

論文 ビーライト系3成分混合セメントのマスコンクリートへの適用性

水越陸視*¹・長岡誠一*²・佐谷靖郎*³・長谷川芳己*⁴

要旨: 中庸熱セメントをベースとした3成分系低発熱セメントと、これと混合比率が同じであるビーライトセメントをベースとした3成分系低発熱セメントを用いたコンクリートの諸性状を比較し、温度応力解析により温度ひび割れに対する抵抗性を比較検討した。その結果、3成分の混合比率が同じ場合、ベースセメントを中庸熱セメントからビーライトセメントに置き換えても、凝結、硬化収縮、乾燥収縮等の諸性状を大きく変化させることなく発熱量を低減でき、かつ温度履歴が等しい場合には同等の強度発現を示すことが確認された。また、温度応力解析により最小ひび割れ指数が大きく向上することが確認された。

キーワード: ビーライトセメント、マスコンクリート、温度ひび割れ抵抗性

1. はじめに

本州四国連絡橋公団が建設する3ルートの中の最後の吊橋となる来島大橋のアンカレイジは、明石海峡大橋同様マスコンクリート構造物となる。来島大橋の典型的な海中基礎である4Aの気中コンクリートについては、平成5年5月よりセメントに中庸熱ポルトランドセメントをベースとした3成分系低発熱型セメント（以下、MSFと略す）を使用して打設が進められてきており、良好な結果が得られている。しかし、ケーブルアンカーフレーム設置後はそれまでに比べて打設サイクルが長くなる、鋼材量が多くなるなど、温度ひび割れに対する条件が厳しくなる。このため、より温度ひび割れ抵抗性に優れたセメントが要求された。

3成分系混合セメントの場合、その混合比率を変えることによってコンクリートの発熱量や強度をコントロールすることができるが、その他の諸性状も大きく変化することが考えられる。一方、混合比率を変えずに3成分系混合セメントの高性能化を図る方法として、ベースセメントに中庸熱セメントより更に低発熱型のものを用いることが提案されている[1]。この場合、発熱量や強度以外の諸性状は大きく変化することはないと考えられる。

本報告は、ケーブルアンカーフレーム設置後の4A気中コンクリートの打設に先立ち、MSFと同じ混合比率の低発熱型ポルトランドセメント（以下、ビーライトセメントと記す）をベースとした3成分系低発熱型セメント（以下、BSFと略す）を用いたコンクリートの諸性状をMSFを用いたコンクリートと比較することにより明らかにし、温度応力解析によりひび割れ抵抗性を比較検討したものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料

実験に使用した3成分系低発熱型セメントの仕様および性質を表-1に、ベースセメントの鉋

* 1 住友大阪セメント（株）セメント・コンクリート研究所研究員、工修（正会員）

* 2 住友大阪セメント（株）セメント・コンクリート研究所主任研究員（正会員）

* 3 （株）熊谷組四国支店（正会員）

* 4 本州四国連絡橋公団第三建設局今治工事事務所第一工事長

物組成および性質を表-2に示す。また、高炉スラグはブレン5370cm²/g、塩基度1.85の微粉末を、フライアッシュにはブレン3360cm²/g、メソポール吸着量0.34mg/gのものを使用した。

表-1 使用セメントの仕様および性質

セメントの種類	ベースセメントの種類	混合比率 (%)			比重	ブレン (cm ² /g)	圧縮強さ (kgf/cm ²)				水和熱 (cal/g)	
		セメント	スラグ	フライアッシュ			3日	7日	28日	91日	7日	28日
BSF	低発熱ポルト	25	50	25	2.79	4,440	50	108	238	403	36.4	43.8
MSF	中発熱ポルト	25	50	25	2.78	4,390	58	129	290	429	43.9	53.8

表-2 ベースセメントの鉱物組成および性質

	鉱物組成 (%)				比重	ブレン (cm ² /g)	SO ₃ 量 (%)	圧縮強さ (kgf/cm ²)				水和熱 (cal/g)	
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF				3日	7日	28日	91日	7日	28日
低発熱ポルトランド	22	58	4	10	3.23	3,480	2.5	66	90	238	435	47.2	64.5
中発熱ポルトランド	40	38	5	12	3.19	3,320	1.8	116	184	376	496	63.1	77.9

骨材には、粗骨材として津久見産石灰石 (G max. 40mm、比重2.71、吸水率0.22%、粗粒率7.46) を、細骨材には頓田川沖産海砂 (比重2.54、吸水率3.00%、粗粒率2.77) を使用した。また、細骨材の微粒分を補うために、高知県春野産の石粉 (比重2.70、ブレン比表面積5,120cm²/g、湿分0.1%、石灰石純度96.0%) を使用した。混和剤には、ポリカルボン酸系の高性能A E減水剤と空気量調整剤として変性アルキルカルボン酸化合物系のA E剤を使用した。

2.2 コンクリートの配合

実験に用いたコンクリートの配合は、本州四国連絡橋公団におけるコンクリートの種別Lに相当するものである[2]。コンクリートの示方配合を表-3に示す。

表-3 コンクリートの示方配合

セメントの種類	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	練上り温度 (°C)	単 位 量 (kg/m ³)					混和剤 (C×%)	
				水	セメント	石粉	細骨材	粗骨材	SPA*	助剤
BSF	11±2.5	4±1	20	143	260	30	670	1218	1.25	0.0024
			5						1.15	0.0048
MSF			20	143	260	30	669	1216	1.25	0.0024
			5						1.15	0.0048

注)* SPA : 高性能A E減水剤

2.3 試験項目および方法

本実験において実施した試験項目および方法は表-4に示す通りである。

3. コンクリート試験結果

3.1 凝結硬化試験

プロクター貫入抵抗試験結果を図-1に示す。BSFを用いたコンクリートの凝結時間は、始発、終結ともMSFと同程度であった。

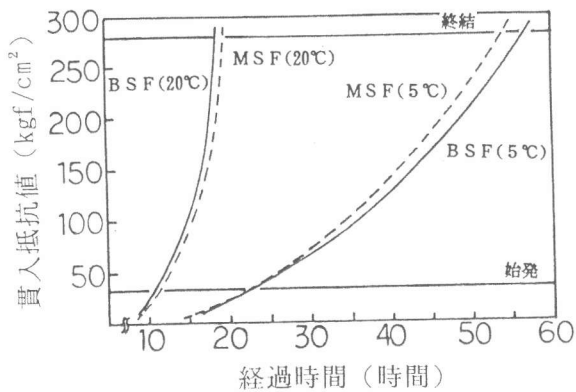


図-1 プロクター貫入抵抗試験結果

表-4 試験項目および方法

試験項目	試験方法	備考
凝結時間	JIS A 6204 付属書 1	プロクター貫入抵抗
断熱温度上昇量	空気循環式の装置を用い14日間測定	打込み温度は装置上の都合により20℃および10℃とした
自己収縮	水密構造の無応力容器内にて埋込み型ひずみ計により測定 近松らの方法 [3] に準拠	円柱供試体: φ15×30cm 20℃恒温室に保持
乾燥収縮	JIS A 1129	角柱: 15×15×53cm
圧縮強度	JIS A 1108	円柱: φ15×30cm
引張強度	JIS A 1113	円柱: φ15×20cm
静弾性係数	KODAN 302	初期接線弾性係数

3. 2 断熱温度上昇試験

断熱温度上昇試験結果を図-2、図-3に示す。なお、図中の近似式には低発熱セメントの発熱の遅れを考慮し、 $T=K(1-EXP(-\alpha(t-t_0)))$ を用いた。最終断熱温度上昇量Kは、打込み温度20℃ではBSFの方がMSFよりも約4℃、打込み温度10℃では約3℃低い値であった。一方、温度上昇速度に関する定数 α は、打込み温度20℃ではBSFの方がMSFよりも約0.4小さい値となったが、打込み温度10℃ではほとんど同じ値となった。これらのことより、ベースセメントにベীライトセメントを用いると、最終温度上昇量および上昇速度を低減できることが明らかになった。

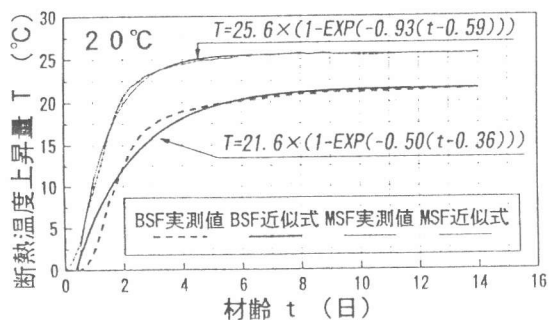


図-2 断熱温度上昇試験結果(20℃)

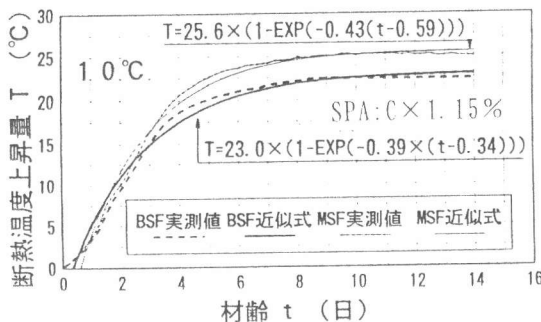


図-3 断熱温度上昇試験結果(10℃)

3. 3 自己収縮試験

硬化に伴う自己収縮ひずみの経時変化を図-4に示す。なお、初期膨張の傾向が2種類のセメントでやや異なったため自己収縮ひずみの基点を膨張のピーク値とした。自己収縮ひずみの大きさは、BSFの方がMSFよりも若干小さい値を示した。高炉スラグ微粉末を70%混合した2成分系セメントを用いた同一配合での報告 [4] と比較すると、材齢21日での自己収縮ひずみが74 μ であるのに対し、本試験ではBSF、MSFともに約18 μ と小さかった。これは、

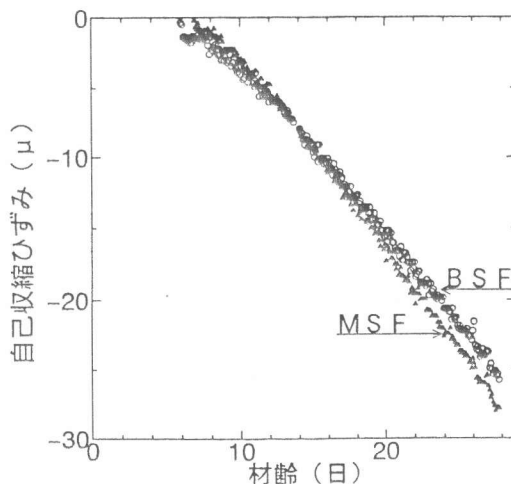


図-4 自己収縮ひずみの経時変化

高炉スラグ微粉末の混合比率が異なることに起因するものと考えられる [5]。

3.4 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験結果を図-5に示す。乾燥収縮ひずみは、BSF、MSFで顕著な差異は認められず、材齢23週で270 μ と小さかった。乾燥収縮ひずみが小さかった理由としては、貧配合でかつ粗骨材に最大寸法40mmの石灰石を用いたためであると考えられる [6]。

3.5 強度試験

圧縮強度、割裂引張強度および静弾性係数試験結果をまとめて表-5に示す。また、各種養生条件における積算温度と圧縮強度の関係を図-6に示す。同一積算温度においても、それまでの温度履歴が異なれば、特に初期材齢において強度発現性状が異なることが明らかになった。また、セメントの種類に着目すると、20 $^{\circ}$ C標準養生および5 $^{\circ}$ C養生では、BSFの圧縮強度発現はMSFとほぼ同じであった。ベースセメントの強度発現性はMSFに比べてBSFの方が、すなわち中庸熱ポルトランドセメントに比べてビーライトセメントの方が低いにもかかわらず同等の強度発現性を示したのは、高炉スラグ微粉末が若材齢の強度発現に大きく寄与し、かつ混合比率も多く、混入量が等しかったためと考えられる。一方、断熱養生では材齢3日に相当する積算温度108 D \cdot D程度でMSFの80%、材齢7日に相当する積算温度301 D \cdot D程度で89%と若干強度発現が遅くなる傾向を示した。これは、断熱温度上昇量および上昇速度に差があったため、BSFよりもMSFの方が同一材齢における積算温度が大きくなったためであると考えられる。

4. 温度ひび割れ抵抗性の検討

4.1 温度応力解析方法

温度解析はパイプクーリングによる熱収支を考慮した有限要素法により、温度応力解析はク

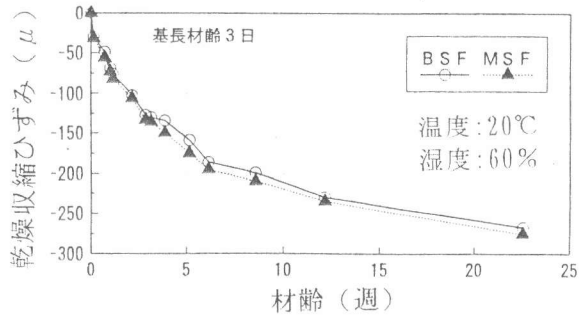


図-5 乾燥収縮試験結果

表-5 強度試験結果の一覧

試験項目	材齢 (日)	標準養生 (20 $^{\circ}$ C水中)		断熱養生 (湿度100%)		低温養生 (5 $^{\circ}$ C水中)	
		BSF	MSF	BSF	MSF	BSF	MSF
積算温度 (D \cdot D)	3	90	90	108	177	45	45
	14	210	210	301	343	105	105
	28	420	420	660	727	210	210
	91	840	840	-	-	420	420
圧縮強度 (kgf/cm 2)	3	61	69	127	159	8	12
	14	150	171	240	255	44	41
	28	203	211	-	-	104	102
	91	310	297	-	-	187	310
引張強度 (kgf/cm 2)	3	8.0	8.0	12.0	12.8	0.7	0.6
	14	18.2	19.9	22.9	22.0	5.0	4.9
	28	27.9	26.0	-	-	10.7	10.7
	91	50.6	50.0	-	-	25.5	25.2
接線 弾性係数 ($\times 10^3$ kgf/cm 2)	3	2.01	1.91	2.37	2.77	0.37	0.72
	14	4.10	4.52	3.03	3.28	1.47	1.88
	28	3.47	3.08	3.23	3.59	2.47	2.93
	91	3.80	3.37	-	-	3.22	3.20

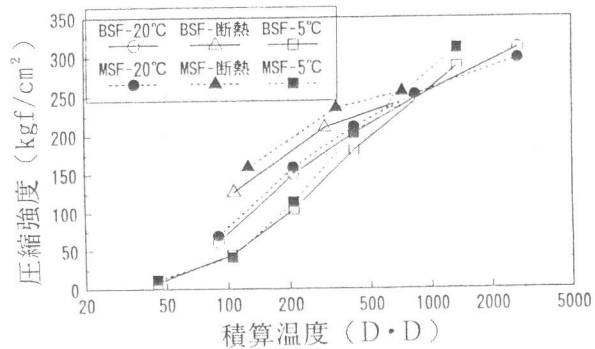


図-6 積算温度と圧縮強度の関係

リープを考慮した有効ヤング係数法に基ずく2次元有限要素法により行った。

検討対象は、来島大橋4A気中コンクリートの打設計画に基づき、ケーブルアンカーフレームが設置される前の躯体において平面的に4分割したうちの1ブロックとした〔7〕。解析モデルは5リフト切り出しモデルとし、第3リフトを着目リフトとした。また、クーリングパイプを節点に与え、その節点を特殊熱伝達境界とした。解析モデルを図-7に、解析条件を表-6に示す。なお、引張強度の発現性状は前述したように温度履歴に依存するため、引張強度は平均養生温度で補正した値を使用した。解析に用いた積算温度と引張強度の関係を図-8に示す。

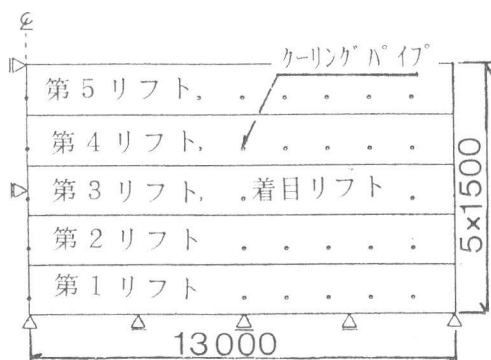


図-7 解析モデル

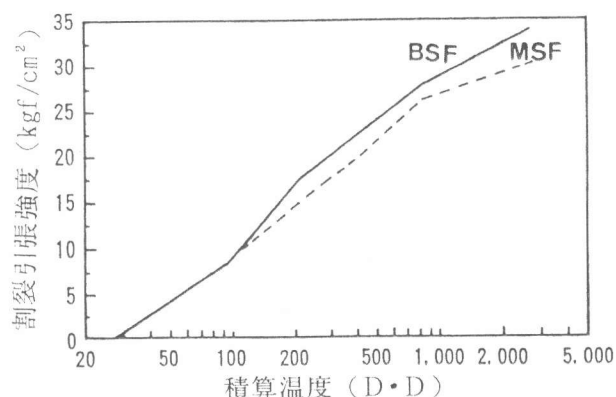


図-8 積算温度と引張強度の関係

4. 2 温度解析結果

最高温度が最も高かったリフト中央部における温度の経時変化を図-9に示す。BSFの中心温度はMSFよりも4.3℃低く、最高温度発生材齢もBSFの方がMSFよりも約1日遅い結果となった。

4. 3 温度応力解析結果

温度応力解析の結果、最小ひび割れ指数が最も小さくなった側面から37.5cmの位置での温度応力の経時変化を図-10に、温度ひび割れ指数履歴を図-11に示す。発生応力は、BSF、MSFとも材齢14日で最大となっており、MSFの方がBSFよりも約4kgf/cm²大きい値を

表-6 解析条件

物性値の種類	セメントの種類		備考	
	BSF	MSF		
断熱温度上昇式 $T=K(1-EXP(-\alpha(t-t_0)))$	K	22.7	断熱温度上昇試験結果を基に打設温度による補間により求めた。	
	α	0.41		
	t_0	0.70		
単位容積重量	2,321 (kg/m ³)		室内試験値	
比熱	0.328 (kcal/kg·°C)		室内試験値	
熱伝導率	2.050 (kcal/m·h·°C)		室内試験値	
熱伝達率	(kcal/m ² ·h·°C)		計算値と計測結果からの逆解値	
打設面	4 (灌水+I7キャップ)			
側面	4 (木製型枠+断熱材)			
クーリングパイプ	25 (水温10°C)			
線膨張係数	7.2 (×10 ⁻⁶ /°C)		実測値	
引張強度 (kgf/cm ²)	表-5の値とマチュリティの関係より(図-8参照)		温度依存性を考慮し平均養生温度で補正	
接線弾性係数	引張強度と同様の方法		引張強度と同様の一般的な値	
ポアソン比	0.167			
クリープ係数	初期温度上昇時	中心部 0.00	計測値と計算結果からの逆解析値	
	温度降下時	表面部 0.00		
	(圧縮減少区間)	0.72		3.49
	(引張増加区間)	1.33		3.49
	再温度上昇時	0.00		0.60
(次々リフト)	0.00	0.45		
その他の時期	0.00	0.00		
打設温度(°C)			打設時期10~12月、外気温は現場計測値、パイプクーリングは1次および1.5次クーリングを考慮	
R2-10リフト	15.5			
R2-11リフト	13.3			
R2-12リフト	12.2			
R2-13リフト	10.6			
R2-14リフト	11.0			

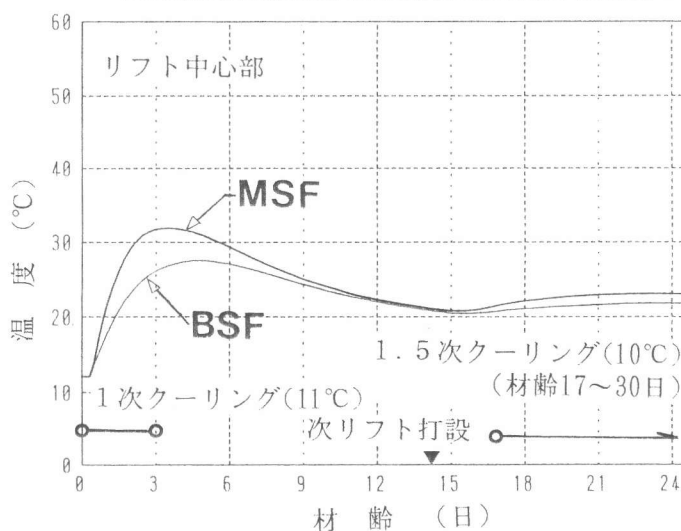


図-9 中心温度の経時変化

示した。最小ひび割れ指数は、MSFが1.92であるのに対してBSFは3.78と約2倍の値となった。これは、両者の引張強度発現性状がほぼ同等であるため発生応力の差がそのままBSFの最小ひび割れ指数の差となったものである。

以上の結果は、ケーブルアンカーフレーム設置後においても、セメントにBSFを用いることにより、ひび割れ制御可能な範囲に温度ひび割れ指数を改善できることを示唆するものと考えられる。

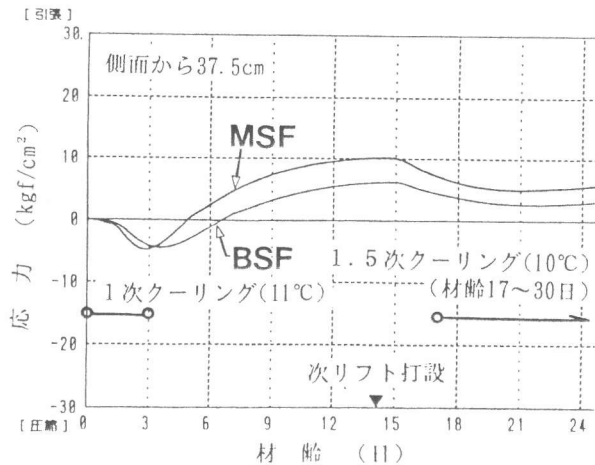


図-10 温度応力の経時変化

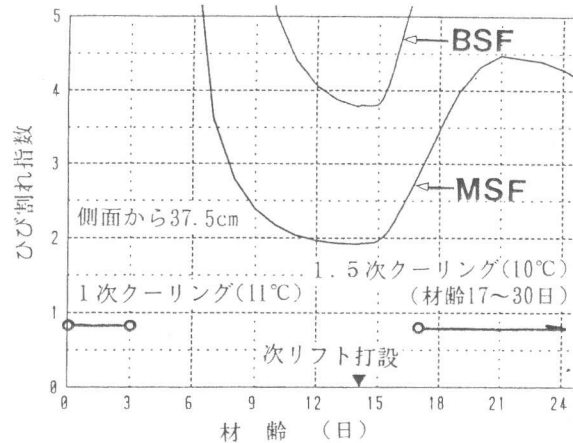


図-11 温度ひび割れ指数履歴

5. まとめ

本実験および温度応力解析の範囲において得られた結果をまとめると、次のようである。

- (1) 3成分系混合セメントにおいて、ベースセメントを中庸熱ポルトランドセメントから低発熱型ポルトランドセメントに変えることにより、3成分の混合比率が同じであっても断熱温度上昇および上昇速度は低減する。
- (2) 強度発現性は、温度履歴が等しい場合ほぼ同等である。
- (3) コンクリートの凝結、硬化収縮、乾燥収縮等の諸性状もほとんど変化しない。
- (4) ビーライトセメントを用いた場合、中庸熱セメントと同等の引張強度が得られるため、発生応力の低減により最小ひび割れ指数はかなり大きくなり、温度ひび割れ抵抗性が改善されることが明らかになった。

これらの検討結果により、来島大橋の4A気中コンクリートにおいてはケーブルアンカーフレーム設置後セメントをMSFからBSFに切り替えて打設を行っている。同時に、現場において種々の計測を行い、本検討結果の確認を行っているところである。今後、計測結果がまとまれば、MSF打設時の計測結果と併せて報告する予定である。

参考文献

- 1) 長谷川芳記: 低発熱型ベースセメントが3成分系セメントの諸性状に及ぼす影響, 土木学会第46回年次学術講演会, pp.174~175, 1991.9
- 2) 海洋架橋調査会: 橋梁用マスコンクリート用低発熱セメントの調査・研究(その1), 1988年
- 3) 近松公明: 結合材の種類別コンクリートの硬化収縮に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.1, 1993
- 4) (社)日本コンクリート工学協会: 超種コンクリート研究委員会報告書(II), pp.149~160, 1994年5月
- 5) 田澤栄一, 宮沢伸吾: セメント系材料の自己乾燥に及ぼす結合材および配合の影響, 土木学会論文集, No.502/V-25, pp.43~52, 1994年11月
- 6) (社)セメント協会: 石灰石骨材コンクリートに関する研究, コンクリート専門委員会報告-46, pp.41~44, 1992年10月
- 7) 秋山清樹, 長谷川芳記: 来島大橋の基礎施工, 土木施工34巻5号, pp.21~28, 1993年5月