複合則理論を用いたコンクリートのヤング係数の推定式に関する研究

STUDY ON EQUATION FOR PREDICTING ELASTIC MODULUS OF CONCRETE BASED ON THE THEORY OF COMPOSITE MATERIAL

清原 千鶴*, 永松 静也**, 佐藤 嘉昭***, 三橋 博三****

Chizuru KIYOHARA, Seiki NAGAMATSU, Yoshiaki SATO
and Hirozo MIHASHI

For high-strength and high-fluidity concrete, the water-cement ratio and the volume fraction of aggregate is lower than conventional concrete. In order to clarify systematically the deformation of these concrete, it is necessary to consider the effect of the volume of constituents in concrete. In this study, the estimation formula of modulus of elasticity of concrete was derived on the basis of a two-phase composite material model through experiments on the compressive strength and secant modulus of cement paste and concrete specimen with a same water-cement ratio respectively. The following conclusions may be drawn: 1) the relationships between cement-water ratio and modulus of elasticity of cement paste and concrete specimen were expressed by comparatively simple equations. 2) the elastic modulus of cement paste can be explained as a function of the cement-water ratio, and that of aggregate as a function of its absorption. 3) the proposed equation is able to estimate the compressive secant modulus of both normal and high strength concrete.

Keywords: Secant modulus of elasticity, Compressive strength, Theory of composite material, Two-phase model,
Volume fraction of aggregate, Cement paste

ヤング係数, 圧縮強度, 複合則理論, 二相材料, 骨材容積, セメントペースト

1. はじめに

本研究は, 多種多様にあるコンクリートのヤング係数をコンクリートの調合設計時における水セメント比, 単位水量および骨材の物性を要因として推定を行う方法を提案するものである。

コンクリートのヤング係数は, 構造設計時に部材の変形や剛性を評価するための材料の特性として要求される基本的な因子であり, その値が設計上の値と大きく異ならないよう配慮が必要となる。コンクリート構造物の性能規定や性能照査が要求される情勢のなか, コンクリート構造物の使用限界を検討する上においても, 調合設計時におけるコンクリートのヤング係数の正確な評価は意味があると考えられる。

コンクリートは, セメントペーストと細骨材および粗骨材を主成分とする複合材料であり, ヤング係数は構成する物質の変形性状の和として表されるため, 複合則理論が成立する。したがって, コンクリートのヤング係数は, セメントペーストおよび骨材のヤング係数とそれらの構成比の関数で表すことができる。これらの式は理論的に明確であり, コンクリートの調合および構成物質の物性に関するデータを用いることによって, コンクリートのヤング係数を算出することができる。

コンクリートのヤング係数の推定方法としては, 大きく分けると複合則理

論を用いる方法と日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」¹⁾に示されているような数多くの実験結果に基づいて圧縮強度や単位容積質量をパラメータとする推定式(式(1))を用いる方法がある。通常, 式の簡単さ, 実用的価値の高さから, 式(1)に示されるような推定式が用いられている。

$$E = 33.5 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{\gamma}{2.4} \right)^2 \times \left(\frac{F_c}{60} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

ここに, E : コンクリートのヤング係数 (kN/mm²)

F_c : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

γ : コンクリートの単位容積質量 (t/m³)

k_1, k_2 : 骨材, 混和材による定数

ここで, 過去10年間に於いて日本国内で発表された圧縮強度とヤング係数の関係を調べてみると, 図-1に示すように骨材容積比(コンクリートの容積に対する骨材の容積の比)は0.45~0.75の範囲となっており, 同じ水セメント比でも骨材容積比には大きな差が見られる。また図-2に示すように骨材容積比0.45~0.75の範囲でヤング係数が大きく変化している。実験結果に基づいたヤング係数推定式では, コンクリート

* 大分大学工学部福祉環境工学科建築コース 助手・工修

** 北九州市立大学国際環境工学部環境空間デザイン学科
教授・工博

*** 大分大学工学部福祉環境工学科建築コース 教授・工博

**** 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授・工博

Research Assoc., Dept. of Architecture Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., M. Eng.
Prof., Dept. of Environmental Space Design, Faculty of Environmental Eng.,
Kitakyushu Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Building Eng., Graduate School of Eng., Tohoku
Univ., Dr. Eng.

図-1 水セメント比と骨材容積比の関係

図-2 骨材容積比と水セメント比の関係

の単位容積質量(γ)の中に構成物質の量の影響が集約される形となっている。しかし、現在では、普通コンクリートと比べて低水セメント比、高セメント量である高強度および高流動コンクリートを代表とする高機能、高性能コンクリートの開発が進められており、このような多種多様なコンクリートに対応するヤング係数推定式を構築するためには、複合則理論に基づいて構成物質の変形性状とその構成量から推定の方がより汎用性が高いものと考えられる。また、川上の研究²⁾に示されているように、圧縮強度とヤング係数は異なる物理量であるため、複合材料としてのコンクリートのヤング係数を推定する場合、構成物質のヤング係数とその量に基づいて評価の方が理論的である。しかしながら、複合則理論に基づく推定方法は、複合モデルの弾性理論解に基づいているため、精密なモデルになるほどその式は複雑となることに加えて、構成材料の物性値が容易に得られないことなどによりコンクリートの工学的な取り扱いに適しておらず、実用化されていないのが現状である。

本研究では、複合則理論を用いた実用的なコンクリートのヤング係数の推定式を確立することを最終目的としている。本論文は、その最初のステップであり、養生条件およびセメントの種類を一定とした条件下における普通コンクリート、高強度コンクリートおよび軽量コンクリート I 種のヤング係数の推定式を提案することとし、筆者らがこれまでに行ってきたセメントペースト³⁾、普通コンクリート⁴⁾、高強度コンクリート⁵⁾および軽量コンクリート I 種⁶⁾に関する実験結果を基に、複合則理論を用いた推定式の適用性について検討を行った。

2. 実験

2.1 実験概要

本論文では、細骨材および粗骨材ともに普通骨材を用いたコンクリートに関する実験 I、実験 II、粗骨材に軽量骨材を用いたコンクリート(軽量コンクリート I 種)に関する実験 III の 3 シリーズの実験について検討を行った。これらの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。軽量骨材は流紋岩(真珠岩の一種)系ガラス質微粉末を主原料とした造粒型人工軽量骨材である。表-1 に示すように軽量骨材の吸水率は 24 時間で 3.3% と小さいことから、骨材のプレウェッチングは行わず、混練時に 24 時間吸水分を練り混ぜ水に加えることとした。

実験 I では水セメント比を 0.25~0.65 の 5 種類とし、単位水量 170kg/m³を基準とした 11 調合とした。実験 II では、水セメント比を

表-1 使用材料の物理的性質

セメント	実験 I ~ III	普通ポルトランドセメント 密度:3.16g/cm ³
細骨材	実験 I	松岡・蒲江産混合砂(海砂+山砂) 密度:2.60g/cm ³ , 吸水率:2.52%, 粗粒率:2.62
	実験 II	松岡・蒲江産混合砂 密度:2.60g/cm ³ , 吸水率:2.52%, 粗粒率:2.62
	実験 III	大分市片島産山砂 表乾密度:2.61g/cm ³ , 吸水率:1.68%, 粗粒率:2.68 長浜・平島産海砂 表乾密度:2.56g/cm ³ , 吸水率:1.74%, 粗粒率:2.66
粗骨材	実験 I	松岡産硬質砂岩砕石 密度:2.67g/cm ³ , 吸水率:0.38%, 粗粒率:6.79
	実験 II	松岡産硬質砂岩砕石 密度:2.66g/cm ³ , 吸水率:1.24%, 粗粒率:5.72
	実験 III	造粒型人工軽量骨材 (主原料: 流紋岩系ガラス質微粉末) 表乾密度:0.92g/cm ³ , 24h 吸水率:3.3%(カタログ値)
混和剤	実験 I ~ III	高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸エーテル系) ※実験 II は AE 助剤も使用

表-2 調合表

実験	W/C	s/a (%)	単位質量(kg/m³)				高性能 AE 減水剤 (C×%)	Va (m³/m³)	
			W	C	S	G			
実験Ⅰ	0.25	36.6	170	680	536	950	1.30	0.570	
	0.35	39.1	170	486	635	1011	1.20	0.631	
	0.45	46.0	160	356	808	969	1.40	0.682	
		44.6	170	378	762	970	1.10	0.665	
		43.2	180	400	720	969	0.85	0.648	
	0.55	46.6	160	291	842	987	1.80	0.703	
		46.4	170	309	820	969	1.20	0.687	
		45.1	180	327	778	970	1.00	0.671	
	0.65	49.3	170	262	890	936	1.80	0.702	
		47.3	175	269	844	964	1.65	0.695	
		47.2	180	277	834	954	1.35	0.687	
実験Ⅱ	0.25	38.0	150	600	608	1014	1.76	0.615	
		38.0	160	640	874	962	1.70	0.583	
		38.0	170	680	552	926	1.70	0.560	
		38.0	180	720	530	889	1.70	0.538	
	0.30	40.0	150	500	660	1017	1.80	0.636	
		40.0	160	533	639	984	1.60	0.616	
		40.0	170	567	618	952	1.50	0.596	
		40.0	180	601	597	920	1.40	0.575	
	0.35	43.0	150	429	734	1000	1.80	0.658	
		43.0	160	457	710	971	1.67	0.638	
		43.0	170	486	692	943	1.50	0.621	
		43.0	180	514	671	914	1.20	0.602	
実験Ⅲ	0.30	38.3	165	550	369	242	323	0.80	0.616
	0.40	43.3	165	413	447	293	318	0.80	0.659
	0.50	46.7	170	340	495	324	307	0.90	0.677
	0.60	47.5	175	292	512	335	307	1.20	0.688

W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率, W: 水, C: セメント, G: 粗骨材, S: 細骨材, Va: 骨材容積比

0.25, 0.30, 0.35の3種類とし、それぞれの水セメント比において単位水量を150~180kg/m³の4種類に変化させた12調合とした。実験Ⅲでは水セメント比を0.30~0.60の4種類とした。全てのコンクリートに使用したセメントは普通ポルトランドセメントである。実験Ⅰおよび実験Ⅲでは目標スランプ18±2cm, 空気量4.5±1%を、実験Ⅱでは目標スランプ20±2cm, 空気量3.5±1%を満足するように高性能AE減水剤で調整を行った。

供試体はすべて材齢1日で脱型し、圧縮強度試験時まで恒温恒湿室内(温度20±1℃, 相対湿度60±5%)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に準拠した。また、圧縮強度試験時に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、JIS A 1149に準拠しヤング係数を算出した。

2.2 実験結果

表-3に材齢28日および1年の圧縮強度試験結果の一覧を示す。また、図-3に材齢28日における圧縮強度とヤング係数の関係を示す。図中の曲線は両者の関係を式(2)に示すようなべき乗関数で回帰した回帰曲線である。

$$E_c = a \cdot F_c^b \quad (2)$$

ここに、 a , b : 材料定数, F_c : 圧縮強度 (N/mm²)

これによると、同一の圧縮強度で比較すると軽量コンクリートのヤング係数が小さいことが分かる。また、圧縮強度が増加する割合に対してヤング係数が増加する割合が小さく、その傾向は高強度の範囲や軽量コンクリートに顕著に見られる。

3. 複合則理論式の適用

コンクリートのヤング係数の推定フローを図-4に示す。複合則理論の適用にあたって、コンクリートをモルタルと粗骨材、あるいはセメントペーストと骨材全体のどちらでモデル化するのが妥当かという点については未だ結論は出ていない。本研究では、コンクリートを母材セメントペーストと骨材の二相材料として取り扱うこととした。

B. Paul⁷⁾によれば、コンクリートに作用する応力が一様であるとき、またコンクリート中の各相に生じるひずみおよび応力が一様であるとき、二相系複合材料のヤング係数の上限値と下限値は並列式および直列式で予測可能となる。しかしながらコンクリート中に発生する応力やひずみのいずれも一様分布ではない。そこで、上限値および下限値の中間の値を与える式が数多く提案されているが、本研究では、Hashin-Hansen式⁸⁾である式(3)を用いることとした。この式は、複合モデルを幾何学モデルとし、構成材料の相互作用から理論的に求めたHashin式をHansenが構成材料のポアソン比を一定値($\mu_a = \mu_m = \mu_c = 0.2$)とし実用的な式にしたものである。

$$\frac{E_c}{E_m} = \frac{(1-V_a) \cdot E_m + (1+V_a) \cdot E_a}{(1+V_a) \cdot E_m + (1-V_a) \cdot E_a} \quad (3)$$

ここに、 E_c, E_m, E_a :

コンクリート、母材および骨材のヤング係数 (N/mm²)

V_a : 骨材容積比 (m³/m³)

本研究では、コンクリートを母材セメントペーストと骨材の二相材

表-3 圧縮強度試験結果

実験	W/C	単位 水量 (kg/m ³)	材齢 28 日		材齢 1 年	
			圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)
実験Ⅰ	0.25	170	73.9	3.63	83.8	4.19
	0.35	170	55.2	3.33	65.9	3.94
	0.45	160	34.2	2.88	45.7	3.34
		170	37.1	2.84	45.4	3.38
		180	39.9	2.89	54.0	3.43
	0.55	160	29.3	2.66	36.1	2.96
		170	30.4	2.68	35.3	2.98
		180	32.4	2.75	37.5	3.16
	0.65	170	22.7	2.38	27.8	2.76
		175	26.2	2.49	31.4	2.61
		180	25.6	2.49	31.0	2.78
実験Ⅱ	0.25	150	73.2	3.47	81.5	3.75
		160	61.5	3.34	83.7	3.80
		170	72.0	3.26	85.7	3.84
		180	71.9	3.33	82.6	3.80
	0.30	150	68.6	3.72	78.0	3.92
		160	64.7	3.44	75.4	3.83
		170	64.5	3.39	79.4	3.62
		180	61.2	3.28	74.8	3.71
	0.35	150	48.8	3.42	67.9	3.78
		160	54.0	3.27	72.4	3.71
		170	41.3	3.29	65.0	3.51
		180	37.1	2.99	64.2	3.25
実験Ⅲ	0.30	165	43.2	1.84	51.4	2.00
	0.40	165	33.0	1.63	37.7	1.84
	0.50	170	27.4	1.59	34.3	1.75
	0.60	175	24.3	1.52	32.2	1.70

図-3 コンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係 (材齢 28 日)

図-4 複合則理論を用いたコンクリートのヤング係数の推定フロー

料として取り扱うため、式(3)の母材のヤング係数 E_m はセメントペーストのヤング係数 E_p と表すことにする。

複合則理論式(式(3))の適用にあたって、母材セメントペーストおよび骨材のヤング係数が必要になるが、各構成材料のヤング係数は簡単な式で表現できることが望ましい。ここでは、各構成材料のヤング

係数について以下のように推定を行った。

3.1 セメントペーストのヤング係数(E_p)の推定

コンクリート中のセメントペーストのヤング係数は直接測定することが出来ない。そこで、コンクリートと同じ水セメント比のセメントペーストを単独で作製して得たヤング係数³⁾を利用することとした。本研究ではコンクリート中の母材セメントペーストのヤング係数は、単独で作製したヤング係数を基に、次のように仮定することとした。

$$E_p(x, t) = k \cdot \bar{E}_p(x, t) \quad (4)$$

ここに、 E_p ：コンクリート中のセメントペーストのヤング係数
($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

$\bar{E}_p$ ：単独で作製したセメントペーストのヤング係数
($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

k ：補正係数

x ：水セメント比(W/C)， t ：材齢(日)

式(4)に示すように、本研究では、コンクリート中の母材セメントペーストは、骨材界面に生じるマイクロクラックおよび骨材界面に形成される遷移帯領域の影響を受けて、見かけ上母材セメントペーストのヤング係数が低下すると考えて補正係数 k を導入した。しかし、この補正係数 k は、水セメント比や測定材齢などの影響をうけ、事前に特定するのは困難である。そこで、ここでは、材齢および水セメント比をパラメータとして表すこととしたが、補正係数の算出方法は後述することにする。

水セメント比0.25～0.65のセメントペーストを作製し、圧縮強度試験を行い、ヤング係数を算出した。セメントペーストは、混練後、ブリーディング水がなくなり、打設可能となるフロー値200mm程度になるまでの2、3時間の間、密封容器の中で定期的に攪拌し、その後型枠に成型した。また、全ての供試体はコンクリート供試体と同様に、圧縮強度試験時まで恒温恒湿室内にて封かん養生とした。

表-4に単独で作製したセメントペースト供試体を用いた圧縮強度試験結果を示す。図-5に単独で作製したセメントペーストのヤング係数 $\bar{E}_p$ の経時変化を示す。水セメント比によらず材齢28日までは急激にヤング係数が上昇するが、その後値は一定値に収束する傾向を示している。本研究では式(5)に示すような水セメント比および試験材齢をパラメータとする双曲線関数で回帰することとした。図中の曲線が回帰曲線である。本実験と同様の一定条件下においては、式(4)および式(5)を用いることによって、任意の水セメント比および材齢のセメントペーストのヤング係数が推定できることとなる。

$$\bar{E}_p(x, t) = \frac{A \cdot t}{1+t} \quad A = 0.036 + 0.66 \cdot \frac{1}{x} \quad (5)$$

ここに、 t ：材齢(日)， x ：水セメント比

3.2 骨材のヤング係数(E_a)の推定

骨材のヤング係数は、試料を成型して測定することも可能ではあるが、多種多様にある骨材の弾性係数を直接求めることは容易ではない。そこで、以下に示すようにそれぞれの骨材のヤング係数(E_a)を間接的に求めた。

表-4 セメントペーストの圧縮強度試験結果一覧

W/C	圧縮強度(N/mm ²)						ヤング係数($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)					
	3日	7日	28日	56日	112日	365日	3日	7日	28日	56日	112日	365日
0.25	66.8	70.7	72.6	73.9	75.4	76.4	1.94	2.27	2.40	2.45	2.60	2.62
0.35	55.5	62.1	64.6	65.6	65.3	65.8	1.60	1.73	1.90	2.01	2.12	2.13
0.45	38.5	49.0	54.4	55.0	56.3	56.4	1.09	1.22	1.52	1.56	1.55	1.61
0.55	26.5	34.9	43.7	46.8	46.9	48.0	0.81	0.95	1.19	1.24	1.12	1.26
0.65	17.5	23.2	32.2	34.7	37.1	37.3	0.58	0.70	0.95	1.00	1.03	1.09

図-5 セメントペーストのヤング係数(E_p)の経時変化

図-6 骨材のヤング係数と吸水率の関係

(1) 普通骨材

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、実際には同じ岩石名のものでも、生成年代や深さ、地域、風化の度合いなどによって性質が様々に異なるため、骨材のヤング係数は曖昧である。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、骨材のヤング係数との関係性について調べた。図-6に既往の研究より得られた骨材のヤング係数と吸水率の関係を示す。荻野¹⁰⁾の研究によれば吸水率とヤング係数との間には有意水準1%で相関関係があると述べている。また、その他の研究者も吸水率とヤング係数の相関性について認めている。そこで、図-6の収集データより骨材のヤング係数は、式(6)に示す実験式で表すこととした。しかしながら、図に示すように同じ吸水率においてもヤング係数の値が大きく異なっているものもあり、骨材のヤング係数とどのような特性を結びつけるのが最も妥当かについては、今後も引き続き検討していく必要がある。

$$\left. \begin{matrix} E_s \\ E_g \end{matrix} \right\} = \frac{5.89}{\mu^{0.22}} \quad (6)$$

ここに、 E_s ：細骨材のヤング係数($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

E_g ：粗骨材のヤング係数($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

μ ：吸水率(%)

(2) 軽量骨材

軽量骨材のヤング係数は、普通骨材のヤング係数と比較すると小さく、ヤング係数と吸水率の関係は式(6)では表すことができない。そこで、軽量骨材を成型加工せず強度評価を行っている原田ら¹⁷⁾の研究に基づいて軽量骨材の圧壊試験を行い、球面と平面の接触応力より式(7)を用いて軽量骨材のヤング係数を求めることとした。軽量コンクリートの練混ぜにおいて骨材のプレウェッチングを行っていないことから、圧壊試験で用いた骨材は気乾状態のものを用いた。

$$E_g = \frac{3 \cdot P \cdot E_1 \cdot (1 - \nu_2^2)}{\sqrt{16 \cdot \delta^3 \cdot r \cdot E_1^2 - 9 \cdot P^2 \cdot (1 - \nu_1^2)^2}} \quad (7)$$

ここに、 δ ：変位(mm)， P ：荷重(N)，

r ：骨材半径(mm)， E_1 ：圧板の弾性係数(N/mm²)

ν_1, ν_2 ：圧板、骨材のポアソン比

式(7)において $E_1=2.1 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ ， $\nu_1=\nu_2=0.3$ と仮定し、 δ は測定変位から圧板自体の変位を除去したものをを用いた。圧壊強度は骨材径による影響を受けることが考えられるため、骨材径が15mm程度のものを採取して行った。圧壊試験は図-7に示すよう載荷板に骨材を挟み0.5mm/minの速さで載荷した。受圧面で圧壊しているが、いずれの骨材も中心部で引張破壊を起こしていることが確認できた。表-5にヤング係数の計算結果を示す。これより使用した軽量骨材のヤング係数を $1.45 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ とした。本論文で示した軽量骨材のヤング係数の算出方法は骨材の成形などを必要とせず、簡便な実験を行うものであり、他の軽量骨材にも適用できるものと思われる。しかしながら、主原料として産業廃棄物を使用した新しい軽量骨材が開発されており、軽量骨材も普通骨材と同様に普遍的な特性との関係について検討する必要があるものと思われる。

(3) ヤング係数の算出

細骨材および粗骨材のヤング係数は式(6)および式(7)を用いることで算出できる。本研究では、コンクリートをセメントペーストと骨材(細骨材+粗骨材)の二相材料として取り扱うこととしているため、骨材のヤング係数 E_a は、細骨材および粗骨材のヤング係数にコンクリート中の細骨材および粗骨材の絶対容積比を乗じた値(式(8)参照)とした。算出した骨材のヤング係数の一覧表を表-6に示す。

$$E_a = (s/a) \cdot E_s + (1 - (s/a)) \cdot E_g \quad (8)$$

ここに、 s/a ：細骨材率

4. 複合則理論を用いたヤング係数の推定

4.1 複合則理論の適用

式(3)とこれに付随する式(4)，式(5)，式(6)，式(7)および式(8)

図-7 圧壊試験模式図

表-5 圧壊試験結果一覧

No.	直径 (mm)	圧壊荷重 (N)	ヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)
1	15.66	1020	2.45
2	14.21	1046	1.28
3	15.13	1679	1.58
4	15.28	1558	1.12
5	14.96	1592	1.05
6	14.52	942	1.23
平均			1.45

表-6 骨材のヤング係数の算出結果一覧表

実験	W/C	s/a (%)	細骨材 E_s (N/mm ²)	粗骨材 E_g (N/mm ²)	骨材 E_a (N/mm ²)
実験 I	0.25	36.6	4.81×10^4	7.29×10^4	6.38×10^4
		39.1			6.32×10^4
		46.0			6.15×10^4
		44.6			6.18×10^4
		43.2			6.22×10^4
	0.55	46.6			6.13×10^4
		46.4			6.14×10^4
		45.1			6.17×10^4
		49.3			6.06×10^4
		47.3			6.11×10^4
実験 II	0.25	38	4.81×10^4	5.62×10^4	5.31×10^4
		38			
		38			
		38			
		40			
	0.30	40			5.29×10^4
		40			
		40			
		40			
		43			
実験 III	0.35	43			5.27×10^4
		43			
		43			
		43			
		43			
実験 III	0.60	38.3	5.24×10^4	1.45×10^4	2.90×10^4
		43.3			3.09×10^4
		46.7			3.22×10^4
		47.5			3.25×10^4

図-8 推定値と実測値の比較

が本論文において提案する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、水セメント比、骨材の吸水率、骨材容積比をパラメータとしており、本実験と同様の一定条件下においては、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(4)における補正係数 $k=1$ としてペー

図-9 補正係数 k と水セメント比の関係(実験 I の場合)

ストのヤング係数を、式(6)、式(7)および式(8)より骨材のヤング係数を推定し、これらの値を式(3)に代入してコンクリートのヤング係数の推定を行った。なお、推定値と実測値を比較したものを図-8に示す。これによると、推定値は実測値より大きい値を与えることが分かる。コンクリートが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、弾性理論に基づいており、骨材界面に形成される遷移帯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¹⁸⁾。そこで、骨材界面に生じるマイクロクラックおよび骨材界面に形成される遷移帯領域の影響を考慮するために導入した式(4)の補正係数 k は、実測値から逆算して求めることとした。求めた k の値と水セメント比の関係の一例を図-9に示す。これより、水セメント比が小さいほど k の値が大きくなることが分かる。内川ら¹⁹⁾の研究によれば水セメント比が小さいほど形成される遷移帯領域の厚さは小さくなると言われている。そこで、水セメント比が小さいほどまた、材齢が進行するほどヤング係数に及ぼす遷移帯領域の影響は小さくなるものと仮定し、補正係数 k を水セメント比と材齢の関数である式(9)で表すこととした。

$$\left. \begin{array}{l} \text{普通・高強度コンクリートの場合} \\ k = \alpha \cdot t^{0.08} \quad \alpha = 0.4 \cdot x^{-0.19} \\ \text{軽量コンクリートの場合} \\ k = 0.37 \cdot t^{0.12} \end{array} \right\} \quad (9)$$

ここに、 t : 材齢(日), x : 水セメント比

図-9の曲線は式(9)より得られたものである。なお、軽量骨材を用いた場合については、本実験では水セメント比による影響が見られなかったため、材齢のみをパラメータとする関数とした。遷移帯領域は骨材表面形状の影響を受けることが指摘されており、表面形状と遷移帯領域の関係や遷移帯領域を考慮した補正係数の導入方法についても引き続き検討していく必要があるものと思われる。

式(9)を用いて算出した補正係数を式(8)に代入して推定した結果と実測値を比較したものを図-10に示す。図中の実線は実測値との誤差が0%、点線は誤差±10%を示している。これによると、若干ばらつきはあるが、推定値は実測値をよく表しているものと思われる。

遷移帯領域を加味した補正係数の導入については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広範囲のコンクリートのヤング係数の推定が可能であると考えられる。

図-10 推定値と実測値の比較(補正係数考慮)

図-11 収集したヤング係数の頻度

4.2 提案式の適用性の検証

4.1 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、1982～2002年において日本建築学会大会学術講演梗概集、コンクリート工学年次論文報告集およびセメント技術年報(セメント・コンクリート論文集)などに公表されたコンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係に関する約670件の実験データを収集し、推定式の適用性の検証を行った。本論文では、養生条件およびセメントの種類を一定とした条件下におけるヤング係数の推定式を提案することを目的としているため、実験データの収集条件を、(1)普通ポルトランドセメントのみを使用したもの、(2)養生条件を封かん養生および水中養生としたもの、(3)軽量骨材は、人工軽量骨材を使用したものとした。収集したデータは、コンクリートの圧縮強度、ヤング係数、圧縮強度試験時の単位容積質量に加えて、コンクリートの使用材料の種類・物性および調合、フレッシュコンクリートの物性である。

図-11に収集したデータについて示す。普通および高強度コンクリートのデータ数は606、軽量コンクリートI種のデータ数は53である。普通および高強度コンクリートでは $3 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 以上 $4 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 未満のデータが最も多く、軽量コンクリートI種では $1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 以上 $2 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 未満のデータが最も多い。このようなデータを基に、表-7に示すような圧縮強度および単位容積質量をパラメータとする既往のヤング係数推定式との比較検討を行った。これらの推定式の適用にあたって軽量骨材のヤング係数においては、圧壊試

験が実施できないため、全て本実験で得られた実験値である $1.45 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ を用いた。AIJ 式における F_c (設計基準強度) には、圧縮強度の実測値を用いた。ACI 式においては $f_c' \leq 21 \text{ N/mm}^2$ では上段の式を用いた。

各推定式から求めたヤング係数の計算値と実測値の差、すなわち残差と水セメント比の関係を図-12 に示す。なお、図中には ACI 式および CEB 式の適用範囲外のデータについてもプロットしている。これらの結果より、AIJ 式(図-12 b))では、軽量コンクリートの一部のデータでは値を過大評価する傾向にある。また、普通骨材を使用したコンクリートでは水セメント比の高い領域で若干過小評価する傾向が見られる。ACI 式(図-12 c))では、軽量骨材を用いた場合に過大評価する傾向が見られる。また水セメント比の増加とともに過小評価する傾向を示している。CEB 式(図-12 d))では全体的に過大評価する傾向が見られる。提案式(図-12 a))では水セメント比の増加とともに若干過小評価する傾向が見られる。野口らの研究²⁰⁾においても同様な検討がなされており、ACI 式および CEB 式において同様な傾向が報告されている。

表-8 に求めた残差の平均値、分散を示す。平均値は 0 に近いほど、推定結果の精度が良く、分散は小さい値になるほどそのばらつきが小さいことを示す。これによると、残差の平均値は普通・高強度コンクリートの場合は提案式、軽量コンクリート I 種は AIJ 式が最も 0 に近い値を示し、分散は、普通・高強度コンクリートの場合は ACI 式、軽量コンクリート I 種は CEB 式が最も小さい値を示している。

これらのことより、一定の条件下においてはあが、本提案式は、骨材の種類によらず、普通強度から高強度までの広範囲の強度レベルのコンクリートや骨材の種類が異なるコンクリートのヤング係数を比較的精度良く推定出来ると考えられる。

表-7 既往のヤング係数推定式

略称	ヤング係数の推定式および設計値
日本建築学会式 ¹⁾ (AIJ 式)	$E_c = 33.5 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{\gamma}{2.4} \right)^2 \times \left(\frac{F_c}{60} \right)^{\frac{1}{3}}$ <p> E_c: コンクリートのヤング係数(kN/mm^2) F_c: コンクリートの設計基準強度(N/mm^2) γ: コンクリートの気乾単位容積質量(t/m^3) k_1: 骨材の種類によって決まる定数 k_2: 混和材の種類によって決まる定数 </p>
ACI ^{(21), (22)}	$E_c = W_c^{1.5} \times 1350 \times \sqrt{f_c'} \dots \dots \dots f_c' < 41 \text{ N/mm}^2$ $E_c = 3320 \times \sqrt{f_c'} + 6900 \dots \dots \dots 21 \text{ N/mm}^2 < f_c' < 83 \text{ N/mm}^2$ <p> E_c: コンクリートのヤング係数(N/mm^2) W_c: 単位容積質量(kg/m^3) f_c': 標準円柱供試体の 28 日圧縮強度(N/mm^2) </p>
CEB-FIP ⁽²³⁾	$E_c = \alpha \times 21500 \times \left(\frac{f_{cm}}{10} \right)^{\frac{1}{3}} \dots \dots \dots f_{cm} < 41 \text{ N/mm}^2$ <p> E_c: コンクリートのヤング係数(N/mm^2) f_{cm}: 28 日平均圧縮強度(N/mm^2) α: 補正係数 $\alpha = 1.2$: 玄武岩・硬質石灰岩, 1.0: 石英岩, 0.9: 石灰岩, 0.7: 砂岩 </p>

表-8 残差の平均・分散

		提案式	AIJ 式	ACI 式	CEB 式
平均値	普通・高強度	-0.085	-0.155	-0.188	0.385
	軽量 I 種	-0.081	0.009	0.370	1.345
分散	普通・高強度	0.165	0.194	0.121	0.194
	軽量 I 種	0.039	0.243	0.231	0.026

図-12 水セメント比と各推定値の残差の関係

5. まとめ

本研究では、複合則理論式を用いたコンクリートのヤング係数の推定式について提案し、その汎用性について検討を行った。養生条件およびセメントの種類を一定とした条件下における本研究の範囲内で得られた知見は以下の通りである。

- (1) コンクリートの構成材料の1つである母材セメントペーストのヤング係数は、水セメント比および材齢をパラメータとする式(5)で算出できる。
- (2) コンクリートの構成材料の1つである骨材のヤング係数は、普通骨材の場合は吸水率をパラメータとした式(6)で、軽量骨材の場合は圧壊試験の結果による式(7)で算出できる。
- (3) コンクリートのヤング係数は、Hashin-Hansenの複合則理論式を基に、遷移帯領域などを考慮した係数を用いて修正した下式を用いることによって推定できる。

$$\frac{E_c}{E_p} = \frac{(1-V_a) \cdot E_p + (1+V_a) \cdot E_a}{(1+V_a) \cdot E_p + (1-V_a) \cdot E_a}$$

ここに、 $E_p(x, t) = k \cdot \bar{E}_p(x, t)$

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

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

	普通骨材	軽量骨材*
k	$k = \alpha \cdot t^{0.08}$ $\alpha = 0.4 \cdot x^{-0.19}$	$k = 0.37 \cdot t^{0.12}$
E_s	$E_s = \frac{5.89}{\mu^{0.22}}$	—
E_g	$E_g = \frac{5.89}{\mu^{0.22}}$	1.45×10^4

*適応できる軽量骨材は人工軽量骨材のみ

E_c : コンクリートのヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

E_p : セメントペーストのヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

E_a : 骨材のヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

V_a : 骨材容積比 (m^3/m^3)

E_s : 細骨材のヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

E_g : 粗骨材のヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)

x : 水セメント比, t : 材齢(日), μ : 吸水率(%)

- (4) 本提案式は水セメント比、単位水量(骨材量)、細骨材率、使用骨材の吸水率をパラメータとしており、コンクリートの調合設計時に必要な所定の材齢のヤング係数を推定することが可能となるものと思われる。

謝辞

本研究の実施にあたり、株式会社ポゾリス物産：伊藤忠氏、株式会社さとうベネック：上田賢司氏、大分大学文部技官：遠矢義秋氏、大分大学修論生：上原崇氏(1997年度)、長谷川浩延氏(1999年度)、川村祐史氏(2001年度)ならびに大分大学福祉環境工学科建築コース材料施工研究室の皆様にも多大なご協力を賜りました。ここに記して厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説・許容応力度設計法・，1999
- 2) 川上英男：コンクリートの弾性係数と近似複合理論，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp.497-500，1995.6
- 3) 清原千鶴ほか6名：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)，日本建築学会九州支部研究発表会第37号・1，pp.85-92，1999.3
- 4) 長谷川浩延ほか6名：複合則理論によるコンクリートの各種力学特性に関する基礎的研究(その1.セメントペーストおよびコンクリートの圧縮強度とヤング係数の実験結果)，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.685-686，1999.9
- 5) 長谷川浩延ほか6名：高強度コンクリートの力学特性に関する研究(その2.高強度コンクリートのヤング係数・乾燥収縮ひずみ)，日本建築学会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.815-816，1998.9
- 6) 川村祐史ほか6名：人工軽量骨材を用いたコンクリートのヤング係数と乾燥収縮ひずみ(その1.圧縮強度，ヤング係数および乾燥収縮)，日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1分冊，pp.531-532，2000.9
- 7) B.Paul：Prediction of elastic constants of multiphase materials, Trans. AIME, Vol.218, 1960.
- 8) T.C.Hansen：Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar, and Cement Paste, Journal of ACI, pp.193-216 1965.2
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 鶴田浩章：高強度コンクリートの力学的性質に及ぼす粗骨材品質の影響に関する基礎的研究，九州大学博士論文，2001.3
- 12) 萩野正二，渡辺久夫：日本鉱業会講演要旨，1971
- 13) 萩野正二，渡辺久夫：日本鉱業会講演要旨，1970
- 14) 馬場明生：建築材料の乾燥収縮機構とその応用に関する研究，東京大学博士論文，1975.6
- 15) T.J. Hirsh：Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Modulus of Cement Paste Matrix and Aggregate, J. of ACI, vol.59, No.3, 1962.3
- 16) 萩野正二，渡辺久夫：日本鉱業会講演要旨，1972
- 17) 原田至克ほか3名：人工軽量骨材の強度評価方法，太平洋セメント研究報告第136号，pp.49-58，1999
- 18) 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，Vol.22，No.2，pp.529-534，2000.6
- 19) Uchikawa Hiroshi：Similarities and Discrepancies of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete from Standpoints of Composition and Structure, Engineering Foundation Conference, Advances in the Production and Utilization of Cement Based Materials, Vol.1, pp.271-310, 1988.
- 20) 野口貴文，友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮強度とヤング係数との関係，日本建築学会構造系論文集，No.474，pp.1-10，1995.8
- 21) ACI Committee Report, Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary, ACI Committee 318, 1981
- 22) ACI Committee Report, State-of the Art Report on High-Strength Concrete, ACI Committee 363, 1995
- 23) CEB-FIP Model code 1990, Part1. Design Input Data, 2. Material Properties, 1990

(2003年7月10日原稿受理，2003年11月21日採用決定)