

論文 各種アルカリ刺激材を用いた環境負荷低減コンクリートの基本性状に関する研究

岩田 正幸^{*1}・藤原 浩己^{*2}・丸岡 正知^{*3}・竹井 智哉^{*4}

要旨：セメント産業における CO₂ 排出量の削減を目的とし、セメントを無使用（クリンカーフリー）あるいは、使用量を大幅に減じ、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末などの産業副産物を主材料としたモルタルおよびコンクリートにおいて、2 種類の消石灰と乾燥スラッジ粉、2 種類のセメントをアルカリ刺激材として加え比較検討を行った。その結果、アルカリ刺激材としてセメントを用いた場合、モルタル実験においてフレッシュ性状、圧縮強度共に優れていることが分かった。また、コンクリート実験においては標準養生、材齢 28 日で 60N/mm² 以上の圧縮強度が得られた。

キーワード：環境負荷低減、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末、消石灰、生コンスラッジ

1. はじめに

現在、地球温暖化の要因が CO₂ を中心とする温室効果ガスの排出であると指摘されており、社会的な取り組みとして CO₂ 排出量の削減が求められている。また、セメント産業から排出される CO₂ は、日本の総排出量の約 4% を占めており、セメントを 1t 製造するに当たり、約 0.8t の CO₂ を排出していると言われている¹⁾。加えて、近年コンクリート構造物の高層化・大スパン化、高耐久化に伴い、高強度コンクリートの需要が高まっており、一部では、設計基準強度が 150N/mm² を超える超高強度コンクリートが実施工で用いられている²⁾。しかし、一般に高強度コンクリートは大量のセメントを必要とするため、CO₂ 排出による環境負荷が大きく、また水和発熱による温度ひび割れや自己収縮によるコンクリート構造物のひび割れ等、耐久性低下の恐れがある。

本研究は、セメントを無使用（クリンカーフリー）あるいは、使用量を大幅に減じ、代替として産業副産物であるフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を主材料とした、標準養生材齢 28 日で 60N/mm² 以上の圧縮強度を有する高強度コンクリートの開発を目的としている。

実験は高い強度発現性や良好なフレッシュ性状を得るため、各種アルカリ刺激材について検討を行った。刺激材として品質の異なる 2 種類の消石灰と、生コンスラッジを乾燥・粉碎した乾燥スラッジ粉、さらに 2 種類のセメントを使用した際の諸性状について検討した。

本報告では二つの実験を行っており、実験 1 では、各種アルカリ刺激材についてモルタルレベルで実験を行い、混合割合を変化させた際の基本性状を検討した。実験 2 では、アルカリ刺激材の混合割合を一定としたコ

ンクリートについて基本性状を検討した。

2. 実験 1：各種アルカリ刺激材を用いた環境負荷低減モルタルの基本性状

2.1 使用材料

本実験の使用材料を表-1 に示す。

主材料として、石炭火力発電所から排出される産業副産物でポゾラン物質であるフライアッシュおよび、製鉄所で銑鉄を製造する際の副産物で、潜在水硬性を有する高炉スラグ微粉末を使用した。その他の混和材料として、自己収縮抑制および初期強度発現の目的で無水石膏を使用した。また、アルカリ刺激材としては、プレーン比表面積が 45m²/g 以上と粒子が非常に細かく、高い反応性が期待できる多孔性高比表面積消石灰（TK）および、製造時のエネルギー消費量、コストの削減を目的として汎用の特号消石灰（CHs）の 2 種類の消石灰を使用した。消石灰の物性値を表-2 に示す。また、産業廃棄物の有効利用の観点から、生コンクリート工場などにおいて発生する生コンスラッジを使用した。生コンスラッジは、生コン工場にて脱水直後のスラッジケーキを採取し、200℃の乾燥炉にて 24 時間乾燥させた後、粉碎機を用いて粉末とした乾燥スラッジ粉（SD）を使用した。生コンスラッジは未水和のセメント分を含み強アルカリ性を示すため、アルカリ刺激材として使用できると考えられる。さらに、最も一般的なアルカリ刺激材として、普通ポルトランドセメント（NC1）および、試作セメント（NC2）の 2 種類のセメントを使用した。ここで、本実験で使用した試作セメントは普通ポルトランドセメント（NC1）と比較して C₃S を多く含む鉱物組成を有して

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科地球環境デザイン学専攻 (学生会員)

*2 宇都宮大学大学院 工学研究科地球環境デザイン学専攻 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学大学院 工学研究科地球環境デザイン学専攻 工博 (正会員)

*4 宇都宮大学大学院 工学研究科地球環境デザイン学専攻 (学生会員)

おり、初期の水和反応でより多くの水酸化カルシウムを生成し、強度の増加が期待できる。表-3に粉末度、化学成分を示す。

2.2 実験条件

本実験における配合条件を表-4に示す。

実験1では、フライアッシュ JIS II 種規格品と高炉スラグ微粉末（ブレン比表面積 4260cm²/g）を主材料とした。配合条件は既往の高強度コンクリートの研究³⁾を基に、水粉体比 W/P=20%，砂粉体比 S/P=32%とし、目標のモルタルフロー値 250±25mm を満たすよう高性能減水剤の添加料を調整した。

また、粉体構成を表-5に示す。フライアッシュ、無水石膏の混合割合を一定とし、各アルカリ刺激材の混合割合を 5, 10, 15%の3水準とし、高炉スラグ微粉末に置換した。

2.3 実験項目

(1)フレッシュ性状試験

a. 練り時間の測定

練混ぜには公称容量 10L のオムニミキサーを使用した。練混ぜ方法はまず粉体と細骨材を投入し空練りを1分間行い、その後、水と減水剤を投入して流動性が得られたと判断したらミキサーを止め、その後消泡剤を投入しさらに3分間練混ぜを行った。

水と減水剤を投入してからモルタルが作製されるまでの時間を練り時間とし、モルタルの作製しやすさの指標とした。

b. モルタルフロー試験

JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠した。

c. 空気量試験

JIS A 1116「フレッシュコンクリートの単位体積質量試験方法および空気量の質量による試験方法」に準拠した。

(2)圧縮強度試験

JSCE-G 505「円柱供試体を用いたモルタルまたはセメントペーストの圧縮強度試験方法」に準拠した。測定は脱型直後の材齢 1 日、20℃水中養生材齢 3, 7, 28 日、60℃温水養生材齢 7 日とした。なお、60℃温水養生とは促進養生条件で、水和反応を促進し、早期にポテンシャル強度を引き出すための条件である。

2.4 実験結果および考察（実験1）

(1)フレッシュ性状

フレッシュ性状試験の結果を表-6に示す。また、アルカリ刺激材の混合割合と SP 添加率の関係を図-1に、練り時間との関係を図-2にそれぞれ示す。

アルカリ刺激材として TK, CHs, SD を使用した場合に刺激材の混合割合の増加と共に目標の流動性を得るための SP 添加率が増大した。また、練り時間については刺激材に SD を使用した場合に、混合割合の増加に伴

表-1 使用材料

材料	記号	材料名	密度 (g/cm ³)
結合材	FA II	フライアッシュ JIS II 種規格品	2.33
	BS4	高炉スラグ微粉末 4000 (JIS規格品)	2.90
	AG	無水セッコウ	2.90
アルカリ刺激材	TK	多孔質高比表面積消石灰	2.24
	CHs	特号消石灰	2.24
	SD	乾燥スラッジ	2.22
	NC1	普通ポルトランドセメント	3.16
	NC2	試作セメント	3.16
水	W	上水道水	1.00
細骨材	S	鬼怒川産川砂	2.54
粗骨材	G	笠間産碎石	2.66
減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤	1.08
消泡剤	DF	ポリアルキレングリコロール誘導体	1.00

表-2 消石灰の物性値

品質		JIS規格 特号	多孔性高比表面積消石灰 TK	特号消石灰 CHs
BET比表面積	cm ² /g	－	469000	150000
平均粒径	μ m	－	6.0	9.4
CaO	%	72.5以上	73.4	73.9

表-3 セメントの化学成分

資料	lg-loss (%)	化学成分(%)							ブレン値 (cm ² /g)
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	TiO ₂	
NC1	0.99	20.69	5.52	3.14	63.44	2.03	2.27	0.30	3330
NC2	1.06	19.24	5.37	3.42	64.82	1.91	2.80	0.28	4780

表-4 配合条件（実験1）

モルタルフロー値 (mm)	空気量 Air (%)	水粉体比 W/P (%)	砂粉体比 S/P (%)
250±25	2.0以下	20.0	32.0

表-5 粉体構成

配合No.	W/P(%)	S/P(%)	質量比(%)			
			FA II	BS4	AG	アルカリ刺激材
TK5	20	32	40	45	10	5
CHs5						
SD5						
NC1-5						
NC2-5						
TK10				40	10	10
CHs10						
SD10						
NC1-10						
NC2-10						
TK15				35	10	15
CHs15						
SD15						
NC1-15						
NC2-15						

い、練り時間が長くなる傾向を示した。これは既往の研究⁴⁾の結果とも一致し、乾燥スラッジ粉は吸水性が大きいため所定の流動性を得るための自由水が減少したことが原因と考えられる。一方、アルカリ刺激材としてセメントである NC1, NC2 を使用した場合、目標の流動性を得るための SP 添加率や、練り時間の変化は僅

表-6 フレッシュ性状試験結果（実験 1）

配合No.	SP (×C%)	DF (×C%)	練り時間 (min)	フロー値 (mm)	Air (%)
TK5	0.80	0.8	5.5	275	1.8
CHs5	0.55	0.8	4.0	228	1.2
SD5	0.55	0.8	7.5	263	1.5
NC1-5	0.43	0.8	4.5	255	1.3
NC2-5	0.43	0.8	4.0	243	0.7
TK10	1.10	0.8	4.5	250	1.2
CHs10	0.70	0.8	4.5	230	1.1
SD10	0.78	0.8	9.0	255	1.6
NC1-10	0.45	0.8	4.5	255	1.6
NC2-10	0.46	0.8	4.5	260	0.9
TK15	1.50	0.8	4.5	253	1.1
CHs15	0.87	0.8	5.0	233	1.0
SD15	1.20	0.8	14.0	258	1.7
NC1-15	0.45	0.8	4.5	233	1.3
NC2-15	0.52	0.8	3.5	275	0.6

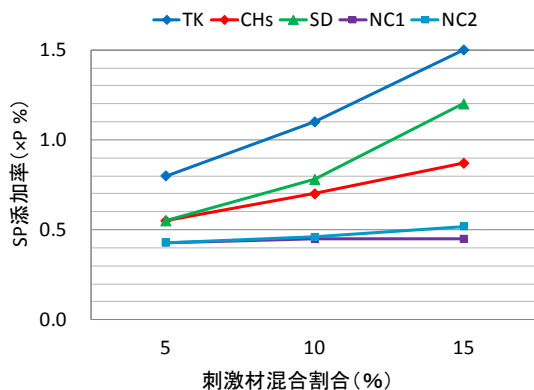


図-1 刺激材混合割合と SP 添加率の関係

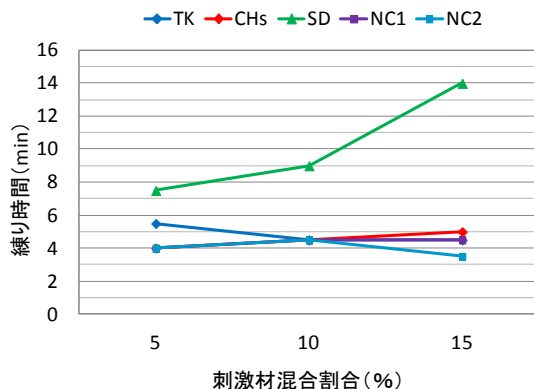


図-2 刺激材混合割合と練り時間の関係

かであることが分かった。

(2) 圧縮強度

本実験で得られた圧縮強度試験の結果を図-3、図-4に示す。結果より、消石灰である TK および CHs を刺激材として使用した場合、混和量の増大に伴い水中養生時の圧縮強度が低下する傾向を示した。しかし、60℃温水養生においては逆に混和量が多いほど圧縮強度が大きくなることが分かった。これは、水中養生材齢 28 日程度では水和反応が十分に進んでいないため、アルカリ刺激材の混合割合が大きいと、未反応の消石灰が多く存在し

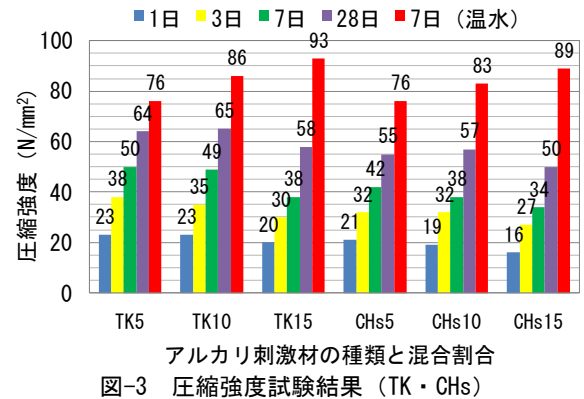


図-3 圧縮強度試験結果 (TK・CHs)

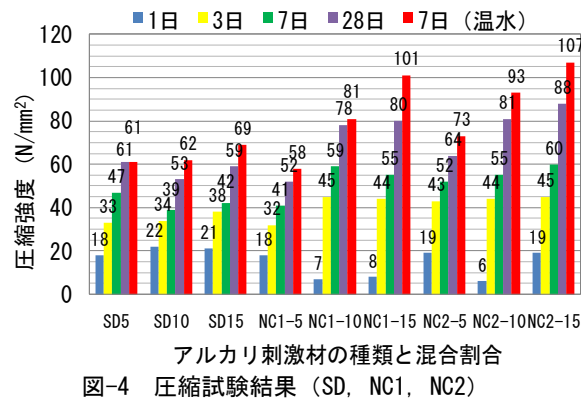


図-4 圧縮試験結果 (SD, NC1, NC2)

表-7 配合条件（実験 2）

スランプリフロー値 (mm)	空気量 Air (%)	水粉体比 W/P (%)	砂粉体比 S/P (%)	Xv (%)
650±50	2.0以下	20.0	32	37.5

強度低下の要因となると考えられる。一方、促進養生である 60℃温水養生においては水和反応が十分に進行するため、結合材に対する刺激材の割合が小さいと（刺激材による水酸化カルシウムが不足している）、水和反応が抑制され強度低下の要因となると考えられる。

また、刺激材に SD を使用した場合は、混合割合の多い 15%の配合 SD15 において初期材齢（材齢 1, 3 日）と 60℃温水養生時に強度が高いことが分かる。60℃温水養生時には消石灰を使用した場合と同様に刺激材による水酸化カルシウムが多くなるため、反応が持続したと考えられる。初期材齢での強度の違いは、SD 自体の水硬性によるものと考えられる。また、本実験の範囲内においては、刺激材に SD を使用した場合でも温水養生時に 60 N/mm²程度の圧縮強度を有していることから、高強度コンクリート用混和材として使用できる可能性があると考えられる。刺激材としてセメントである NC1, NC2 を使用した場合、混和量の増大に伴って強度が増加することが確認された。これは SD を使用した場合と同様に刺激材自体が水硬性を有しているためと考えられ、より顕著に圧縮強度に影響する結果となった。しかしながら、材齢 1 日での圧縮強度が小さい配合が確認された。

表-8 コンクリートの配合

配合No.	アルカリ刺激材	W/P (%)	質量比(%)					示方配合 (kg/m ³)							
			OPC	FA II	BS4	AG	刺激材	W	OPC	FA II	BS4	AG	刺激材	S	G
No.1	TK	20	0	40	40	10	10	175	0	350	350	87	87	280	998
No.2	CHs							175		350	350	87	87	280	998
No.3	SD							175		350	350	87	87	280	998
No.4	NC1							178		356	356	89	89	285	998
No.5	NC2							178		356	356	89	89	285	998
OPC	-	20	100	-	-	-	-	195	973	-	-	-	-	311	998

したがって初期の水和反応について今後検討する必要があると考えられる。

3. 実験 2: 各種アルカリ刺激剤を用いた環境負荷低減コンクリートの基本性状

3.1 使用材料

使用材料は実験 1 と同様であり表-1 に示す通りである。

3.2 実験条件

本実験における配合条件を表-7 に、コンクリートの配合を表-8 示す。

実験 2 では、フライアッシュ JIS II 種規格品と高炉スラグ微粉末（ブレン比表面積 4260cm²/g）を主材料とし、実験 1 において使用したアルカリ刺激材について、混合割合を 10%一定とした。配合条件は水粉体比 W/P = 20%，砂粉体比 S/P = 32%，粗骨材絶対容積割合 Xv=37.5%とし、目標のスランプフロー値 650±50mm を満たすよう、高性能減水剤の添加量を調整した。また、比較対象として配合条件を同様とし、粉体の全てを普通ポルトランドセメント (NC1) とした配合を OPC とした。

3.3 実験項目

(1)フレッシュ性状試験

a. 練り時間の測定

練混ぜには公称容量 100L の強制二軸ミキサーを使用した。練混ぜ方法はまず粉体と骨材を投入し空練りを 1 分間行い、その後、水と減水剤を投入して流動性が得られたと判断したらミキサーを止め、その後消泡剤を投入しさらに 1 分間練混ぜを行った。

水と減水剤を投入してからコンクリートが流動性を示すまでの時間を練り時間とし、コンクリートの作製しやすさの指標とした。

b. スランプフロー試験

JIS A 1150「コンクリートのスランプフロー試験方法」に準拠した。

c. 空気量試験

JIS A 1128「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法（空気室圧力法）」に準拠した。

d. 凝結時間試験

JIS A 1147「コンクリートの凝結時間試験方法」に準拠した。

表-9 フレッシュ性状試験結果（実験 2）

配合No.	SP (x C%)	DF (x C%)	練り時間 (min)	フロー値 (mm)	Air (%)	凝結時間	
						始発	終結
No.1	1.20	0.8	6.0	658	1.5	10:45	17:20
No.2	0.70	0.8	6.5	643	1.5	4:55	10:10
No.3	1.05	0.8	14.0	690	2.7	3:05	9:15
No.4	0.65	0.8	8.5	710	1.6	4:30	13:30
No.5	0.60	0.8	6.0	678	1.8	2:55	9:55
OPC	1.80	0.8	6.0	685	1.7	3:00	8:30

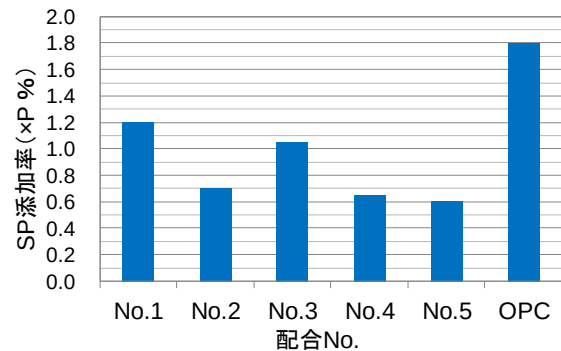


図-5 各配合の SP 添加率

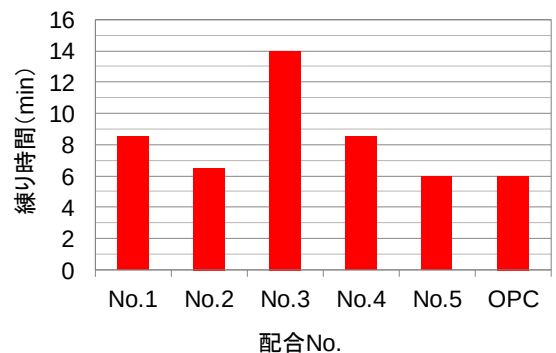


図-6 各配合の練り時間

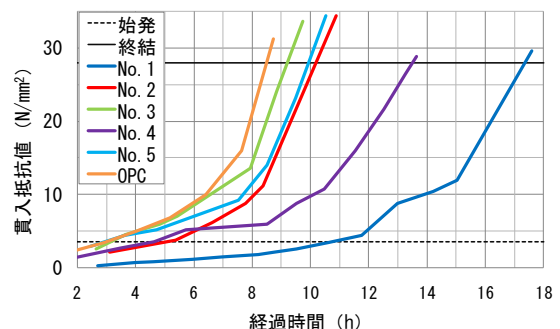


図-7 凝結試験結果

(2) 硬化性状試験

a. 圧縮強度試験

JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した。測定は脱型直後の材齢 1 日、20℃水中養生材齢 7、28 日とした。

b. 静弾性係数試験

JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠した。測定は、20℃水中養生材齢 28 日とした。

5.4 実験結果および考察（実験 2）

(1) フレッシュ性状

フレッシュ性状試験の結果を表-9 に示す。また、各配合の SP 添加率を図-5 に、練り時間を図-6 に、凝結試験の結果を図-7 にそれぞれ示す。

実験 1 の結果と比較して、SP 添加率、練り時間共に増加する傾向が示された。これは、本実験の配合が高粉体量かつ低水粉体比であるため、モルタル部分の練混ぜ性にミキサーによる差が生じたためと思われる。

図-5 より、目標スランプフロー値を得るための SP 添加率は NC1 を 100% 使用した配合 OPC が最も大きい結果となった。刺激材に TK, SD を使用した場合に SP 添加率、練り時間共に大きく、他の配合と比較して練混ぜ性に劣っていると言える。これは、TK に関しては、粒子が非常に細かく比表面積が大きいため、多くの自由水を吸着したためだと考えられる。SD に関しては実験 1 と同様に吸水性が高いためであると考えられる。

次に図-7 に示す凝結時間を見ると、消石灰である TK, CHs を使用した配合 No.1 と No.2 で大きな差が生じる結果となった。これは、No.1 が No.2 と比較して SP 添加率が大きくなってしまったためであると考えられる。また、刺激材にセメントを使用した配合 No.4 と No.5 においても NC1 を使用した No.4 の凝結までの時間が長くなることが分かった。これは、NC1 と比較して NC2 の粉末度が大きく、C₃S の量が多いため早期に反応し硬化したためと考えられる。

(2) 硬化性状

硬化性状試験の結果を表-10 に示す。また、各配合の圧縮強度試験結果を図-8 に、静弾性係数試験結果を図-9 にそれぞれ示す。

圧縮強度試験の結果より、刺激材に TK, CHs, SD を使用した場合には、目標としていた標準養生材齢 28 日で 60N/mm² を満足することができなかった。しかし、刺激材にセメントを使用した配合では 70 N/mm² 程度の圧縮強度が得られた。また、図-8 より圧縮強度増加の程度を見ると、刺激材に TK, CHs, SD を使用した場合には配合 OPC と同様の圧縮強度の増加傾向を示しているのに対して、刺激材にセメントを使用した配合 No.4, No.5 は材齢 1 日の圧縮強度が小さく、材齢 7 日までの圧縮強

表-10 硬化性状試験結果

配合No.	アルカリ刺激材	圧縮強度(N/mm ²)			静弾性係数 (材齢28日)
		1日	7日	28日	
No.1	TK	12	40	56	35.5
No.2	CHs	11	39	53	35.7
No.3	SD	19	42	52	39.4
No.4	NC1	6	55	67	38.3
No.5	NC2	6	56	70	37.6
OPC	-	55	88	100	44.2

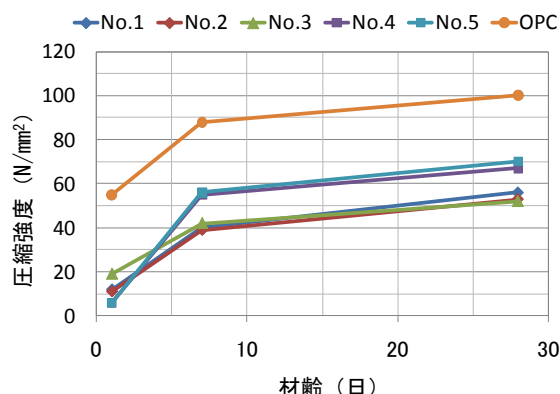


図-8 圧縮強度試験結果（実験 2）

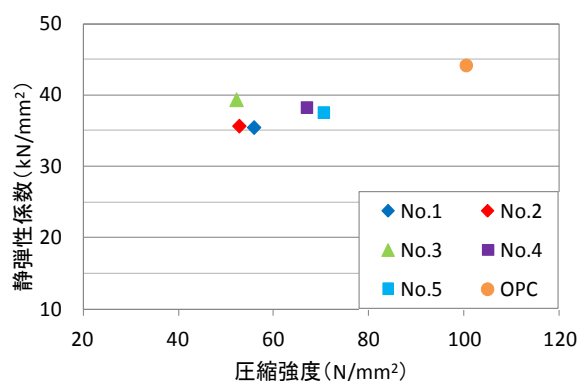


図-9 静弾性係数試験結果

度の増加が大きい。これは、実験 1 においても刺激材にセメントを使用した場合、材齢 1 日の圧縮強度が低い結果が得られたことから、初期の強度発現性について検討が必要であると考えられる。材齢 7 日から 28 日にかけての圧縮強度の伸びは、すべての配合で概ね同様な傾向を示した。

次に、静弾性係数試験の結果より、アルカリ刺激材に SD を使用した配合 No.3 は圧縮強度に対する弾性係数が高い結果であった。

6. まとめ

本研究では、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末などの産業副産物を主材料とし、モルタルおよびコンクリート実験にて各種アルカリ刺激材がフレッシュ性状、硬化性状に及ぼす影響について比較検討を行った。その結果以下の知見を得た。

6.1 実験 1

- (1) 刺激材に多孔性高比表面石灰、特号消石灰および乾燥スラッジ粉を使用すると、目標モルタルフロー値を得るための SP 添加率が増加する。
- (2) 刺激材に乾燥スラッジを使用した場合、混合割合の増加に伴い練り時間が長期化する。
- (3) 刺激材にセメントを使用した場合、フレッシュ性状へ与える影響は少ない。
- (4) 刺激材に消石灰 (TK, CHs) および、乾燥スラッジ (SD) を使用した場合、混合割合の増加に伴い水中養生時の圧縮強度は低下傾向を示すが、60℃温水養生時は増加する。
- (5) 刺激材にセメントを使用した場合、混合割合の増加に伴って圧縮強度は増加する。

6.2 実験 2

- (1) 本実験の配合条件においては、刺激材に TK, SD を使用した場合、他の配合と比較して練混ぜ性能が悪化する。
- (2) 刺激材に TK, NC1 を使用した場合、凝結時間が長

期化する。

- (3) 刺激材にセメントを使用した場合、標準養生材齢 28 日において、70 N/mm² 程度の圧縮強度が得られる。

参考文献

- 1) 樋口雅也：コンクリートの環境負荷評価における環境要因に関する基礎的検討，コンクリート工学年次論文集，vol24，No.2，pp1531-1542，(2002)
- 2) 陣内浩ほか：Fc150N/mm² の超高強度コンクリートの現状と今後の課題，コンクリートテクノ，Vol.26，No.5，pp.9-12，(2007)
- 3) 藤原浩巳，丸岡正知，藤村ゆい，廣島明男：超高強度コンクリートの硬化性状に及ぼす各種粉体材料の影響に関する実験的検討，セメント・コンクリート論文集，No.60，pp.441-446，(2006)
- 4) 月岡存：生コンスラッジの混和材としての有効利用に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp.175-180，(1998)