

5. フライアッシュを使用したコンクリートの特性と実施工への適用

Properties of Fly Ash Concrete and Application for Site Construction

山崎 順二^{*1}

要 旨

フライアッシュ（Ⅱ種相当）をコンクリートの結合材または混和材として使用することにより、ワーカビリティの改善、水和発熱の低減、単位水量の低減によるひび割れ抑制などの品質改善効果が得られる。当社の環境配慮活動の一環としての副産物の有効利用と上記の利点を活用するため、本工事では、着工前から生コン工場の協力のもと強度発現性および耐久性に関する品質確認実験を行い、JIS マーク表示品としての出荷体制を整えることにより、フライアッシュを使用したコンクリートを設計基準強度 27～36N/mm²の構造体コンクリートに使用した。本報では、室内における実験結果および実施工における受入れ時点での品質変動および構造体コンクリートの強度発現について報告する。

キーワード：フライアッシュⅡ種／実施工／強度発現性／中性化抵抗性／長さ変化率

1. はじめに

電気事業における石炭火力発電所から発生するフライアッシュを有効利用することは、廃棄物の削減となり、CO₂発生量の低減につながる。フライアッシュをコンクリートの混和材料もしくは結合材として使用することによって、ワーカビリティの改善や単位水量の低減効果が得られる。さらに、単位水量の低減による乾燥収縮率の低減効果、ポズラン反応による長期強度の増進、セメント置換の場合には水和発熱の低減によるマスコンクリートの温度ひび割れ低減効果が得られる。

一方、これらのフライアッシュの本来の性能を十分に発揮させるためには、20%程度以上のセメント内割置換で使用することが有効となるが、公共建築工事標準仕様書(平成 22 年版)¹⁾の規定によれば、セメント質量の 10%までしか混合使用できない。さらに、JIS マーク表示品であれば採用されやすくなるが、未だ全国展開されるまでには至っていない。そのため、コンクリート構造体にフライアッシュを混合使用する場合は、事前に生コン工場や協同組合と協議して必要なデータを整備すると共に、JIS マーク表示品として出荷できる体制を整えることに加えて、フライアッシュのセメント内割置換率の上限が、特記仕様に明記されていることが必要となる。

今回の実施工への適用については、まずこれらの法規制等への

対応を行い、納入予定工場での室内実験によるフライアッシュ使用コンクリートの品質に関する実験を重ねた結果をもとに、大阪府北摂地区での建設工事における営業所棟基礎および地上構造体（鉄筋コンクリート造 6 階）にフライアッシュ使用コンクリートを適用した。

本報では、工場にて行った室内試験実験の結果および実施工における受入れ時点でのコンクリートの品質変動について報告する。

2. 室内実験

フライアッシュⅡ種をセメントおよび細骨材の一部と置換して使用した場合のコンクリートの特性を調査するため、レディーミクストコンクリート工場の試験室にて実験を行った。室内実験では、フレッシュコンクリートの性状、強度発現性、乾燥収縮率および中性化抵抗性について調査した。

表－1 室内実験に使用した材料

材料	記号	種類もしくは産地	密度(表乾) (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率 (実積率)
セメント	N	普通ポルトランドセメント(U社製)	3.16	－	－
混和材	FA	舞鶴産 フライアッシュⅡ種	2.25	－	－
細骨材	S1	兵庫県西島産砕砂 (60%)	2.58	1.65	2.90
	S2	福岡県北九州産石灰砕砂 (:40%)	2.69	0.58	2.50
粗骨材	G1	兵庫県西島産碎石(1505 :20%)	2.62	0.75	(59.5)
	G2	兵庫県西島産碎石(2010 :30%)	2.62		
	G3	山口県伊佐産石灰碎石(2005 :50%)	2.70		
混和剤	Ad	高性能AE減水剤・AE調整剤	－	－	－

^{*1} 技術研究所環境・生産研究グループ

2.1 室内実験の概要

室内実験に使用した材料を表－1に示す。フライアッシュはJIS A 6201の品質基準のⅡ種に相当するもの（比表面積：3760～3820cm²/g、強熱減量：2.2～2.5%）である。また、化学混和剤は全て高性能AE減水剤とした。

表－2にコンクリートの調合概要を示す。水セメント比を55・50・45%の3水準、フライアッシュの混合については、セメント内割置換で20wt%の1水準、細骨材置換で40・60・80kg/m³の計3水準とし、無混合のものも含めて合計15種類のコンクリートを練り混ぜた。調合記号は「水セメント比・（セメント置換：Cもしくは細骨材置換：S）・置換量」を示している。なお促進中性化試験においては、セメント内割置換で10 kg/m³および15 kg/m³の供試体（C10、C15）も作製した。フレッシュコンクリートのスランプは18cmとし、単位水量を180kg/m³の一定とした。

なおセメント内割置換の調合であるC20についてのみ、単位セメント量と単位フライアッシュ量を加えた量で水セメント比（W/C）を表記している。

コンクリートの試験項目は、フレッシュコンクリートの試験、圧縮強度、長さ変化率および促進中性化試験とし、該当するJISに準じてそれぞれの試験を実施した。

2.2 室内実験の結果および考察

(1) フレッシュコンクリートの性状

表－3に、高性能AE減水剤の添加率とフレッシュコンクリートの試験結果を示す。スランプおよび空気量は全てJISの許容範囲内であり、良好なフレッシュコンクリートの性状であった。AE調整剤の添加率とフライアッシュ混合量との関係を図－1に示す。フライアッシュに含まれる未燃カーボン量の影響によってフライアッシュの混合量が多くなるほど空気連行性が徐々に低下し空気量が不

表－2 室内実験に使用したコンクリートの調合概要

調合記号	W/C (%)	スランプ (cm)	s/a (%)	C	FA	W	S1	S2	G1	G2	G3
						(kg/m ³)					
55CS0	55	18	48.7	327	－	180	506	352	181	272	466
55C20	55	18	48.0	262	65	180	492	342	181	272	466
55S40	55	18	48.7	327	40	180	482	336	181	272	466
55S60	55	18	48.7	327	60	180	470	328	181	272	466
55S80	55	18	48.7	327	80	180	458	320	181	272	466
50CS0	50	18	47.4	360	－	180	485	337	183	275	470
50C20	50	18	46.6	288	72	180	471	327	183	275	470
50S40	50	18	47.4	360	40	180	461	321	183	275	470
50S60	50	18	47.4	360	60	180	449	313	183	275	470
50S80	50	18	47.4	360	80	180	437	305	183	275	470
45CS0	45	18	45.8	400	－	180	460	320	185	277	474
45C20	45	18	45.0	320	80	180	444	309	185	277	474
45S40	45	18	45.8	400	40	180	436	304	185	277	474
45S60	45	18	45.8	400	60	180	424	296	185	277	474
45S80	45	18	45.8	400	80	180	412	288	185	277	474

表－3 フレッシュコンクリートの試験結果

調合記号	混和剤 C×%	AE助剤 (C×0.003%)	スランプ (cm)	スランプフロー (cm×cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度(℃)	単位容積 質量(kg/L)
55CS0	0.45(0A1T)	1.0	18.0	29.0×29.0	5.5	18	2.254
55C20	0.50(3A0T)	8.0	19.5	36.5×35.0	5.4	18	2.239
55S40	0.45(3A0T)	2.0	17.5	30.0×29.5	4.2	18	2.281
55S60	0.50(3A0T)	5.0	18.0	30.0×29.0	4.3	18	2.278
55S80	0.60(3A0T)	10.0	18.0	29.5×29.0	4.9	18	2.265
50CS0	0.45(0A1T)	1.0	19.0	31.2×30.4	4.9	17	2.275
50C20	0.50(5A0T)	6.0	20.5	37.0×35.6	4.7	17	2.234
50S40	0.50(5A0T)	1.0	19.0	32.0×31.5	4.5	16	2.267
50S60	0.55(5A0T)	4.0	20.0	35.1×34.0	4.5	16	2.268
50S80	0.55(5A0T)	8.5	19.5	31.9×30.8	5.3	16	2.245
45CS0	0.55(0A1T)	1.0	19.5	34.3×32.4	4.7	15	2.272
45C20	0.55(5A0T)	6.0	19.5	33.2×32.8	4.6	15	2.266
45S40	0.55(5A0T)	0.5	20.0	35.0×34.6	4.9	15	2.272
45S60	0.55(5A0T)	3.0	19.5	33.0×31.4	4.0	15	2.295
45S80	0.55(5A0T)	8.0	18.0	29.8×29.0	5.2	15	2.256

()内:(A:AE剤・T:消泡剤)

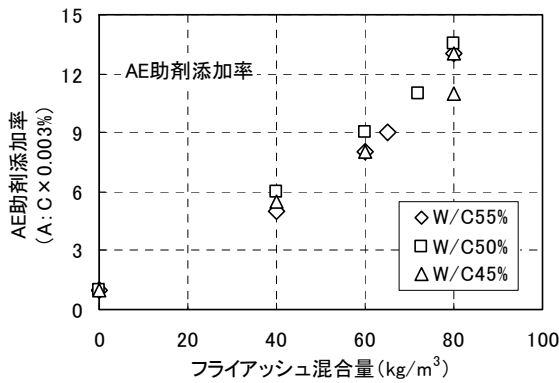


図-1 AE 調整剤添加率とフライアッシュ混合量

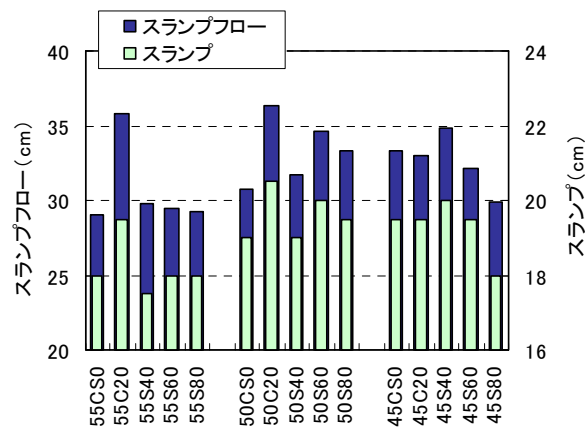


図-2 スランプおよびスランプフロー

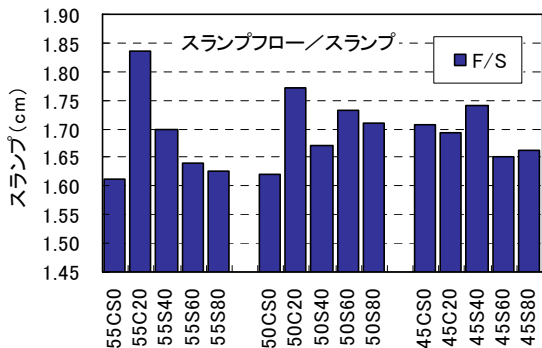


図-3 スランプフロー/スランプ (F/S)

安定になることが予測されるが、図-1 に示されるように W/C に関わらずフライアッシュの混合量に概ね正比例して AE 調整剤の添加量が増加していることがわかる。

これより、フライアッシュの混合量および品質に応じた AE 調整剤添加量を把握して設定すれば、実施工においても所要の空気量が確保できると考えられる。図-2 にコンクリートのスランプおよびスランプフローを示す。フライアッシュの混入により、W/C55%および W/C50%ではスランプが小さい場合でもスランプフローが大きくなる傾向にある。そこで、ワーカビリ F/S (スランプフロー/スランプ) で評価²⁾すると、図-3 に示すように W

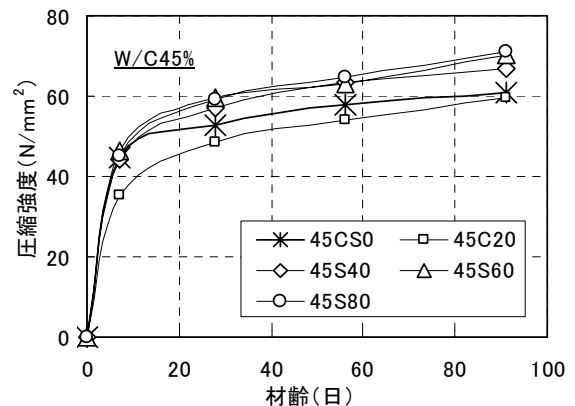
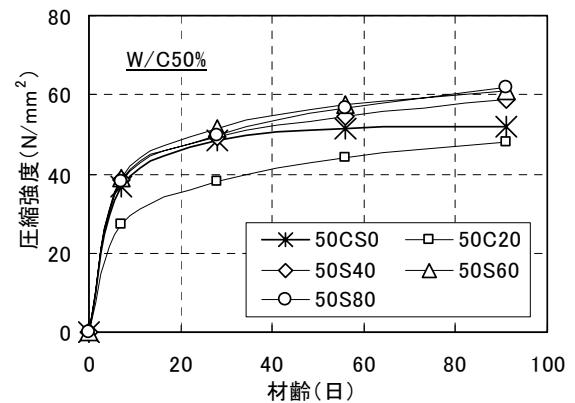
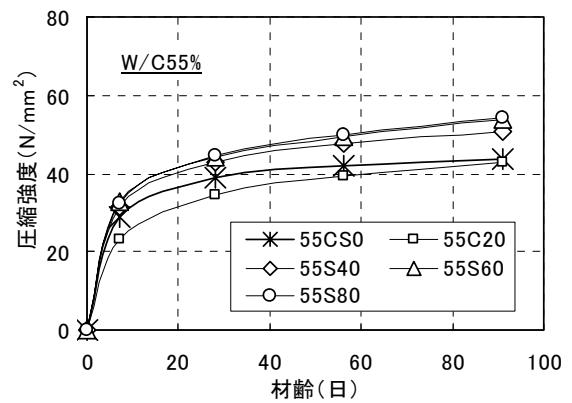


図-4 水セメント比ごとの圧縮強度発現性

／C 45%のみやや異なる傾向にあるが、W/C 55%および W/C 50%では、フライアッシュを混合することによって無混合の CS0 よりも F/S が大きくなり、フレッシュコンクリートのワーカビリティおよびコンシステンシーが改善されることが認められる。

(2) 圧縮強度発現性

材齢 91 日までの圧縮強度の発現性を W/C ごとに図-4 に示す。フライアッシュをセメントと 20%内割置換した C20 では、いずれの W/C においてもその他の割合よりも強度発現が小さくなっているが、CS20 は材齢 91 日の時点でフライアッシュ無混合の CS0 と同程度の強度発現が得られている。また細骨材置換の S40、S60 および

S80 では、いずれの W/C においてもフライアッシュ置換率が大きくなるほど圧縮強度が徐々に高くなり、ポズラン反応による長期強度の増進効果が認められる。

図-5 に、フライアッシュ無混合の CS0 に対するその他の調合での強度比率を W/C ごとに示す。フライアッシュを細骨材置換で混合することにより、無混合の CS0 に対して材齢 7 日の時点で 100~110%、材齢 91 日の時点で 110~120%程度の強度発現が得られている。

また、図-6 に、それぞれの調合における材齢 28 日強度を 100%とした場合の各材齢での強度比を示す。フライアッシュを混合することにより、材齢 28 日以降の強度増進率（強度比）が無混合の CS0 に比べて大きく、材齢 91 日においてはフライアッシュのポズラン反応により材齢 28 日の 120%以上の強度発現が得られている。強度増進

率はセメント置換の C20 が最も大きく、単位セメント量少ない高水セメント比かつフライアッシュ混合量が多い調合において、ポズラン活性による長期強度の増進効果が大きくなっている。

材齢 28 日における標準養生強度と C/W の関係を図-7 に、材齢 56 日標準養生強度と C/W の関係を図-8 に示す。併せてフライアッシュ混合量ごとの両者の関係式を図中に示す。フライアッシュ無混合の CS0 と比較して、細骨材置換（S40,S60,S80）の調合においては、前述のようにフライアッシュの混合量が多くなるほど高い強度発現が得られる傾向にあるが、図中に示した C/W- σ_{56} 式の傾きは、フライアッシュの混合量によらず概ね同等であることがわかる。これより、フライアッシュの混合量に応じた W/C を設定することにより、所要の強度に対

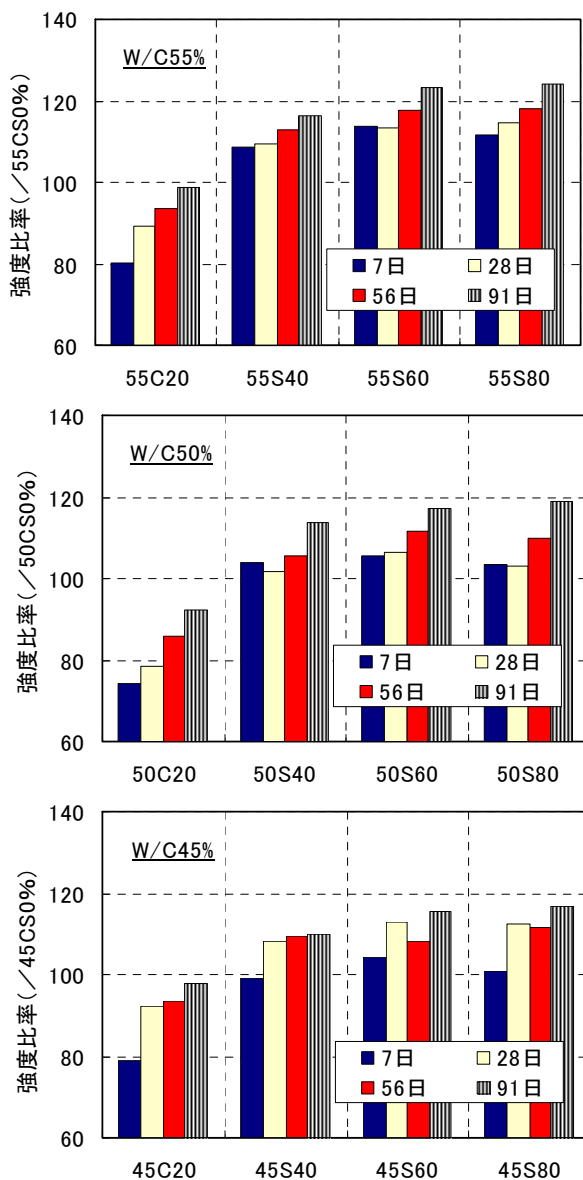


図-5 フライアッシュ無混合 CS0 に対する強度比率

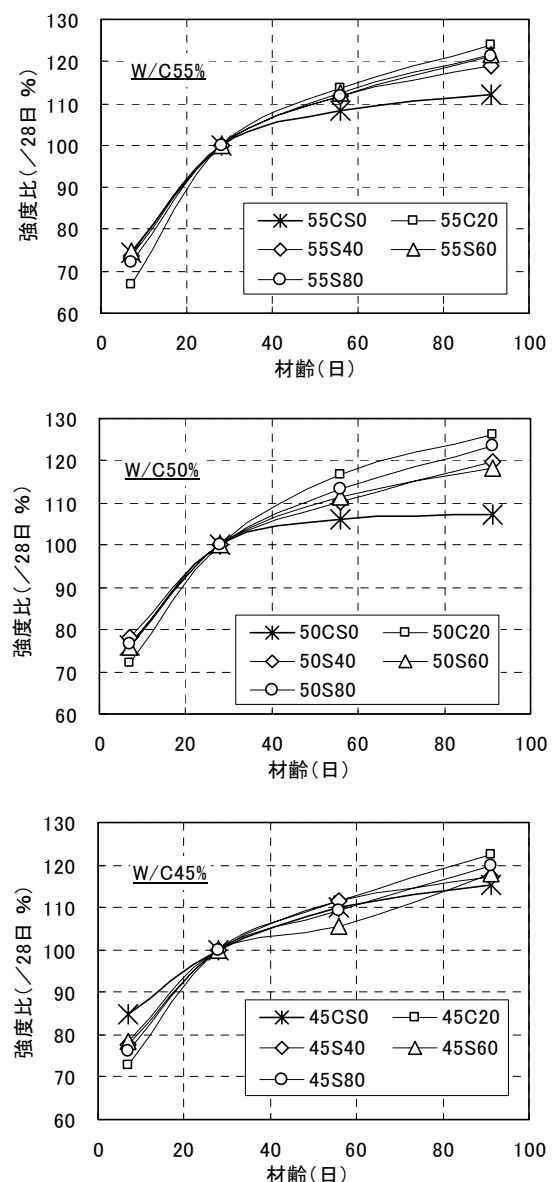


図-6 材齢 28 日に対する各材齢での圧縮強度比

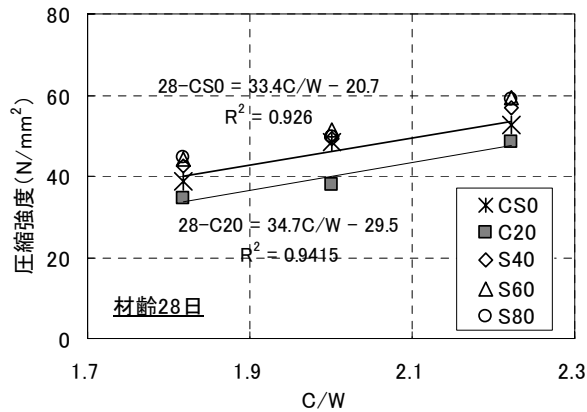


図-7 材齢 28 日における C/W と強度の関係

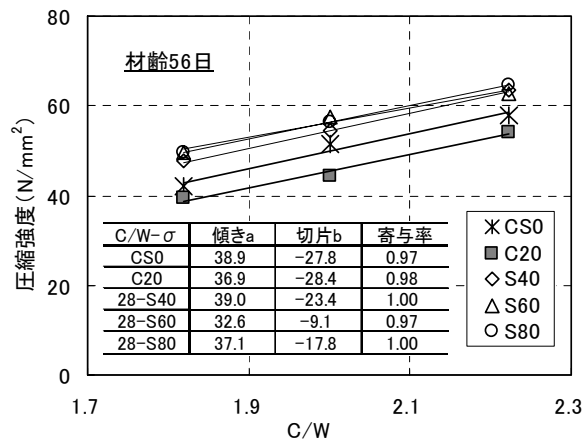


図-8 材齢 56 日における C/W と強度の関係

する調査計画が可能となる。また、材齢 56 日の方が材齢 28 日より CS0 に対する強度発現性が高くなることから、調査管理材齢を 56 日とした方が、フライアッシュの利点を活かした経済的な調査設計が可能となる。

(3) 長さ変化率および質量変化率

図-9 に水セメント比 50%、スランブ 18cm のフライアッシュ使用コンクリートの保存期間 26 週までの長さ変化率を、図-10 に質量変化率と乾燥収縮率の関係を示す。フライアッシュの混合量が多くなるほど無混合の CS0 よりも長さ変化率がやや小さくなり、それに伴い質量変化率も同等以下になる傾向にあった。これより、フライアッシュの混合によりセメント量が減少し、乾燥収縮率がやや低減される傾向にあると考えられる。

(4) 促進中性化抵抗性

図-11 に、水セメント比 50%、スランブ 18cm のフライアッシュ使用コンクリートにおける促進期間 26 週（温度 20℃、相対湿度 60%RH、CO₂ 濃度 5%）までの促進中性化深さの試験結果を示す。図にはセメント内割置換 10 kg/m³ および 15 kg/m³ の値 (C10、C15) も併せて示した。さらに図-12 に、セメント内割置換 20% までの促進試験

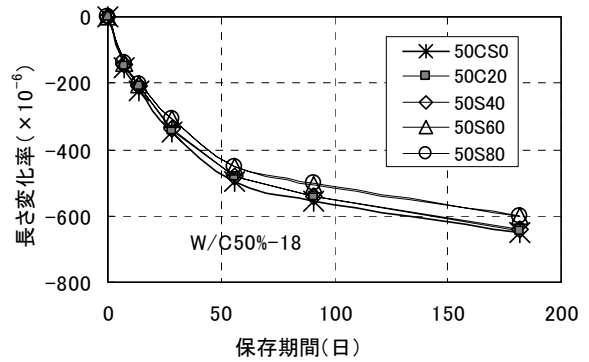


図-9 長さ変化率

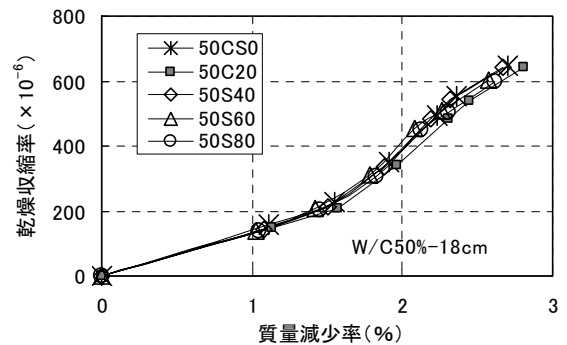


図-10 質量変化率

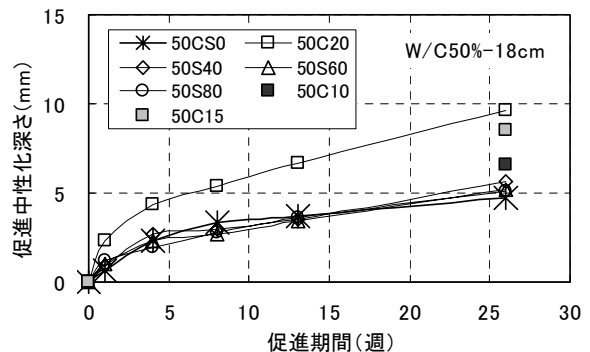


図-11 促進中性化深さ

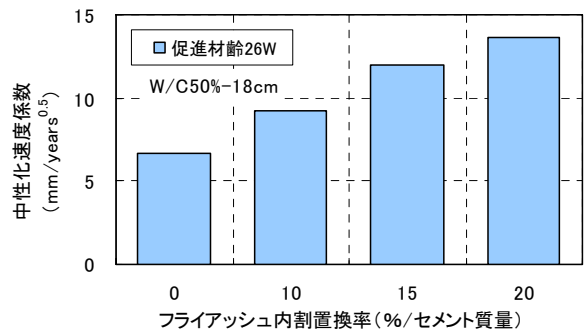


図-12 セメント置換量と中性化速度係数

による中性化速度係数を示す。

図-11 より、細骨材置換の調査 (50S40～50S80) では混合量に関わらず無混合の 50CS0 と同等の促進中性化

深さであるが、セメント内割置換の割合 (50C10～50C20) では図-12 に示すように混合量が多いほど中性化速度係数が大きくなり、50C20 では 50CS0 の 2 倍程度の中性化速度係数となった。このことから、構造体コンクリートの性能を確保するには、水ポルトランドセメント比の大きさやかぶり厚さに配慮することが必要と考えられる。

3. 実施工における品質管理結果

フライアッシュⅡ種をセメント質量の 20%で内割置換したコンクリートを、ワーカビリティの改善、水和発熱の低減、乾燥収縮率の低減などを目的としたバリューエンジニアリング(VE)技術として、大阪府北摂地区での建築工事に使用した。適用したのは営業所棟の基礎および地上構造体コンクリート(鉄筋コンクリート造 6 階、設計基準強度 27～36N/mm²)で、2011 年 9 月～2012 年 3 月の間に打設した。

以下に、実施工時における受入れ時点でのコンクリートの品質変動について述べる。

3.1 フレッシュコンクリートの性状

呼び強度 27,30,36 および 40(呼び強度 27 のみスランブ 15cm、それ以外は 18cm)におけるフレッシュコンクリートの出荷時と荷卸し時の性状について、スランブの変動を図-13 に、空気量の変動を図-14 に示す。なお、出荷

時のスランブの目標値は、運搬などによるロスを 2～2.5cm 程度見込み、また空気量は、フライアッシュの未燃カーボン量等の影響に配慮して荷卸し地点までに 1.5%のロスが生じるものと見込んで製造したものである。

荷卸し時のスランブは全て JIS の許容範囲である±2.5cm の範囲内であり、荷卸し時の目標値を満足している。空気量についても 3.5%～5.6%の範囲であり、全て荷卸し時の目標値を満足した。出荷時および荷卸し時における変動は、スランブ 15cm のコンクリートにおいては、出荷時の 20 点の平均値が 18cm、荷卸し時に 15.5cm であり、その差である運搬によるスランブロス、想定した数値と同等(2.5cm)であった。スランブ 18cm のコンクリートについては、呼び強度 30、36 および 40 における計 43 点の平均値が出荷時 20.6cm、荷卸し時 18.9cm であり、スランブ 15cm のものよりも出荷時から荷卸しまでのスランブロスがやや小さくなった。スランブロスの大きさは、後述する高性能 AE 減水剤の使用量に起因するものと考えられる。

また出荷時と荷卸し時の空気量について、スランブ 15cm のものでは、出荷時の平均値が 6.4%、荷卸し時が 4.4%、スランブ 18cm のものでは出荷時 5.7%、荷卸し時 4.5%であり、空気量の運搬によるロスの平均値は 1.2%～2.0%であった。空気量ロスの変動要因は主としてフライ

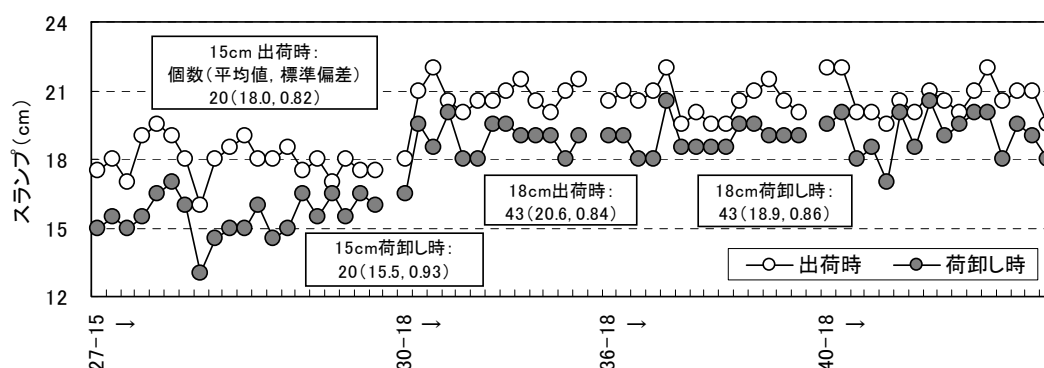


図-13 呼び強度ごとのスランブの変動 (出荷時および荷卸し時)

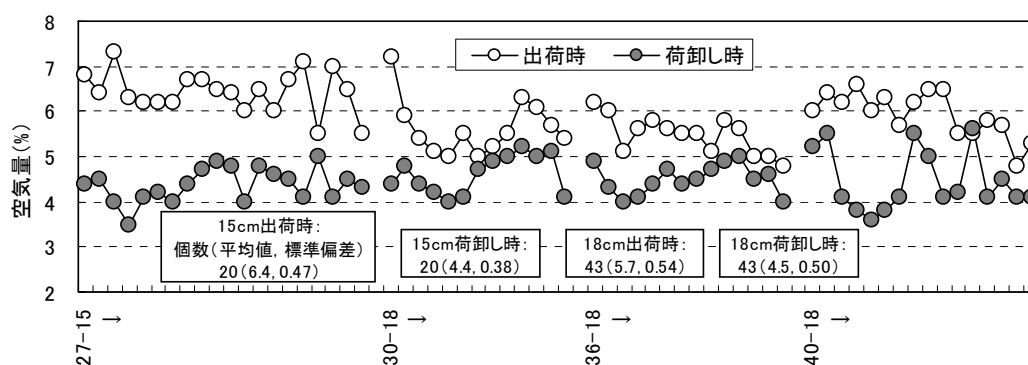


図-14 呼び強度ごとの空気量の変動 (出荷時および荷卸し時)

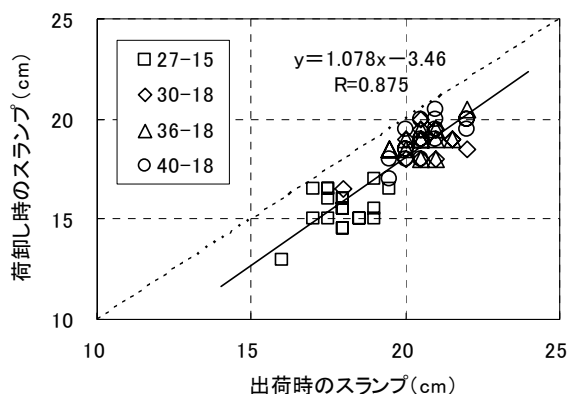


図-15 出荷時と荷卸し時のスランプ

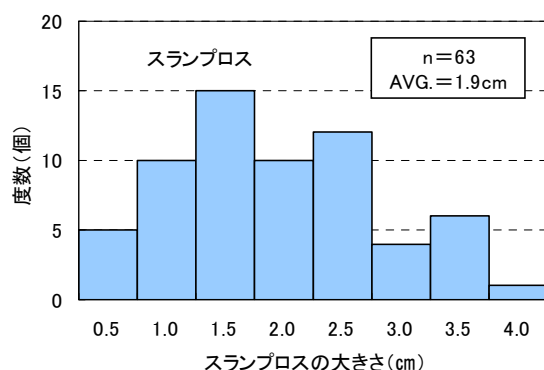


図-16 スランプロス値のヒストグラム

アッシュに含まれる未燃カーボン量の違いによる影響と考えられるが、上記の結果から、空気量は十分に制御できたと判断できる。

次に、荷卸し時と出荷時のスランプの関係を図-15に、図-16にスランプロス値のヒストグラムを示す。運搬時間は30分程度であったが、スランプは、呼び強度および出荷時のスランプの大きさに関わらず、荷卸し時までに平均2cm程度のロスが生じていることがわかる。なお、打込み時期は標準期および冬期の期間である。

図-17にスランプロス値と高性能AE減水剤添加率の関係を示す。スランプロスは、添加率が増大すると若干小さくなる傾向があり、高性能AE減水剤のスランプ保持性能効果が伺える。

荷卸し時と出荷時の空気量の関係を図-18に、図-19に空気量のロス値のヒストグラムを示す。空気量のロス量はスランプロスに見られるような傾向はなく、出荷時から1~3%の範囲(平均約1.5%)でロスが生じる結果となった。これは、運搬時間、外気温、空気量(AE)調整剤の添加量などの影響により変動すると考えられるが、フライアッシュの品質、特にフライアッシュに含まれる未燃カーボン量による影響が最も大きいと考えられる。

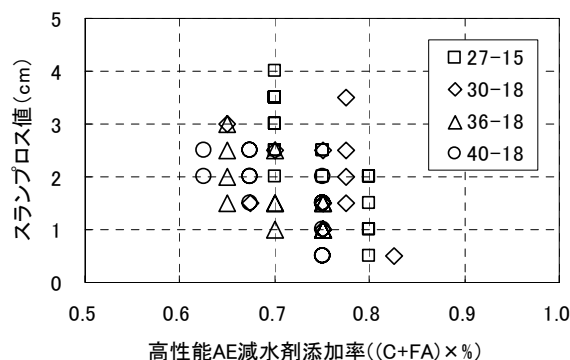


図-17 スランプロスと高性能 AE 減水剤添加率

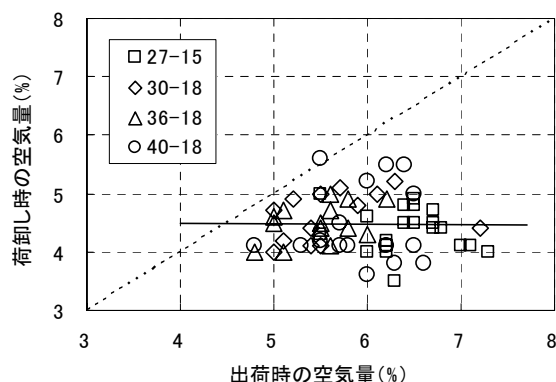


図-18 出荷時と荷卸し時の空気量

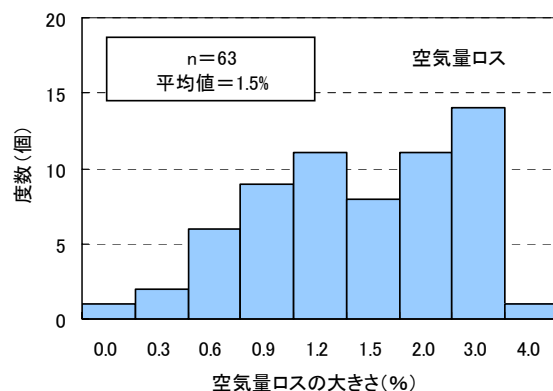


図-19 空気量ロス値のヒストグラム

3.2 硬化コンクリートの性状

呼び強度40、36および30のコンクリートの工程検査(標準養生)における材齢91日までの強度発現性の一例を図-20に、荷卸し時検査において採取した材齢56日標準養生強度と結合材水比の関係を図-21に示す。コンクリートの強度管理材齢は56日であるが、いずれも材齢28日の時点で呼び強度比が1.10~1.16、材齢56日の時点で概ね1.30程度となり、フライアッシュのポズラン反応による長期強度の増大効果が得られていることが分かる。

以上より、作業所に納入されたコンクリートは、フレッシュコンクリートの性状や強度発現性に問題はなく、

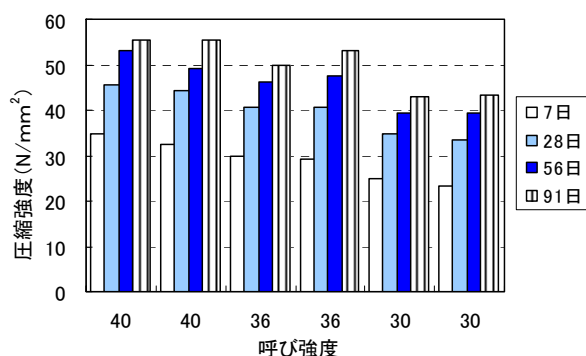


図-20 呼び強度ごとの強度発現性の例

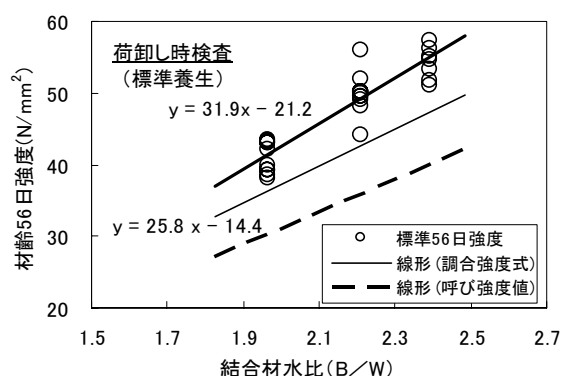


図-21 材齢56日標準養生強度と結合材水比の関係

良好な品質のフライアッシュを使用したコンクリートが納入されたと判断できる。

3.3 模擬柱試験体における強度発現性の調査

作業所に納入される実機で製造されたコンクリートを用いて、大きさ $600 \times 600 \times 900 \text{mm}$ の模擬柱試験体を作製し強度発現性を調査した。模擬柱試験体は、呼び強度 40、36、30 (スランプ 18cm) および 27 (スランプ 15cm) において、作業所での打込み期間中に計 6 体作製した。納入工場は 2 工場(S 工場および I 工場)であった。

コンクリートの硬化後、材齢 28 日、56 日および 91 日において、 $\phi 100 \text{mm} \times 900 \text{mm}$ のコアを断面中央部および隅角部から 1 本ずつ採取し、長さ 200mm に切断して供試体を 3 体ずつ成型した。試験体の作製と併せて、現場封かん養生、温度追従 (模擬柱試験体の中心温度による) 養生および簡易断熱養生供試体を作製し、各養生条件における強度発現性を調査した。模擬試験体の打込み時期は、2011 年 9 月～2012 年 3 月の間であった。

図-22 に、模擬柱試験体を使用したコンクリートの標準養生供試体における材齢 3 日～91 日までの強度発現性を示す。コンクリートの調合管理材齢は 56 日であるが、いずれの調合においても材齢 28 日の時点で呼び強度を超える強度発現性が得られている。図-23 にコア強度と各

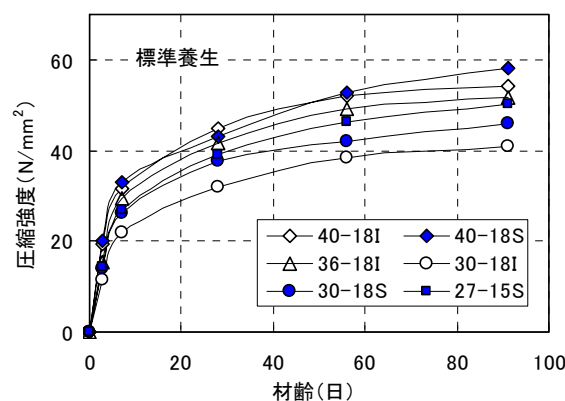


図-22 模擬柱試験体を使用したコンクリートの標準養生供試体における強度発現性

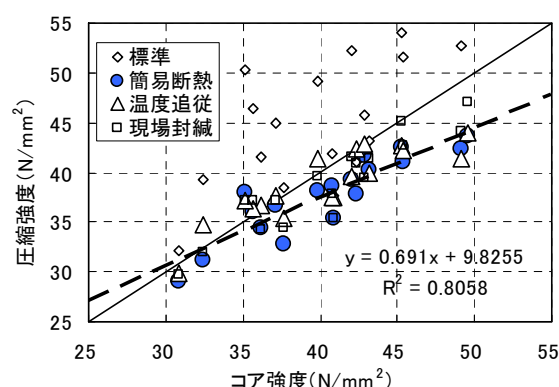


図-23 コア強度と各種養生による圧縮強度

養生における供試体強度との関係を示す。図中の波線は簡易断熱養生強度の回帰線である。一般に、簡易断熱養生や温度追従養生では、コア強度を概ね精度良く評価出来ると考えられるが、今回の実験結果からは、両者はコア強度との相関がやや低く、簡易断熱養生では構造体強度をやや安全側に判定していることがわかった。

図-24 に、標準養生強度とコア供試体強度により算出した構造体強度補正值を示す。調合管理強度を 28 日で設計する場合、構造体強度の管理材齢が 56 日の場合は $_{28}S_{56}$ 値が 3N/mm^2 以下、91 日では $_{28}S_{91}$ 値が 0N/mm^2 以下となり、構造体強度の管理材齢を長期に設定することによって合理的な調合設計が可能となる。さらに、調合管理材齢を 56 日とすることによって、調合管理強度に対する設計水結合材比が大きくでき、マスコンクリート対策としては有利となるが、 $_{56}S_{91}$ 値は $3 \sim 6 \text{N/mm}^2$ 程度と 28 日の場合よりもやや高くなる傾向にあった。これはフライアッシュのポゾラン反応による長期強度の増大に起因していると考えられる。図-25 に、打込みから構造体強度管理材齢までの平均気温と構造体強度補正值の関係を示す。本工事では冬期の打込みであったため 16°C 未満のデータ

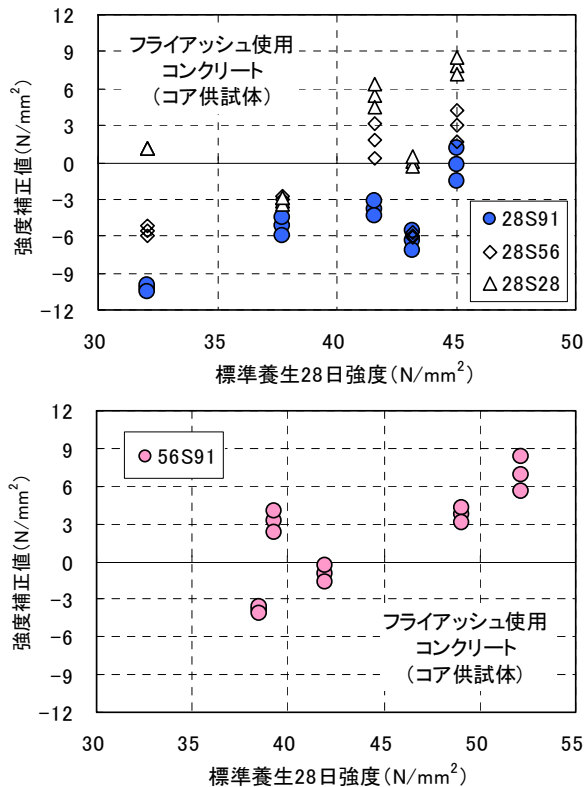


図-24 標準養生 28 日強度と構造体強度補正值

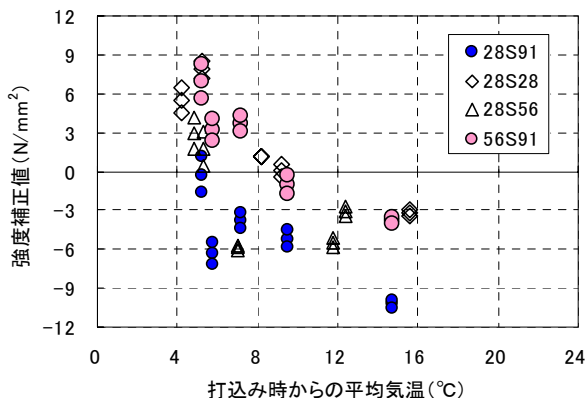


図-25 模擬柱試験体に使用したコンクリート

であるが、コア供試体から得られた補正值は、文献³⁾に示された補正值Sの標準値よりもやや小さい値であった。

4. まとめ

フライアッシュⅡ種を使用したコンクリートに関する一連の実験の結果、以下のことが分かった。

- 1) フライアッシュⅡ種の混合使用によってセメント内割置換の場合のみ中性化速度が速くなるが、中性化抵抗性以外のコンクリートの性状は、無混入の場合と概ね同等以上であることがわかった。
- 2) フライアッシュを使用したコンクリートは、設計面および施工面において中性化抵抗性を確保する



写真-1 構造体コンクリートの狭隙部への打込み状況

ための配慮（調合計画における水ポルトランドセメント比や施工時点におけるかぶり厚さ）を施すことにより、構造体コンクリートの要求性能を十分に満足できる品質を有していると考えられる。

- 3) 生コン工場での製造時においては、フライアッシュの品質や混合量に応じた AE 調整剤の添加量を設定すれば、フライアッシュ無混入の調合と同等に品質の安定したフレッシュコンクリートが得られることが、実施工時の品質管理結果から確認できた。
- 4) 模擬柱試験体を作製して得た構造体強度補正值は、文献³⁾による数値に対してやや安全側であり、実施工された構造体コンクリートは所要の性能を十分に発揮していることが分かった。

5. おわりに

型枠脱型後の打込み状況の例を写真-1に示す。フライアッシュを使用したコンクリートは、JIS A 5308 において環境ラベル（メビウスループマーク）を付与できるコンクリートである。

今後、当社の VE の要素技術としての利用のみでなく、地球環境保護や環境配慮活動のための技術として、更なる有効活用を目指したい。

[謝 辞]

実施工におけるフライアッシュ使用コンクリートの納入にあたり (株)関西宇部吹田工場および伊丹コンクリート工業(株)においては、JIS 標準化のための各種実験の実施、実施工時のデータ収集などについて、多大な協力をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 公共建築工事標準仕様書(建築工事編) 平成 22 年版、p.54
- 2) 山崎順二・立松和彦：京都地区の天然砂利を用いた高強度コンクリートの実構造物への適用とその品質管理、日本建築学会技術報告集 第 7 号、pp.13-16、1999.2.
- 3) 日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説、p.43、2007.