

論文 フライアッシュ原粉を多量使用したコンクリートの適用性に関する研究

依 道和*1・小林 俊秋*2・矢島 典明*3・山中 謙*4

要旨: フライアッシュ原粉を多量使用したコンクリートについて、ニューマチックケーソンに用いられる中埋めコンクリートへの適用を目的とし、モルタル試験でフライアッシュ原粉の添加量および添加方法がフレッシュ性状および硬化性状に与える影響を検討し、コンクリート試験でフライアッシュ原粉の品質変動がフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響を検討した。その結果、細骨材とセメントをフライアッシュ原粉で 150kg/m³ 併用置換したコンクリートは、フライアッシュ原粉の品質変動が及ぼす影響は小さく、さらに充填性向上に寄与するフレッシュ性状改善、水和熱の抑制および自己収縮を低減する効果が確認された。

キーワード: フライアッシュ, 原粉, 強熱減量, 水和熱, 自己収縮, 環境負荷低減

1. はじめに

地球温暖化対策として、各分野でCO₂排出削減の取り組みが進められており、建設分野として社会資本整備に伴って排出されるCO₂削減を目指した低炭素型セメントの利用拡大が求められている。低炭素型セメントとは、コンクリートに使用するセメントの一部を産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材で置換したものであり、混和材の混合率を高めることによりセメントの使用量を減少させ、コンクリート構造物の建設に伴って排出されるCO₂の相当量を削減できることが期待されている。

神奈川県横浜市に建設された磯子火力発電所は、平成に入り発電所の更新工事を行い、600MW×2=1200MWの発電量をもつ発電所に生まれ変わり大都市に電力を供給している。昨今の電力不足の中、磯子火力発電所はフル稼働で電力供給を行っており、それに伴い年間約250千トンの石炭灰を発生している。その中でフライアッシュのJIS品はコンクリート用混和材として有効利用され、JIS品以外の原粉（以下FA原粉）およびクリンカはセメント原料や建材原料として有効利用されているが、FA原粉についてもコンクリート用混和材として利用することで灰処理の多様性を持たせることが可能となる。また、細骨材の一部をFA原粉で置換することにより天然骨材の枯渇防止にも繋がり、その活用が望まれている。フライアッシュI種、II種（以下FAII種）などのJIS品であればポゾラン反応により長期強度増進、水密性の向上およびワーカビリティの改善が期待されるが、FA原粉についてはJIS品より品質変動が大きいことが予測され、強度発現やフレッシュ性状に及ぼす影響を検討する必要がある。

一方、FA原粉を多量使用したコンクリートに関して、ニューマチックケーソン工事で使用される中埋めコンクリートへの適用性を検討した。中埋めコンクリートとは、ケーソン下部に気密性の作業室を設け空気圧により湧水を防ぎながら掘削作業を行った後に充填するコンクリートを示している。無筋コンクリートであり、塩分浸透、中性化および凍結融解などに対する抵抗性は必要とされておらず、圧力環境における流動性や中埋めコンクリートを打ち込み後の漏水を防止するために水和熱や自己収縮が小さいコンクリートが求められている。

以上より本研究では、FA原粉を多量使用したコンクリートの配合、フレッシュ性状、硬化性状および環境負荷低減効果に及ぼす影響について検討を行った。

2. 使用材料

本試験で使用した使用材料を表-1に示す。環境負荷低減効果を高めるために、ベースセメントとして高炉セメントB種を選定した。フライアッシュの種類として、FAII種を1種類と平成25年9~10月に採取したFA原粉5種類を選定した。FAII種および原粉ともに磯子火力発

表-1 使用材料

材料名	記号	種類・産地および物性値
セメント	C	高炉セメントB種 密度: 3.04g/cm ³
フライアッシュ	FA	JIS規格のII種を1種類 原粉を5種類
細骨材	S	西茨城郡岩瀬町飯淵産砕砂 表乾密度: 2.66 g/cm ³
粗骨材	G	西茨城郡岩瀬町飯淵産碎石 表乾密度: 2.66 g/cm ³
化学混和剤	AE	AE減水剤高機能タイプ リグニンスルホン酸化合物 とポリカルボン酸エーテル の複合体
空気調整剤	-	消泡剤

*1 オリエンタル白石株式会社 技術研究所主任研究員 工修 (正会員)

*2 オリエンタル白石株式会社 技術研究所主任研究員 (正会員)

*3 株式会社ジェイペック 若松事業所 (正会員)

*4 株式会社ジェイペック 若松事業所

表-2 FAⅡ種の規格値とフライアッシュ原粉およびFAⅡ種の品質

項目	種類	FAⅡ種規格値	フライアッシュ原粉					FAⅡ種
			FA-A	FA-B	FA-C	FA-D	FA-E	FA-Ⅱ
二酸化けい素 %		45.0 以上	54.9	60.2	57.9	55.1	55.4	57.0
湿分 %		1.0 以下	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
強熱減量 (ig.loss) %		5.0 以下	3.4	3.6	3.2	3.0	2.8	2.5
密度 g/cm ³		1.95 以上	2.15	2.16	2.21	2.37	2.26	2.30
粉末度	45μm ふるい残分 %	40 以下	28.0	26.8	21.6	25.8	25.6	5.20
	比表面積 cm ² /g	2500 以上	4160	4030	4120	4850	4540	4690
フロー値比 %		95 以上	100.7	99.0	103.3	105.1	107.9	109.3
活性度指数 %	材齢 28 日	80 以上	86.0	89.2	87.0	91.2	89.5	89.7
	材齢 91 日	90 以上	100.5	92.2	97.0	97.6	104.5	97.1
メチレンブルー吸着量 (mg/g)		—	0.84	0.88	0.86	0.82	0.79	0.93

表-3 各要素間の単相関係数一覧

	フロー値比	強熱減量	比表面積	密度	45μm 残分	MB 吸着量	SiO ₂	材齢 28 日 活性度指数	材齢 91 日 活性度指数
フロー値比	1.00	----	----	----	----	----	----	----	----
強熱減量	1.00	1.00	----	----	----	----	----	----	----
比表面積	0.88	0.90	1.00	----	----	----	----	----	----
密度	0.96	0.94	0.72	1.00	----	----	----	----	----
45μm ふるい残分	0.32	0.30	0.03	0.47	1.00	----	----	----	----
メチレンブルー吸着量	0.89	0.91	0.95	0.76	0.11	1.00	----	----	----
SiO ₂	0.60	0.65	0.88	0.36	0.24	0.81	1.00	----	----
材齢 28 日 活性度指数	0.44	0.43	0.41	0.51	0.08	0.36	0.02	1.00	----
材齢 91 日 活性度指数	0.74	0.75	0.78	0.58	0.07	0.89	0.81	0.10	1.00

表-4 モルタルの配合およびフレッシュ性状試験結果

配合番号	W/C (%)	W/(C+FA) (%)	単位量 (kg/m ³)				フロー値 (mm)	空気量 (%)
			W	C	FA	S		
ベース	55.0	55.0	190	345	0	900	165	1.5
FA100 細骨材置換	55.0	42.7	190	345	100	779	155	1.3
FA150 細骨材置換	55.0	38.3	190	345	150	719	165	1.1
FA200 細骨材置換	55.0	34.8	190	345	200	660	160	2.0
FA100 併用置換	64.5	48.2	190	295	100	824	170	1.2
FA150 併用置換	70.5	45.3	190	270	150	786	175	1.4
FA200 併用置換	77.5	42.7	190	245	200	747	158	1.0
FA100 セメント置換	77.5	55.0	190	245	100	867	155	0.7
FA150 セメント置換	97.5	55.1	190	195	150	851	173	0.9
FA200 セメント置換	131	55.1	190	145	200	834	168	1.0

表-5 モルタルの試験項目

試験種類	試験方法
減水剤添加率	—
フロー値	直後 0 打フロー
V ロート 流下時間	モルタル用 吐出口寸法 30×30mm
空気量	モルタル用
圧縮強度	供試体形状 φ50×100mm
簡易断熱試験	供試体形状 φ100×200mm

電所から採取されたものである。FAⅡ種の規格値と FA 原粉および FAⅡ種の品質を表-2 に示す。FA 原粉の品質は、FAⅡ種と比べて 45μm ふるい残分が多い傾向が見られたが、すべての項目について FAⅡ種の JIS 規格値を満足した。表-3 に FA 原粉の品質の単相関係数の一覧を示す。各成分間で相関係数の高いもの、すなわち、表中の相関係数が 0.9 程度以上となるものに着目すると、物理的性質として強熱減量、比表面積、密度およびメチレンブルー吸着量の相関性が高く、流動性を評価する指標として用いられるフロー値比は強熱減量との高い相関関係が確認された。以上より、FA 原粉の品質変動がコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響について強熱減量の変動を指標とした検討を行った。

3.モルタルによるフライアッシュ原粉混合割合の検討

フライアッシュは、①流動性の改善および単位水量の減少、②水和熱の減少、③長期強度の増進、④乾燥収縮の低減などの効果を持つ一方で、フライアッシュによるセメント置換により初期強度が低下することや、細骨材置換により粘性が増加することから、AE 減水剤の使用

量が増加する傾向があることなどが知られている。本試験では、FA 原粉の使用量を 100, 150, 200kg/m³ の 3 種類とし、セメント置換、細骨材置換および併用置換の 3 種類の 9 配合とセメント単味のベース配合、合計 10 配合について、モルタルのフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす FA 原粉の影響を評価した。モルタルの配合およびフロー値と空気量の試験結果を表-4 に示す。モルタルの各配合は、単位粗骨材量を 900kg/m³ としたコンクリートの配合から粗骨材を抜いたものである。モルタル試験には、表-2 に示す 5 種類の FA 原粉の中で強熱減量が中間値であった FA 原粉 FA-C を用いた。

3.1 試験項目および試験方法

JIS R 5201 に準拠しモルタルを製造し、表-5 に示す試験項目について試験を行った。ベースモルタルおよび FA 原粉を置換したモルタル配合について、0 打フロー値が 165±10mm、空気量 2.0%以下となるように AE 減水剤の添加率および消泡剤添加率の調整を行った。空気量に関して、既往の研究²⁾では高気圧下環境での流動性に関して、0.3~0.7MPa 程度の高気圧下環境での流動性は、空気量 4.5%より空気量 2.0%とした方が流動性の低下が小さくなることが報告されている。本研究では、同程度

の高圧気下環境で使用する中埋めコンクリートを想定しているために空気量を2.0%に設定した。

3.2 モルタルのフレッシュ性状試験結果

0打フロー値が165±10mmを得るために必要なAE減水剤の添加量を図-1に示す。併用置換およびセメント置換とした配合は、ベースモルタルと同等のAE減水剤の添加率を示し、細骨材置換とした場合は、FA原粉の置換率を増加させるにつれてAE減水剤の添加率が増加する傾向が確認された。これは、過去の文献¹⁾にも示される通り、『単位粉体量が300~500kg/m³の範囲では粉体量に関係なく減水剤の添加量は一定であり、500kg/m³を超えると急激に減水剤の添加量が増大する』と言った考察と本実験の結果は一致している。

表-4に示すモルタル配合について空気量の測定を行った。その結果、配合種類毎の空気量の違いに明確な傾向は確認されなかったが、FA原粉を混和した配合について消泡剤を使用することなく空気量は2.0%以下となった。これは、FA原粉に含まれる未燃カーボンがAE減水剤に含まれるAE剤等を吸着したためだと考えられる。

Vロート流下時間を図-2に示す。併用置換およびセメント置換とした配合は、ベースモルタルと同等のVロート流下時間を示し、細骨材置換とした場合は、FA原粉の置換率を増加させるにつれてVロート流下時間が増加する傾向が確認された。これより、細骨材置換とした場合は粉体量の増加に伴い粘性が増加したためにVロート流下時間が大きくなったと考えられる。

3.3 モルタルの硬化性状試験結果

モルタルの圧縮強度を図-3に示す。材齢3日の圧縮強度は、細骨材置換とした配合はベースモルタルと同等の強度発現であり、併用置換およびセメント置換とした配合はベースモルタルより小さくなった。材齢28、91日では細骨材置換とした配合はベースモルタルより20%程度の強度増加が確認された。細骨材置換とした場合は、セメント量を確保した上でFA原粉を細骨材と置換しているために、短期強度も確保されポズラン反応によって長期強度も増進したのと考えられる。併用置換およびセメント置換とした配合は、FA原粉が多くなるにつれてセメント量が少なくなり、その割合に応じて強度発現が小さくなったのと考えられる。

密閉空間に充填されたコンクリートは、水和熱による温度変化や自己収縮により体積変化が生じる。中埋めコンクリートに関して、既設コンクリートとの隙間から生じる漏水が問題となる場合がある。水和熱による温度変化や自己収縮による体積変化が小さいコンクリートが漏水の可能性も小さくなるために、体積変化が小さい配合が中埋めコンクリートとして適していると考えられる。本試験では、φ100×200mmのモルタル供試体を

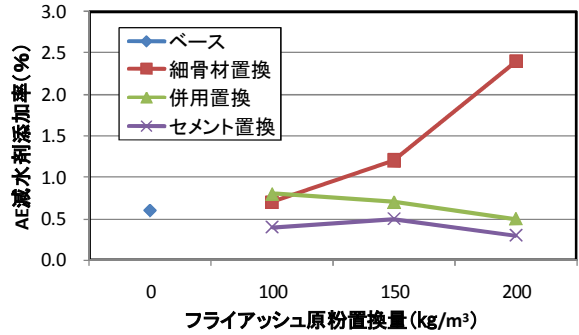


図-1 モルタルのAE減水剤添加率

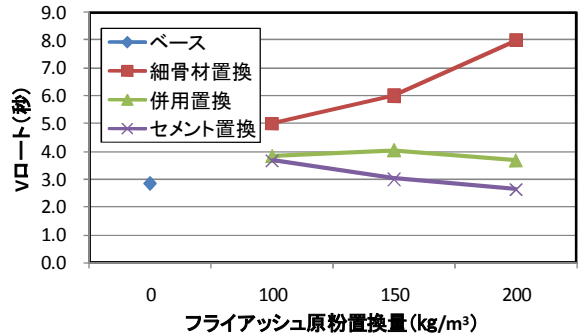


図-2 モルタルのVロート流下時間

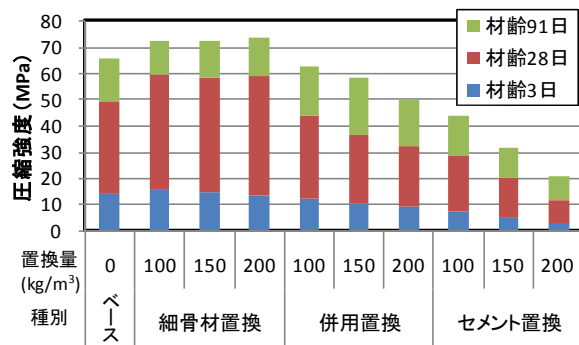


図-3 モルタルの圧縮強度

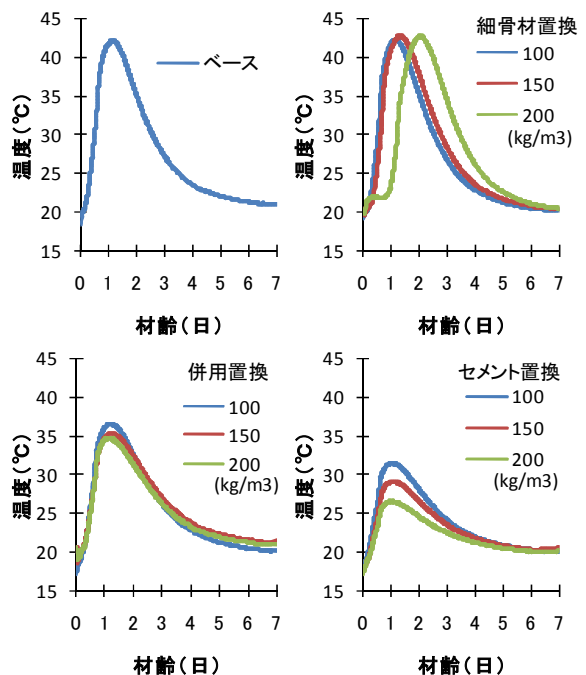


図-4 モルタルの材齢と簡易断熱温度の関係

500×500×600mmの発砲スチロールの中心部分に設置し、モルタル供試体の中心部分に設置した熱電対を用いて簡易断熱温度を測定した。材齢と簡易断熱温度の関係を図-4に示す。簡易断熱温度の最高温度は、ベースコンクリートが最も高くなり、細骨材置換とした配合は同程度の最高温度を示し水和熱抑制効果は確認されなかった。また、FA原粉を細骨材置換で200kg/m³置換した配合は、AE減水剤を13.1kg/m³使用したことにより凝結遅延が生じ最高温度に達する日数が24時間程度遅くなったものと考えられる。併用置換およびセメント置換の配合は、セメントをFA原粉で置換した量に応じてベースコンクリートより最高温度を低下させる効果が確認された。

表-6 コンクリートの配合表およびフレッシュ性状試験結果

配合番号	W/C (%)	W/(C+FA) (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					直後スランブ(cm)	空気量 (%)
					W	C	FA	S	G		
ベース	55.0	55.0	2.0	56.0	190	345	0	1008	792	21.0	2.0
FA-B	70.5	45.3	2.0	53.0	190	270	150	892	789	22.0	1.1
FA-C	70.5	45.3	2.0	53.0	190	270	150	894	791	21.5	1.4
FA-E	70.5	45.3	2.0	53.0	190	270	150	896	793	22.0	1.5
FA-II	70.5	45.3	2.0	53.0	190	270	150	898	795	21.5	1.4

※ベース配合のみセメント質量に対して消泡剤を0.004%使用した。

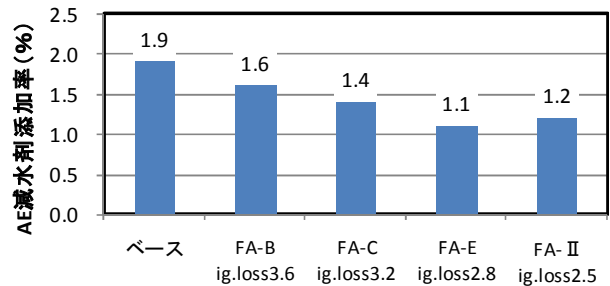


図-5 原粉の品質変動によるAE減水剤添加率

4.原粉の品質変動がコンクリートに及ぼす影響

FA原粉の品質変動によるコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響について、表-2に示す強熱減量が最大値のFA-B、中間値のFA-C、最小値のFA-Eの3種類について検討を行った。測定項目は、フレッシュ性状としてコンクリートの減水剤添加率、空気量、スランブ経時変化および凝結時間、硬化性状として圧縮強度および自己収縮とした。

中埋めコンクリートには、設計地盤反力以上の強度が要求されており、ケーソン下部の作業空間に充填させるためスランブを高く設定し設計基準強度18MPa以上、スランブ18cmまたは21cm、粗骨材最大寸法20mmまたは25mmの配合が一般的に用いられている。モルタル試験の結果より、原粉を併用置換した配合はセメント置換と細骨材置換の中間程度のフレッシュ性状および硬化性状を示した。これより、中埋めコンクリートとして圧縮強度が設計基準強度を満足する範囲で、細骨材置換で得られる天然骨材の使用量削減および長期強度の増進とセメント置換で得られる流動性向上および水和発熱の抑制の効果を取り入れた併用置換が適していると考えられる。以上よりコンクリート試験には、細骨材置換とセメント置換の両面の利点を取り入れた併用置換でFA原粉を150kg/m³使用した配合を選定した。

コンクリートの配合表およびフレッシュ性状の試験結果を表-6に示す。コンクリートについても空気量を2.0%以下に管理するために、ベース配合はセメントに対して消泡剤を0.004%使用したが、FA原粉およびFAII種を置換した配合は消泡剤を使用することなく空気量を2.0%以下に管理した。コンクリートの圧縮強度に関して、品質管理用の標準水中養生と実際の施工条件を考慮した模擬断熱温度養生について検討を行った。

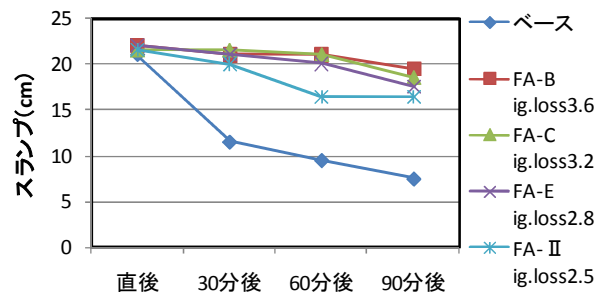


図-6 スランブの経時変化

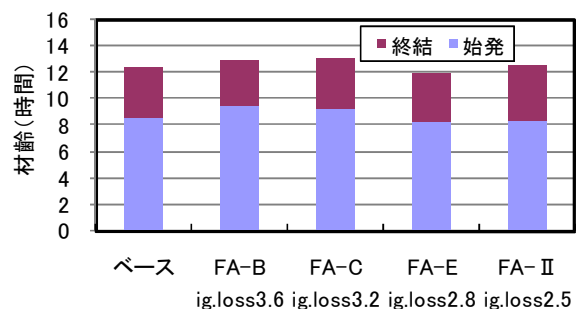


図-7 凝結時間

4.1 コンクリートのフレッシュ性状試験結果

スランブ21±1.5cm得るために必要なAE減水剤添加率を図-5に示す。AE減水剤添加率は、表-2に示す強熱減量とフロー値比の関係と同様にFA原粉に含まれる強熱減量が大きいくほど流動性が小さくなり、所定の流動性を得るためのAE減水剤添加率が大きくなる傾向が確認された。これは、FA原粉の強熱減量が大きくなるとAE剤の吸着量が高まるため、同程度の流動性を確保するためにAE減水剤の添加量が増加したものと考えられる。FA原粉およびFAII種を使用したものは、ベースよりも減水剤添加率が小さくなった。これは細骨材率の違いによる影響と球状のフライアッシュ粒子によるボールベアリング効果により流動性が改善されたと考えられる。

空気量について、モルタル試験と同様に FA 原粉および FA II 種に含まれる未燃カーボンが AE 剤を吸着したために消泡剤を使用することなく 2.0%以下の結果が得られた。凍結融解抵抗性が必要とされない中埋めコンクリートについては、FA 原粉に含まれる未燃カーボンの影響は問題となりにくいと考えられる。

図-6 にスランプの経時変化、図-7 に凝結時間を示す。FA 原粉を置換した配合は、ベースコンクリートと比較してスランプロスは低減され、凝結は遅延する傾向が確認された。FA 原粉を置換した配合について、AE 減水剤の添加率が大きいものほど凝結が遅延する傾向が確認された。また、強熱減量が大きい配合の方が若干ではあるがスランプロスが小さくなる傾向が確認された。中埋めコンクリートは、数百 m³を 50m³/時間程度で打ち込むため、長時間を有する施工の際はスランプロスが小さく、凝結が遅くなる効果は中埋めコンクリートの施工に対して有効であると考えられる。

4.2 コンクリートの圧縮強度試験結果

標準水中養生は、材齢 1 日まで温度 20℃、湿度 60%の恒温恒湿室で保管し、脱枠後は温度 20℃一定の水中養生を行った。模擬断熱温度養生は、ケーソン下部の作業室に充填されたコンクリートの温度を模擬した環境温度（1 日で 60℃まで昇温→60℃を 1.25 日保持→6 日で 20℃まで降温）で養生し、材齢 6 日以降は温度 20℃、湿度 60%の恒温恒湿室で封かん養生を行った。養生種類毎に圧縮強度を図-8 に示す。これより、養生方法の違いにかかわらず FA 原粉の強熱減量の違いが圧縮強度に及ぼす影響は認められなかった。

代表的な強度発現の推定方法としては、コンクリートの温度履歴を用いて材齢を有効材齢または積算温度に換算する方法がある。有効材齢の算出式として式（1）がコンクリート標準示方書[設計編]³⁾に記載されている。

$$t_e = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (1)$$

ここで、 t_e ：有効材齢（日）、 Δt_i ：ある一定のコンクリート温度が継続する期間（日）、 $T(\Delta t_i)$ ： Δt_i の間継続するコンクリートの温度（℃）、 T_0 ：1℃とする。

図-9 に材齢と圧縮強度の関係、図-10 に有効材齢と圧縮強度の関係を示す。図-9 および図-10 の X 軸は対数表示とした。図-9 の材齢と圧縮強度の関係より、配合種類にかかわらず材齢 1 日および 3 日は水中養生より模擬断熱温度養生の圧縮強度が大きくなったが、材齢 28 日で同等の圧縮強度となり、材齢 91 日では模擬断熱温度養生より水中養生の圧縮強度が大きくなることを確認された。図-10 に示す圧縮強度と有効材齢の関係では、

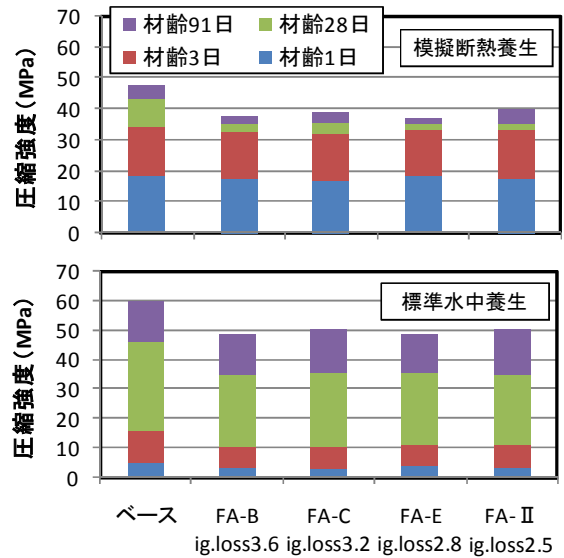


図-8 コンクリートの圧縮強度

有効材齢 1 日、3 日および 28 日では水中養生と模擬断熱温度養生の圧縮強度は概ね一致しており、有効材齢 91 日では模擬断熱温度養生より水中養生の圧縮強度が大きくなることを確認された。有効材齢で評価した際に、水中養生の圧縮強度が模擬断熱温度養生より大きくなった原因は、模擬断熱温度養生と比べて水中養生を行った供試体は長期のポゾラン反応やセメントの水和反応が進展し、模擬断熱温度養生を行ったものは 60℃程度の高温の温度履歴を受けたために長期強度の伸びが小さくなったと考えられる。また、図-9 に示される材齢と圧縮強度の関係と図-10 に示す有効材齢と圧縮強度に示される回帰式の相関係数を比較すると、材齢で評価したものは 0.77~0.89 を示し、有効材齢で評価したものは 0.92~0.95 と高い相関関係を示している。これより、実構造物の中埋めコンクリートの温度履歴を考慮し、圧縮強度を有効材齢で評価することで、標準養生の圧縮強度から初期材齢の実構造物圧縮強度を概ね推定できるものと考えられる。

4.3 コンクリートの自己収縮試験結果

コンクリートの自己収縮は、高流動コンクリートの自己収縮試験方法⁴⁾に準拠し、100×100×400mm の鋼製型枠の中央に低剛性の埋め込み型ひずみ計を設置し測定を行った。ベースコンクリート、FA 原粉 FA-C および FA II 種の自己収縮を測定した結果を図-11 に示す。ベースコンクリートの自己収縮は材齢 28 日で約 100×10⁻⁶、FA II 種は約 20×10⁻⁶、FA 原粉 FA-C は約 40×10⁻⁶であった。フライアッシュの自己収縮低減効果は、過去の文献⁵⁾より化学的性質と関係が強いことが確認されているが、フライアッシュの化学的性質がどのようなメカニズムで収縮を低減させているかまでは解明されておらず、さらに炭種によっては効果が異なることが示されている。本試験で用いた FA 原粉については、自己収縮低減効果

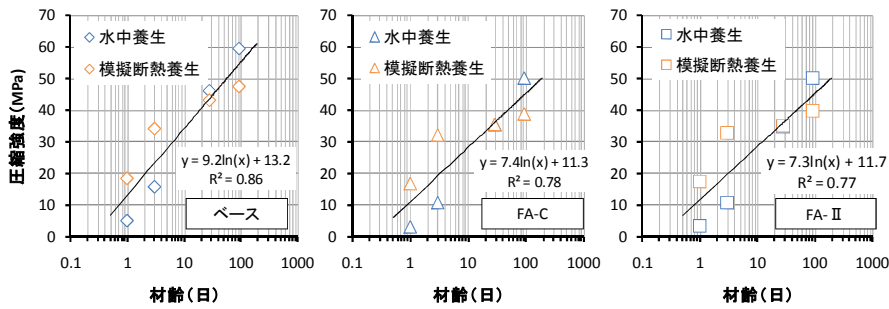


図-9 材齢と圧縮強度の関係

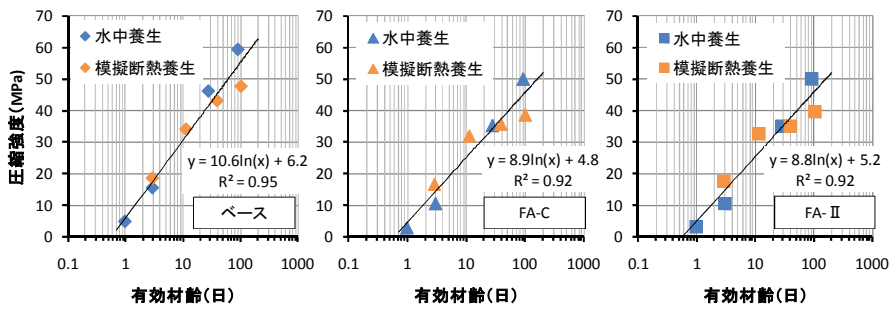


図-10 有効材齢と圧縮強度の関係

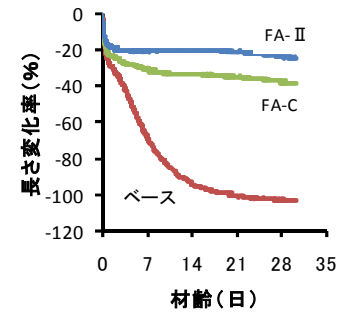


図-11 自己収縮ひずみの推移

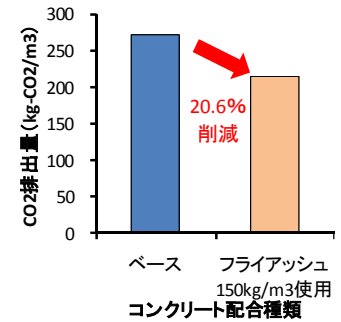


図-12 CO₂排出量の比較

が確認されたために、中埋めコンクリートに使用した際に漏水を低減できる可能性が示唆された。

5. CO₂削減効果の試算

今回の試算では、土木学会コンクリートの環境負荷評価 (その2)⁶⁾に記載されたCO₂排出原単位を用いた。各材料のCO₂排出原単位の数値は、ポルトランドセメントは766.6kg-CO₂、粗骨材は2.9kg-CO₂、細骨材は3.7kg-CO₂、フライアッシュは19.6kg-CO₂を用いた。ポルトランドセメントのCO₂排出量はフライアッシュの約40倍であり、セメントの使用量を減らすほど大きなCO₂削減効果が得られる。FA原粉の使用量が多くなるにつれてCO₂排出量が削減され、図-12に示すようにFA原粉150kgをセメントと細骨材の併用置換した配合はベースコンクリートと比較して20.6% (55kg-CO₂/m³)のCO₂削減効果が確認された。

本試験で使用したFA原粉の品質変動の範囲であれば、中埋めコンクリートを想定した配合として不具合を及ぼす影響は確認されなかった。今後は、環境負荷低減および資源再利用の向上効果を高めるために、FA原粉の添加量をさらに増加させた配合の検討や、実環境を模擬した圧気試験により0.3~0.7MPaの圧気環境での流動性を確認するなど実施工に向けた検討が必要である。

6. まとめ

本研究の範囲で以下の結論が得られた。

- (1) フライアッシュ原粉を用いた配合は、消泡剤を使用せずに空気量を2.0%以下に調整することができる。
- (2) フライアッシュ原粉を用いた配合は、ベースコンク

リートと比べてスランプロスが小さく、凝結も遅くなるため、長時間を有する作業室内での充填性向上効果が得られる。

- (3) 実構造物の温度履歴を測定し、圧縮強度を有効材齢で評価することで水中養生圧縮強度から初期材齢の実構造物圧縮強度を推定することが可能である。
- (4) フライアッシュ原粉を併用置換で150kg/m³使用したコンクリートは、水和熱および自己収縮が小さくなることによる硬化後の漏水低減効果が期待できる。
- (5) フライアッシュ原粉の品質変動として、強熱減量が2.8~3.6%の範囲であれば中埋めコンクリートのフレッシュ性状や硬化性状に与える影響は小さい。

参考文献

- 1) 松家武樹, 堺孝司, 空保政行, 山形秀之: 細骨材として砕砂とフライアッシュIV種を用いたコンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.57-62, 2002
- 2) 井上智裕, 大石雅彦, 杉山隆文: 高気圧下環境がコンクリートのスランプに及ぼす影響, 土木学会第61回年次学術講演会, pp.387-388, 2006
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2013
- 4) 日本コンクリート工学協会: 超流動コンクリート研究委員会報告書(II), pp.209-210, 1994
- 5) 堀田智明, 名和豊春: モルタル硬化体の自己収縮に及ぼすフライアッシュ品質の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.165-170, 2002
- 6) 土木学会: コンクリートの環境負荷評価 (その2), 土木学会, コンクリート技術シリーズ No.62, 2004