

論文 改質ビーライト系セメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートの諸性状

吉田 行^{*1}・田口 史雄^{*2}・名和 豊春^{*3}・渡辺 宏^{*4}

要旨：粒度等を改質したビーライト系セメントおよび比表面積の異なる高炉スラグ微粉末を用いた高耐久コンクリートの実用化を目的として、コンクリートの高流動化を行い、強度や発熱特性などに及ぼす影響について検討を行った。その結果、これらの結合材を用いたコンクリートは低発熱高強度となること、および塩分浸透や中性化に対する耐久性が確保されることが確認され、本結合材を用いた高耐久コンクリートの実用化の一端が示された。

キーワード：ビーライト系セメント、高炉スラグ微粉末、高流動コンクリート、耐久性

1. はじめに

近年、土木学会コンクリート標準示方書や道路橋示方書が改訂され、コンクリート構造物の設計体系は性能規定型に移行しつつある。性能規定型設計では、コンクリートの耐久性が長期的に確保されるように設計段階からその性能を照査する形式がとられている。このため、新設コンクリート構造物においては、その耐久性を確保することがライフサイクルコスト削減の観点からも極めて重要な課題である。

このような背景から、著者らはこれまで、長期耐久性を有するコンクリートの開発を目的として、ビーライト系セメントを用いたコンクリートの物性および耐久性について広汎な検討を行ってきた。その結果、ビーライト系セメントの高微粉末化およびその一部を高炉スラグ微粉末で置換することにより、強度・発熱特性、耐凍害性および塩分浸透抵抗性などの物性や耐久性が改善され、特にそれらの向上効果は、水結合材比30%以下の領域で著しいことを明らかにしてきた^{1),2),3),4)}。しかし、これまでの検討はコンクリートの性能の限界を調査する観点から、スランプ8cm程度のコンクリートで検討を行っており、性能の向上効果が著しい水結合材比

30%以下の領域のコンクリートを実用化するには、施工性も含めた総合的な評価が必要となる。

本研究では、改質ビーライト系セメントとその一部を高炉スラグ微粉末で置換したコンクリートの現場適用性（ポンプ施工等）を考慮し、コンクリートの高流動化および高流動化に伴う物性や耐久性への影響について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1に使用材料を**表-2**に結合材の性状を示す。セメントには高微粉末化したビーライト系セメント（以下B6と記述）、一般的なビーライト系セメント（市販品、以下B3と記述）および普通ポルトランドセメント（以下OPCと記述）の3種類を用いた。高炉スラグ微粉末（以下スラグと記述）は、JIS A 6206で規定される比表面積4000, 6000, 8000（以下それぞれS4,S6,S8と記述）クラスのをそれぞれ用い

表-1 使用材料

細骨材	登別産陸砂	密度 2.69g/cm ³ , FM 2.70
粗骨材	白老産碎石	密度 2.66g/cm ³ , Gmax 25mm
高性能AE減水剤	末端スルホン基を有するポリカルボン酸系	
AE助剤	樹脂酸塩系（ロジン系）	
消泡剤	ポリエーテル系	

*1 北海道開発土木研究所 構造部材料研究室研究員 工修（正会員）

*2 北海道開発土木研究所 構造部材料研究室室長（正会員）

*3 北海道大学大学院 工学研究科教授 工博（正会員）

*4 日鐵セメント(株) 研究開発部次長研究員（正会員）

表－2 結合材の性状

結合材	比表面積 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	化学成分(%)								鉱物組成(%)			
			igloss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	
ビーライト系セメント	B6	6410	3.25	0.5	25.0	4.1	3.9	61.6	1.5	1.9	21	56	4	12
	B3	3340	3.27	0.2	24.8	3.9	4.0	62.1	1.5	2.2	25	52	4	12
普通ポルトランドセメント	OPC	3320	3.16	0.3	21.8	5.4	2.9	64.5	1.9	1.7	54	21	9	9
高炉スラグ微粉末	S4	4111	2.91	1.2	32.8	14.5	0.6	41.3	4.9	2.0	—	—	—	—
	S6	6090	2.89	2.3	31.0	13.7	0.6	40.5	4.4	4.0	—	—	—	—
	S8	7200	2.89	3.2	29.7	13.2	0.4	40.3	4.4	6.0	—	—	—	—

表－3 コンクリートの配合

配合名	セメントの種類	スラグの種類	スラグ置換率(%)	W/B (%)	s/a (%)	SP ^{※1} の種類	SP添加率(C×%)	単位量 (kg/m ³)				空気量調整剤(C*%)	V漏斗流下時間(秒)
								W	B	S	G		
B6	B6	—	—	30	52	C	0.75	150	500	911	831	0.0006	18.4
B3	B3	—	—			D	0.70	157	523	891	813	0.0005	12.3
OPC	OPC	—	—			D	0.60	160	533	876	799	0.0006	10.7
S4-60	B6	S4	60			D	0.60	145	483	906	827	0.0005	15.4
S6-40		S6	40			C	0.70	148	493	899	821	0.0005	15.8
S6-60			60			C	0.70	145	483	906	827	0.0005	20.5
S8-40		S8	40			B	0.80	145	483	903	830	0.0006	28.4
S8-60			60			A	1.20	140	467	920	840	0.003 ^{※2}	17.8

※1 SP:高性能 AE 減水剤 (分散性: 大 A→小 D), ※2 S8-60 のみ AE 助剤使用, その他は消泡剤

た。混和剤はセメントの分散性に応じて4種類の高性能 AE 減水剤 (分散性: 大 A→小 D, 以下 SP と記述) を各配合の性状に合わせてそれぞれ用いた。併せて, 空気量を調節するため AE 助剤あるいは消泡剤を用いた。

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表－3に示す。水結合材比 (W/B) は, これまでの試験で性能の向上が著しい30%とした。配合は, 目標スランプフローおよび目標空気量をそれぞれ60±5cm, 4.5±1%と設定し, 試験練りを行い決定した。なお, 表－3には参考としてV漏斗流下時間を示した。

2.3 実験項目

各コンクリートの物性および耐久性を調べるために, 以下の項目で試験を行った。なお, 各試験に用いた供試体の基本的な養生は, 供試体作成後1日湿気養生を行い, 脱型後各試験材齢まで20℃で水中養生を行った。

(1) 圧縮強度試験

圧縮強度試験は, φ10×20cm 円柱供試体を用い, JIS A 1108 に準拠して行った。試験材齢は3, 7, 28 および91日の4材齢とした。

(2) 断熱温度上昇試験

断熱温度上昇試験は, 供試体寸法φ40×40cmを用い, 空気循環式の試験装置により行った。

(3) 電気泳動による塩分実効拡散係数試験

塩化物イオンの浸透に対する抵抗性は, 塩化物イオンの拡散係数により評価を行った。なお, 本研究で試験を行ったコンクリートは, 塩化物イオンの浸透に対する抵抗性が大きく, 浸せき方法による試験で塩化物イオンの見掛けの拡散係数を求めるには, 浸せき期間が著しく大きくなると考えられたため, 本研究では電気泳動によるコンクリート中の実効拡散係数試験方法(案)(JSCE-G571-2003)に準拠して塩化物イオンの実効拡散係数を求め, 実効拡散係数による評価を行った。なお, 電気泳動用供試体は, 材齢91日まで水中養生したφ10×20cmの円柱供試体の中央部を, 厚さ5cmの円盤状になるように切断したものをを用いた。

(4) 中性化促進試験

コンクリートの中性化試験は, JIS A 1153 コンクリートの促進中性化試験方法に準拠し, 温度20±2℃, 相対湿度60±5%, 炭酸ガス濃度5

±0.2%の試験条件で行った。供試体は試験前養生として、打設後 20℃水中養生を 4 週間行い、その後、相対湿度 60±5%、温度 20±2℃の環境で 4 週間気中養生を行った。中性化の測定は、試験開始後 1, 4, 8, 13, 26 週の各材齢で行い、試薬には 1%フェノールフタレインエタノール溶液を用いた。

(5) 細孔径分布の測定

コンクリート硬化体の細孔径分布は水銀圧入法により、圧縮強度試験材齢にあわせて測定した。試料は、測定用に別途作製したφ10×20cm 円柱供試体内部のコンクリートを 5mm 立方体に切断し、アセトン中で洗浄した後、D-dry (5×10⁴mmHg) で 7 日間乾燥させて測定を行った。細孔容積は、試料体積から骨材体積を除いた硬化セメントペースト体積当たりの空隙率で表記した。なお、骨材体積は、細孔測定と同様に採取した試料から得た不溶解残分質量率（セメント協会法 F-18 に準拠）に試料質量を乗じこれを骨材密度で除して求めた。

(6) 結合水量および Ca(OH)₂ 量の測定

結合水量および Ca(OH)₂ 量の測定は、熱分析装置を用い、昇温速度 10℃/min で示差熱分析 (DTA) を行った。結合水量は 20℃と 800℃の質量変化率より、Ca(OH)₂ 量は 450℃付近の減量より求めた。測定試料は、まず粗砕したコンクリートを鉄乳鉢中で粉碎しながら粗骨材を取り除き、残った試料をさらにアセトン中で軽く粉碎して 75μm 以下の粉末を採取した。試料は、この粉末を窒素ガス雰囲気中で定質量となるまで乾燥させたものを用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 単位水量と各結合材の関係

図-1 に各配合の単位水量に及ぼす結合材の種類の影響と SP 添加率の関係を示す。なお、本研究で用いた SP は、結合材が高微粉なものほど分散性の高いものを選定し、単位水量を小さくする目的で、コンクリートが分離を起こさない範囲で最大量用いている。

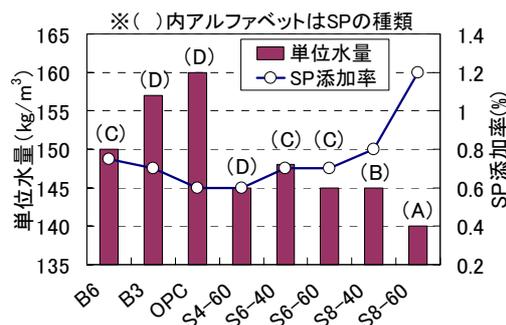


図-1 単位水量に及ぼす結合材の種類の影響

セメント単味の場合、SP の種類および添加率に応じて単位水量は減少した。一方、スラグを用いた場合も、SP の種類や添加率に応じて単位水量が減少する傾向が見られるが、同じ種類の SP で同程度の添加率でも、セメント単味の場合よりも単位水量は減少した。これは、粒形が球形に近いビーライト系セメントとスラグの組合せにより分散性が向上したためと考えられ、単位水量は結合材の種類や比表面積、SP の種類などに大きく影響されることがわかった。

3.2 圧縮強度

図-2 に圧縮強度の経時変化を示す。材齢 7 日までの初期（早期）強度は、OPC が最も大きかった。B6 単味の場合、B3 よりも 18MPa 程度強度が増加しており、高微粉末化によりビーライト系セメントの弱点とされている初期強度が改善されたが、OPC よりは小さかった。B6 の一部をスラグで置換した場合、スラグの比表面積が大きいほど初期強度は増大し、S8 は OPC とほぼ同程度となった。

一方、材齢 28 日以降の強度発現に着目すると、B6 および B3 の長期的な強度増加が大きく、B6 は材齢 28 日で OPC を上回り、それ以降は全配合の中で強度が最大となった。また、B3 は材齢 91 日で OPC を上回り、B6 との強度差も小さくなった。これに対して、スラグを置換した場合、初期強度が大きかった比表面積の大きいものほどその後の強度増加は小さくなり、S8 は OPC と同様に強度増加が頭打ち傾向を示した。また、S6 は材齢 91 日で OPC と同程度となり、S4 は強度増加が大きく、材齢 91 日における他の配合

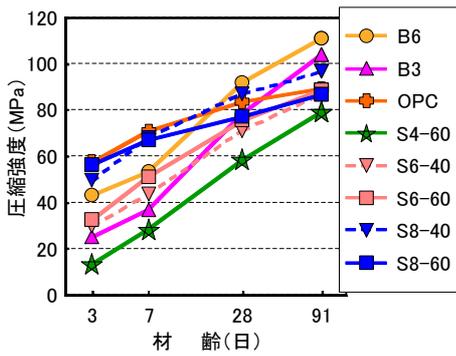


図-2 圧縮強度

との強度差が小さくなったが、強度は最も小さかった。なお、スラグ置換率の影響については、S8の場合、置換率が小さいほど初期強度は小さく、長期強度が増大する傾向が見られたが、S6ではほぼ同程度で推移しており、本試験の範囲内では、大きな差は見られなかった。

以上のことから、各結合材およびその組合せにより、多様な強度発現形態を有するコンクリートの製造が可能であることが明らかとなった。なお、これらの傾向は、有スランプで行った過去の試験結果と同様であり、コンクリートの高流動化が強度発現特性に及ぼす影響はほとんどみられなかった。

3.3 断熱温度上昇量

図-3に各配合における断熱温度上昇量を示す。セメント単味の場合、OPCに比べてB6およびB3の断熱温度上昇速度および断熱温度上昇量は小さく、高微粉末化したB6はB3よりも若干大きくなった。これは高微粉末化によりセメントの水和進行が促進されたことによるものと考えられる⁵⁾。これに対し、スラグを置換した場合は、スラグ置換率が大きくなるほど断熱温度上昇量は減少し、B6単味と比べて最大で約16℃抑制された。また、スラグ置換率40%の場合、スラグ比表面積が大きいほど断熱温度上昇量は減少したが、置換率60%ではスラグ比表面積の違いによる有意な差は見られなかった。このことから、スラグ混入による断熱温度上昇量の抑制効果は、スラグの比表面積よりも置換率の影響が大きいことがわかった。

図-4に単位結合材量当たりの終局断熱温

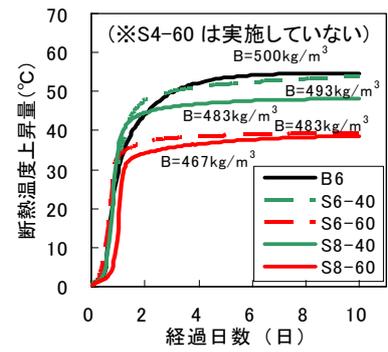
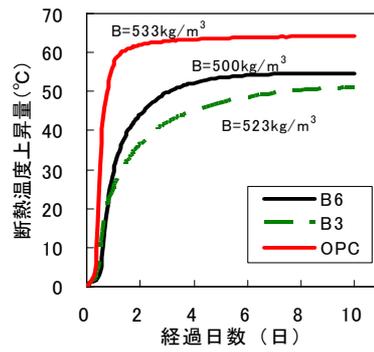


図-3 断熱温度上昇量

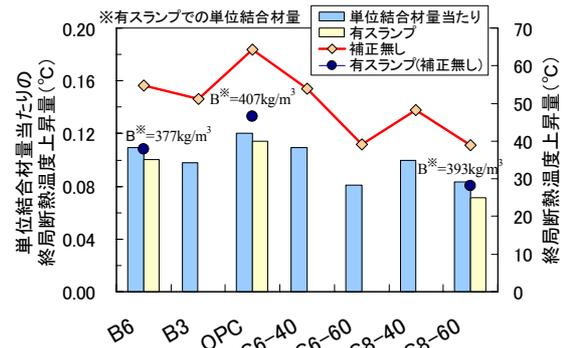


図-4 単位結合材量当たりの終局断熱温度上昇量

度上昇量を示す。結合材量で修正していない終局断熱温度上昇量も併記しているが、両者の傾向は同様となっている。また、一部併記した同一W/Bにおける過去の有スランプの値(ただし、供試体寸法φ30×30cmで測定した値)と比較すると、高流動化した方が終局断熱温度上昇量は大きいものの、単位結合材量当たりで比較した場合差は小さくなっていった。このことから、高流動化による断熱温度上昇量の増加は、基本的には単位結合材量の違いによるものと言える。

3.4 塩化物イオンの実効拡散係数

図-5に各配合における塩化物イオンの実効拡散係数を示す。図には、本研究における高流動コンクリートのデータと過去に行った有スランプでのデータ^{2),3)}を併記している。

セメント単味の場合、B3はOPCよりも若干大きくなったが、高微粉末化したB6はOPCよりも1/3程度拡散係数が小さくなった。一方、スラグを置換した場合は、スラグ置換率が大きいほど拡散係数は小さくなった。また、スラグ比表面積の違いでは、S4とS6はほぼ同程度だったが、S8は拡散係数が極めて小さくなり、S8-60

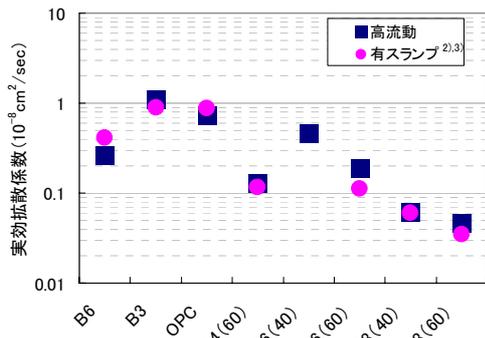


図-5 塩化物イオンの実効拡散係数

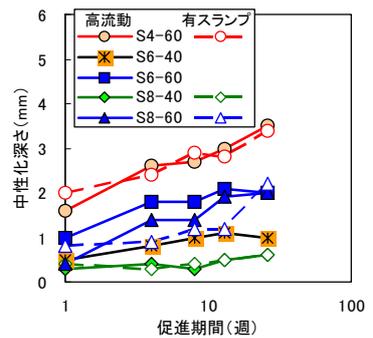
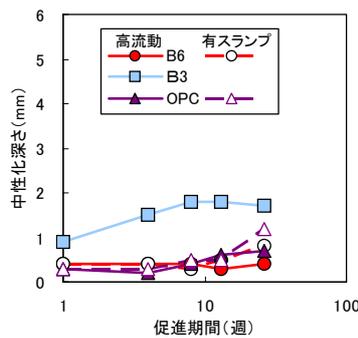


図-6 中性化深さの経時変化

では OPC よりも 1/15 程度実効拡散係数は小さくなった。これらの傾向は、有スランプにおける過去の試験結果と同様の傾向であり、高流動化した場合においても塩分浸透抵抗性

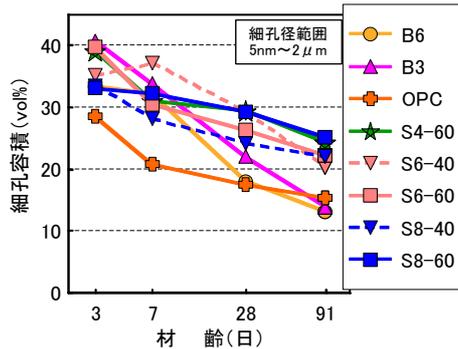


図-7 細孔容積の経時変化

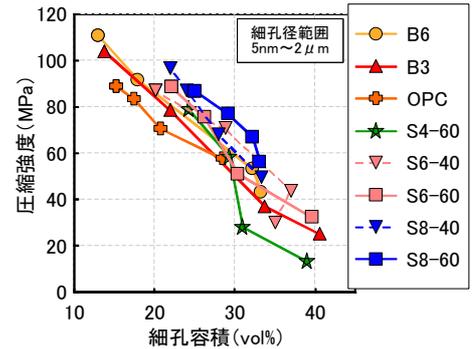


図-8 圧縮強度と細孔容積の関係

能は確保されることがわかった。なお、これらのメカニズムについては、細孔容積やその分布特性などが複雑に影響しているものと思われる³⁾。ただし、ここで検討した拡散係数は電気泳動法により求めた実効拡散係数であり、塩水浸せき試験などにより求められる見掛けの拡散係数とは異なる。見掛けの拡散係数への換算については現在検討中であり、今後の課題ではあるが、実際の拡散では塩分の固定化や吸着を伴いながら進行することから、ここで評価した実効拡散係数は、見掛けの拡散係数よりも大きな値を示していることが考えられ、設計上は安全側で考慮できると思われる。

3.5 中性化に対する抵抗性

図-6 に促進中性化試験の結果を示す。セメント単味の場合、B3 が若干大きくなったが B6 は OPC と同様殆ど中性化はしていなかった。スラグを置換した場合、スラグ比表面積が大きく置換率が小さいほど中性化は抑制される傾向がみられた。これらは、コンクリートの細孔組織や結合材の水和により生成される $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量が影響しているものと考えられる。また、図に併

記した、同一 W/B における過去の有スランプでの試験結果⁴⁾と比較すると、ほぼ同程度となっており高流動化による影響は見られなかった。これらのことから、スラグの混入により中性化は促進される傾向がみられるが、W/B が 30% と小さい領域においては、中性化の進行深さが極めて小さく、中性化に対する抵抗性は十分に期待できる。

3.6 細孔容積

図-7 に細孔容積の経時変化を示す。材齢の経過とともに細孔容積は減少しているが、結合材の種類によりその傾向は異なっており、強度発現の傾向と類似した傾向を示した。そこで、図-8 に圧縮強度と細孔容積の関係を示す。全体としては、細孔容積が少ないほど圧縮強度は増加する傾向にある。また、初期の強度発現が大きい OPC や S8 などは、初期の細孔容積が他のケースよりも比較的少なく、材齢の経過に伴う細孔容積の変動が小さいのに対し、長期的な強度増加がみられる配合では、初期の細孔容積が多く、材齢の経過に伴い細孔容積は大きく減少する傾向がみられた。また、細孔容積が少な

い高強度領域では、同一細孔容積に対する圧縮強度は、スラグを混入したケースで最も大きく、以下 B6, B3, OPC の順となり、スラグを混入したケースでは、スラグ比表面積および置換率が大きいほど増大する傾向がみられた。

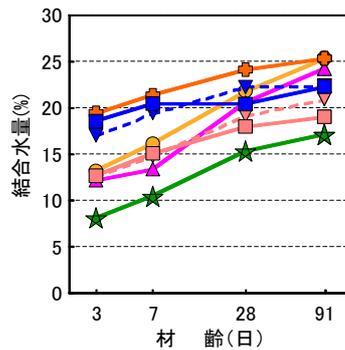


図-9 結合水量

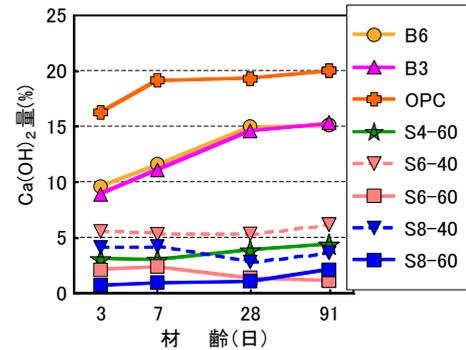


図-10 Ca(OH)₂量

3.7 結合水量と Ca(OH)₂量

図-9に各配合における結合水量の経時変化を示す。結合水量は、材齢の経過とともに増加し、これらの傾向は図-2に示した圧縮強度の経時変化と極めてよく一致しており、水和量およびその進行速度が強度発現に大きく影響を及ぼしていることがわかる。

図-10に Ca(OH)₂量の経時変化を示す。C₃Sが多い OPC で最も多く、B6 と B3 はほぼ同程度であった。これに対し、スラグを混入したケースでは、Ca(OH)₂量が極めて少なく、スラグ比表面積および置換率が大きいほど Ca(OH)₂量は少なかった。これは、スラグの置換により生成される Ca(OH)₂が減少することに加え、水和の進行に伴い Ca(OH)₂が消費されるためと考えられる。この結果は、スラグを混入したケースで中性化深さが増大したことを裏付けるものである。また、3.6で述べた同一細孔容積に対する圧縮強度が各配合で異なったことに対する要因の一つとして、本研究のような高強度領域のコンクリートにおいては、Ca(OH)₂の結晶の強度がセメント水和物の強度よりも小さいため、Ca(OH)₂量は強度に大きく影響を及ぼし、Ca(OH)₂量が少ないものほど圧縮強度が大きくなったことが考えられる⁵⁾。

4. まとめ

(1)改質ビーライト系セメントおよび高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートは、低発熱かつ高強度となり、結合材の組合せにより多様な強度発現特性を有するコンクリートの製造が可能となることが明らかとなった。

(2)高流動化した場合でも、塩分浸透や中性化に対する耐久性が確保されることが確認され、本結合材を用いた高耐久コンクリートの実用化の一端が示された。今後はこれらの耐久性が向上するメカニズムの解明や収縮特性などさらに詳細な検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 吉田行, 田口史雄, 嶋田久俊: 改質ビーライト系セメントを用いたコンクリートの強度・発熱特性および凍結融解抵抗性, 北海道開発土木研究所月報, No.578, pp.4-13, 2001.8
- 2) 吉田行, 田口史雄, 渡辺宏: 高炉スラグ微粉末を用いた改質ビーライト系セメントコンクリートの塩分浸透性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.639-644, 2002.6
- 3) 吉田行, 田口史雄, 名和豊春, 渡辺宏: 高炉スラグ微粉末を用いた改質ビーライト系セメントコンクリートの塩分浸透性に及ぼす諸要因の影響: コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.777-782, 2004.7
- 4) 吉田行, 田口史雄, 名和豊春, 渡辺宏: 高炉スラグ微粉末を用いた改質ビーライト系セメントコンクリートの中性化, 平成15年度土木学会北海道支部論文報告集, 第60号, V-28, pp.766-767, 2004.1
- 5) 堺孝司, 熊谷守晃, 吉田行, 渡辺宏, 下林清一: 改質ビーライト系セメントコンクリートの長期強度発現とそのメカニズム, 土木学会論文集 No.753/V-62, pp.1-11, 2004.2