論文　混和材を用いたコンクリートのヤング係数と収縮ひずみに関する一考察

清原　千鶴[*1]・永松　静也[*2]・佐藤　嘉昭[*3]・三橋　博三[*4]

要旨：本研究は，混和材を用いたコンクリートの変形性状について複合則理論を用いた統一的な評価方法を確立することを最終目的としている。ここではコンクリートの構成物質であるセメントペーストの変形性状について定量的に把握するため，高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いた圧縮強度および乾燥収縮ひずみ試験を行い，混和材混入率とその変形性状の評価方法について検討を行った。その結果，本実験の範囲内においては，混和材を用いたペーストの圧縮強度，ヤング係数および乾燥収縮ひずみは調合上の水セメント比と混和材混入率の関数で評価が可能であることを示した。

キーワード：高炉スラグ微粉末，フライアッシュ，圧縮強度，ヤング係数，収縮ひずみ

1.　はじめに

産業副産物を貴重な資源として有効に利用することは，循環型社会を形成する上で重要なことである。新しいコンクリート用混和材として有効利用が試みられると，それに関連したさまざまなデータが報告されているが，新しい資源の有効利用を促すには，混和材のどのような性状がコンクリートの物性にどう影響するかなど，個別的な理論から一般的な理論へと展開する必要がある。そこで，本研究では，多種多様な混和材を用いたコンクリートのヤング係数および収縮ひずみについて複合則理論を用いた統一的な評価方法を確立することを最終目的としている。複合則理論の適用に当っては，構成物質であるセメントペーストのヤング係数および収縮ひずみをより簡単に表現することが望ましい。

そこで，本論文では，産業副産物である高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを混和材として取り上げ，コンクリートの構成物質であるセメントペースト(母材)の変形性状の評価方法を提案することを目的とし，高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いたセメントペーストの圧縮強度試験および乾燥収縮ひずみ試験を行い，これらの変形性状と混和材混入率の関係について，調合上の水セメント比の影響を取り入れた定量的な推定の可能性について検討を行った。

2.　実験

2.1　実験計画

本実験では，混和材混入率がペーストの変形性状に及ぼす影響について明らかにするため，水セメント比(W/C)30，40%のセメントペーストを基準とし，それらに対して高炉スラグ微粉末(以下，BS)およびフライアッシュ(以下，FA)をセメント容積の内割で 15，30，45%，並びに外割で 15，30%混入したペースト供試体を作製し，結合水率の測定や圧縮強度試験，乾燥収縮ひずみ試験を行った。実験要因を**表-1** に示す。

2.2　使用材料および調合

使用した混和材は，フライアッシュⅡ種(密度 2.27g/cm^3，比表面積 3630cm^2/g，強熱減量 2.3%)，高炉スラグ微粉末(密度 2.91g/cm^3，比表面積 6020cm^2/g)の 2 種類である。セメントには普通

*1 大分大学助手　工学部建設工学科　工修(正会員)
*2 北九州市立大学教授　国際環境工学部環境空間デザイン学科　工博(正会員)
*3 大分大学教授　工学部建設工学科　工博(正会員)
*4 東北大学教授　工学研究科都市・建築学専攻　工博(正会員)

ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm^3，比表面積 3290cm^2/g)，混和剤には高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系)を用いた。

調合の基本的な考え方を**図-1** に示す。本実験では，混和材量の影響を的確に評価するため，混和材が異なる場合でも同一の容積になるようにするために，絶対容積調合とした。混和材はそれぞれ基本となるセメントペーストのセメント容積に対して，内割で 15，30，45%，外割で 15，30%混入した。したがって内割混入の場合は，基本セメントペーストと水結合材容積比(V_W/V_B，V_B=セメント容積+混和材容積)は同一となるが，混和剤混入率の増加に伴い，水セメント比が大きくなり，外割混入の場合は，基本セメントペーストと水セメント比は同一となるが，混和剤混入率の増加に伴い，水結合材容積比が小さくなる。

2.3 混練，打設および養生方法

ペーストの混練にはモルタルミキサ(50ℓ)を用いた。混練後，ブリーディング水がなくなり成形可能(ここでは，フロー値 200mm 程度を目安とした)となるまでの 2~3 時間，密封容器の中で定期的に攪拌した。

供試体はすべて材齢 1 日で脱型し，所定の材齢まで恒温恒湿室内(温度 20±0.5℃，湿度 60±5%RH)にて封緘養生とした。

2.4 実験方法

(1) 結合水量

結合水量の測定には，半球状の供試体を用い，ジョークラッシャにて微粉砕し，100μm 以下の試料を 105℃で 24 時間乾燥させた後，質量(W_{105})測定し，その後 1000℃で 4 時間強熱減量しその質量(W_{1000})を測定した。これより，式(1)を用いて結合水量を求めた。

$$w_n = \frac{W_{105} - W_{1000}}{\text{使用したセメント量}} \qquad (1)$$

ここに，w_n：セメント量あたりの結合水量(g/g)

(2) 圧縮強度試験(ヤング係数)

圧縮強度試験はφ5×10cm の円柱供試体を用い，材齢 7，28，56，91，112 日において測定を行った。ヤング係数は，強度試験時にコンプレッソメータを用いてひずみの測定を行い圧縮応力ひずみ曲線を求め，圧縮強度の 1/3 の点の割線ヤング係数として算出した。

表-1 実験要因

記号	混和材	混入率(%) 内割	混入率(%) 外割	V_W/V_B	W/C (%)	W/B (%)	実験項目
BS30	BS	0		0.948	30		●
		15	―		35.2	30.4	●
		30	―		42.9	30.7	●
		45	―		54.5	31.1	△
		―	15	0.815	30	26.1	●
		―	30	0.700		22.6	●
FA30	FA	0		0.948	30		●
		15	―		35.2	31.3	●
		30	―		42.9	32.8	●
		45	―		54.5	34.4	△
		―	15	0.815	30	26.9	●
		―	30	0.700		23.9	●
BS40	BS	0		1.264	40		●
		15	―		47.1	40.5	●
		30	―		57.1	41.0	●
		45	―		72.7	41.5	△
		―	15	1.089	40	34.9	●
		―	30	0.939		30.3	●
FA40	FA	0		1.264	40		●
		15	―		47.1	41.8	●
		30	―		57.1	43.7	●
		45	―		72.7	45.9	△
		―	15	1.089	40	35.9	●
		―	30	0.939		32.1	●

●：圧縮強度試験＋乾燥収縮試験
△：圧縮強度試験のみ

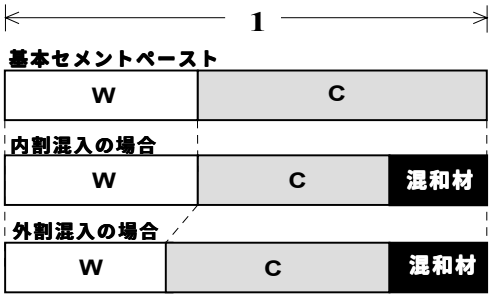

図-1 調合の基本的な考え方

(3) 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみ試験では，φ5×10cm の円柱供試体を用い，材齢 7 日より乾燥を開始した。測定は恒温恒湿室内にて行い，供試体は上下面を水分の移動がないようにシールし，側面のみ乾燥させることとした。なお，ひずみの測定には小型埋め込みゲージを用いて行った。

3. 混和材を含む結合材の水和特性

高炉スラグ微粉末およびフライアッシュの水

和反応に関する研究[1)]は多く行われているが，本研究では，実用的な範囲で水和の進行を全体的に表すことのできる方法として，ここでは結合水量を水和特性の指標とした。

図-2 に高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを含む結合材の結合水量の経時変化を示す。結合水量(w_n)の進行は2次の反応速度論[2)]で表される式(2)を用いることとした。

$$w_n = \frac{W_n \cdot t}{\dfrac{1}{\alpha W_n} + t} \qquad (2)$$

ここに，

W_n:終局結合水量(g/g)

α :水和の進行のし易さを表す定数

t:材齢(日)

図中の曲線が実測データを式(2)に当てはめたものである。これによると，混和材の種類によらず，混和材混入率が増加することによって結合水量は増加している。ここではセメント量あたりの結合水量として算出しているが，使用した結合材量あたりの結合水量とすると，混和材を混入することによって減少する。また，同じ混入率の場合，外割混入と内割混入を比較すると，内割混入の方が大きくなっている。

4. ペーストの圧縮強度 F_p およびヤング係数 E_p の評価

4.1 圧縮強度およびヤング係数の経時変化

図-3 に圧縮強度およびヤング係数と材齢の関係を示す。混和材を用いたペーストの材齢に伴う圧縮強度およびヤング係数の傾向を定量的に把握するために，双曲線関数にあてはめた。

これによると，内割混入の場合は混入率が小さいほど，外割混入の場合は

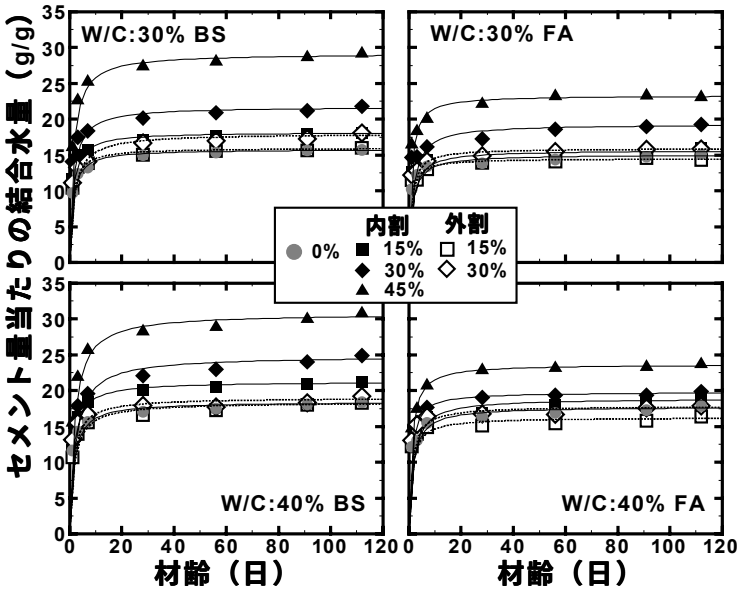

図-2 結合水量の経時変化

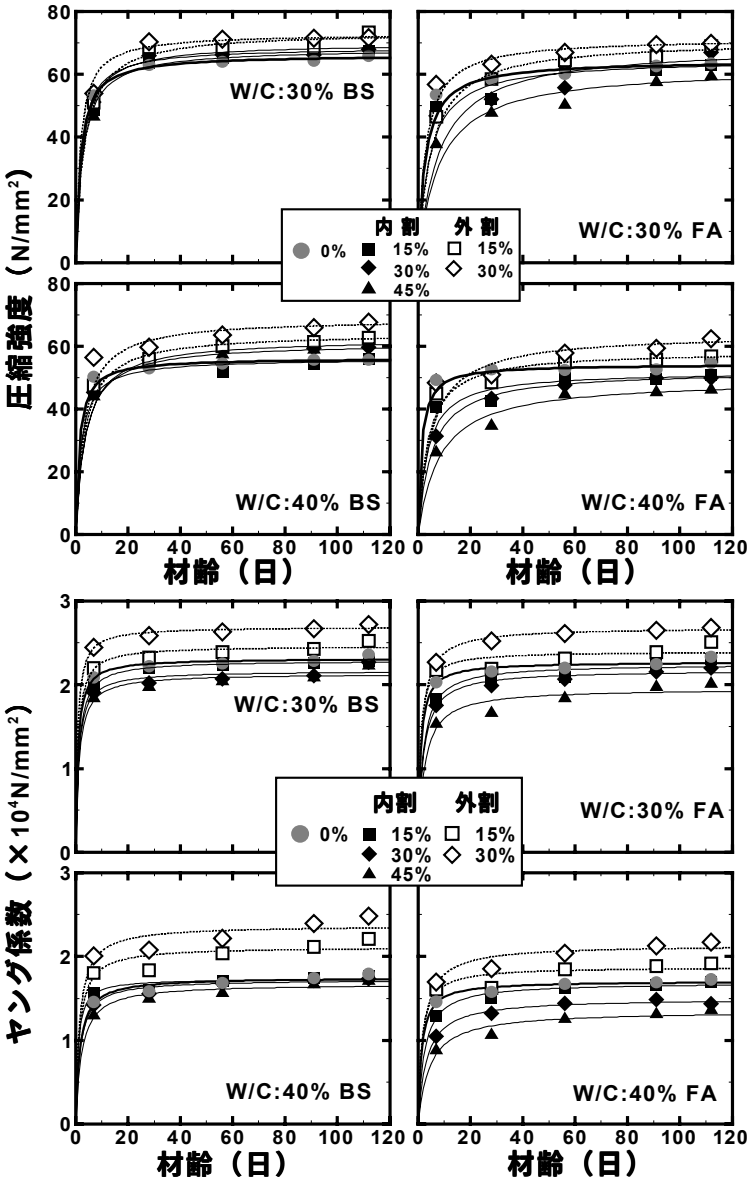

図-3 圧縮強度およびヤング係数の経時変化

混入率が大きいほど圧縮強度およびヤング係数は大きくなっている。また，同じ混入率を比較すると高炉スラグ微粉末を混入したペーストの圧縮強度およびヤング係数は，フライアッシュを混入したペーストよりも高い値を示しており，高炉スラグ微粉末を用いたペーストの方が水和反応速度が速いことがわかる。

4.2　圧縮強度 F_p およびヤング係数 E_p の推定

混和材を用いたペーストの圧縮強度およびヤング係数に及ぼす混和材混入率の影響を明らかにするため，ここでは，混和材を用いたペーストの圧縮強度およびヤング係数を，水セメント比 x および混和材混入率 r をパラメータとする式(4)の関数で表されるとした。

$$\begin{aligned} F_p &= f_1(r)\cdot\overline{F}_p(x,t) \\ E_p &= f_2(r)\cdot\overline{E}_p(x,t) \end{aligned} \qquad (4)$$

ここに，

$f_1(r)$, $f_2(r)$：圧縮強度及びヤング係数に及ぼす混和材混入による影響係数

$\overline{F}_p(x,t)$, $\overline{E}_p(x,t)$：

プレーンセメントペーストの圧縮強度(N/mm^2)およびヤング係数(×10^{4}N/mm^2)

r：混和材混入率(%), x：水セメント比(%)

t：材齢(日)

$f_1(r)$および$f_2(r)$は，圧縮強度およびヤング係数に及ぼす混和材混入率の影響を表す関数であり，$\overline{F}_p(x,t)$ および $\overline{E}_p(x,t)$は，混和材混入率 0%のプレーンセメントペーストの圧縮強度およびヤング係数と水セメント比の関係を表す関数である。また，式(4)中の水セメント比 x とは調合上の水セメント比のことであり，**表-1** に示すように内割混入の場合は，混入率の増加とともに水セメント比は大きくなり，外割混入の場合は，混入率に影響を受けず一定の値となる。本実験では，水セメント比 30，40%については実測データが得られているが，他の水セメント比については測定を行っていないため，ここでは基本となるプレーンセメントペーストの圧縮強度およびヤング係数と水セメント比の関係を筆者ら[3)]の既往の研究から得られた式(5)および式(6)を用いて推定することとした。

$$\left.\begin{aligned} \overline{F}_p(x,t) &= a + b\cdot\log(1/x) \\ a &= -6.35 + 13.5\cdot\log(t) \\ b &= 125.2 - 15.8\cdot\log(t) \end{aligned}\right\} \qquad (5)$$

$$\left.\begin{aligned} \overline{E}p(x,t) &= c + d\cdot\log(1/x) \\ c &= -2024.7 + 2759.3\cdot\log(t) \\ d &= 33758 + 43.455\cdot t \end{aligned}\right\} \qquad (6)$$

各調合における圧縮強度およびヤング係数を式(5)および式(6)から算出した $\overline{F}_p$ および $\overline{E}_p$ で除した値が，それぞれの混和材混入による影響係数となる。算出した混和材混入による影響係数と混和材混入率の関係の一例を**図-4** に示す。これによると，水セメント比が同一の場合，プレーンセメントペーストと比較して高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを混入することにより，圧縮強度およびヤング係数が増加することがわかる。内割調合の場合，混和材混入率の増加に伴い，増加率が大きくなっており，その傾向は，高炉スラグ微粉末を混入した場合の方が顕著である。本論文では，これらの関係を式

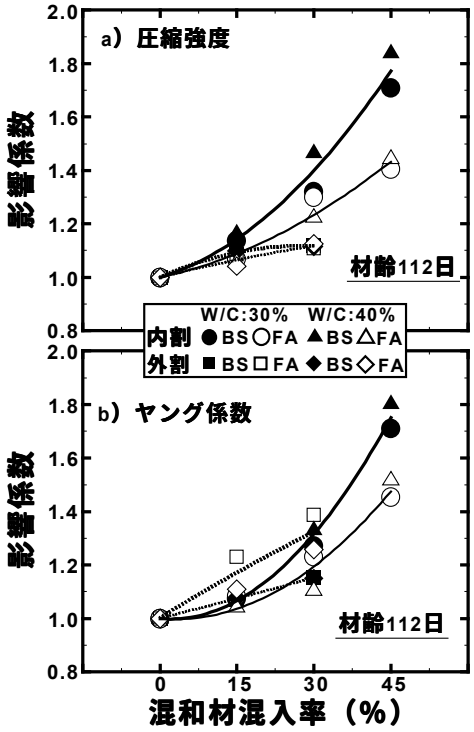

図-4　影響係数と混和材混入率の関係（112 日の場合）

(7)に示す関数で表すこととした。

$$f_1(r) = 1 + a \cdot r + b \cdot r^2$$
$$f_2(r) = 1 + c \cdot r + d \cdot r^2 \qquad (7)$$

ここに，a，b，c，d：材料定数

式(7)中の材料定数は混和材のキャラクタや試験材齢によって定まる値となるが，ここでは，実測値に最も一致する値として求めた。式(4)および式(7)を用いて求めた計算値と実測値を比較したものを**図-5**に示す。これによると値にばらつきが見られるが，ほぼ実測値を表すことができている。

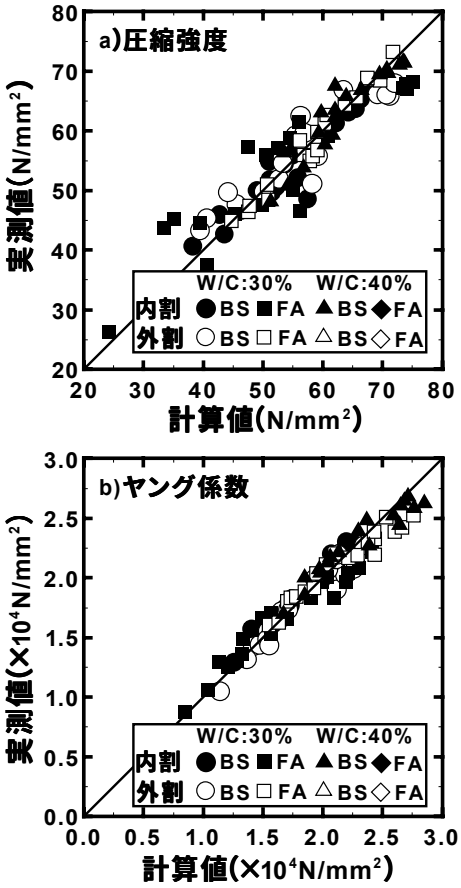

図-5　実測値と計算値の比較

5.　ペーストの乾燥収縮ひずみ S_p の評価

5.1　乾燥収縮ひずみの経時変化

図-6に材齢7日から乾燥開始した乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥収縮ひずみの経時変化を表すには，一般的に乾燥期間 t_0 の双曲線関数か指数関数が用いられる。ここでは，乾燥期間 t_0 の関数式である式(8)で近似的に表すこととした。

$$S_P(t_0) = S_{P\infty} \cdot \frac{t_0}{\gamma + t_0} \qquad (8)$$

ここに，

t_0：乾燥期間(日)，

γ：材料定数

$S_{P\infty}$：乾燥収縮ひずみの最終値($\times 10^{-6}$)

図-6によると，同一の混入率で比較すると高炉スラグ微粉末よりフライアッシュを混入しているペーストの方が乾燥収縮ひずみの値は大きくなっていることがわかるが，以下では乾燥収縮ひずみの終局値 $S_{P\infty}$ の評価を行った。算出した終局値の一覧を**表-2**に示す。

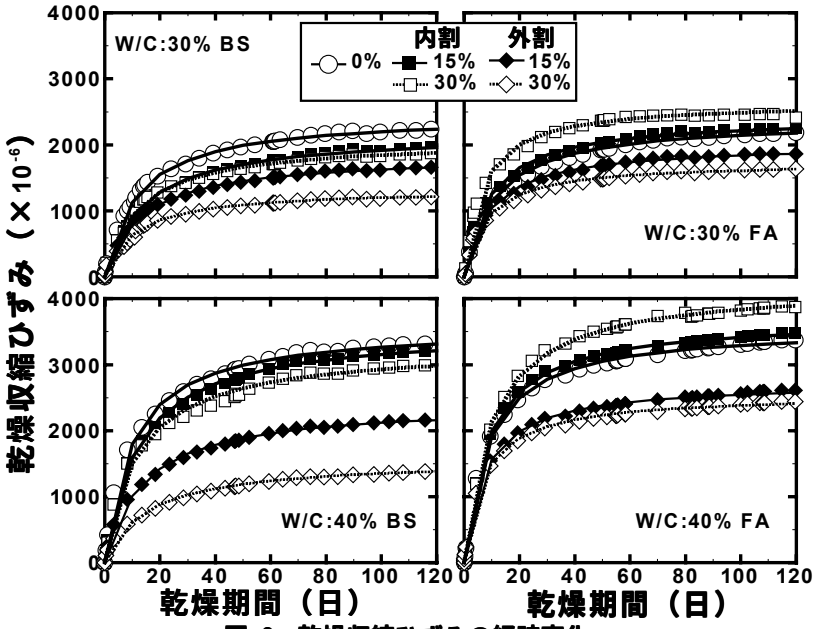

図-6　乾燥収縮ひずみの経時変化

5.2　乾燥収縮ひずみの終局値 $S_{P\infty}$ の推定

乾燥収縮ひずみと混和材混入率の関係を式(9)に示すような水セメント比 x および混和材混入率 r による関数とする。

表-2　乾燥収縮ひずみの終局値一覧

	乾燥収縮ひずみの終局値($\times 10^{-6}$)				
	0	内割		外割	
		15%	30%	15%	30%
BS30	2453	2186	2068	1841	1326
FA30	2367	2416	2643	2008	1732
BS40	3582	3542	3276	2411	1556
FA40	3565	3704	4206	2733	2541

$$S_{P\infty} = f_3(r) \cdot \overline{S}_{p\infty}(x) \qquad (9)$$

ここに，

$f_3(r)$：混和材混入による影響係数

$\overline{S}_{p\infty}(x)$：プレーンセメントペーストの乾燥収縮ひずみ($\times 10^{-6}$)

基本セメントペーストの乾燥収縮ひずみと水セメント比の関係は，筆者ら[3)]の実験より得られた式(10)を用いることとした。

$$\overline{S}_{p\infty}(x) = \alpha \cdot x^{\beta} \qquad (10)$$

$$\alpha = 1.76 \cdot t'^{0.0467}, \beta = 0.837$$

ここに，t':乾燥開始材齢(日)

各調合の乾燥収縮ひずみの実測値を式(10)から求めた $\overline{S}_{P\infty}$で除した値である影響係数と混和材混入率の関係をプロットすると**図-7** のようになる。この図より，水セメント比が同一の場合，高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを混入することにより，乾燥収縮ひずみが低減することがわかる。本論文では，これらの関係を式(11)に示す関数で表すこととした。

$$f_3(r) = 1 - a \cdot (r)^b \qquad (11)$$

ここに，a，b：材料定数

式(11)中の材料定数は混和材のキャラクタによって定まる値となるが，ここでは，材料定数 b=0.5 とし，材料定数 a は実測値に最も一致する値として求めた。**図-8** に式(9)および式(11)を用いて計算した結果と実測値を比較したものを示す。これによるとばらつきはみられるものの，ほぼ実測値を表すことができている。

6. まとめ

本論文では，コンクリートの構成材料であるセメントペーストの圧縮強度，ヤング係数および乾燥収縮ひずみと混和材混入率の関係について検討を行った。

その結果，本実験の範囲内においては，高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを混入したペーストの圧縮強度，ヤング係数および乾燥収縮ひずみの終局予測値を，混和材混入率と調合上の水セメント比をパラメータとする関数で評価が可能であることを示した。

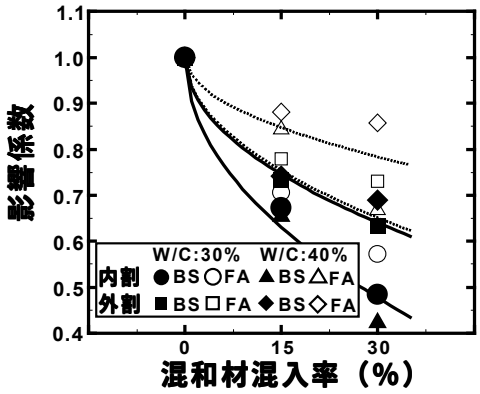

図-7　影響係数と混和材混入率の関係

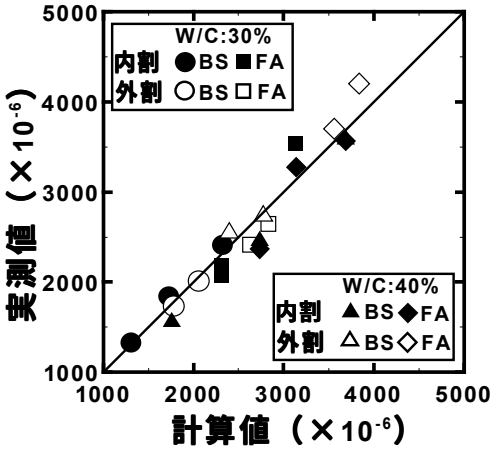

図-8　計算値と実測値の比較

謝辞

本研究は平成 13 年度文部省科学研究費補助金(奨励研究(B)，課題番号(13750542))によって行われたものである。末筆ながら付記して謝意を表します。

参考文献

1) 例えば，内川　浩：混合セメントの水和および構造形成に及ぼす混合材の効果(その1~その 4)，セメントコンクリート，No.483～No.486，1987.5～1987.11

2) 永松静也ほか：乾燥を受けるセメント硬化体の水和の進行を表す式，日本建築学会構造系論文報告集, 第 361 号, pp.21-30, 1986.3

3) 清原千鶴ほか：コンクリートの力学特性に関する基礎的研究(その 1，その 2)，日本建築学会研究報告九州支部，第 37 号･1，構造系，pp.85-92，1999.3