

論文 フライアッシュを使用したマスコンクリートの強度発現性状 およびその強度管理方法に関する一提案

船本 憲治*1

要旨:フライアッシュをセメントの45%まで内割使用したマスコンクリートの強度発現性状およびその強度管理方法に関して検討した。その結果、マスコンクリートの強度管理方法として、1)構造体コンクリート強度の管理材齢は91日とすることを推奨する、2)フライアッシュ置換率15~30%のコンクリートおよびフライアッシュセメントB種を用いたコンクリートの強度検査は材齢28日の標準水中養生供試体強度を用いる、3)フライアッシュ置換率45%のコンクリートの強度検査は材齢91日の標準水中養生供試体強度を用いることを提案した。

キーワード:フライアッシュ, マスコンクリート, 強度管理, 強度発現性状

1. はじめに

全国の石炭火力発電所等から発生する石炭灰の量は、今後さらに増加し、2010年には1,090万トンに増大すると予想されており、石炭灰は、地球規模の環境保護あるいは資源の有効利用の観点から大量かつ有効に利用する方法を確立する時期にきているといえる。そこで、本論は、フライアッシュの大量利用が見込まれるマスコンクリートに着目し、フライアッシュを結合材としてセメントの45%まで内割使用したマスコンクリートの強度発現性状およびその強度管理方法について検討するとともに、その合理的な強度管理方法の提案を行うものである。

2. 使用材料および調査

使用材料を表-1および表-2に示す。フライアッシュは、九州地区の700MW級海外炭専焼ボイラより発生した分級細粉であり、すべてJIS規格のII種に適合している。なお、表-2のAは、後述の簡易断熱養生試験体および模擬試験体Iに使用した灰であり、Bは模擬試験体IIおよび基礎マットスラブ工事の夏期に、Cは同じく冬期に使用した灰である。表-3に調査表を示す。今回の調査は、基礎マットスラブの設計基準強度21N/

表-1 使用材料一覧表

材料名	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント (密度3.15g/cm ³)
粗骨材	芦北産砕石(砂岩), 最大骨材寸法40mm (表乾密度2.65g/cm ³ , 吸水率0.47%)
細骨材	粗砂 崎戸産海砂 (表乾密度2.58g/cm ³ , 吸水率2.13%)
	細砂 八代産海砂 (表乾密度2.60g/cm ³ , 吸水率2.45%)
水	水道水
混和剤	A E減水剤(リゲニックス®)系 空気量調整剤(7-エチル系)

表-2 フライアッシュの品質

項目	分級細粉			
	A(一般)	B(夏期)	C(冬期)	
二酸化けい素 (%)	53.1	67.5	62.4	
湿分 (%)	0.1	0.2	0.1	
強熱減量 (%)	1.7	1.6	1.9	
密度 (g/cm ³)	2.40	2.26	2.30	
粉末度	45μmふるい残量 (%)	2	3	5
	比表面積 (cm ² /g)	3,950	3,870	3,950
フロー値比 (%)	108	103	104	
活性度指数 (%)	材齢28日	88	85	80
	材齢91日	107	101	92

*1九州電力(株)北九州発電所建設所土木建築課長 工修 (正会員)

mm² (管理材齢 91 日) を考慮し、水結合材比 (W/B) は 55% とした。また、フライアッシュ置換率 (FA/B) は 0, 30, 45% の 3 水準とした。なお、目標スランプおよび空気量は 15cm と 4% とし、それぞれがそれらの値を満足するように、単位水量および空気量調整剤で調整を行った。

表-3 調合表

W/B (%)	FA/B (%)	S/A (%)	単位水量 (kg/m ³)	A E 減水剤 (B×%)	空気量調整剤 (B×%)
55	0	44	185	1.0	0.003
	30	44	178	1.0	0.009
	45	45	175	1.0	0.009~0.015

3. 試験項目および方法

簡易断熱養生試験体は、φ 12.5cm×H 25cm の金属製型枠を用いて作成し、図-1 に示すような容器に入れ、熱伝対により試験体中心温度を測定するとともに材齢 7, 28, 91 日の圧縮強度を測定した。模擬試験体は、基礎マットスラブを想定し、図-2 に示すように熱伝対により各点の温度を測定するとともに材齢 28, 91, 365 日のコア供試体 (φ 12.5cm×H 25cm) の圧縮強度を測定した。なお、1m×1m×H 2.6m の側面 (4 面) には発砲スチロールを巻きその上から木製型枠を設置した。また、コンクリートの製造は基礎マットスラブ本体と同じレディミクストコンクリートを用いた。

一方、基礎マットスラブ本体 (70m×70m×H 2.6m) の施工は、9 月 (夏期) から 12 月 (冬期) にかけて W/B=55%, FA/B=45% で実施し、熱伝対と歪み計により基礎マットスラブの各深さレベルでの温度と歪みを測定するとともに材齢 91 日のコア供試体 (φ 12.5m×H 25cm) の圧縮強度を測定した。(コンクリートのフレッシュ性状および発熱性状については文献 1) を参照のこと。)

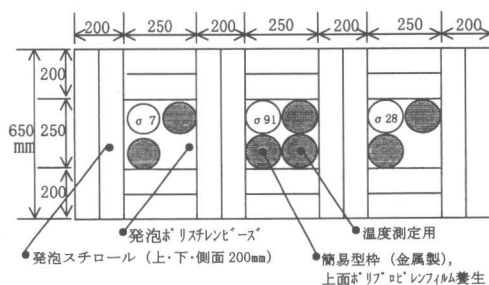
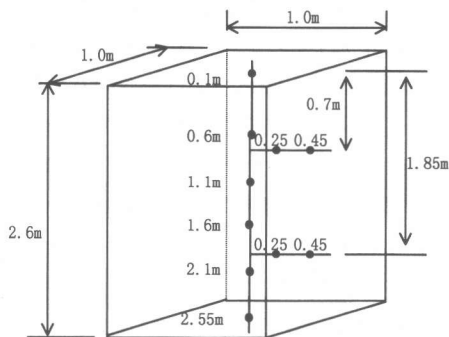


図-1 簡易断熱養生試験体 (φ 12.5cm×H 25cm)



- ※) ●は、熱伝対の設置位置
- ※) 側面 (4 面) に発砲スチロールを巻き
- ※) 数字は、縦方向は上面から、横方向は中心からの距離

図-2 模擬試験体 (1m×1m×H 2.6m)

表-4 圧縮強度試験結果

試験体名	W/B (%)	FA/B (%)	打設時期	最高温度 (°C)	コア直径 (cm)	コア数 (体)	高温履歴試験体強度 (N/mm ²)				供試体直径 (cm)	供試体数 (体)	標準水中養生供試体強度 (N/mm ²)		
							7日	28日	91日	365日			7日	28日	91日
簡易断熱養生試験体	55	0	一般	50.6	12.5	3	22.8	26.2	29.5	—	12.5	3	24.4	32.4	35.4
		30		40.0		3	17.7	24.8	32.2	—		3	16.4	26.9	34.2
		45		34.6		3	12.8	19.9	28.0	—		3	11.1	19.6	27.5
模擬試験体 I	55	0	一般	68.2	12.5	5	—	20.7	24.5	30.0	12.5	3	—	32.4	35.4
		30		56.0		5	—	27.7	30.8	35.2		3	—	26.9	34.2
		45		49.8		5	—	22.2	27.8	32.9		3	—	19.6	27.5
模擬試験体 II	55	45	夏期	58.7	12.5	5	—	—	22.8	28.8	12.5	3	—	17.5	22.4
				冬期		43.3	5	—	—	27.3		43.4	3	—	22.4
基礎スラブ	55	45	夏期	64.7	12.5	5	—	—	23.1	—	12.5	3	—	17.5	22.4
				冬期		49.7	5	—	—	28.8		—	3	—	22.4

4. 強度発現性状

簡易断熱養生試験体, 模擬試験体, 基礎マットスラブにおいて, 初期高温履歴を受けたコンクリートおよび同一調合で標準水中養生したコンクリートの圧縮強度試験結果を表-4に示す。

簡易断熱養生および標準水中養生したコンクリートの材齢と圧縮強度の関係を図-3に示す。フライアッシュ置換率 45%の場合の 28, 91 日強度は, 簡易断熱養生と標準水中養生で同程度である。しかし, 無置換の場合は, 簡易断熱養生と標準水中養生で強度発現には大きな差異があり, 簡易断熱養生の場合は標準水中養生の場合より強度発現が小さい。

模擬試験体, 簡易断熱養生試験体, 標準水中養生供試体における材齢と圧縮強度比 (材齢N日強度/材齢 28 日強度) の関係を図-4に示す。材齢 7 日の強度発現は, 簡易断熱養生の方が標準水中養生より大きく, また, フライアッシュ置換率が大きくなるほど小さい。一方, 材齢 28 日から 91 日までの強度の伸びは, 簡易断熱養生試験体と標準水中養生試験体に大きな差異はなく, フライアッシュ置換率が大きくなるほど大きく, 無置換の場合は小さくなっている。ただし, 模擬試験体では, 材齢 365 日までの強度増進は大きいものの, フライアッシュ置換率 30%と無置換で長期強度の伸びが逆転する結果になった。

フライアッシュ置換率の影響を検討するために, フライアッシュ置換率と圧縮強度比 (各置換率毎の強度/無置換の場合の強度) の関係を図-5に示す。初期高温履歴を受けたコンクリート (模擬試験体・簡易断熱養生試験体) の圧縮強度比は, フライアッシュ置換率 30%までは増加しほぼ 1 以上である。しかし, フライアッシュ置換率が 30%を超えると圧縮強度比は低下する傾向にあるが, フライアッシュ置換率 45%でも, 初期高温履歴を受けたコンクリートの圧縮強度比は材齢 91 日以降においてはほぼ 1 以上である。一方, 標準水中養生したコンクリートの圧縮強度比は, 材齢 91 日までの範囲では, フライアッシュ置換率の増加とともに低下する傾向にある。このこと

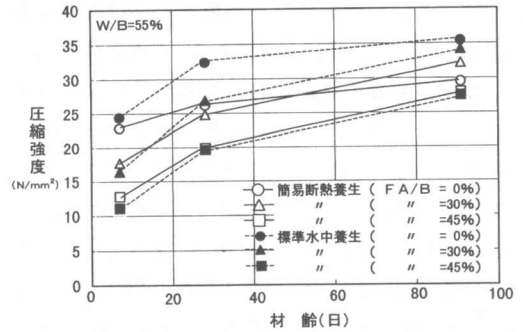


図-3 材齢と圧縮強度の関係

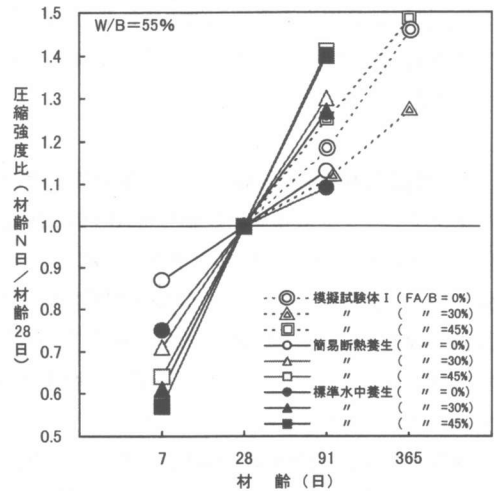


図-4 材齢と圧縮強度比 (材齢N日強度/材齢 28 日強度) の関係

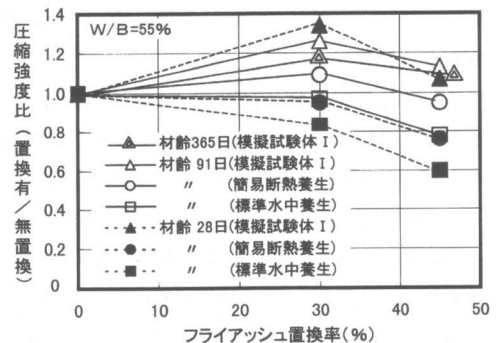


図-5 フライアッシュ置換率と圧縮強度比 (各置換率毎の強度/無置換の場合の強度) の関係

は、フライアッシュはマスコンクリートのように初期に高温履歴を受ける環境下における強度発現性状において特に有効であり、模擬試験体および簡易断熱養生試験体の強度発現性状から考えると、①フライアッシュ置換率が0, 30, 45%の中では30%が最適であること、②フライアッシュ置換率45%でも無置換の場合より有効であることを示している。また、材齢別に考えると、模擬試験体(28, 91, 365日)の圧縮強度比の差は小さいが、簡易断熱養生試験体および標準水中養生供試体の圧縮強度比は、材齢91日の方が材齢28日より大きい。これらのことは、フライアッシュのポゾラン反応が長期に亘り進行しているとともに、模擬試験体のように初期に特に高温履歴を受ける環境下においてその反応が早く進行しやすいことを示している。

5. 標準水中養生供試体による強度管理の検討
 フライアッシュ置換率と圧縮強度比(初期高温履歴試験体91日強度/標準水中養生供試体91日強度)の関係を図-6に示す。圧縮強度比は、無置換では小さく、フライアッシュ置換率が大きくなるほど大きくなり、フライアッシュ置換率45%でほぼ1になっている。

フライアッシュ置換率45%におけるコンクリートの最高温度と圧縮強度比(初期高温履歴試験体91日強度/標準水中養生供試体91日強度)の関係を図-7に示す。圧縮強度比は、コンクリートの最高温度に関係なくほぼ1になっており、また、初期高温履歴試験体の91日強度はすべて設計基準強度(管理材齢91日)を満足していた。

現在、建築工事標準仕様書(JASS5)では、マスコンクリートにおける構造体強度の管理は標準水中養生で実施することになっており、フライアッシュ置換率45%では問題ないが、フライアッシュ置換率0~30%では、適切な強度補正が必要なることを示している。この結果は文献2)のフライアッシュセメントB種を用いたマスコンクリートの構造体実験結果と一致する。なお、今回の実験では、管理材齢91日において、フライアッ

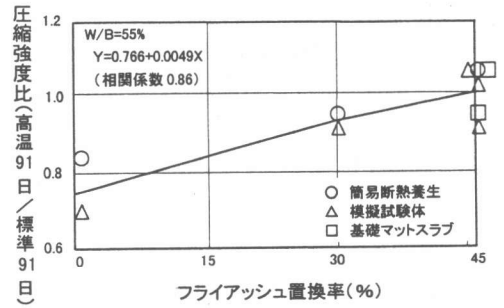


図-6 フライアッシュ置換率と圧縮強度比(初期高温履歴試験体91日強度/標準水中養生供試体91日強度)の関係

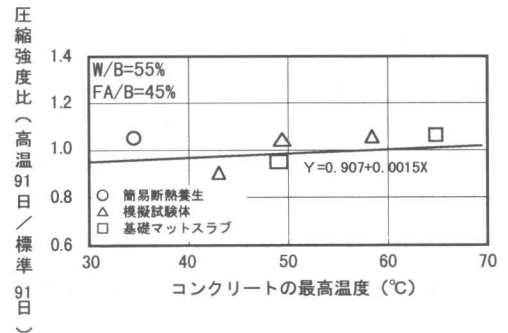


図-7 コンクリートの最高温度と圧縮強度比(初期高温履歴試験体91日強度/標準水中養生供試体91日強度)の関係

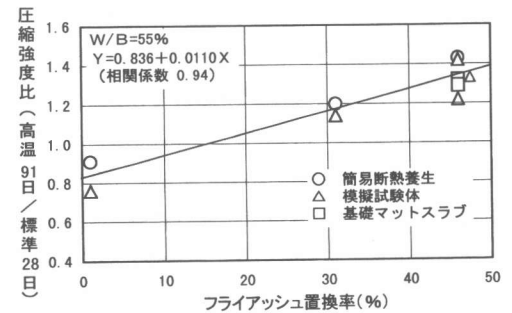


図-8 フライアッシュ置換率と圧縮強度比(初期高温履歴試験体91日強度/標準水中養生供試体28日強度)の関係

シユ無置換の場合で2~3割、フライアッシュ置換率30%の場合で1割程度の強度割増が必要となる結果になった。

文献2)によると、フライアッシュセメントB種を用いたマスコンクリートの構造体実験結果が

ら「設計基準強度が 36 N/mm² 以下の場合、材齢 28 日時の標準水中養生供試体強度が設計基準強度を満たしていれば、構造体コンクリート強度は材齢 91 日までには必ず設計基準強度を満足する」と結論付けられている。そこで、今回の実験結果におけるフライアッシュ置換率と圧縮強度比（初期高温履歴試験体 91 日強度/標準水中養生供試体 28 日強度）の関係を図-8 に示す。フライアッシュ置換率と圧縮強度比には良い相関を持った直線関係が成立し、フライアッシュ置換率 15~20%程度（フライアッシュセメントB種相当）では上記文献2)の結果とも一致する。

6. 積算温度による強度管理の検討

簡易断熱養生試験体および模擬試験体におけるフライアッシュ置換率 30, 45%（最高温度 34.6~56.0°C）における積算温度と圧縮強度の関係を図-9 に示す。なお、ここで積算温度はコア採取位置の平均温度の積算とし、簡易断熱養生試験体はレディミクストコンクリートを用いた実機試験の前に実施した室内試験（傾胴式ミキサー150リットル）の結果も取り入れた。圧縮強度は積算温度の対数と直線的な関係があり、このことは初期に高温履歴を受けたフライアッシュコンクリートの強度が積算温度により良く推定できることを示している。しかし、フライアッシュ無置換の場合（最高温度 50.6~68.2°C）は、図-9 のような相関は認められなかった。また、フライアッシュ置換率 45%の基礎マットスラブの施工の場合（最高温度 49.7~64.7°C）でも、図-9 のような相関は認められなかった。

このことは、初期にあまりにも高い温度履歴を受けると、圧縮強度と積算温度の対数との直線的な関係が得られなくなることを示しており、今回は水結合材比 55%だけの実験結果であるが、その最高温度は 60°C程度と考えられる。

7. 強度管理方法に関する一提案

JASS5 では、マスコンクリートにおける構造体コンクリート強度推定のための圧縮強度試験用

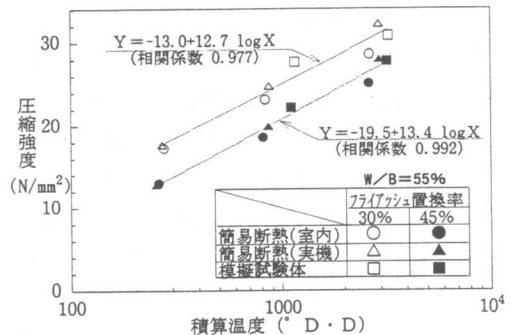


図-9 簡易断熱養生試験体・模擬試験体（最高温度 34.6~56.0°C）における積算温度と圧縮強度の関係

供試体の養生は、標準水中養生によることとしている。しかし、フライアッシュをセメントの 45%まで内割使用したマスコンクリートにおける今回の試験結果および文献2)の結果によると、標準水中養生供試体強度が設計基準強度を満足していても、マスコンクリートの構造体強度が設計基準強度を満たしていないことがあり、JASS5 の強度管理に問題があることが判明した。そこで、フライアッシュをセメントの 45%まで内割使用したマスコンクリート（設計基準強度 36N/mm² 以下）の一つの強度管理方法として文献2)を参考にし以下を提案する。

- 構造体コンクリート強度の管理材齢は、材齢 91 日とすることを推奨する。
- フライアッシュ置換率 15~30%のコンクリートおよびフライアッシュセメントB種を使用したコンクリートの強度検査は、材齢 28 日の標準水中養生供試体強度を用いる。
- フライアッシュ置換率 45%のコンクリートの強度検査は、材齢 91 日の標準水中養生供試体強度を用いる。

8. まとめ

フライアッシュを結合材としてセメントの 45%まで内割使用したマスコンクリートの強度発現性状を分析した結果、フライアッシュの有効性が

確認でき、下記の結論を得た。

- (1) フライアッシュは、マスコンクリートのように初期に高温履歴を受ける環境下における強度発現性状において特に有効であり、模擬試験体および簡易断熱養生試験体の強度発現性状から考えると、フライアッシュ置換率 0, 30, 45% の中では 30% が最適であり、フライアッシュ置換率 45% でも無置換の場合より有効である。一方、標準水中養生したコンクリートの圧縮強度比（置換有/無置換）は、フライアッシュ置換率の増加とともに低下する傾向にある。
- (2) 圧縮強度比（初期高温履歴試験体 91 日強度/標準水中養生供試体 91 日強度）は、無置換では小さくフライアッシュ置換率が大きくなるほど大きくなり、フライアッシュ置換率 45% ではほぼ 1 になるとともに、フライアッシュ置換率 45% の初期高温履歴試験体 91 日強度はすべて設計基準強度（管理材齢 91 日）を満足していた。従って、マスコンクリートにおける構造体強度の管理を標準水中養生供試体で実施するときの強度補正は、フライアッシュ置換率 45% の場合はしなくてもよいが、フライアッシュ置換率 30% 以下では適切な補正を行う必要がある。
- (3) フライアッシュ置換率と圧縮強度（初期高温履歴試験体 91 日強度/標準水中養生供試体 28 日強度）は無置換では小さく、フライアッシュ置換率が大きくなるほど大きくなり、両者には良い相関を持った直線関係が成立し、フライアッシュ置換率 15% 程度以上では 1 以上になる。このことは、フライアッシュを使用したマスコンクリートの構造体強度の管理材齢は 91 日とするのが望ましく、その強度管理は、フライアッシュ置換率 15% 程度以上では、28 日標準水中養生供試体により安全側で実施できることを示している。
- (4) 圧縮強度は積算温度の対数と直線的な関係があり、このことは初期に高温履歴を受けたフライアッシュコンクリートの強度が積算温度

により良く推定出来ることを示している。しかし、このような相関は、初期にあまりにも高い温度履歴を受けると得られなく、今回の水結合材比 55% だけの実験結果であるが、その最高温度は 60°C 程度であると考えられる。

- (5) 日本建築学会 JASS5 では、マスコンクリートにおける構造体コンクリート強度推定のための圧縮強度試験用供試体の養生は、標準水中養生によることとしている。しかし、フライアッシュをセメント 45% まで内割使用したマスコンクリートにおける今回試験結果および既往文献の結果によると、標準水中養生供試体強度が設計基準強度を満足していても、マスコンクリートの構造体強度が設計基準強度を満たしていないことがあることが判明した。そこでフライアッシュをセメントの 45% まで内割使用したマスコンクリート（設計基準強度 36N/mm² 以下）の 1 つの強度管理方法として文献 2）を参考にし以下を提案する。
 - a) 構造体コンクリート強度の管理材齢は、材齢 91 日とすることを推奨する。
 - b) フライアッシュ置換率 15~30% のコンクリートおよびフライアッシュセメント B 種を使用したコンクリートの強度検査は、材齢 28 日の標準水中養生供試体強度を用いる。
 - c) フライアッシュ置換率 45% のコンクリートの強度検査は、材齢 91 日の標準水中養生供試体強度を用いる。

参考文献

- 1) 船本憲治, 宝口繁紀, 笹原厚: フライアッシュを使用したマスコンクリートの発熱および強度発現特性, 日本建築学会構造系論文集, 第 540 号, pp. 1~6, 2001. 2
- 2) 川口徹, 大池武: マスコンクリートの強度管理方法に関する一提案, 日本建築学会技術報告集, 第 10 号, pp. 5~9, 2000. 6