間隔係数が  $300\mu\text{m}$  程度確保されても 54 しか得られなかった。また、気泡間隔係数が  $400\mu\text{m}$  程度であっても 60 以上の耐久性指数が得られる場合があることも明らかとなった。これらの結果は、細孔構造にも関係すると考えら

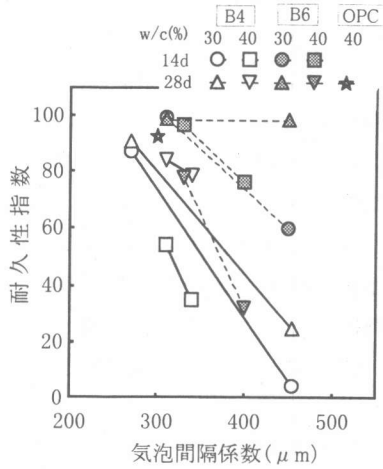


図-4 耐久性指数と気泡間隔係数の関係

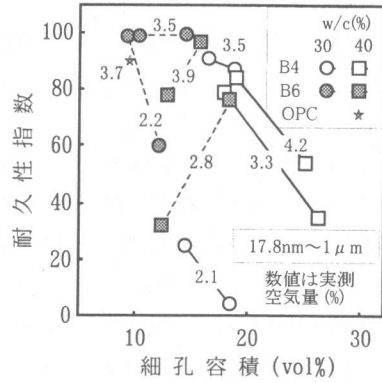
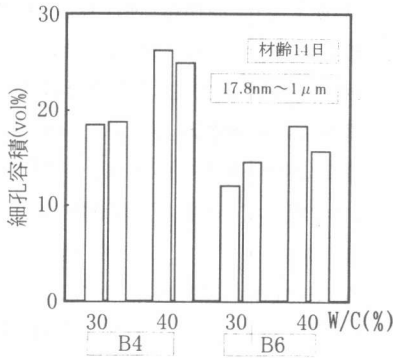
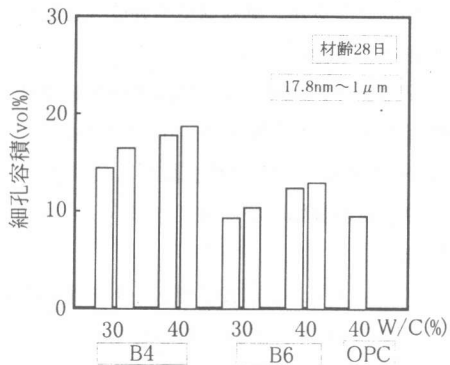


図-6 耐久性指数と細孔容積の関係



(a)



(b)

図-5 細孔容積

れるが、これについては次節で検討する。

### 3.5 細孔構造の影響

コンクリートの凍結融解抵抗性は、そのコンクリートの細孔構造と密接な関係があると言われていた。鎌田は<sup>12)</sup>、最低温度を $-18^{\circ}\text{C}$ とした凍結融解試験結果と硬化セメントペーストの区間細孔容積の相関係数を求め、凍結融解抵抗性に最も相関性の高い細孔径の範囲は、 $17.8\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$ であると報告している。この範囲のセメントペースト硬化体当たりの細孔容積を各種配合別に表したものを図-5に示す。なお、図-5の細孔容積は、それぞれの目標空気量に対応するものである。この図から、この範囲の細孔容積は、水セメント比が小さくなるほど、ピーラ

イトセメントの比表面積が大きくなるほど、そして試験開始材齢が長くなるほど少なくなっているのが分かる。

耐久性指数と上記範囲の細孔容積の関係を図-6に示す。細孔容積が小さくなると耐久性指数は増大する傾向がある。この傾向は、セメントB6で $w/c=40\%$ の場合を除いて、セメントの種類および水セメント比によらず、各空気量別に同様に見られ、かつ、空気量が多いほど耐久性指数が大きくなった。例えば、耐久性指数80を確保するには、空気量が2%程度では10vol%程度以下の細孔容積、空気量が4%程度では20vol%程度以下の細孔容積であることが必要である、と言える。

これらの結果を総合的に評価すると、改質したビーライトセメントは、比較的大きな径の細孔径の細孔容積を減少させ、このことが、凍結融解抵抗性の増大に寄与したと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、粒度や鉱物組成を改質したビーライト系セメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性について検討を行い、比表面積の大きなビーライトセメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性に対する優位性を見出した。本研究で得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 空気量が多くなるほど、耐久性指数が大きくなる傾向にあるが、細孔構造や強度など他の要因が複雑に影響している。
- (2) 空気量が4%程度では試験開始時圧縮強度が $50\text{N/mm}^2$ で耐久性指数が80~100得られたが、空気量が2%程度では耐久性指数として80得るためには、試験開始時圧縮強度は $90\text{N/mm}^2$ 程度必要となる。
- (3) セメント B6 および普通セメントを用いた場合、気泡間隔係数が $300\mu\text{m}$ 程度で耐久性指数は90以上得られる。しかし、セメント B4 を用いた場合、水セメント比が40%で試験開始材齢が14日においては、その細孔構造に起因して気泡間隔係数が $300\mu\text{m}$ 程度確保されても十分な耐久性指数が得られない。
- (4) 細孔径 $17.8\text{nm}\sim 1\mu\text{m}$ の範囲の細孔容積が小さくなると耐久性指数は増大する傾向にある。
- (5) 改質したビーライトセメントは、比較的大きな径の細孔径の細孔容積を減少させ、このことが、凍結融解抵抗性の増大に寄与したと考えられる。

#### 参考文献

- 1) 堺孝司・熊谷守晃・若杉伸一・下林清一:ビーライト系セメントの改質によるコンクリートの高性能化, 土木学会論文集, No620/V-43, pp55-70, 1999.5

- 2) 嶋田久俊・熊谷守晃・堺孝司:ビーライト系セメント用いたコンクリートの強度・発熱特性, 土木学会第54回年次学術講演会講演概要集 第5部, pp202-203, 1999.9
- 3) 原田克己・田中一也・中山英明:高ビーライト系超低熱セメントを使用したコンクリートの諸物性, セメント・コンクリート論文集 No.47, pp136-141, 1993.
- 4) 竹田宣典・十河茂幸・栗原正美:ビーライト系低発熱性コンクリートの養生条件と耐久性の関係について, セメント・コンクリート論文集 No.48, pp298-303, 1994.
- 5) セメント協会, 高ビーライト系セメントを用いた高性能コンクリートの性能評価に関する研究, 建築用高性能コンクリートの専門委員会報告書, 1997.3
- 6) 青木茂・三浦律彦・神代泰道・十河茂幸:低発熱ポルトランドセメントを用いた超高強度コンクリートの凍結融解抵抗性, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集 第5部, pp808-809, 1997.9
- 7) 石川伸介・福岡信・立山創一:高ビーライト系セメントを使用した高強度・高流動コンクリートの諸物性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp157-162, 1997.6
- 8) 鳴瀬浩康・田中一也・川上学・轟木詳千:低発熱セメントを用いた高強度高流動コンクリートの耐久性状, セメント・コンクリート論文集 No.52, pp288-289, 1998
- 9) 川上学・深田康弘・轟木詳千:低発熱ポルトランドセメントを用いたコンクリートの凍結融解抵抗性, 第53回セメント技術大会講演要旨 pp210-211, 1999.5
- 10) 佐藤文則・城国省二・佐々木満・中島良光:低熱ポルトランドセメントを用いた高強度・高流動コンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp475-480, 1998.6
- 11) 一瀬賢一・淵田安浩・川口徹:高ビーライトセメントとシリカフェームを用いたコンクリートの基礎的性質に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp1009-1014, 1998.6
- 12) 鎌田英治:硬化コンクリートの水分凍結, コンクリート工学, vol.32, No.9, pp43-48, 1994.9