

環境配慮型高強度コンクリートに関する研究

ーフライアッシュを用いた高強度コンクリートの実機実験ー

A Study on Environmentally Conscious High-strength Concrete

- Tests of Fly-ash High-strength Concrete Using a Mixer at Concrete Mixing Plant -

河野政典* 起橋孝徳**

要 旨

製造過程における CO₂ の排出量が多いポルトランドセメントの使用量を抑えることによって環境負荷低減に配慮した高強度コンクリートの開発を行った。開発に当たり、普通ポルトランドセメントの 20 および 30% をフライアッシュに置換することによって、CO₂ の排出量を 2~3 割低減したコンクリートを生コンプラントの実機ミキサで製造してフレッシュ性状、および圧縮強度特性に関する試験を実施した。その結果、フライアッシュの置換により、80N/mm² 級の低水結合材比の調合においても良好なワーカビリティが得られ、混練および模擬柱への打設が可能であった。また、フライアッシュの混入により圧縮強度が増進し、模擬柱部材から採取したコア強度試験の結果、100N/mm² の構造体強度が得られた。実験結果に基づき、CO₂ の排出量を 2~3 割低減した設計基準強度 80N/mm² のコンクリートの調合設計を行った。

キーワード：環境配慮型、高強度コンクリート、フライアッシュ、実機実験

1. まえがき

近年、地球環境保護への意識が高まる中、CO₂ の排出量を削減する取組みが各分野で進められている。建築物にはコンクリート構造物が多く、大量のコンクリートが使用される。そのコンクリートの製造において最も重要な材料であるポルトランドセメントは、石灰石を主原料とし、製造時の焼成過程で多くの CO₂ を排出する材料である。一方、鉄筋コンクリート構造物においては、昨今、長寿命化、高品質化が求められ、コンクリートの高強度化が進んでいる。高強度を得るためには、セメント量が多く必要となるので、高強度となるほど CO₂ 排出量が多いコンクリートとなる。そこで、高強度コンクリートを対象として、セメントの使用量を抑えて CO₂ の排出量を低減した環境配慮型コンクリートの開発に着手した。

環境配慮型コンクリートの実現手段として、セメントの一部を、コンクリート用混和材として主に土木分野で使用され、コンクリートのフレッシュ性状の改善や長期強度の増進が期待できるフライアッシュ¹⁾ (以下、FA) に置換する方法を採用した。FA は石炭火力発電所で排出される副産物品であるため、普通ポルトランドセメント (以下、N セメント) に比べ CO₂ の排出量原単位が極めて少ない材料である²⁾ (表-1 参照)。

そこで、FA を用いた高強度コンクリートの開発に当たり、レディーミクストコンクリート工場の実機ミキサで製造したコンクリートのフレッシュ性状の経時変化、および圧縮強度特性に関する試験を実施した。本報では、その概要について報告する。

2. 設計基準強度の目標値

N セメントは、全国で入手が可能で、廉価なセメントである。しかしながら、設計基準強度が 60N/mm² を超えるコンクリートの調合に N セメントを用いた場合、フレッシュコンクリートの粘性が極めて大きくなるため、練上がりまでに時間を要し、コンクリート打設時の施工性も低下する。また、水和発熱が大きくなり強度増進が小さくなるので、さらに多くのセメントの割り増しが必要となる。以上の理由から、N セメントの適応範囲の上限は、設計基準強度 60N/mm² 程度までである。今回使用する FA には、ワーカビリティの改善、水和発熱の抑制、長期強度の増進効果があることが知られている¹⁾。そのため、N セメントの調合に FA を混和材として使用することで、N セメントが適用できる設計基準強度の範囲を大きくできる可能性がある。そこで、今回の開発では 80N/mm² までを目標範囲とした。

FA を使用したコンクリートの研究および実施例につ

*技術研究所 **建築本部建築部

いては、普通強度の範囲ではみられるものの、高強度領域での研究報告は少ない。また、実用化に当たっては、フレッシュコンクリートの性状変化、部材に打設したコンクリートの構造体強度の確認が必要である。そこで、夏期、標準期、および冬期において生コン工場の実機プラントでコンクリートを製造し、模擬柱にコンクリートを打設する実験を計画した。

3. 実験概要

3.1 使用材料と調合

使用材料を表-1に、使用したFAの品質試験値を表-2に、コンクリート調合の一覧を表-3に示す。FAにはFAⅡ種でJASS5 M-401³⁾の品質基準に適合するものを使用した。Nセメントのみを用いた調合において、設計基準強度 60N/mm²に対応する水セメント比は一般的に27~29%となる。今回の実験では、Nセメントのみの調合の下限 W/C を27%とした(27FA00 調合)。FAを用いた調合は、設計基準強度 80N/mm²を目標範囲としつつ、Nセメントのみの調合と比較するため、27%を中心に水結合材比を23~33%とした。

FA 置換率については、強度発現や中性化抵抗性を考慮し、20%以下と設定されることが多い¹⁾。今回の開発ではセメントの使用量を抑え、よりCO₂の排出量を低減させたコンクリートにするため、置換率20%の他、30%も試験水準に加えた。

使用材料のCO₂排出量原単位(表-1)から算出した各調合の1m³当たりのCO₂排出量を表-3に示す。Nセメントのみの調合(表-3中のFA00)から、FAを20%置換することで約2割、30%の置換では約3割、CO₂の排出量が少ない調合となる。

41FA00は、33FA20のNセメントの単位量と同一とした調合である。33FA20は、41FA00にFAを外割り混入(細骨材置換)した調合となり、FAを外割り混入した場合についての影響を把握することを目的としている。

フレッシュコンクリートの管理目標値を表-4に示す。水結合材比23、27%のスランプフローは65±10cm、33%は60±10cmとした。

3.2 試験項目

試験項目を表-5に示す。FAを用いた調合については、フレッシュコンクリートの測定をコンクリートの練上がりから120分まで実施した。

FAを用いた調合の構造体強度については、打設した模擬柱からコアを採取し、強度試験により確認した。模擬柱は、断面1.0×1.0m、高さ1.0mの無筋コンクリートで、上下面を厚さ20cmの発泡スチロールで断熱した。

Nセメントのみの調合(FA00)の構造体強度については、JASS5T-606³⁾(簡易断熱養生供試体による構造体コンクリート強度の推定方法)に準拠した簡易断熱供

表-1 コンクリートの使用材料とCO₂排出量原単位^{*2)}

種別	記号	銘柄・産地等	物性値	CO ₂ 排出量原単位(kg-CO ₂ /t)
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度:3.16g/cm ³	766.6
混和材	FA	フライアッシュⅡ種 舞鶴産	密度:2.25g/cm ³	19.6
細骨材	S1	兵庫県西島産 砕砂	密度:2.58g/cm ³ 粗粒率:2.90	3.5
	S2	福岡県東谷鉾山産 石灰石砕砂	密度:2.69g/cm ³ 粗粒率:2.50	
粗骨材	G	兵庫県西島産 砕砂	密度:2.62g/cm ³ 実積率:58.0%	2.8
化学混和剤	SP	高性能 AE 減水剤	ポリカルボン酸系 密度:1.07g/cm ³	100~150

*CO₂排出量原単位:材料を1t生産する過程において排出されるCO₂の量

表-2 FAの品質試験値

	強熱減量 (%)	比表面積 (cm ² /g)	フロー値比 (%)	活性度数 (%)		メチレンブルー吸着量
				28日	91日	
JIS A 6201 or JASS5 M-401 品質基準値	4.0 以下	3000 以上	100 以上	80 以上	90 以上	—
夏期	2.1	3870	108	86	96	0.33
標準期	2.0	3510	109	82	108	0.44
冬期	2.2	3650	104	88	104	0.43

強熱減量、比表面積、フロー値比の品質基準値は JASS5 M-401²⁾

表-3 試験調合の一覧

記号	W/B (%)	FA 置換率 (%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)						1m ³ 当たりのCO ₂ 排出量(kg-CO ₂ /m ³)
				W	B		S1	S2	G	
					C	FA				
23FA20	23	20	28.8	160	557	139	381	265	880	435
23FA30		30	32.9		487	209	367	255	880	382
27FA00	27	0	27.0	165	611	0	467	325	838	474
27FA20		20	33.8		489	122	426	296	867	382
27FA30	30	38.6	428	183	415	288	867	337		
33FA00	33	0	33.0	170	515	0	500	348	849	400
33FA20		20	41.3		412	103	469	326	867	323
41FA00	41.3	0	41.3	412	0	511	355	891	322	

W:水(CO₂排出量原単位は0とした) B:結合材

表-4 フレッシュコンクリートの管理目標値

水結合材比	23%	27%	33%	41.3%
スランプフローまたはスランプ(cm)	65±10		60±10	21±2
空気量(%)	2.0±1.5		3.0±1.5	

表-5 試験項目

試験項目	内容
フレッシュ試験	スランプフロー(スランプ)、空気量、温度
経時試験	FA置換調合 0、45、90、120分
圧縮強度	標準養生、簡易断熱養生:7、28、56、91日
模擬柱	FA置換
1x1x1m	温度 コア強度
	調合 中央、端部 中央、端部:28、56、91日

試体により強度確認を行った。簡易断熱供試体は、厚さ200mmの発泡スチロールで6面断熱した養生箱で材齢7日まで保管し、その後現場封緘養生とした。

模擬柱、および簡易断熱供試体の温度履歴については、熱電対を取付け測定した。

4. 実験結果

4.1 フレッシュコンクリートの性状

Nセメントのみの調合では、フレッシュコンクリートの粘性が極めて大きくなるため、コンクリート打設時の施工性が劣る。しかし、FAで一部置換することにより粘性が抑えられ、水結合材比23%の調合においても模擬柱への打設が十分可能であった。フレッシュコンクリートの試験時のスランプフローの状況を写真-1に、模擬柱の打設状況と養生状況を写真-2に示す。

フレッシュコンクリートの試験結果の一例として夏期におけるスランプフローの経時変化を図-1に示す。スランプフローについては、90分まで目標範囲内にあった。120分では目標範囲を外れる調合もみられたが、高性能AE減水剤を後添加することによりスランプフローが回復することを確認した。なお、空気量については、120分まで目標範囲内にあり、時間経過に伴う変化が小さかった。

4.2 構造体コンクリートの温度

模擬柱と簡易断熱養生で計測したコンクリートの温度履歴の一例として、夏期における23FA20のデータを図-2に示す。模擬柱では、コンクリートを打込み後、約18時間で温度ピークに至り、中心部では90℃を超えた。簡易断熱養生の温度履歴は、模擬柱端部よりやや高い結果であった。

各季節ごとにおける模擬柱へのコンクリートの打込み温度と、柱中心部の最高温度を図-3に示す。夏期と冬期の最高温度には約30℃の違いがみられた。FA混入調合では23FA20が最も単位Nセメント量が多く、最高温度も最も高かった。

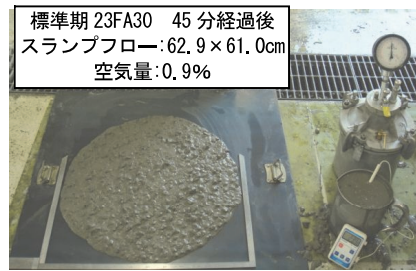


写真-1 フレッシュコンクリートの試験状況

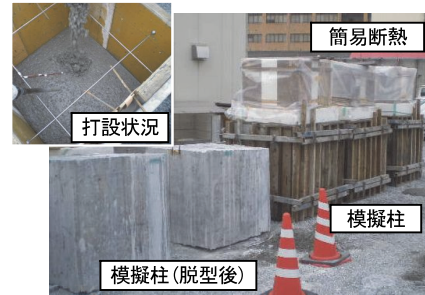


写真-2 模擬柱の打設および養生状況

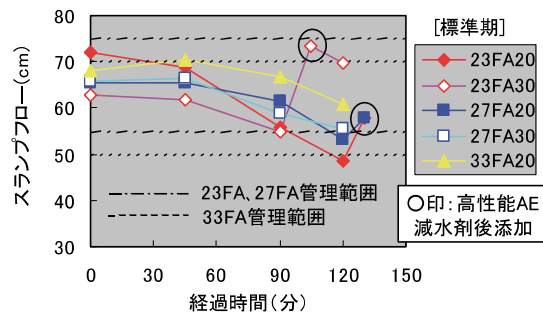


図-1 スランプフローの経時変化

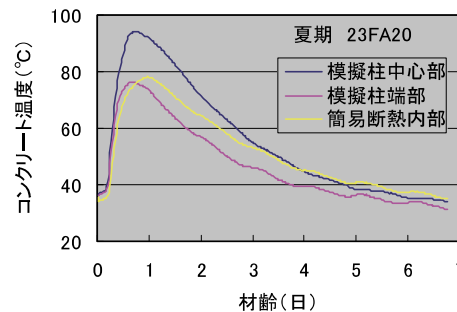


図-2 模擬柱と簡易断熱養生のコンクリートの温度履歴

簡易断熱供試体の温度測定結果から得られた夏期にお

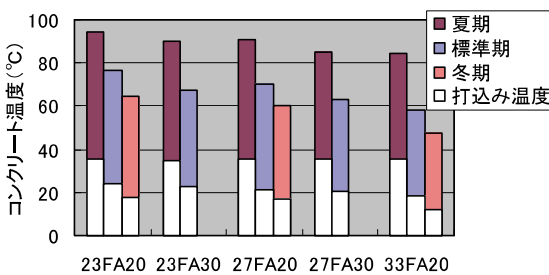


図-3 模擬柱へのコンクリートの打込み温度と、簡易断熱養生箱(柱中心部の最高温度)各調合の単位Nセメント

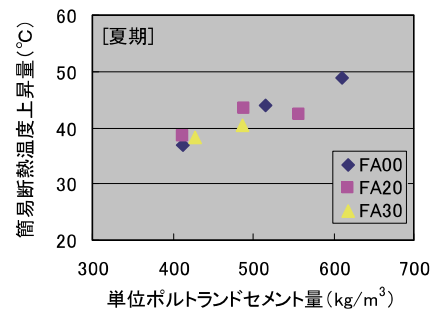


図-4 単位ポルトランドセメント量と簡易断熱供試体の温度上昇量の関係

ト量の関係を図-4に示す。単位 N セメント量が多いほど温度上昇量も大きくなる傾向がみられ、FA で置換した場合においても、その置換率に関わらず、温度上昇量は、単位 N セメント量に依存する傾向がみられた。すなわち、フライアッシュは発熱温度上昇にほとんど影響を与えないことがわかった。

4.3 圧縮強度

a. 標準養生と簡易断熱養生の強度発現傾向

標準期における標準養生と簡易断熱養生供試体の圧縮強度を図-5に示す。水結合材比 27%の標準養生において、N セメント量のみ 27FA00 と FA 置換調合 (27FA20、27FA30) を比較すると、N セメント量のみ調合のほうが初期強度の発現が大きい。長期強度の増進については、FA 置換調合のほうが大きく、高強度領域においても FA による長期強度の増進が期待できることが確認された。

簡易断熱養生においては、標準養生と比較して、FA 置換調合の初期強度の発現が大きい。初期材齢時に高温履歴を受けることによって FA のポゾラン反応が促進され、強度が増進したと考えられる。

材齢 7日と 91日における FA 置換率ごとのセメント水比と圧縮強度の関係を図-6に示す。図-6のグラフでは、FA20 と FA30 は、FA を外割り混入した場合の圧縮強度として表される。材齢 7日では FA00、FA20、FA30 に大きな違いはみられないが、材齢 91日では FA の混入率が大きいほど強度が大きくなる傾向が確認された。

b. FA 強度寄与率

FA 調合指針¹⁾に示されている FA を使用したコンクリートの強度と、水セメント比の関係式を式(1)に示す。式(1)中の強度寄与率 k について、既往文献⁴⁾に示されている算出方法により、その値を求めた。

$$F_{Fa} = a(C + kFa) / W + b \quad (1)$$

ここで、 F_{Fa} : フライアッシュを使用したコンクリートの調合強度(N/mm²)

C : 単位ポルトランドセメント量(kg/m³)

F_a : 単位フライアッシュ量(kg/m³)

W : 単位水量(kg/m³)

k : フライアッシュ強度寄与率

a, b : 実験係数(N/mm²)

標準養生供試体の圧縮強度試験結果から算出した k 値を図-7に示す。今回の実験結果から、標準期、冬期の k 値はほぼ同じであったが、夏期においてはやや大きい結果となった。夏期のコンクリートの練上がり温度は 32~36℃であったので、練上がり温度が高かったことが k 値に影響していると考えられる。

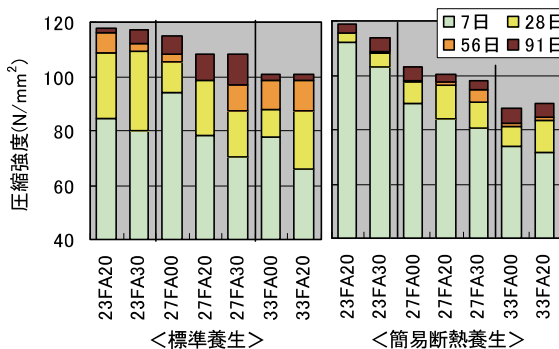


図-5 標準養生と簡易断熱養生供試体の圧縮強度 [標準期]

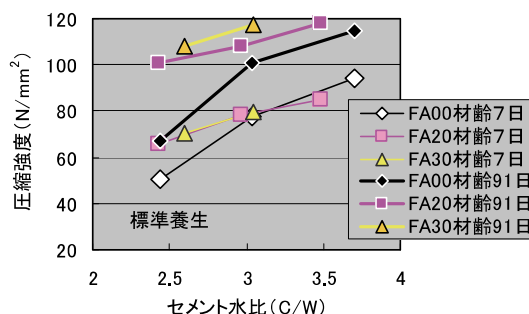


図-6 セメント水比と圧縮強度の関係

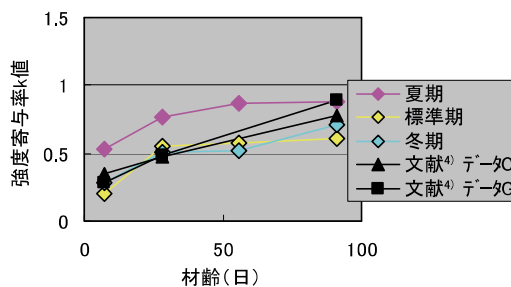


図-7 強度寄与率 k [標準養生供試体]

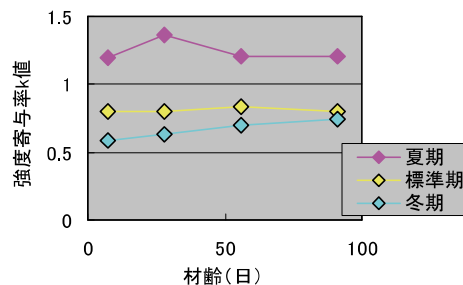


図-8 強度寄与率 k [簡易断熱養生供試体]

今回の実験で使用した FA と同等品質の FA を用いて得られている強度寄与率の文献⁴⁾データを併せて示す。今回の夏期の初期材齢の k 値は、文献データよりやや大きいものの、それ以外においては、文献データにおおよそ沿う結果であった。

簡易断熱養生供試体の圧縮強度試験結果から算出した

k 値を図-8に示す。簡易断熱養生は、標準養生に比べ初期材齢時からk値が大きく、標準期、夏期では材齢に伴う増進はみられなかった。k値は夏期が最も大きく、ついで標準期、冬期の順であり、初期材齢の養生温度が高いほど、k値は大きくなる傾向であった。夏期におけるFAの使用が特に有効であるといえる。

c. 構造体強度（コア強度）

模擬柱の夏期における91日コア強度と結合材水比の関係を図-9に示す。水結合材比27%では、Nセメントのみの27FA00より、FA置換割合のほうが強度発現が大きく、80N/mm²以上の強度が得られた。Nセメントを高強度領域に用いた場合、前述したようにセメントの水和発熱温度が高くなり、長期強度の増進が小さくなる。夏期においてはそれが顕著となる。Nセメントの一部をFAで置換した場合、Nセメントを減じた分、水和発熱温度の上昇が抑えられ、長期強度の増進に有利に働いたと考えられる。一方、FAについては、セメントの水和発熱による高温養生によりポズラン反応が促進され、強度増進に寄与し、Nセメントのみの27FA00より91日強度が大きくなったと考えられる。FAを30%置換した27FA30の圧縮強度が27FA00の強度を上回っており、CO₂の排出量が約3割少ない調合で、同等以上の構造体強度が得られた。

水結合材比23%の調合においては、約100N/mm²の構造体強度が得られた。

d. 構造体強度補正值（S値）

調合設計に必要な構造体強度補正值（S値）について検討するため、材齢28、56日の標準養生供試体強度と91日コア強度の差、₂₈S₉₁、₅₆S₉₁をそれぞれ求めた。91日コア強度と₂₈S₉₁の関係を図-10に、₅₆S₉₁との関係を図-11に示す。FA20とFA30のS値を比較すると、FA30のほうがやや小さい傾向にあった。FA20では、標準期と冬期はほぼ同等で、夏期が大きい傾向にある。

図-10に示す₂₈S₉₁においては、0N/mm²を下回る範囲が見られる。調合設計に用いるS値は0N/mm²以上と定められているため^{3)・5)}、調合設計に用いるS値としては、₅₆S₉₁のほうが合理的と考えられる。そこで、₅₆S₉₁を検討対象とすると、図-11から、設計基準強度80N/mm²に対する₅₆S₉₁の設定値としては、FA20調合の夏期では15N/mm²、標準期および冬期では10N/mm²が妥当と考えられる。FA30調合では、夏期で10N/mm²、標準期で5N/mm²が妥当と考えられる。

4.4 調合設計(水結合材比の試算)

夏期、標準期、および冬期の実験から得られた標準養生供試体強度と結合材水比との関係を近似式と併せて図-12に示す。Nセメントのみを用いたコンクリートについては、一般的に材齢28日の標準養生供試体強度で管理されるため、FA00については材齢28日強度のデータを図中にプロットした。FAを用いたコンクリ

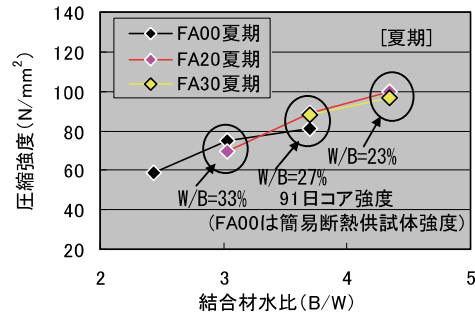


図-9 結合材水比(B/W)と91日コア強度の関係 [夏期]

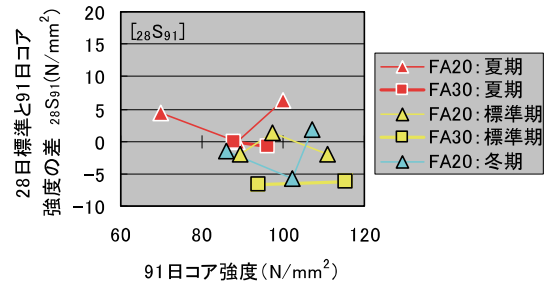


図-10 91日コア強度と₂₈S₉₁の関係

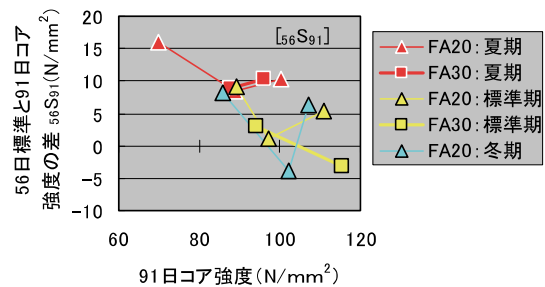


図-11 91日コア強度と₅₆S₉₁の関係

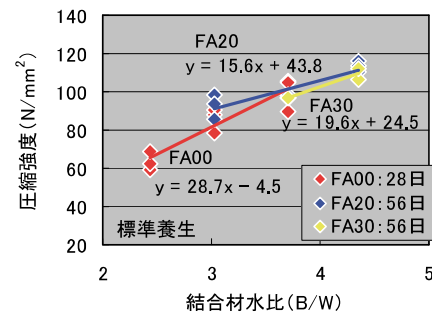


図-12 結合材水比(B/W)と標準養生供試体強度の関係

トについては28日以降も強度増進が期待できるため、FA20、FA30については材齢56日強度のデータをプロットした。水結合材比33~27%において、FA置換割合の材齢56日強度は、FA00調合の材齢28日強度と同等以上となり、FA置換割合のコンクリートは、標準養生供試体の強度発現傾向からも、材齢56日強度での管

理が合理的であると考えられる。

実験結果に基づき、FA を用いた設計基準強度 80N/mm² の水結合材比を試算した。調合強度式⁵⁾を式(2)に示す。供試体の管理材齢を 56 日として、S 値は₅₆S₉₁とした。調合計算に用いた FA20 と FA30 調合の₅₆S₉₁、および水結合材比の計算結果を表一6に示す。水結合材比については、図一12 に示した結合材水比と圧縮強度の近似式に調合強度を代入して、算出した。FA30 調合の S 値が FA20 調合より小さかったため、FA30 調合の水結合材比は FA20 調合よりわずかに大きい結果となった。

$${}_H F_m = (F_c + m S_n) + 2.0 \sigma \quad (2)$$

$$\sigma = 0.1 (F_c + m S_n)$$

ここで、 ${}_H F_m$: 高強度コンクリートの調合強度 (N/mm²)

F_c : 設計基準強度 (N/mm²)

$m S_n$: 標準養生した供試体材齢 m 日における圧縮強度と構造体コンクリートの材齢 n 日における圧縮強度の差による構造体強度補正值 (N/mm²)。ただし、 $m S_n$ は 0 以上の値とする。ここでは₅₆S₉₁とする。

σ : コンクリートの圧縮強度の標準偏差 (N/mm²)

表一6 設計基準強度 80N/mm² の水結合材比 (W/B) の計算結果

	FA20		FA30	
	₅₆ S ₉₁ (N/mm ²)	W/B (%)	₅₆ S ₉₁ (N/mm ²)	W/B (%)
夏期	15	24.9	10	25.7
標準期	10	27.4	5	27.7
冬期	10	27.4	—	—

5. まとめ

普通ポルトランドセメントの使用量を抑えて CO₂ の排出量を低減した環境配慮型高強度コンクリートを開発するため、水結合材比 23~33%の範囲について、FA を 20 および 30%置換した高強度コンクリートを実機ミキサで製造し、フレッシュ性状および圧縮強度特性に関する試験を実施した。得られた結果を以下に示す。

- i. 普通ポルトランドセメントの一部を FA で置換することにより、フレッシュコンクリートの粘性が抑えられ、水結合材比 23%の調合においても混練、および模擬柱への打設が可能であった
- ii. FA の混入により構造体強度が増進し、水結合材比 23%の調合において 100N/mm² の構造体強度が得られた
- iii. FA 置換調合のコンクリートの強度管理は、材齢 56 日が合理的である
- iv. 設計基準強度 80N/mm² 高強度コンクリートにお

いて、普通ポルトランドセメントをベースセメントとし、CO₂ の排出量を約 3 割低減する実施適用可能なコンクリート調合を得た

6. あとがき

FA には、FA II 種で JASS5 M-401 の品質基準に適合するものを使用するが、火力発電所や使用した石炭によって品質が異なるため、FA の産地ごとにフレッシュ性状や強度発現性を確認する必要があるものの、今回の実験の範囲では、普通ポルトランドセメントをベースとして 80N/mm² までの調合設計が可能であることが確認できた。一般的に 60N/mm² を超える場合には、普通ポルトランドセメントより割高となる低熱または中庸熱ポルトランドセメントが用いられているため、80N/mm² クラスの高強度領域においては、CO₂ の排出量の低減のみならず、FA の供給体制が整備されている環境であれば、コスト低減の可能性も見込める。今後は、構造体強度補正值の蓄積を進め、さらに調合の合理化を図りつつ、現場適用に備えたい。

【参考文献】

- 1) 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」、2007.10
- 2) 土木学会、「コンクリートの環境負荷評価」、コンクリート技術シリーズ、No.44
- 3) 日本建築学会、「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事 2009」、2009.2
- 4) 大久保敏彦、中村成春、梶田佳寛、手島則夫ほか、「分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートに関する研究 その2 強度予測式の作成」、日本建築学会大会梗概集(1997)、pp61-62、1997.9
- 5) 日本建築学会、「高強度コンクリート施工指針・同解説」、2013.11