

報告 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

西村 英紀*1・吉武 勇*2・高橋 和之*3・齊藤 直*4

要旨: 本研究では若材齢から長期材齢に至る過程において、フライアッシュコンクリートの強度発現性の予測を行うため、山口県内の生コンクリート会社(計7工場)において、共通配合による圧縮強度試験を実施した。この共通試験結果に基づき、Gompertz式およびGoral式による成長曲線を用い回帰を行い、フライアッシュコンクリートの材齢に応じて変化する圧縮強度の推定式を求めた。さらに、フライアッシュコンクリートの強度発現性におよぼす影響因子を示すとともに、若干の考察を加えた。

キーワード: フライアッシュ, 共通試験, 圧縮強度, 強度回帰, 成長曲線

1. はじめに

海砂・川砂の採取規制による骨材事情の悪化に伴い、フレッシュコンクリートの流動性の低下防止に加え、設計基準強度指定によるW/Cの規定により、単位セメント量の多いコンクリートがしばしば用いられるようになった。単位セメント量の多いコンクリートは収縮量の増加や初期発熱量の増加が問題となるため、発熱・収縮低減効果のある混和材料が求められることとなる。

様々な混和材を用いたコンクリートの物性評価が行われるなか、石炭灰(フライアッシュ等)を混和したコンクリートについて多くの調査・研究が行われている。フライアッシュ(以下FAと称す)はセメントの一部に置換した場合、環境負荷低減効果があることが報告されており¹⁾、アルカリシリカ反応の抑制効果やポズラン反応の長期活性化、単位水量の低減化など様々な効果を有する。しかしながら、FAの品質のばらつきに伴い、フレッシュ性状が不安定になることや、呼び強度が同じコンクリートであっても、その構成材料や配合によっては、同じFAを用いた場合でさえ性状が異なることが、しばしば指摘されている。特にFAコンクリートの長期材齢に関する研究は数多く報告されているが、若材齢期における強度発現性については不明確な点が多い。FAコンクリートの強度発現推定式に関する検討はいくつかみられるものの²⁾、構成材料や配合によって特性が異なるFAコンクリートの強度発現の推定には、さらなるデータの蓄積が必要と思われる。そこで、本研究では共通配合のFAコンクリートを用いた圧縮強度試験(以下、共通試験)を実施し、若材齢から長期材齢に至る強度を予測できる推定式について検討を試みた。

2. 実験概要

2.1 実験方法

FAコンクリートの長期材齢における強度発現性については、様々な実験・検証が行われている。しかしながら若材齢期における強度発現性については緩慢であるとともに、そのばらつきも大きいこともある。

本研究では、山口県内の生コンクリート工場(a~g:計7工場)において共通試験を行い、FAコンクリートの強度特性を調べ、その回帰を通じて推定式を求めた。強度試験はJIS A 1108に準じて圧縮強度試験を行い、試験材齢は1, 2, 3, 5, 7, 28, (56), 91日の7材齢とした。なお練混ぜには、各工場が所有する強制2軸練りミキサを用い、各配合において、それぞれ21本以上のシリンダー供試体(φ100×200mm)を作製した。

2.2 使用材料

本研究ではいずれもJIS R 5210を満足する普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm³)、およびJIS A 6201のII種規格品(密度2.30g/cm³)のFAを使用した。そのほか細骨材・粗骨材・混和剤については各工場で使用しているものとし、さらに用いたセメントも工場によって異なるため、メーカーが異なっている。FAを混和したコンクリートについては、FA用AE剤(高級脂肪酸系界面活性剤:AD3)を共通して利用した。

2.3 配合条件

本研究における共通試験では、各工場で日常用いられている配合を基本とした上で、できるだけ水セメント比(W/C)や細骨材率(s/a)を一定となるように配合調整を行い、コンクリート(目標スランプ8cm, 同空気量4.5%)を作製した。比較の基準とするためFA無置換コンクリート(Base配合)に加え、セメント質量に対し20%

*1 極東興和(株) (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)エネルギー・エコ・マテリア 技術部

*4 (株)エネルギー・エコ・マテリア 技術部長 博(工) (正会員)

内割置換したコンクリート（C20 配合）と、セメント質量に対し 20%および細骨材容積に対し 5%置換したコンクリート（C20S5 配合）について、圧縮強度試験を実施した。

各工場の配合表を表-1～表-3に示す。なお、表中の Fc, Fs はセメント質量置換および細骨材容積置換に対する FA 量を示しており、AD1 は AE 減水剤・AD2 は AE 助剤を示している。また、これらの表中に示す空気量は、実測値を表している。ここで、各工場で用いる骨材は、異なるものであり、その概要を表-4に示している。さらに表-5には各工場で用いた AE 減水剤の主成分をまとめて示している。

3. 共通試験における圧縮強度試験結果

3.1 回帰式

本研究ではフライアッシュコンクリートの圧縮強度発現の定量化および定式化を主目的とし、Gompertz 式および Goral 式の 2 つの成長曲線³⁾を用いて回帰を行った。なお、本研究では一般化 Gompertz 式を変形し、強度比(=各材齢における圧縮強度/材齢 91 日における圧縮強度)の推定において実験係数が 1 つとなる最も簡略化された式(1)を採用した。本報では、同式を Gompertz 式と略記する。回帰を行うにあたり、異なる強度レベルの FA コンクリートについても強度推定できるように一般表記として、強度比についても同様に回帰を行った。吉田ら⁴⁾も

表-1 Base コンクリート配合

	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)												Air (%)
				C	W	Fc	Fs	ΣFA	S1	S2	S3	G1	G2	AD1	AD2	
a	59.9	59.9	47.8	272	163	0	0	0	347	529	0	597	398	2.45	0.001	5.7
b	59.9	59.9	47.1	272	163	0	0	0	622	266	0	357	663	2.18	0.033	4.6
c	59.9	59.9	49.8	272	163	0	0	0	652	280	0	581	387	2.17	0.016	4.5
d	59.9	59.9	47.3	272	163	0	0	0	404	265	232	407	609	1.63	0.001	4.5
e	59.9	59.9	48.3	267	160	0	0	0	535	356	0	593	396	2.67	0.004	4.0
f	59.9	59.9	49.3	267	160	0	0	0	281	328	327	590	393	2.14	0.008	5.5
g	60.1	60.1	49.7	268	161	0	0	0	554	370	0	391	586	1.88	0.005	4.8

表-2 C20 コンクリート配合

	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)												Air (%)
				C	W	Fc	Fs	ΣFA	S1	S2	S3	G1	G2	AD1	AD3	
a	74.9	59.9	47.8	218	163	54	0	54	344	524	0	592	394	2.45	0.030	5.4
b	74.9	59.9	47.1	218	163	54	0	54	616	265	0	354	657	2.18	0.146	4.3
c	74.9	59.9	49.8	218	163	54	0	54	647	278	0	575	383	2.17	0.136	4.2
d	74.9	59.9	47.3	218	163	54	0	54	401	263	228	403	604	1.63	0.033	5.1
e	74.9	59.9	48.3	214	160	53	0	53	530	354	0	587	392	2.67	0.107	4.0
f	74.9	59.9	49.3	214	160	53	0	53	278	324	324	585	390	2.14	0.102	4.5
g	75.1	60.1	49.7	214	161	54	0	54	549	366	0	387	581	1.88	0.0633	6.4

表-3 C20S5 コンクリート配合

	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)												Air (%)
				C	W	Fc	Fs	ΣFA	S1	S2	S3	G1	G2	AD1	AD3	
a	74.9	52.6	47.8	218	163	54	38	92	336	511	0	578	385	2.79	0.074	5.7
b	74.9	52.5	47.1	218	163	54	38	93	601	259	0	345	641	2.48	0.279	4.2
c	74.9	52.4	49.8	218	163	54	39	93	631	271	0	561	374	2.49	0.261	4.0
d	74.9	52.5	47.3	218	163	54	38	93	391	257	223	393	589	1.86	0.034	4.6
e	74.9	52.2	48.3	214	160	53	39	93	518	345	0	573	382	3.06	0.172	4.3
f	74.9	52.1	49.3	214	160	53	40	93	271	316	316	570	380	2.45	0.276	4.6
g	75.1	52.2	49.7	214	161	54	41	94	535	357	0	378	567	2.16	0.049	5.0

表-4 細骨材・粗骨材の密度と材質

	Density(g/cm ³)						
	a	b	c	d	e	f	g
S1	I:2.57	II:2.69	II:2.66	II:2.69	II:2.56	IV:2.73	I:2.60
S2	II:2.61	III:2.70	III:2.64	III:2.65	III:2.66	II:2.61	II:2.65
S3				IV:2.76		III:2.61	
G1	V:2.70	VI:2.73	VI:2.73	V:2.73	VII:2.69	VIII:2.73	IX:2.74
G2	VI:2.70	V:2.73	V:2.73	VI:2.73	VI:2.69	IX:2.73	VIII:2.74

I:海砂, II:砕砂, III:石灰砕砂, IV:高炉スラグ細骨材, V:砕石 2015A,
VI:砕石 1505A, VII:砕石 2010A, VIII:砕石 2015, IX:砕石 1505

表-5 使用した AE 減水剤の主成分

a	ポリカルボン酸系化合物
b	リグニンスルホン酸塩とポリカルボン酸系化合物
c	リグニンスルホン酸塩とポリカルボン酸系化合物
d	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
e	リグニンスルホン酸塩とポリカルボン酸系化合物
f	ポリカルボン酸系化合物
g	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

FA を規定量以上置換した HVFA (ハイボリュームフライアッシュ) コンクリートの強度推定式において、強度比を用いており、強度比を用いることで様々な FA コンクリートの強度推定が可能となる。本研究では、最小二乗法により実験係数の決定を行った。Gompertz 式(1)と Goral 式(2)を以下に記す。

$$\overline{f_{Gp}} = \frac{f_{Gp}}{f_{91}} = 1 - \text{EXP}(-C_1 t) \quad (1)$$

$$\overline{f_{Gr}} = \frac{f_{Gr}}{f_{91}} = \frac{t}{C_2 + t} \quad (2)$$

ここに \overline{f} : 強度比, f : 圧縮強度, f_{91} : 材齢 91 日における圧縮強度, $C_1 \cdot C_2$: 実験係数, t : 材齢を表す。下添字 Gp, Gr はそれぞれ Gompertz, Goral 式を表している。

3.2 セメントメーカー別の強度比の回帰

本研究の共通試験では、試験を実施した各工場において、セメント (メーカー) および骨材のみがそれぞれ異なっている。本研究では FA コンクリートの強度発現性に対し、先ずセメントメーカーの違いによる影響を調べるため、セメントメーカー別に強度比の回帰を行った。本研究の共通試験においては、計 3 社のセメントを用いている。そのうち、a・e・f と b・c・g は、それぞれ同じ会社のセメントを用いているため、それぞれのセメントメーカー (A・B) に分けて、データ整理を試みた。一例として Base 配合におけるそれぞれの回帰結果を図-1

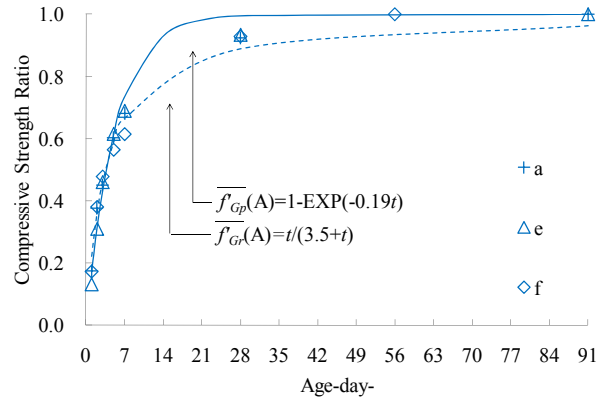


図-1 強度比の回帰結果 (セメントメーカーA)

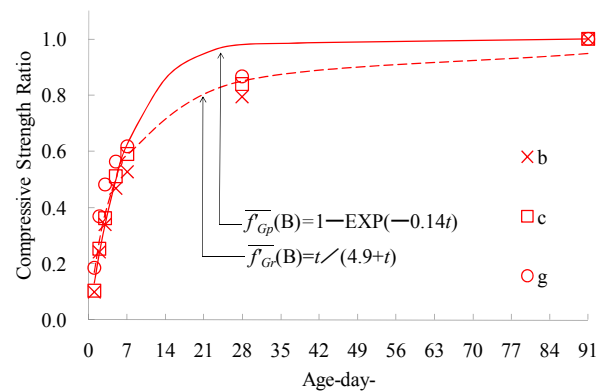


図-2 強度比の回帰結果 (セメントメーカーB)

表-6 実験係数一覧

Cement A		
	C ₁	C ₂
Base	0.14	4.9
C20	0.10	7.4
C20S5	0.10	7.9
Cement B		
	C ₁	C ₂
Base	0.19	3.5
C20	0.13	6.2
C20S5	0.11	6.4

および図-2に示す。図中にはそれぞれ Gompertz 式と Goral 式を記載している。また、表-5に各回帰式で得られた実験係数の一覧を示す。

回帰結果より、A メーカーと B メーカー間に強度発現性の違いがみられた。特に材齢7日までに各回帰式の傾きはA メーカーが緩やかになっており、強度発現の違いを示している。表-1に示す Goral 式の回帰係数に着目すると、各配合でA メーカーの方が、B メーカーの方に比べて、1.2~1.5だけ大きい。

3.3 細骨材種別の影響

前節と同様に細骨材種別による強度比回帰を行った。細骨材の種類分類として、海砂・砕砂、石灰砕砂、石灰砕砂・高炉スラグの3水準について回帰を行った。回帰結果の一例としてC20S5配合の試験結果を図-3~図-5に示す。セメントメーカー同様、長期材齢においては強度のばらつきが生じているものの、若材齢期においては明確な差はみられなかった。セメントメーカーの違いが及ぼす影響と比較すると、細骨材がコンクリートの強度発現に及ぼす影響は小さいことがわかる。

4. 成長曲線を用いた圧縮強度推定式

4.1 回帰結果

各成長曲線における各配合の試験結果を図-6~図-8、強度比に対する回帰結果を図-9~図-11に示す。さらに、回帰によって求めた実験係数を表-6に示すとともに、図-12および図-13には Gompertz 式、Goral 式における推定値と実験値の比較を示す。なお表-6に示す係数は強度発現速度に関する定数を示しており、FAを混和したコンクリートにおける速度低下が確認される。工場ごとの強度データに着目すると、長期強度のばらつきが初期材齢の強度のばらつきに影響しており、強度発現性状については概ね一定の傾向を示した。

図-9~図-11に示すように、強度比で整理した結果、工場間のばらつきが低減された。これは初期強度のばら

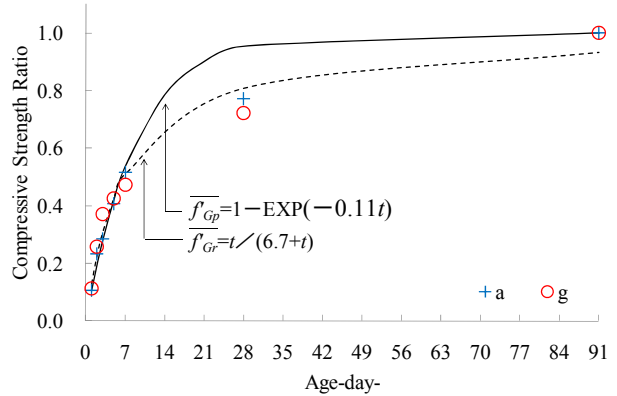


図-3 強度比の回帰結果 (海砂・砕砂)

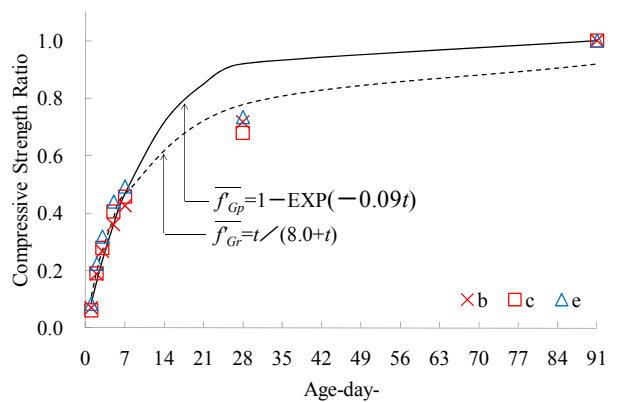


図-4 強度比の回帰結果 (石灰砕砂)

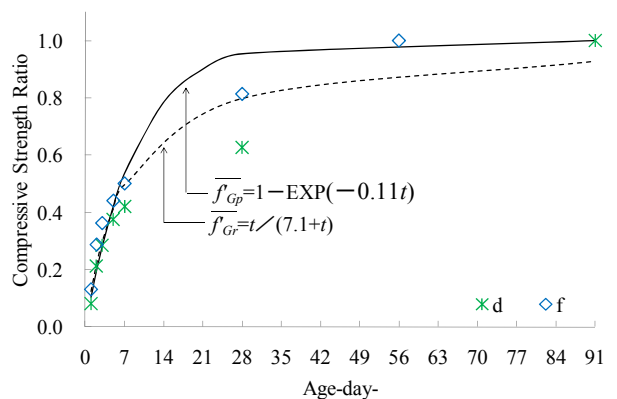


図-5 強度比の回帰 (石灰砕砂・高炉スラグ細骨材)

つきが長期強度のばらつきを唆する結果となった。

ここで、Gompertz 式と Goral 式の回帰結果を比べると、比較的早期に一定値に収束する Gompertz 式に比べ、強度発現が緩慢となる FA コンクリートの強度回帰には、Goral 曲線の方が適しているものと判断される。

既往の研究⁵⁾においても Gompertz 式による回帰方法は短期的 (若材齢) には相関が高く、長期的 (長期材齢) には相関が低いことが報告されており、この結果を裏付

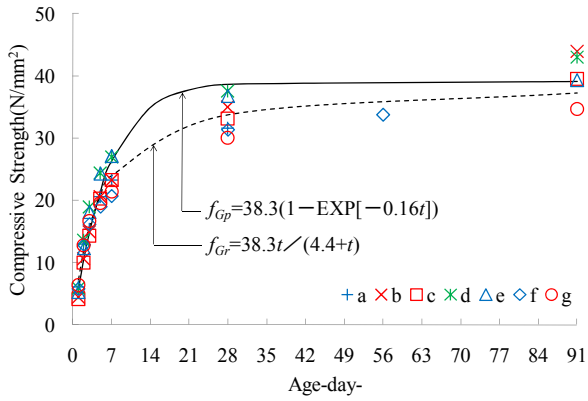


図-6 Base 配合試験結果

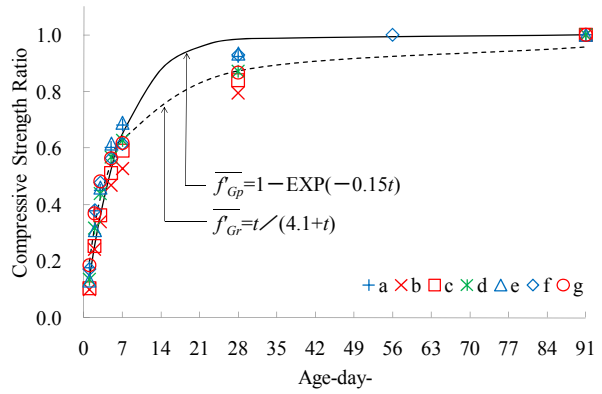


図-9 Base 配合試験結果 (強度比)

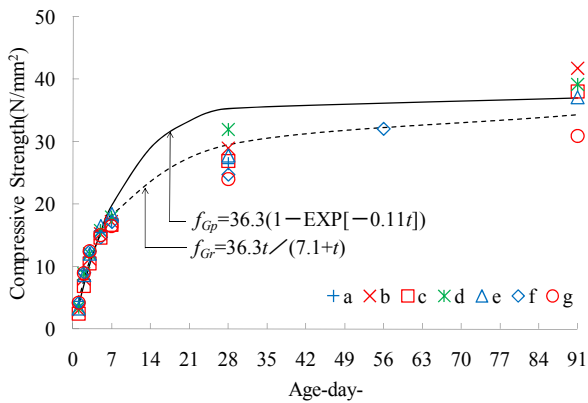


図-7 C20 配合試験結果

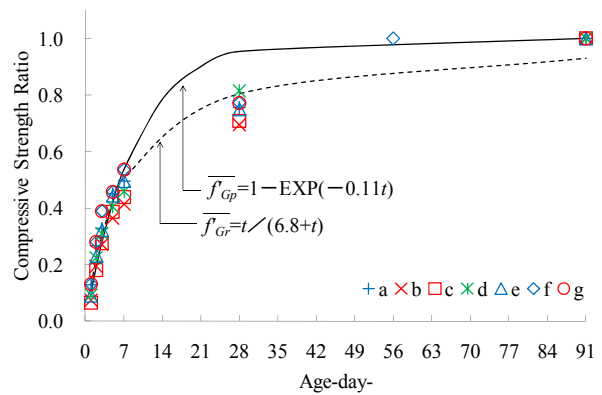


図-10 C20 配合試験結果 (強度比)

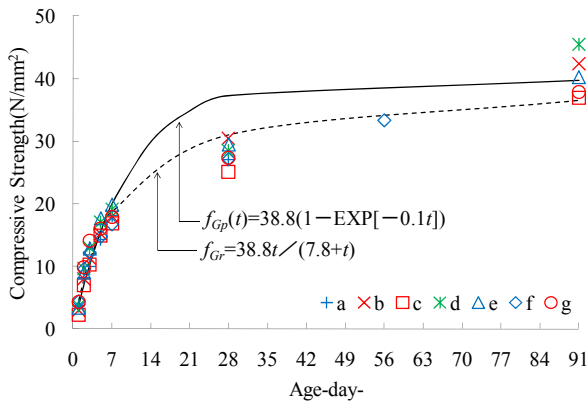


図-8 C20S5 配合試験結果

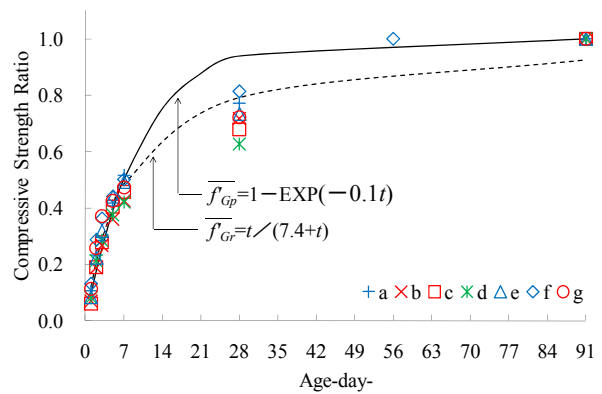


図-11 C20S5 配合試験結果 (強度比)

けるものとなった。

C20 配合と C20S5 配合の強度比の回帰結果を比較すると、両者の実験係数はほぼ同程度であり、これは FA を細骨材に置換することは長期の強度発現にほとんど影響しないことを示している。既往の研究⁶⁾においても、セメントに 20%置換したコンクリートとさらに細骨材に 10%置換したコンクリートの両者の強度発現性は、材齢

91 日以降でほぼ同程度という結果が報告されている。本研究の結果からも、C20 と C20S5 の配合はほぼ同程度の強度発現性を示したことから、上記の推察が裏付けられよう。

本報で示した Goral 式および実験係数 C_2 を用いることで、FA コンクリートの若材齢から長期材齢に至る圧縮強度発現性を概ね適切に推定できるものと考えられる。

表-6 実験係数の一覧

Strength		
	C_1	C_2
Base	0.16	4.4
C20	0.11	7.1
C20S5	0.10	7.8
Strength Ratio		
	C_1	C_2
Base	0.15	4.1
C20	0.11	6.8
C20S5	0.10	7.4

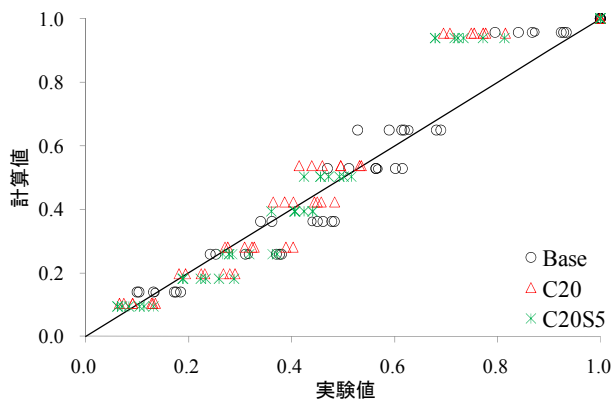


図-12 計算値-実験値 (Gompertz 式)

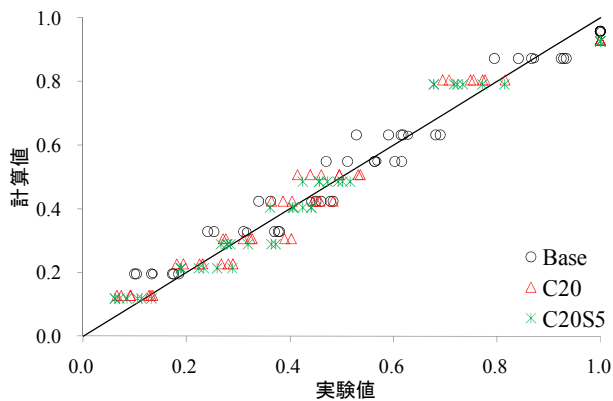


図-13 計算値-実験値 (Goral 式)

5. まとめ

本研究では、山口県内の生コンクリート7工場において共通試験を行い、FA コンクリートの圧縮強度を調べるとともに、その回帰により推定式を求めた。本研究の範囲内で得られた知見について以下に列記する。

- (1) セメントメーカー別による強度 (比) 回帰を行ったところ、初期強度の発現性に拘わる係数に若干の差異がみられた。

- (2) 細骨材種別とFA コンクリートの強度発現には明確な相関性は認められず、細骨材の成分がFA コンクリートの強度発現におよぼす影響は比較的小さい。
- (3) Gompertz 式と Goral 式による回帰結果を比べると Goral 式の方が、FA コンクリートの強度発現の推定に適している。この Goral 式および実験係数 C_2 を用いることで、FA コンクリートの若材齢から長期材齢に至る圧縮強度発現性を適切に推定できるものと思われる。

本論文で示した圧縮強度推定式は、限られた配合における結果を基に構築したものであるが、今後データの拡充やさらなる検討を行うことで、より推定精度と汎用性の高い強度予測式が構築できるものと考えている。

謝辞：本研究は、山口県内の生コンクリート工場7社に協力頂きました。ここに記して関係者各位に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 堺 孝司, 増田 裕, 高野 剛, 石井光裕, 竹中 佳: フライアッシュを用いた環境負荷低減コンクリートに関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.3, pp.332-342, 2009.
- 2) 例えば 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状に関する検討, 日本建築学会技術報告集, Vol.15, No.31, pp.627-630, 2009.
- 3) 氏家 勲, 大野浩二: 各種の成長曲線によるコンクリートの早期強度推定に関する検討, 土木学会論文集, No.798/VI-68, pp.51-61, 2005.
- 4) 吉田和隆, 吉岡 慧, 高橋昭裕, 浜田純夫: 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.
- 5) 吉田隆行, 岡永 健, 御厨 祐, 大坪正典: 成長曲線によるコンクリート強度推定法の研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.14, No.1, pp.555-560, 1992.
- 6) 高橋昭裕, 高橋和之, 齊藤 直, 吉武 勇: 温度応力解析に用いるフライアッシュコンクリートの断熱温度上昇および強度性状に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1519-1524, 2009.