

論文 混和材を用いたコンクリートのヤング係数の評価方法に関する研究

清原 千鶴^{*1}・永松 静也^{*2}・佐藤 嘉昭^{*3}・三橋 博三^{*4}

要旨：本論文では、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いた普通コンクリートおよび高流動コンクリートのヤング係数を上げ、混和材混入率の影響を明らかにするとともに、構成物質であるペーストと骨材の力学特性とそれらの複合モデルからなる複合則理論を用いた推定式の提案を試みた。複合則理論を用いた推定式は、調合上の水セメント比、混和材混入率、骨材容積比など調合や材料物性値をパラメータとしたもので、実験データの比較から、その適用の可能性について言及した。

キーワード：ヤング係数、複合則理論、フライアッシュ、高炉スラグ微粉末

1. はじめに

あらゆる分野において資源循環型社会の構築に向けて努力がなされており、年々、その重要性が増している。コンクリート分野も例外ではなく、様々な種類の産業廃棄物をコンクリートへ有効利用する研究が盛んに行われている。そのような中で、新しいコンクリート用材料の適用性や適用範囲を見極めるためには、新しい材料を用いたコンクリートの基礎物性を正確に把握する必要がある。そのためには、材料によらず統一的に評価できる手法を確立しなければならない。

そこで、本研究では、多種多様にある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。本論文では、その一連の研究として、混和材を用いたコンクリートのヤング係数推定式の確立を目指したものである。筆者らは、既報¹⁾において、混和材として高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを取り上げ、コンクリートの構成物質の1つであるペーストのヤング係数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ている。そこで本論文では、

高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを内割混入した普通コンクリートおよび高流動コンクリートの圧縮強度試験を行い、ヤング係数と混和材混入率の関係について明らかにするとともに、複合則理論を用いたヤング係数推定式の適用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、混和材混入率がコンクリートのヤング係数に及ぼす影響について明らかにするため、高炉スラグ微粉末(BS)およびフライアッシュⅡ種(FA)をセメント容積の内割で混入した普通コンクリート(シリーズⅠ)および高流動コンクリート(シリーズⅡ)の供試体を作製し、圧縮強度試験を行った。

2.2 使用材料および調合

実験に使用した材料の物理的性質を表-1に示す。また、使用したコンクリートの調合を表-2に示す。本実験では、混和材の量の影響を的確に評価するため、混和材料が異なる場合においても全粉体容積が同一になるように、絶対容積調合とした。そこで、混入率の異なる調合の統一的な指標として、 V_w/V_B (水結合材容積比=

*1 大分大学助手 工学部福祉環境工学科建築コース 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 工学部福祉環境工学科建築コース 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)

表-1 使用材料の物理的性質

セメント	シリーズ I・II	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³
細骨材	シリーズ I	混合砂(海砂+山砂) 表乾密度 2.59g/cm ³ ，吸水率 2.20%
	シリーズ II	陸砂 表乾密度：2.60g/cm ³ ，吸水率：1.86%
粗骨材	シリーズ I	硬質砂岩碎石 表乾密度：2.66g/cm ³ ，吸水率：1.09%
	シリーズ II	石灰石碎石 表乾密度：2.70g/cm ³ ，吸水率：0.38%
混和材	シリーズ I	高炉スラグ微粉末 密度：2.91g/cm ³ ，比表面積：5800cm ² /g フライアッシュ II 種 密度：2.31g/cm ³ ，比表面積：3890cm ² /g 強熱減量：1.4%
	シリーズ II	高炉スラグ微粉末 密度：2.91g/cm ³ ，比表面積：6020cm ² /g 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%
混和剤	シリーズ I・II	高性能 AE 減水剤 ポリカルボン酸エーテル系

水の絶対容積/全粉体の絶対容積)を用いている。シリーズ I の普通コンクリートでは、水セメント比 0.3、0.4 のプレーンコンクリートを基本とし、それらに対して高炉スラグ微粉末、フライアッシュをセメント容積の内割で 15、30%混入した。シリーズ II の高流動コンクリートでは、単位水量 170kg/m³、粉体容積 166ℓ/m³、骨材量 634 ℓ/m³ を一定とし、全粉体容積の内割で高炉スラグ微粉末、フライアッシュを 15～60%混入した。シリーズ I の水セメント比 0.3 のコンクリートにおいては、目標スランプ 20±2cm、目標空気量 4±1%、水セメント比 0.4 においては、目標スランプ 18±2cm、目標空気量 4±0.5%を、シリーズ II では、目標スランプフロー値 60±5cm、目標空気量 3±0.5%を得るために、高性能 AE 減水剤で調整した。

2.3 実験方法

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±1℃，相対湿度 60±5%R.H.）にて封かん養生とした。圧縮強度試験はφ10×20cm の円柱供試体を用い、JIS A 1108 に準拠して行った。また、コンプレッソメータに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 の点における割線ヤング係数を算出した。

表-2 コンクリートの調合

シリーズ	V _W /V _B	混和材 混入率 (%)		W/C	s/a (%)	V _a (m ³ /m ³)	単位質量 (kg/m ³)							
							W	C	FA	BS	S	G		
I	0.95	0	0.300	41.8	0.595	175	583	—	—	645	922			
							BS	15	0.353			496	—	81
								30	0.429			408	—	161
		FA	15				0.353	496	63			—		
			30				0.429	408	126			—		
			0				0.400	438	—			—		
	1.26	BS	0.471	41.8	0.642		372	—	60	744	942			
							30	0.571	306			—	121	
							15	0.471	372			47	—	
		FA	30				0.571	306	94			—		
			0				0.324	525	—			—		
			FA				15	0.381	446			—	72	
30	0.463	367		—	145									
45	0.589	289		—	217									
II	1.02	0	0.810	47.0	0.634	170	210	—	290	645	922			
							BS	15	0.381			466	57	—
								30	0.463			367	113	—
								45	0.589			289	170	—
		60	0.810				210	226	—					

V_w/V_B：水結合材容積比，W/C：水セメント比 s/a：細骨材率，
V_a：骨材容積比（コンクリート全容積に対する全骨材容積），
W：水，C：セメント，S：細骨材，G：粗骨材
FA：フライアッシュ，BS：高炉スラグ微粉末

表-3 圧縮強度試験結果(シリーズ I)

V _w /V _B	混和材混入率 (%)	圧縮強度 (N/mm ²)				ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)			
		材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 56 日	材齢 91 日	材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 56 日	材齢 91 日
		0	15	30	45	0	15	30	45
0.95	BS	56.5	60.3	65.5	67.2	3.23	3.42	3.44	3.56
		56.4	58.6	69.2	69.5	3.21	3.48	3.55	3.64
		47.5	50.7	69.0	66.9	3.16	3.41	3.56	3.62
	FA	47.7	60.3	66.0	68.9	3.10	3.20	3.39	3.48
		40.0	53.6	56.5	57.5	2.90	2.97	3.18	3.30
		42.9	53.3	60.3	61.1	2.98	3.23	3.38	3.58
1.26	BS	39.3	54.0	57.8	61.5	2.94	3.24	3.35	3.39
		35.4	51.5	57.4	61.4	2.94	3.22	3.34	3.54
		38.6	47.9	50.8	56.3	2.90	3.16	3.29	3.38
	FA	27.5	35.1	41.6	44.3	2.64	2.92	3.02	3.10

2.4 圧縮強度試験結果

(1) 普通コンクリート(シリーズ I)

表-3 に圧縮強度試験結果(3 本平均)の一覧を、図-1 にヤング係数の経時変化を示す。なお、図中の曲線は対数関数にあてはめた回帰曲線である。表-3 および図-1 より同一の混入率で比較すると、高炉スラグ微粉末混入コンクリートの方が圧縮強度およびヤング係数ともフライアッシュ混入コンクリートよりも大きくなっている。また、高炉スラグ微粉末を混入した供試体は、圧縮強度およびヤング係数ともに、材齢 28 日から基本コンクリートと比較して同等かそれ以上の強度が得られているが、フライ

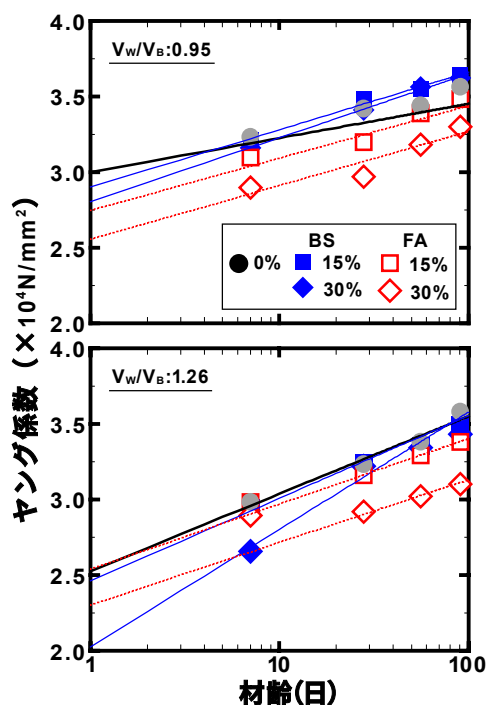


図-1 ヤング係数の経時変化(シリーズ I)

アッシュを混入した供試体は材齢 91 日においても混入率の増加に伴い、強度が低下している。このことから、高炉スラグ微粉末はフライアッシュよりも強度発現性能が高いことが分かる。

図-2 に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図中の曲線はべき関数で近似した近似曲線である。同じ圧縮強度時のヤング係数を比較すると、圧縮強度 40N/mm^2 以下においてフライアッシュを混入したコンクリートのヤング係数が大きくなる傾向を示している。

(2) 高流動コンクリート(シリーズ II)

表-4 に圧縮強度試験結果(3 本平均)の一覧を、図-3 にヤング係数の経時変化を示す。なお、図中の曲線は対数関数にあてはめた回帰曲線である。

高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ混入コンクリートともに混入率が高いほど圧縮強度が低下しており、その傾向はフライアッシュを用いた方が顕著に表れている。また、その低下率はフライアッシュ混入コンクリートの方が大きい。シリーズ I の普通コンクリートと比較すると、強度発現性能は高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ混入コンクリートと

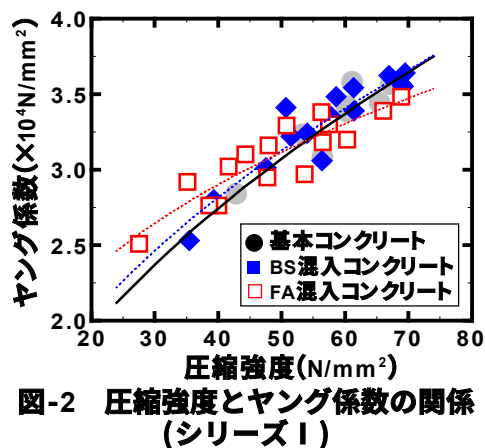


図-2 圧縮強度とヤング係数の関係(シリーズ I)

表-3 圧縮強度試験結果(シリーズ II)

混和材 混入率 (%)		圧縮強度 (N/mm ²)				ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)			
		材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 56 日	材齢 91 日	材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 56 日	材齢 91 日
0		62.0	72.4	78.9	82.4	3.53	3.78	3.80	3.83
BS	15	59.4	70.5	75.9	82.8	3.18	3.61	3.80	3.81
	30	53.3	69.1	79.7	80.2	3.01	3.57	3.83	3.80
	45	45.6	68.1	71.0	77.0	2.86	3.59	3.62	3.57
	60	39.9	60.1	70.8	70.2	2.69	3.42	3.47	3.57
FA	15	52.8	66.7	75.9	82.3	3.35	3.49	3.76	3.81
	30	45.5	56.7	65.7	71.3	3.06	3.23	3.52	3.80
	45	34.3	45.5	49.8	59.1	2.76	2.97	3.20	3.60
	60	23.9	36.9	40.1	43.8	2.50	2.81	2.91	3.26

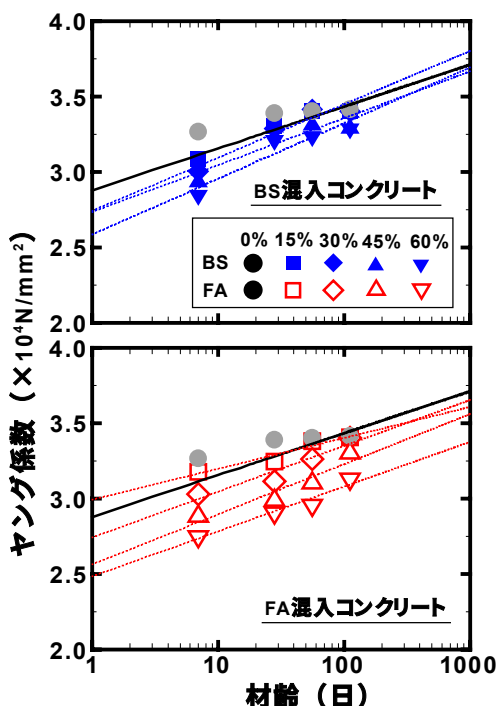


図-3 ヤング係数の経時変化(シリーズ II)

もに低くなっている。

図-4 に圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図中の曲線はべき関数で近似した曲線である。シリーズ I の結果と比較して、高流動コンクリ

ートの実験結果では、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ混入コンクリートともに、基本コンクリートよりも若干低めの値を示しており、その傾向は低強度において顕著になる傾向を示している。

3. 複合則理論を用いたヤング係数の推定式

3.1 複合則理論式

コンクリートは二相モデルであるという仮定に基づいて得られた複合理論式は、骨材境界面に形成される遷移領域の影響を考慮していないため、実測値より大きい値を与えることが指摘されている²⁾。そこで、ここでは、Hashin-Hansenの式に骨材界面に生じるマイクロクラックおよび骨材の境界層の影響に対し、見かけ上骨材のヤング係数が低下すると考え、補正係数 k を導入した式(1)を用いることとした。

$$Ec = Ep \cdot \frac{(1-Va)Ep + (1+Va)(k \cdot Ea)}{(1+Va)Ep + (1-Va)(k \cdot Ea)} \quad (1)$$

ここに、

Ep : 母材ペーストのヤング係数(N/mm²)

Ea : 骨材のヤング係数(N/mm²)

Va : 骨材容積比, k : 補正係数

式(1)の適用に際して、各構成材料のヤング係数は具体的で分かり易く、かつ定量化が可能なものが望ましい。ここでは、母材ペーストのヤング係数および骨材のヤング係数を以下のように推定することとした。

3.2 母材ペーストのヤング係数の推定

コンクリート中のペーストのヤング係数は直接的に確定することは出来ない。そこで、同じ水セメント比のペーストを単独に作製して得られたヤング係数を利用することとなる。既報¹⁾において、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いたペーストの実験結果を基に、これらのヤング係数を調合上の水セメント比と混和材混入率をパラメータとする式(2)の関数で表される可能性を示した。

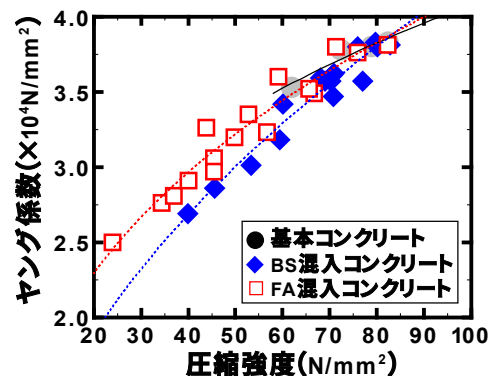


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係 (シリーズII)

$$E_p = f_1(r) \cdot \bar{E}_p(x, t) \quad (2)$$

$$\bar{E}_p(x, t) = \frac{A \cdot t}{1+t} \quad A = 0.036 + 0.66 \cdot \frac{1}{x}$$

$$f_1(r) = 1 + c \cdot r + d \cdot r^2$$

ここに、

$f_1(r)$: ヤング係数に及ぼす混和材混入による影響係数

$\bar{E}_p(x, t)$: プレーンセメントペーストのヤング係数(N/mm²)

r : 混和材混入率(%), x : 水セメント比

t : 材齢(日)

式(2)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、混和材を内割混入した場合は、混入率の増加とともに水セメント比は大きくなる。混和材の影響係数は、潜在水硬性およびポズラン反応の影響を考慮して、既報¹⁾の実験結果より、材料定数 c を、材齢 t をパラメータする対数関数で、材料定数 d を混和材の種類によって定まる定数として表すこととした。本論文では実験結果より得られた実験式を用いたが、影響係数の材料定数は、混和材のキャラクタによって定まる値であり、今後さらに検討していかなければならない。用いた近似式の一覧を表-4に示す。

式(2)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。これによると値に若干ばらつきが見られるが、ほぼ実測値を表している。そこで、以下では、母材ペーストのヤング係数を式(2)で推定することとした。

3.3 骨材のヤング係数の推定

骨材のヤング係数は、コンクリートの力学特性に大きく影響を及ぼしているが、実際にはその値は曖昧である。そこで、骨材の何らかの普遍的な特性とヤング係数を結びつけるデータが必要となってくる。ここでは骨材の吸水率に着目した。既往の実験データ³⁾⁴⁾より、骨材のヤング係数を式(3)に示す実験式で表すこととした。

$$\left. \begin{matrix} E_s \\ E_g \end{matrix} \right\} = \frac{5.89}{\mu^{0.22}} \times 10^4 \quad (3)$$

ここに、 μ ：吸水率(%)

細骨材および粗骨材のヤング係数(E_s および E_g)は式(3)を用いることで算出できる。骨材のヤング係数(E_a)は、細骨材および粗骨材の絶対容積比を乗じた値(式(4))とした。算出した骨材のヤング係数の一覧表を表-5に示す。

$$E_a = S_a \cdot E_s + (1 - (s/a)) \cdot E_g \quad (4)$$

ここに、

s/a ：細骨材率(%)

E_s ：細骨材のヤング係数(N/mm²)

E_g ：粗骨材のヤング係数(N/mm²)

3.4 ヤング係数の推定

式(1)とこれに付随する式(2)、式(3)および式(4)が本論文において提案する混和材を用いたコンクリートのヤング係数の推定式である。これらの式は、調合上の水セメント比、骨材の吸水率、混和材混入率、骨材容積比を調合や材料物性に関わるパラメータとしており、調合設計時に得られるデータを用いて、任意の材齢における高炉スラグ微粉末およびフライアッシュ混入コンクリートのヤング係数を予測できることになる。

本提案式を検証するために、2章で行った実験データを基に、式(2)よりペーストのヤング係数を、式(3)、式(4)より骨材のヤング係数を推定し、これらの値を式(1)に代入してコンク

表-4 材料定数

	BS	FA
c	$0.0065 + 0.0045 \cdot \log(t)$	
d	1×10^{-5}	-1×10^{-5}

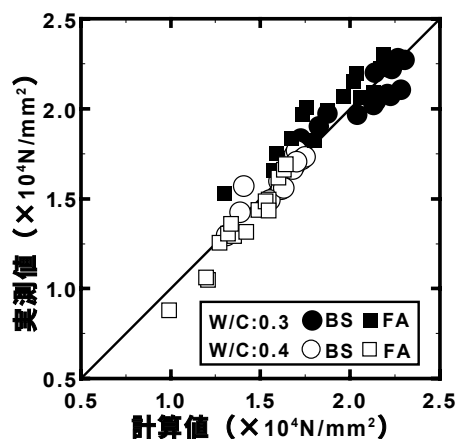


図-5 ペーストのヤング係数の算出結果

表-5 骨材のヤング係数の算出

シリーズ	W/C	s/a (%)	E_s (N/mm ²)	E_g (N/mm ²)	E_a (N/mm ²)
I	0.3	41.8	4.93×10^4	5.75×10^4	5.41×10^4
	0.4	44.8			5.38×10^4
II	0.324	47.0	5.12×10^4	7.25×10^4	6.24×10^4

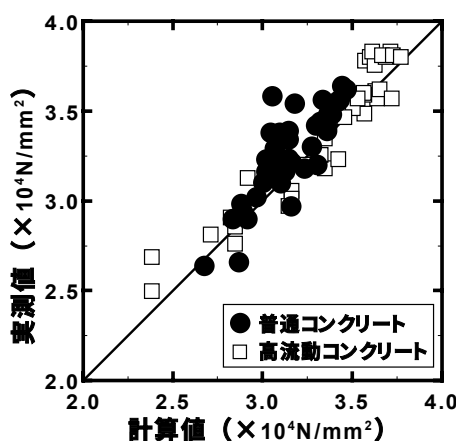


図-6 計算値と実測値の比較 (本実験結果)

リートのヤング係数の推定を行った。なお、遷移領域の影響を考慮するために導入した補正係数は、各調合および材齢において実測値から逆算して求めることとした。その結果、求めた補正係数は材齢および混和材混入率によらずほぼ一定の値を示していたため、ここでは補正係数 k は平均値(0.87)とした。図-6に推定値と

実測値の関係を示す。これによるとばらつきはあるもののほぼ実測値を表しているものと思われる。影響係数の材料定数の設定および遷移領域を加味した補正係数の導入については依然として課題を残しているが、本実験の範囲内においては本提案式を用いることによって任意材齢の高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いたコンクリートのヤング係数を推定が可能であると考えられる。

4. 本提案式の適用性の検証

3 節で提案した複合則理論を用いたヤング係数推定式の汎用性を探るため、1992～2002 年の間において公表された高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いたコンクリートのヤング係数に関する実験データを収集し、検証を行った。収集したデータは、コンクリートの圧縮強度、ヤング係数、コンクリートの調合、使用材料の種類・物性である。なお、使用されているセメントの種類は普通ポルトランドセメントに限定した。

図-7 に収集した実測データ(データ数 $n=188$)と本提案式を用いて算出した計算値の関係を示す。本提案式の補正係数 k は本実験で得られた値である $k=0.87$ を用いた。図中の点線は $\pm 10\%$ 誤差の範囲を示している。また、図-8 に計算値と実測値の比とヤング係数(実測値)の関係を示す。本提案式で算出した値は、実測値よりも若干大きい値を示す傾向にあることが分かる。しかしながら、計算値と実測値の比の平均値は 1.02、その変動係数は 6.1% となっており、比較的高い精度で実測値を推定しており、本提案式の汎用性を確認できた。

5. まとめ

本研究では、高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いたコンクリートのヤング係数の推定式を提案し、その適用性について検証した。その結果、高炉スラグ微粉末およびフライを混入したコンクリートのヤング係数は式(1)

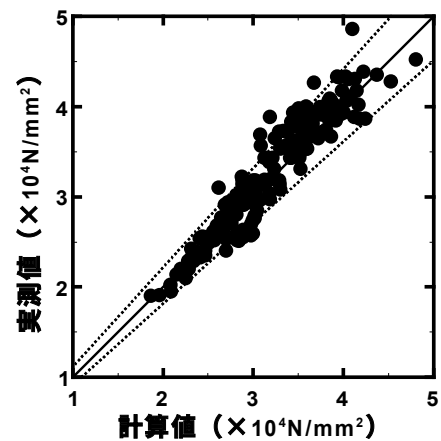


図-7 計算値と実測値の比較(収集データ)

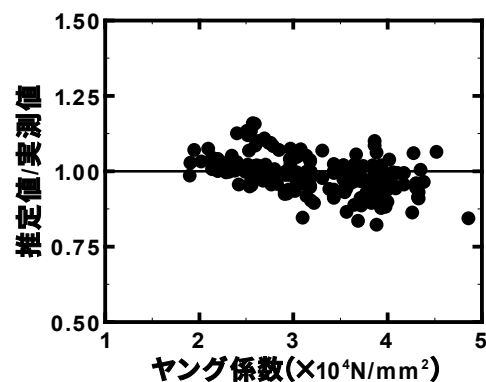


図-8 ヤング係数と推定値/実測値の関係

とこれに付随する式(2)、式(3)および式(4)により推定できることが分かった。また、公表された実験データを収集し、推定式の汎用性を確認した結果、実測値より $\pm 10\%$ 程度の精度で推定できることが分かった。

謝辞

本研究の一部は平成 14 年度財団法人実吉奨学金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) 清原千鶴, 永松静也ほか: 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, コンクリート工学年次論文集, 第 24 巻, 第 1 号, pp.339-344, 2002.7
- 2) 川上英男: コンクリートの弾性係数に及ぼす骨材と境界層の影響, コンクリート工学年次論文集, 第 22 巻, 第 2 号, pp.529-534, 2000.7
- 3) 立松和彦: コンクリートの細孔分布と耐久性に関する研究, 浅沼組技術研究所報(別冊), pp.17-26, 2001.5
- 4) 山口梅太郎, 西松裕一: 岩石力学入門, 財団法人東京大学出版会, pp.123-168, 1991.8