

論文 石炭灰を多量に混用したコンクリートの諸特性に関する検討

谷川公一^{1*}・曾根徳明^{2*}・加藤将裕^{3*}・佐藤宏一郎^{3*}

要旨：著者等は、既にコンクリートへの石炭灰大量利用の方策として、細骨材の一部を大量の石炭灰と置換したコンクリートの強度特性について報告[1]した。本報告では、その成果をもとに養生温度の相違がフレッシュコンクリート及び強度特性に及ぼす影響、さらに耐久性状について検討した。その結果、石炭灰を多量混入することにより、暑中環境下での長期強度増進の改善が確認された。また、石炭灰混入量の増加に伴い中性化深さが低減され、さらに乾燥収縮に関しても普通コンクリートと同等であった。単位セメント量の減少及び石炭灰混入量の増加は凍結融解抵抗性が低下する場合が確認された。

キーワード：石炭灰、フライアッシュ、強度特性、養生温度、中性化、乾燥収縮、凍結融解

1. はじめに

近年、我国のエネルギー総合施策において石炭の利用が高まりつつあり、これに伴い、副産量が増大傾向にある石炭灰（以下、CAと称す）をリサイクル資源として有効活用することが急務の課題である。我国では、CAを粒度調整して得られるフライアッシュに関して、貴重な知見が多く報告されている。しかし、そのほとんどはフライアッシュをセメントの30%以下の割合で置換したコンクリートに関するものがほとんどであって、フライアッシュ混入率を著しく増大させた、いわゆるHigh Volume Flyash Concrete(HVFC)に関する報告は比較的少ない。

本報告は、コンクリート中の細骨材の一部をCAと容積置換したコンクリート（以下、CAコンクリートと称す）を基本的な概念とし、コンクリートにおけるCAの大量有効利用の観点からCAコンクリートの成形・養生温度の相違が強度特性に及ぼす影響、また単位セメント量及びCA混入量の相違がコンクリートの耐久性（中性化・乾燥収縮・凍結融解）に及ぼす影響について検討を加えたものである。

2. 使用材料

2.1 セメント

セメントはC社製普通ポルトランドセメント（比重3.15、比表面積3320cm²/g）を使用した。

2.2 石炭灰

試験に用いた2種類のCAは、火力発電所の電気集塵機に捕捉されたものであり、採取時期が異なる。また、粒度調整などの処理は施していない、いわゆる、原粉であるが、本CAの品質はフライアッシュの規格(JIS A 6201)に合致する。表-1にCAの性質を示す。

2.3 骨材

細骨材には陸砂（静岡県小笠産、表乾比重2.59、吸水率1.48%、実積率68.2%、粗粒率2.75）

*1 秩父小野田（株）資源リサイクル研究所、（正会員）

*2 秩父小野田（株）資源リサイクル研究所、工博（正会員）

*3 秩父小野田（株）資源リサイクル研究所

表-1 CAの性質

CAの種類	比重	比表面積 (cm ² /g)	MB吸着 量 (mg/g)	化学成分(%)										
				ig. loss	insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	R ₂ O	TOTAL
CA1	2.23	3220	0.55	2.5	82.1	57.4	27.6	4.6	4.7	0.68	0.3	0.23	0.79	96.42
CA2	2.23	3210	0.49	2.5	86.4	59.3	24.7	4.8	4.1	1.3	0.3	0.35	0.95	95.76
JIS A 6201	1.95≤	2400≤	—	5.0≥	—	45.0≤	—	—	—	—	—	—	—	—

を、また粗骨材には碎石2005（茨城県岩瀬産、表乾比重2.64、吸水率0.78%、実積率61.5%、粗粒率6.66）を使用した。

2. 4 混和剤

CA無混入のコンクリート（以下、基準コンクリートと称す）にはAE減水剤（標準形、リグニン系）を、またCAコンクリートには高性能AE減水剤（標準形、ポリカルボン酸系）をそれぞれ使用した。なお、空気量の調整には、アルキルアリルスルホン酸塩、変形アルキルカルボン酸化合物を主成分とする2種類のAE助剤をそれぞれ使用した。

3. 検討項目と試験方法

3. 1 検討項目

CAコンクリートに関して、CAを細骨材の一部と考え、細骨材中に増加した微粉分が、セメント量及び粉体量(C+CA)に関連して、コンクリート物性に対しどの様に影響を及ぼすのか検討する。本試験で取り上げたCAコンクリートに関する検討項目は以下に示す2項目である。

- 1)養生温度が異なるCAコンクリートの強度性状
- 2)CAコンクリートの耐久性状（乾燥収縮、中性化、凍結融解）

表-2に配合及びフレッシュコンクリート結果を示す。収縮、水密性及び耐久性を考慮し、単位水量の上限値を180kg/m³と設定した。検討項目1)について、表-2から説明すると、配合No.1~9に石炭灰CA1を用い、単位セメントを300 kg/m³と設定し、その重量割合(=CA/C)で表したCA混入量を0, 75, 100%、また成形・養生温度を5℃、20℃及び30℃と相違させた場合について

表-2 コンクリート配合とフレッシュコンクリート結果

配合No.	CA種類	混和剤種類 ^{*1}	W/C (%)	CA/C (%)	養生温度(℃)	粉体量 ^{*2} (ℓ)	単位量(kg/m ³)					ad1 ^{*3} (kg/m ³)	ad2 ^{*4} (g/m ³)	コンクリート温度(℃)	スラブ(cm)	空気量(%)	凝結(h:m)	
							W	C	CA	S	G						始発	終結
1	CA1	WRA	52.7	0	5	95	158	300	0	791	1047	0.75	3	6.0	13.0	4.1	17:15	23:14
2		SP	60.0	75		195	180	300	225	476	1044	3.94	110	6.0	18.0	5.9	14:56	22:32
3		SP	60.0	100		229	180	300	300	389	1044	6.60	45	7.0	21.5	4.4	16:23	27:28
4	CA1	WRA	53.3	0	20	95	160	300	0	789	1044	0.75	6	21.5	11.0	4.6	6:46	8:30
5		SP	60.0	75		195	180	300	225	476	1044	3.68	126	21.0	17.5	4.8	6:38	8:44
6		SP	60.0	100		229	180	300	300	389	1044	6.60	36	22.5	18.5	3.7	8:53	11:14
7	CA1	WRA	55.0	0	30	95	165	300	0	783	1037	0.75	9	30.5	12.5	5.2	4:47	6:02
8		SP	60.0	75		195	180	300	225	476	1044	3.15	142	31.0	18.5	4.9	4:27	5:45
9		SP	60.0	100		229	180	300	300	389	1044	5.10	81	32.0	17.5	3.8	5:29	6:56
10	CA2	SP	60.0	50	162	180	300	150	563	1044	1.25	338	21.0	17.0	6.4	7:02	10:04	
11		SP	72.0	74		180	250	185	563	1044	0.87	365	22.0	16.5	5.1	6:30	10:07	
12		SP	90.0	113		180	200	225	563	1044	0.85	421	21.5	18.0	4.8	8:13	11:52	
13	CA2	SP	60.0	75	20	195	180	300	225	476	1044	3.68	205	22.2	16.0	5.7	7:10	10:02
14		SP	72.0	104		180	250	260	476	1044	3.57	199	22.5	17.5	3.6	7:32	10:43	
15		SP	90.0	148		180	200	295	476	1044	2.97	386	22.1	17.5	4.9	8:28	12:26	
16	CA2	SP	60.0	100	229	180	300	300	389	1044	5.40	72	20.8	19.0	5.6	8:25	11:17	
17		SP	72.0	134		180	250	335	389	1044	5.28	97	21.9	21.0	5.0	9:29	14:36	
18		SP	90.0	185		180	200	370	389	1044	5.13	111	22.0	19.5	4.5	10:12	15:42	

*1: WRA: AE減水剤, SP: 高性能AE減水剤 *2: セメント+CAの容積 *3: 減水剤 *4: AE助剤

強度に及ぼす影響を検討した。次に検討項目2)では、配合No. 10 ~18に石炭灰CA2を用い、単位セメント量 300 kg/m^3 で $CA/C=0, 75, 100\%$ と変えた3配合のCAコンクリートにおいて、粉体量(=CA+C)を $162, 195, 229 \text{ kg/m}^3$ に保持したまま、つまり容積置換後の粉末容積一定の状態、単位セメント量(=W/C)を $250, 200 \text{ kg/m}^3$ と変化させて、耐久性(中性化、乾燥収縮、凍結融解)に及ぼす影響を検討した。

3. 2 試験方法

使用したミキサは 50 l 強制パン型であり、全材料を空練り後、注水した。全混練時間は 150 秒 である。コンクリートの成形、水中養生は所定温度に設定した恒温室で実施した。スランプは基準コンクリート $12 \pm 2.5 \text{ cm}$ 、CAコンクリート $18 \pm 2.5 \text{ cm}$ 、空気量は $4.5 \pm 1.0\%$ に設計した。所要のスランプを得るために、基準コンクリートについては単位水量、またCAコンクリートについては混和剤の添加量で調整した。フレッシュコンクリートの性状及び強度はJISの方法で試験した。乾燥収縮試験、凍結融解試験はJIS A 1129、ASTM C 666にそれぞれ準拠した。中性化試験は水中養生28日後の供試体を屋内及び屋外に暴露した。屋内暴露条件は $20^\circ\text{C} \cdot 60\% \text{ HR}$ である。中性化計測については、割裂面にフェノールフタレイン1%溶液を噴霧し、未着色部分を中性化部分として、平均中性化深さで整理した。

4. 試験結果及び考察

4. 1 養生温度を相違させたCAコンクリートの強度性状

表-2の配合No. 1~9に示したフレッシュコンクリート結果より、所要のスランプを得るための高性能AE減水剤添加量は、CA混入量の増加及び成形温度の低下に伴い上昇することが分かる。CAの多量混入によりAE助剤添加量の増加が考えられたが、空気連行性を有する高性能AE減水剤の多量使用により、AE助剤使用量はむしろ減少傾向にある。ポリカルボン酸系の高性能AE減水剤を多量に添加したCAコンクリートの場合、凝結時間に関して、CA混入量の影響より成形・養生温度の及ぼす影響の方が顕著であると言える。

養生温度別に分けた圧縮強度比較を図-1に示す。CAコンクリートは、 $C/CA=75, 100\%$ の場合について検討した。養生温度 5°C の場合、CAコンクリート(No. 2, 3)の材齢3日における強度は基準コンクリート(No. 1)と大略同程度であるが、材齢7日以降では大きい。また、石炭灰混入量が多いCAコンクリート(No. 3)は、材齢7日以降では養生温度が 5°C の場合であっても 20°C 養生の基準コンクリート(No. 4)の強度を上回ることも確認された。一方、養生温度 30°C

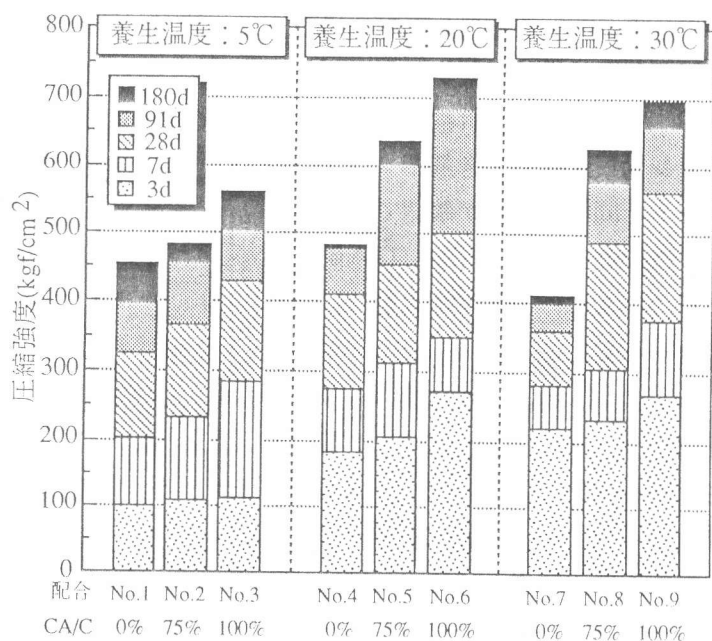


図-1 養生温度の異なるCAコンクリートの圧縮強度

において基準コンクリート(No. 7)は、材齢28日以降の長期強度発現が20℃養生の場合よりも阻害される傾向にある。しかし、CAコンクリート(No. 8, 9)の場合には初期及び長期いずれの材齢においても強度発現性が良好である。高温環境下において、長期強度発現が阻害される理由には、高温環境下で生成した厚い水和物組織が形成され、この水和物が層状に未水和セメント粒子を早期に包み込み、粒子内部の未水和部の水和進行が阻止されるため、また高温によって内部水和物が著しく緻密化し以後の水和物反応速度を低下させるため[2]とされている。これに対し、CAコンクリートの場合には、初期材齢において、山崎[3]の報告したCAの微粉末効果ならびにCAの保水効果による水セメント比の低減によって緻密な組織を形成し強度発現を促進することが、さらに長期材齢ではCAのポズラン反応が長期強度発現に寄与することが考えられ、これらのことが、高温環境下で、初期及び長期のいずれにおいても強度が増大した要因と推測される。以上のように、CAコンクリートは、低温あるいは高温環境下のいずれにおいても基準コンクリートより強度発現性が優れることが確かめられ、このことはCAコンクリートの寒中あるいは暑中コンクリートへの適用も可能であることを示唆している。

4. 2 CAコンクリートの耐久性状

W/C と圧縮強度の関係を図-2に示す。図によると、同一W/Cであれば、粉体量の増加、即ちCA混入量が増加するほど強度が増大することがわかる。さらに、W/C=60%では、水セメント比が大きいに関わらず、すべての材齢で基準コンクリート(W/C=55%)より強度発現が良好である。また、W/C=72%の場合にはCAの多量混入により基準コンクリートと同等以上の強度発現が得られ、W/C=90%とした場合には初期強度は幾分低下するが、材齢180日まで経過すればCAのポズラン効果が期待でき基準コンクリートと同等の強度が確認できる。いずれのW/Cにおいても、CA置換率の増大に伴う強度増大量は同程度だと言える。

水セメント比と中性化深さとの関係を図-3に示す。図は水中養生期間を28日とし、以後1年間暴露した結果である。屋内暴露と屋外暴露条件の結果を比較すれば、通常のコンクリートと同様に中性化の進行は屋内暴露の方が早い。

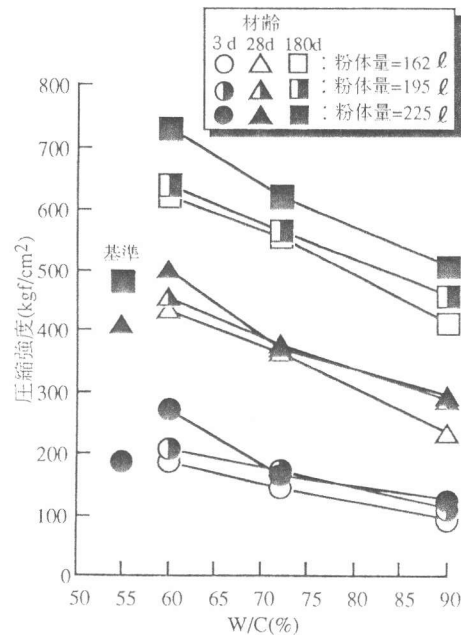


図-2 水セメント比と圧縮強度の関係

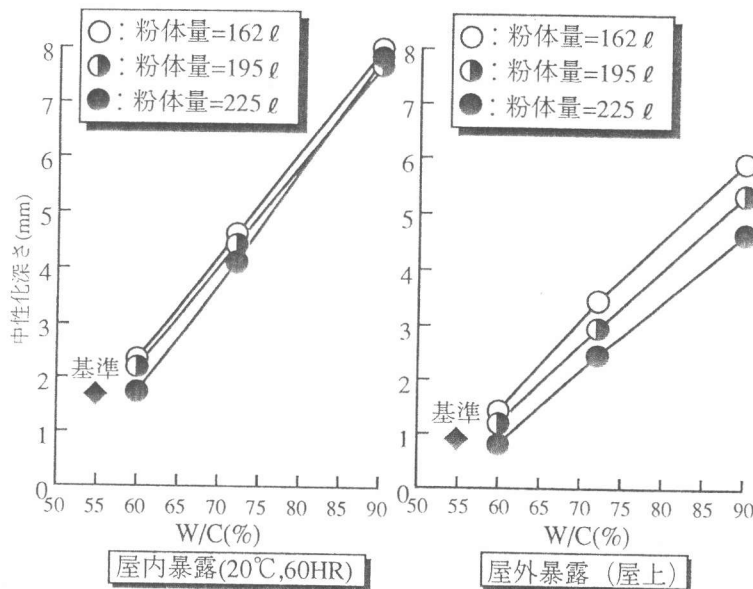


図-3 水セメント比と中性化深さの関係

屋外暴露条件において、同一W/Cのコンクリートの中性化深さは、粉体量を162ℓ～225ℓに増大することにより、中性化深さが約1～2mm程度低減される。一方、屋内暴露では粉体量の相違が中性化深さに及ぼす影響は僅かである。最大粉体重量を330kg/m³、CA/(CA+C)=30%とした場合、フライアッシュの混入が中性化速度の低減に効果的であるとする報告[4]がある。しかし、図-2に関して、W/C=60%材齢28日の3点のCAコンクリート強度はいずれも材齢28日基準コンクリート(W/C=55%)強度を50～100kgf/m²程度上回っているが、基準コンクリートの中性化深さより減少しないため、CAの多量混入が必ずしも中性化低減に大きく寄与するとは言い難い。十分な養生を施したCAコンクリートは初期及び長期に良好な強度発現が確認されたが、同一セメント量を保持していてもCAの過剰混入はCAコンクリート中の水酸化カルシウム量の低下[5]を促し、組織の緻密化効果と相殺されて中性化深さの低減に寄与しないと推察される。

粉体量と乾燥収縮率及び重量変化率の関係を図-4に示す。CAコンクリートの重量変化率は基準コンクリートのそれより大きい。これはCAコンクリートの単位水量が基準コンクリート(No.4)より20kg/m³多いことに起因すると考えられる。また、粉体量中のセメント量が減少すると重量変化率は大きくなるが、CAコンクリートの収縮率は基準コンクリートのそれと同程度である。すなわち、CAコンクリートにおいては、粉体量一定において単位セメント量の相違により重量変化率が変化しても乾燥収縮率には影響が少ないと言える。

CAコンクリートの凍結融解作用に対する耐久性指数と粉体量の関係を図-5に示す。図によれば、所要の空気量を連行したCAコンクリートにおいて、粉体量200ℓ/m³以下、あるいはセメント量300kg/m³であれば、凍害に対する耐久性は付与していると考えられる。しかし、例えばNo.17,18のように粉体量が大きく、且つ単位セメント量が少なくなる場合には、耐久性指数の低下が著しい。また、凍結融解試験を実施した耐久性の低いCAコンクリート試験体は、表面のスケールリングによる剥落が大きかった。CAコンクリートの気泡間隔係数測定結果を表-3に示す。表によれば、CAコンクリートの気泡数は基準コンクリートと比較して増加し、いずれのCAコンクリートの気泡間隔も基準コンクリートより小さい。フライアッシュを混入したコンクリートの凍結融解抵抗性低下の原因として、フレッシュの段階において空気量減少が大きい[6]ことや、フライアッシュ粒子による気泡の分断により気泡の分散独立性が低下する[7]ことなどの報告がある。本CAコンクリートのように、粉体量の増加はペース

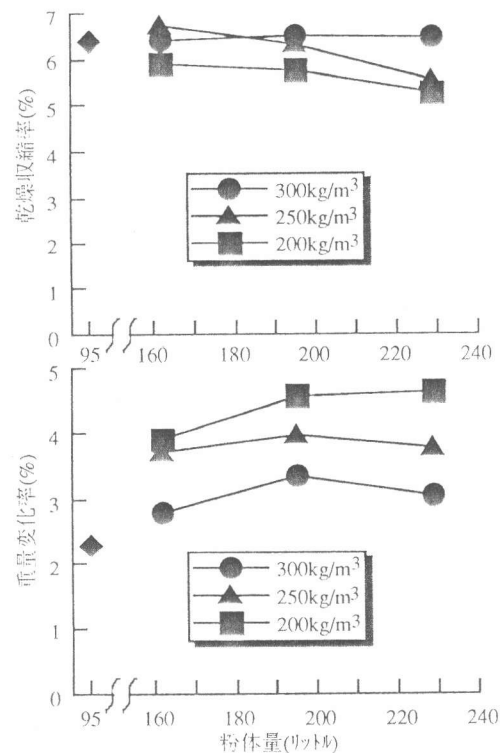


図-4 粉体量と乾燥収縮の関係

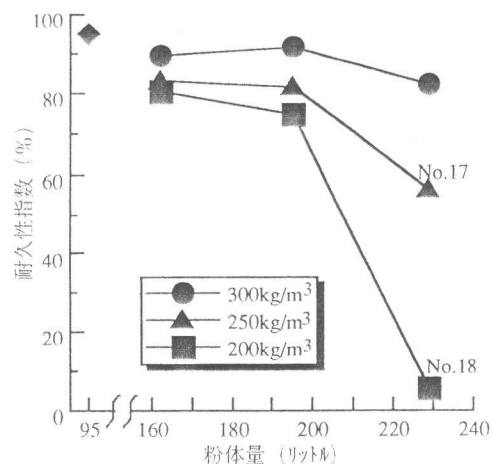


図-5 粉体量と耐久性指数の関係

トを増加させ、コンクリート中の空気量を一定としてペースト量が増大する場合には、基準コンクリートと比較して相対的にペースト中の空気量が減少する。気泡間隔係数の測定結果は耐久性を満たす数値を表しているが、実際には、空気量一定のため気泡数は増大し気泡径は減少することから、気泡組織が良好であると言い難い。このような傾向は、硬化コンクリートの気泡組織の観察からも確かめられた。増加した気泡がCAの多量混入により気泡の分散に悪影響を及ぼしたとすると、気泡組織が独立気泡でなく連続気泡のようになると考えられ、気泡間隔係数は見かけ上良好でも凍結融解抵抗性を低下させる可能性がある。

表-3 硬化コンクリートの気泡性状

配合 No.	粉体量 (ℓ/m³)	単体量(kg/m³)		気泡数 (個)	硬化後空気量 (%)	気泡間隔係数 (mm)
		C	CA			
4	95	300	0	338	3.20	0.241
10	162	300	150	1350	3.68	0.105
11		250	185	1412	3.50	0.121
12		200	225	1524	2.89	0.118
13	195	300	225	1210	3.24	0.115
14		250	260	1298	3.01	0.130
15		200	295	1352	3.20	0.124
16	229	300	300	1193	3.16	0.116
17		250	335	1235	2.95	0.108
18		200	370	1312	2.87	0.099

5. まとめ

本報告の範囲で以下のことが明らかになった。

- 1) CAコンクリートは養生温度を5℃程度の低温あるいは30℃程度の高温環境で養生した場合においても、いずれの場合にも初期のみならず長期において基準コンクリートより良好な強度発現を示す。特にCAコンクリートは、通常のコンクリートに認められる暑中コンクリートの長期強度発現低下傾向を緩和させることができる。
- 2) 屋外暴露状況下で、水セメント比が等しいCAコンクリートは、CA/Cの割合が大きい程中性化深さは減少する。しかし、室内に暴露した場合には、CA混入量増大による中性化低減効果は僅かである。
- 3) CAコンクリートの乾燥収縮特性は、基準コンクリートのそれと同程度であることが確認された。
- 4) 凍結融解に対する抵抗性は、セメント量300kg/m³とした場合、基準コンクリートとほぼ同程度である。しかし、所定の空気量を連行しても、単位セメント量が小さく、且つCA混入量すなわち粉体量が大きいCAコンクリートでは耐久性が損なわれる場合がある。

参考文献

- 1) 曾根徳明・谷川公一・小谷中昭裕・加藤将裕：石炭灰を多量に混用したコンクリートに関する強度特性、セメント・コンクリート 論文集、No. 48, pp370-375、1995
- 2) 日本建築学会：暑中コンクリートの施工指針、pp28-30、1992.6
- 3) 山崎寛司：鉱物質微粉末がコンクリートの強度に及ぼす効果に関する基礎研究、土木学会論文集第85号、pp15-44、1962.9
- 4) 佐伯竜彦・長滝重義：散水促進中性化試験による中性化深さの予測、コンクリート工学年次論文集、Vol. 15、No. 1、1993
- 5) 大賀宏行・長滝重義：促進試験によるコンクリートの中性化深さの予測と評価、土木学会論文集第390号、pp225-233、1988.2
- 6) 中島良光・佐藤文則・出頭圭三：高流動コンクリートの耐久性に関する研究、第2回超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp131-136、1994.5
- 7) 長滝重義・大賀宏行・嶋田久俊：フライアッシュを混和したコンクリートの耐凍害性評価、セメント技術年報、No. 41、pp371-374、1987