

論文 フライアッシュを広範に内割置換したコンクリートの圧縮強度の簡易予測式

張 文博*¹・吉武 勇*²・齊藤 直*³

要旨: JIS II 種およびそれに相当するフライアッシュ (FA) をセメントに内割置換したコンクリートの圧縮強度発現を定式化するため, 国内外の文献調査を通じて, 標準養生下における材齢・置換率ごとに強度特性を求めた。FA の質量置換率 0~50%と広範囲を対象に, 材齢 7 日の圧縮強度に対する材齢 28・91 日の強度比を求め, FA 置換率との相関性について考察した。さらに様々な材齢における強度比を用いて, Goral 曲線による回帰を行い, 若材齢から長期材齢までの圧縮強度発現の簡易予測式を提案した。

キーワード: 簡易予測式, 圧縮強度, フライアッシュ, Goral 曲線, 置換率

1. はじめに

コンクリートの強度発現性は, 安全かつ効率的な施工計画および脱枠の管理等に重要な情報である。強度発現性は, 使用する材料や配合・製造方法によって異なるばかりでなく, 養生・環境温度によっても影響を受ける。特に, 環境・経済的観点から積極的な使用が望まれるフライアッシュ (以下, FA と略記) においては, セメントに一部代替置換した場合, コンクリートの初期強度発現が緩慢となることが知られ, その強度発現性を予め予測しておくことが望まれる。

FA をセメントに対して質量置換したコンクリート (以下, FA コンクリート) では, 実質的な単位セメント量の低減による発熱抑制効果が期待でき, さらに FA の主成分が水和生成物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応して, 密実に組織形成するため長期的に強度増進がみられることが特徴である。一方で, FA の構成成分のバラツキ, 発熱減量, 粒径・粒径分布および養生期間における湿潤状態などが FA コンクリートの強度発現性に少なからず影響することが知られている。こういった影響因子を踏まえた上で, これまでのいくつかの研究では, それぞれの観点から FA コンクリートの強度の予測式が提案されてきた¹⁾⁴⁾。これらの予測式は, (a) 初期強度だけを対象としたもの¹⁾²⁾, (b) 品質が一定の FA だけを用いたもの²⁾³⁾, (c) FA 質量置換率の範囲が狭いもの⁴⁾, など様々であるが, いずれの予測式も, その適用範囲が限定的であり, 且つその取扱いも簡便なものではなかった。

そこで本研究では, できるだけ広範な FA 置換率のコンクリートの強度予測が行えるよう, 国内外の文献調査を基に, その強度発現特性を整理し, FA コンクリートの簡便な強度予測式 (以下, 簡易予測式) を作成した。な

表一 1 強度分析に用いた供試体の形状と寸法

形状	寸法 (mm)	参考文献
円柱	$d75 \times h150$	19,42
	$d100 \times h200$	7-11,14,16,23-25,28,30-41,43,44
	$d150 \times h300$	12-13,15, 17,25,27
立方体	$71 \times 71 \times 71$	20
	$100 \times 100 \times 100$	21,22,26,29
	$150 \times 150 \times 150$	18,27

お, 本論文で対象とする FA コンクリートは, JIS II 種またはそれに準じる FA と普通ポルトランドセメントを用いたものである。

2. 圧縮強度データの分析

2.1 圧縮強度データ

本論文で使用する圧縮強度データの一部は, 文献に記載される数値を直接引用したが, その多くはグラフなどから読み取った値である。本論文で用いた圧縮強度データは, 次に示す条件を基に収集したものである。

- i) 標準養生を行った一般構造用コンクリートの強度データを対象とする。吹付けコンクリートまたは繊維コンクリート等の特殊コンクリートは対象外とする。
- ii) JIS A6201 に規定される II 種相当の FA を用いたコンクリートを対象とする。ただし, 一部の FA では, その品質が規定値より若干はずれているものも含まれている。
- iii) 粉体材料として普通ポルトランドセメントと FA だけを用いたコンクリートを対象とする。また対象とするコンクリートは, セメントに対して FA 質量置換率を 0

*1 山口大学大学院 理工学研究科 修(工) (正会員)

*2 山口大学大学院 理工学研究科准教授 博(工) (正会員)

*3 (株)エネルギア・エコ・マテリア 技術部長 博(工) (正会員)

～50%までとする。FA 無置換コンクリート以外、置換率の値を±2.5%の範囲にまとめて分類した。

2.2 供試体形状・寸法の校正

本研究で対象としたコンクリートの圧縮強度試験時に用いられた供試体は表-1に示す $d75\text{mm} \times h150\text{mm}$, $d100\text{mm} \times h200\text{mm}$, $d150\text{mm} \times h300\text{mm}$ の円柱状 (d : 直径, h : 高さ) のものと、一辺が 71mm, 100mm, 150mm 長の立方体状の供試体の計 6 種類である。供試体の圧縮強度におよぼす形状・寸法の影響を勘案するため、図-1に示す手順によりすべての強度データを $d100\text{mm} \times h200\text{mm}$ 円柱の圧縮強度に換算した。以下にその手順について詳述する。

まず、既往の研究⁵⁾で提案されている式(1)を用いて、形状が同じで寸法の異なる供試体を用いた圧縮強度を推定した。すなわち、71mm および 100mm 長の立方体の圧縮強度から 150mm 長の立方体の圧縮強度に、あるいは $d75\text{mm}$ 円柱から $d100\text{mm}$ 円柱の圧縮強度に換算した。

$$\frac{f'}{f'_0} = \left(\frac{V}{V_0} \right)^{\frac{-1}{\beta+1}} \quad (1)$$

ここに f' , f'_0 : 圧縮強度, V , V_0 : 供試体の体積, β : 材料定数 ($\beta=27$) を表す。

さらに本研究では、既往の研究⁶⁾を参考に、150mm 長の立方体の圧縮強度から $d150\text{mm}$ 円柱の圧縮強度に換算する式(2)を用いて円柱の圧縮強度を推定した。

$$f'_{c150} / f'_{d150} = 0.97 / 0.76 \quad (2)$$

ここに、 f'_{c150} と f'_{d150} は、それぞれ 150mm 立方体と $d150\text{mm}$ 円柱供試体による圧縮強度 (MPa) を表す。

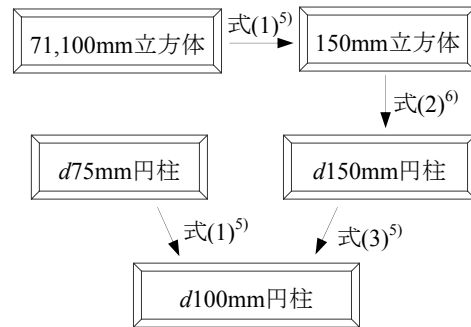


図-1 形状寸法が異なる供試体の圧縮強度の校正

さらに、 $d150\text{mm}$ 円柱の圧縮強度から $d100\text{mm}$ 円柱の圧縮強度に換算するため、既往の研究⁵⁾で提案されている式(3)を用いた。

$$f'_{d150} / f'_{d100} = -0.000857 f'_{d100} + 1.008244 \quad (3)$$

上式において、 f'_{d100} は $d100\text{mm} \times h200\text{mm}$ の圧縮強度 (MPa) を表すが、以降は f' と略記し、下添字は材齢 (日) を示すものとする。以下に示す圧縮強度は、 $d100\text{mm} \times h200\text{mm}$ に相当する圧縮強度に換算したものである。

2.3 データの分析方法

本研究で調査した文献の FA コンクリートは、5.60～96.4MPa と様々な強度レベルにある。そこで、本研究では FA コンクリートの強度レベルの相違を低減するため、基準材齢(7日)の圧縮強度に対する各材齢の強度比を用いてデータ分析を行った。一例として、無置換と FA コンクリートにおける f'_{91} / f'_7 (材齢 7日圧縮強度に対する材齢 91日の強度比) の結果を図-2に示す。同図によると、無置換コンクリート f'_{91} / f'_7 の値は概ね 1.0～2.0 内にあるが、FA コンクリートでは 1.0～4.0 と広範囲に分布している。これは、FA コンクリートの初期強度が比較的小さく、

表-2 置換率ごとの圧縮強度比

r (%)	f'_{28} / f'_7				f'_{91} / f'_7				f'_{91} / f'_{28}	参考文献
	Ave	Max	Min	SD	Ave	Max	Min	SD		
0	1.31	1.77	1.10	0.07	1.45	1.89	1.10	0.07	1.12	7-10,13,14,16,18-24,26,27,28-32,34-36,38-44
10	1.40	1.59	1.25	0.06	1.75	2.04	1.54	0.07	1.27	15,17,25,28,31
15	1.41	1.67	1.18	0.06	1.69	2.48	1.36	0.08	1.28	8,10,15,24,25,30,36,39,40
20	1.45	2.24	1.21	0.09	1.80	2.61	1.35	0.09	1.29	7,8,15,21,24-26,28,29,31-35,41,42,44
25	1.48	2.08	1.26	0.07	1.92	2.79	1.49	0.08	1.31	11,15,17,20,21,24,30,40
30	1.45	1.86	1.24	0.08	1.86	2.82	1.49	0.09	1.30	7,8,10,15,17,22-25,27,28,33-35,38
35	1.55	1.78	1.36	0.06	2.00	2.62	1.66	0.08	1.32	8,17,19,42,43
40	1.60	1.79	1.40	0.05	2.33	3.04	1.74	0.07	1.46	12,17,18,27,30,38,40,43
45	1.72	2.86	1.41	0.10	2.26	3.90	1.69	0.10	1.38	8,17,18-20,37
50	1.55	2.03	1.10	0.09	2.30	3.18	1.55	0.08	1.47	15,17,18,19,22,23,25,27,36,38,41-43

[Note] r : FA 置換率, f'_m / f'_n : 材齢 n 日圧縮強度に対する m 日の強度比, Ave, Max, Min, SD: それぞれ強度比の平均値, 最大値, 最小値および標準偏差を表す。

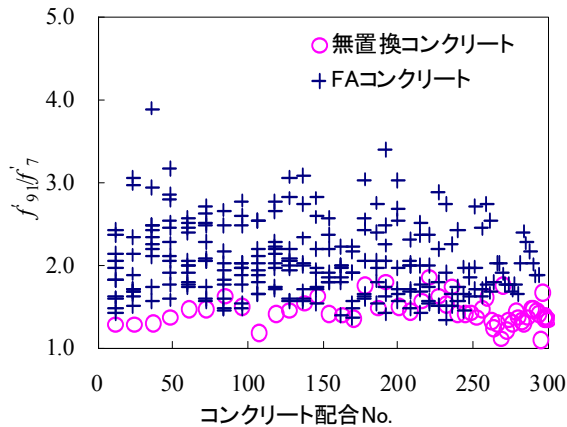


図-2 強度比 (f'_{91}/f'_7) の例

長期材齢ではポズラン反応によって強度増進することが影響しているものと思われる。このように無置換コンクリートに比べ、材齢に伴う強度変化の著しいFAコンクリートの強度発現性を定式化するため、本研究では、FAの質量置換率5%ごと（但し置換率5%のデータなし）に分類・整理した上で、FA置換率と強度比の関連性について検討を行った。

3. FAコンクリートの圧縮強度の簡易予測式

3.1 強度比

FAコンクリートの圧縮強度発現性について、表-2に示すようにFA置換率 (r) ごとの圧縮強度比を用いて分析を行った。この表には、材齢7日の圧縮強度に対する材齢28日、91日の強度比 f'_{28}/f'_7 、 f'_{91}/f'_7 の平均値、最大、最小値および標準偏差 SD を表すほか、 f'_{91}/f'_{28} の平均値も併記した。さらにFA置換率で整理した強度比（線：範囲、縦棒：平均値）を図-3に示す。

図-3および表-2により、無置換コンクリートの f'_{28}/f'_7 と f'_{91}/f'_7 の平均値はそれぞれ1.31と1.45となり、材齢7日から28日まで圧縮強度は30%ほど増加したが、材齢28日から91日まで10%程度しか増進しなかった。これに対して、FAコンクリートの場合、 f'_{28}/f'_7 の平均値は無置換コンクリートに比べて顕著に大きくなり、置換率の増加に伴って増加する傾向がみられた。また、 f'_{91}/f'_7 の平均値は1.7程度以上となり、FA置換率30%以上では、ほぼ2.0以上となった。

3.2 簡易予測式

セメントの一部代替材としてのFAの普及を妨げる大きな理由の一つとして、若材齢期の強度発現性が未だ不明な点が多いことがあげられる^{30,44)}。本研究では、材齢7日までの圧縮強度に対し、FA置換率の影響は小さいと仮定し、先ず材齢7日の圧縮強度とセメント水比 (C/W) の関係について図-4のように整理した。

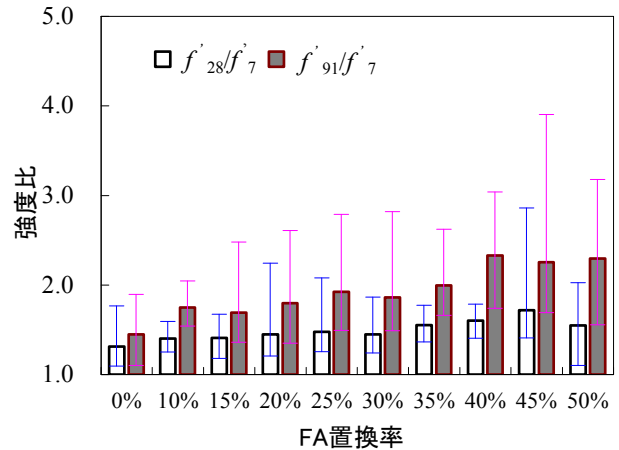


図-3 圧縮強度比の平均値およびバラツキの範囲

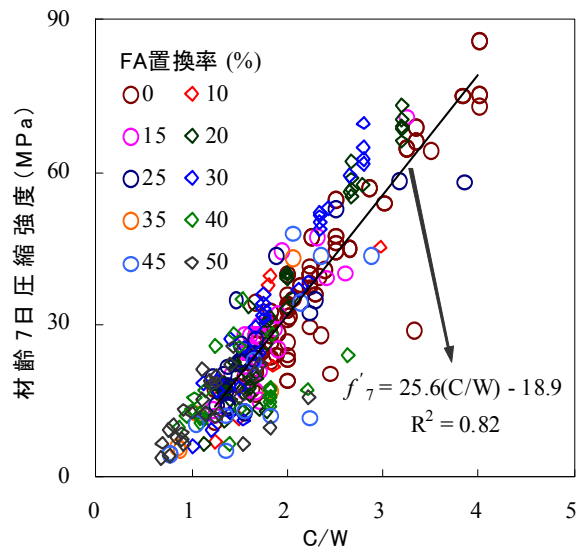


図-4 材齢7日の圧縮強度と C/W の関係

この結果によると、FA置換率の影響はみられず、材齢7日の圧縮強度と C/W は概ね線形関係にあった。そこで本研究では、その回帰式を用いて材齢7日の圧縮強度 f'_7 (MPa) を次式のように求めることとした。

$$f'_7 = 25.6(C/W) - 18.9 \quad (4)$$

この式は、様々な文献で発表されている広範な配合のコンクリートに対し、一部では式(1)~(3)のような換算値を用いて求めた圧縮強度について整理したものであり、バラツキも認められる。そのため、初期材齢におけるFAコンクリートの強度推定する簡便な式であるが、実用にあたっては安全係数等を用いて推定の方が望ましい。

次に、材齢7日までの圧縮強度データおよび式(5)に示す Goral 式を用いて、若材齢期における圧縮強度の簡易予測式を提案する。

$$R(t) = \frac{f'_t}{f'_7} = \frac{t}{a+bt} \quad (0 < t \leq 7) \quad (5)$$

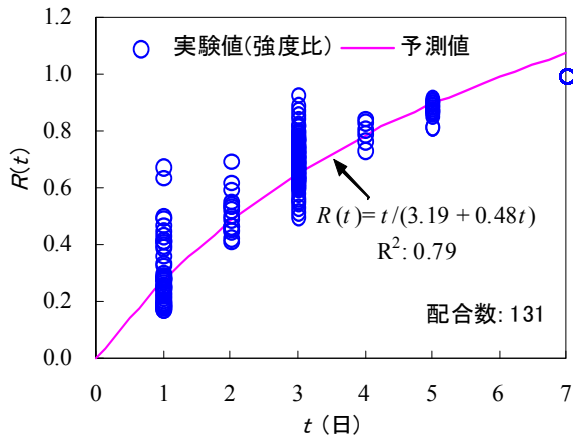


図-5 材齢7日までの強度比と強度予測式

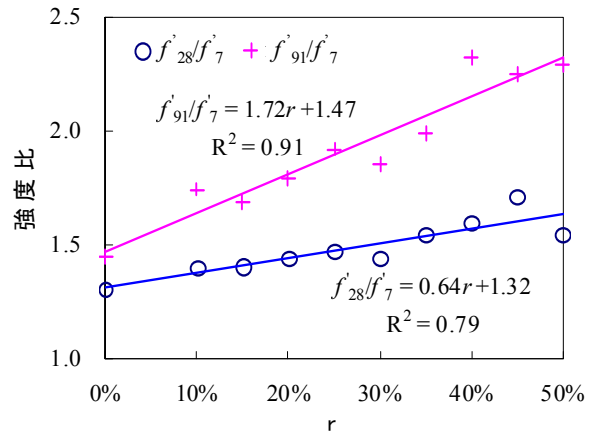
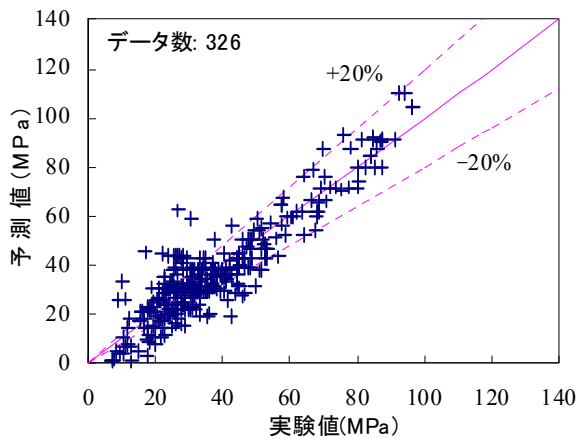
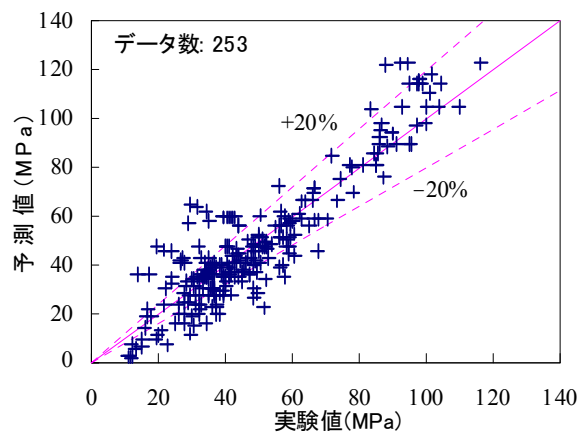


図-6 材齢7日に対する強度比とFA置換率の関係



a) 材齢28日圧縮強度



b) 材齢91日圧縮強度

図-7 実験値と予測値の比較

ここに、 $R(t)$: 材齢 t 日における強度比、 f'_t : 材齢 t 日における圧縮強度 (MPa)、 a, b : 定数を表す。

FA のポズラン反応はコンクリートの初期強度にほとんど影響を及ぼさないため²⁸⁾、材齢7日までの結果分析にはFAの置換率を考慮せず、参考文献の中から130配合の圧縮強度データを用いて予測式の構築を図った。本研究では、各配合の実験値を基に $1/R(t)$ と $1/t$ の関係を整理し、その回帰直線の係数から、式(5)の定数 a, b を求めた。材齢7日までの圧縮強度比および求めた強度推定曲線 (Goral 式) を図-5に示す。各種実験条件等を一括して整理しているため、バラツキはみられるものの、この強度推定曲線は、実験値の概ね平均値を推定していることがわかる。

本研究における材齢7日以降の強度予測には、材齢7日強度に対する各材齢強度の比をもって推定する方法を試みる。図-6にFA置換率と f'_{28}/f'_7 および f'_{91}/f'_7 の平均値 (表-2参照) の関係を示す。同図によって、両方ともFA置換率に対して概ね比例関係が成り立っていることから、それぞれに式(6)に示す直線回帰式を求めた。

$$\left. \begin{aligned} f'_{28}/f'_7 &= 0.64r + 1.32 \\ f'_{91}/f'_7 &= 1.72r + 1.47 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

これらの検討結果を基に、FA置換率が0~50%範囲内の場合、置換率が異なるコンクリートにおいても、材齢7日の推定圧縮強度を用いて求めることができる。すなわち、材齢7日までの圧縮強度、および材齢28・91日の圧縮強度は、以下の式(7)により、簡易的に推定できる。

$$\left. \begin{aligned} f'_t &= (25.6C/W - 18.9) \cdot t / (3.19 + 0.48t) \\ f'_{28} &= (0.64r + 1.32) \cdot (25.6C/W - 18.9) \\ f'_{91} &= (1.72r + 1.47) \cdot (25.6C/W - 18.9) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

但し、材齢 t は0~7日、FA置換率 r は0.0~0.5の範囲内の値を表す。

3.3 予測式の検証

前節までに示したFAコンクリートの圧縮強度の簡易推定式を用いて、各文献で示される広範な配合 (FA置換

率：0～50%，および C/W：0.8～4.0）の FA コンクリートの圧縮強度を推定した。図-7には、a) 材齢 28 日強度、b) 材齢 91 日強度、の予測値と実験値の比較を示す。同図に示すように、材齢 28 日と 91 日の圧縮強度の予測値と実験値は、直線 $y=x$ 近傍に分布しており、予測値は、多くの実験値に対して±20%に入っていることがわかる。

本研究では、国内外の文献等における異なる材料・配合（W/C, s/a, FA 置換率など）による FA コンクリートの圧縮強度データ（試験方法も一部異なる）を収集して分析を行った。これらの各種因子については、今後より詳細な検討をはかる必要があると考えられるが、本論文で示した簡易予測式は、FA コンクリートの強度発現予測において、簡便で有用なものと考えられる。

4. まとめ

JIS II 種およびそれに相当する FA を内割置換したコンクリートの圧縮強度について、既往の文献等から圧縮強度データを収集し、圧縮強度の簡易予測式を提案した。本論文のまとめを以下に列挙する。

- (1) FA 置換率が 0～50%以内において、FA 置換率が大きいほど、長期材齢における圧縮強度発現が顕著になる。特に、FA 置換率が 30%以上では、材齢 7 日に対する 91 日の強度比がほぼ 2.0 以上となる。
- (2) FA コンクリートの材齢 7 日に対する 28 日・91 日圧縮強度比は、FA 置換率に対して概ね比例関係にある。
- (3) セメント水比を用いて FA コンクリートの材齢 7 日圧縮強度を推定し、Goral 曲線により初期強度（材齢 7 日まで）の予測式を作成した。
- (4) (2)・(3)の結果を用いて、水セメント比および FA 置換率の異なる FA コンクリートの圧縮強度の簡易予測式を提案した。

本研究では、JIS 基準の II 種相当の FA を対象にして検討した。一方、ASTM C618 では SiO_2 に加え、 Al_2O_3 、 CaO などの成分も考慮して FA が分類されている⁴⁵⁾。今後、強度予測式の精度を高めるため、成分も含めて異なる材料および配合の影響について検討する必要がある。

参考文献

- 1) K. Granesh Babu and G. Siva nageswara Rao: Early Strength Behaviour of Fly Ash Concretes, *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 2, pp.277-284, 1994
- 2) Binu Sukumar, *et al.*: Evaluation of Strength at Early Ages of Self-Compacting Concrete with High Volume Fly Ash, *Construction and Building Materials*, Vol. 22, pp.1394-1401, 2008
- 3) A. Oner, *et al.*: An Experimental Study on Strength Development of Concrete Containing Fly Ash and

Optimum Usage of Fly Ash in Concrete, *Cement and Concrete Research*, Vol.35, pp.1165-1171, 2005

- 4) 大久保敏彦ほか：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、*日本建築学会大会学術講演梗概集（関東）*, A-1, 材料施工, pp.61-62, 1997
- 5) 野口貴文, 友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮力学特性に及ぼす供試体寸法・形状の影響、*日本建築学会構造系論文集*, 第 473 号, pp.19-28, 1995
- 6) Tibor Kausay and Tamás K. Simon: Acceptance of Concrete Compressive Strength, *Concrete Structures, Annual Journal of the Hungarian Group of fib, Budapest*, Vol.8, pp.54-63, 2007
- 7) 船本憲治ほか：フライアッシュが高強度コンクリートの流動性および強度発現に及ぼす影響、*コンクリート工学年次論文集*, Vol.18, No.1, pp.357-362, 1996
- 8) 深川正浩ほか：分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの力学特性及び耐久性、*コンクリート工学年次論文集*, Vol.19, No.1, pp.205-210, 1997
- 9) 平岡伸哉ほか：生コン工場で製造したハイボリュームフライアッシュコンクリートの諸性質、*コンクリート工学年次論文集*, Vol.20, No.2, pp.109-114, 1998
- 10) 國府勝郎ほか：フライアッシュの強度発現に関する養生温度および材齢効果の定量的評価、*コンクリート工学年次論文集*, Vol.22, No.2, pp.79-84, 2000
- 11) 呉 桂栄ほか：フライアッシュを使用したコンクリートの長期強度発現に及ぼす湿潤養生の影響、*Vol.24, No.1, pp.315-320, 2002*
- 12) Tarun R.Naik, *et al.*: Pavement Construction with High-Volume Class C and Class F Fly Ash Concrete, *ACI Materials Journal*, Vol.92, pp.200-210, 1995
- 13) Tarun R.Naik, *et al.*: Mechanical Properties and Durability of Concrete Made with Blended Fly Ash, *ACI Materials Journal*, Vol.95, pp.454-462, 1998
- 14) Burak Uzal, *et al.*: High-Volume Natural Pozzolan Concrete for Structural Applications, *ACI Materials Journal*, Vol.104, pp.535-538, 2007
- 15) E. E. Berry, *et al.*: Fly Ash for Use in Concrete-A Critical Review, *ACI Journal*, Vol.77, pp.59-73, 1980
- 16) L.H. Jiang and V. M. Malhotra: Reduction in Water Demand of Non-air-entrained Concrete Incorporating Large Volumes of Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, Vol.30, pp.1785-1789, 2000
- 17) Mohammed Sonebi: Medium Strength Self-compacting Concrete Containing Fly Ash: Modelling Using Factorial Experimental Plans, *Cement and Concrete Research*, Vol.34, pp.1199-1208, 2004

- 18) Rafat Siddique: Performance Characteristics of High-volume Class F Fly Ash Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.34, pp.487-493, 2004
- 19) Dan Ravina and P.K. Mehta: Compressive Strength of Low Cement/High Fly Ash Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.18, pp. 571-583, 1988
- 20) C.S. Poon, *et al.*: A Study on High Strength Concrete Prepared with Large Volumes of Low Calcium Fly Ash, Cement and Concrete Research, Vol.30, pp.447-455, 2000
- 21) Kou Shicong and C S Poon: Compressive Strength, Pore Size Distribution and Chloride-ion Penetration of Recycled Aggregate Concrete Incorporating Class-F Fly Ash, Journal of Wuhan University of Technology, Vol.21, No.4, pp.130-136, 2006
- 22) Ö. Eren: Strength Development of Concrete with Ordinary Portland Cement, Slag or Fly Ash Cured at Different Temperatures, Materials and Structures, Vol.35, pp.536-540, 2002
- 23) 齊藤 直: ハイボリュームフライアッシュコンクリートの日本での実用化に向けて, 2007年石炭灰有効利用シンポジウム, JCOAL, pp.1-17, 2007
- 24) 船本憲治: フライアッシュII種を使用したコンクリートの標準養生下における圧縮強度発現性に関する検討, 日本建築学会技術報告集, Vol.15, No.31, pp.627-630, 2009
- 25) 吉越盛次: 混和材としてのフライアッシュに関する研究, 土木学会論文集, No.31, pp.1-62, 1955
- 26) P.K.Mehta, *et al.*: Properties of Portland Cement Concrete Containing Fly Ash and Condensed Silica-fume, Cement and Concrete Research, Vol. 12, pp.587-595, 1982
- 27) D.Galeota, *et al.*: Structural Concrete Incorporating High Volume of Fly Ash, Proceedings of Milwaukee Conference, Sp153-2, ACI, pp.25-42, 1995
- 28) Kwangryul Hwang, *et al.*: Prediction Model of Compressive Strength Development of Fly-ash Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.34, pp.2269-2276, 2004
- 29) Dan Ravina: Efficient Utilization of Coarse and Fine Fly Ash in Precast Concrete by Incorporating Thermal Curing, ACI Journal, Vol.78, pp.194-200, 1981
- 30) M.K. Gopalan, *et al.*: Effect of Curing Regime on the Properties of Fly-ash Concrete, ACI Materials Journal, Vol.84, pp.14-19, 1987
- 31) 高橋昭裕: 断熱温度上昇量と長期強度試験に基づくフライアッシュコンクリートの温度ひび割れ抑制効果, 山口大学大学院修士論文, 2009
- 32) 桑野陵一ほか: フライアッシュの品質変動がコンクリート性状に及ぼす影響について, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.1, pp.45-50, 1991
- 33) 阿部 徹ほか: フライアッシュ原粉を混和したコンクリートの現場実証による評価, 土木施工, pp.30-35, 2009
- 34) 大久保敏彦ほか: 分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの強度予測式の作成に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.475-480, 1997
- 35) 伊藤智章ほか: フライアッシュを細骨材の一部に用いたコンクリートの強度および耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.217-222, 2000
- 36) 河野 清ほか: ハイボリュームフライアッシュコンクリートの特性—配合と強度, ヤング係数, 乾燥収縮および断熱温度上昇—, セメント・コンクリート, No.593, pp.10-17, 1996
- 37) 小田部裕一ほか: フライアッシュ高含有セメントのダムコンクリートへの適用, セメント・コンクリート論文集, No.52, pp.308-313, 1998
- 38) 金森誠治ほか: 高性能 AE 減水剤を使用したハイボリュームフライアッシュコンクリートのフレッシュ性状と強度性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集(中国), A-1, 材料施工 1999, pp.463-464, 1999
- 39) 河野 清ほか: ハイボリュームフライアッシュコンクリートの圧縮強度に及ぼすフライアッシュの品質, 養生温度および細骨材率の影響, セメント・コンクリート論文集, No.51, pp.144-149, 1997
- 40) 全 洪珠, 嵩 英雄: フライアッシュコンクリートの諸性質に及ぼすフライアッシュの種類および置換率の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.189-194, 2004
- 41) 曾根徳明ほか: フライアッシュ多量置換セメントを用いたコンクリートの諸特性と配合設計に関する一考察, セメント・コンクリート論文集, Vol.50, pp.738-743, 1996
- 42) M. N. Hague, *et al.*: Realistic Strength of Air-Entrained Concretes With and Without Fly Ash, ACI Materials Journal, Vol. 85, pp.241-247, 1988
- 43) 吉田和隆ほか: HVFA コンクリートにおける材齢1年までのフライアッシュの強度寄与, 土木学会論文集F, Vol.64, No.1, pp.104-109, 2008
- 44) 西村英紀ほか: 共通試験に基づくフライアッシュコンクリートの圧縮強度推定式, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.161-166, 2010
- 45) ACI Committee 232: Use of Fly Ash in Concrete, pp.1-41, 2003