

論文 複合理論による骨材の弾性係数評価

川上 英男^{*1}

要旨：先に筆者はセメントペースト・細骨材・粗骨材の弾性係数を用い、複合理論を2段階に適用してコンクリートの弾性係数を推定する方法を報告した。本論では骨材の弾性係数を母材とその骨材を含む複合体それぞれの弾性係数から複合理論を用いて逆解析する方法を検討する。この方法の特色は母材中に粒状体として分布している骨材を対象とする点にある。先ず骨材母岩コアの実験例を掲げると共に川砂利や焼成骨材を対象とする場合に圧縮試験や密度から弾性係数を求める際の問題点に触れる。次いで上述の手法による実験結果を比較検討し、その理論上の特性についても考察する。

キーワード：コンクリート, 弾性係数, 複合理論, 骨材, モルタル, 逆解析

1. はじめに

コンクリートは多質の材料で構成されている。したがってその複雑な構成体から成るコンクリートの圧縮強度や弾性係数（以下圧縮強度の1/3の応力度における割線弾性係数；Secant Modulusをいう）に対してもそれらの構成体がそれぞれ影響を及ぼしている。

コンクリートの弾性係数については、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」ではコンクリートの設計基準強度を主な指標とし、気乾単位容積重量、骨材岩種及び混和材を参考とする関係式を示している¹⁾。そこでは骨材の弾性係数は指数として取り上げられていない。

一方、2種類の素材から成る複合体に対し各素材の含有量と弾性係数に基づいて複合体の弾性係数を理論的に評価する方法がある^{（例えば 2）}。以下本論ではこれを複合理論という。この場合には各素材の弾性係数が不可欠である。

先に筆者はコンクリートの実験結果を検討の上その弾性係数と圧縮強度は物理的には本来無関係と考えられること、並びに複合理論によるコンクリートの弾性係数評価法が圧縮強度を指標とする評価法よりコンクリートの物理的現象

に忠実であることを報告した。さらに複合理論をコンクリートに適用するに当たって、コンクリートの構成材料を実用的見地からセメントペースト、細骨材及び粗骨材の3種と見なすことにした。その理由の一つは、粗骨材は細骨材に比べて格段にそのサイズが大きいこと、またそのために粗骨材の表面境界層がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響が大きいことを見出したからである³⁾。もう一つの理由は骨材の多様化である。天然資源の枯渇と資源の有効利用の観点から粗骨材や細骨材として多種類の材料の活用が図られているからである。すなわち細・粗骨材を一体のものとして取り扱うよりも別々に取り扱う方がより普遍的と考えられるからである。

ここに2相材料を対象とする複合理論を3相の材料に展開する必要がある。筆者は先ずセメントペーストと細骨材に複合理論を用いてモルタルの弾性係数を算定し、次いでそのモルタルと粗骨材に同様に複合理論を適用してコンクリートの弾性係数を算定するという2段階適用を提案した⁴⁾。これによって粗骨材境界層のコンクリートの力学的性質に及ぼす影響を取り入れることも可能となり、その影響を補正係数とし

*1 福井大学名誉教授・福井工業大学名誉教授 工博（正会員）

て取り入れる方法を報告した⁵⁾。

コンクリートの弾性係数評価にこの複合理論を用いるときはコンクリートの圧縮強度は不用となり、替りにセメントペースト、細骨材、粗骨材の弾性係数が指標となる。

以上が本論で骨材の弾性係数評価を取り上げた背景である。以下先ず上記複合理論によるコンクリートの弾性係数評価の概要を述べておく。

2. 複合理論によるコンクリートの弾性係数評価について

その手順を次の①～③に示す。

①セメントペーストの弾性係数 (E_p)⁶⁾ とモルタル部分の調合、砂の弾性係数にもとづいて複合理論を適用してモルタルの弾性係数 (E_m) を求める。

②同様にモルタルの弾性係数 (E_m)、コンクリートの調合、粗骨材の弾性係数を用いて複合理論の繰り返し適用によってコンクリートの弾性係数 (E_c) を算定する。

複合理論としては複合構造モデルの中で最も精緻とされる Hashin-Hansen の提案式(1)²⁾ を用いる。

$$E_c = E_m \frac{[V_m E_m + (1+V_a)E_a]}{[(1+V_a)E_m + V_m E_a]} \quad (1)$$

E_c, E_m, E_a : 複合体, 母材, 骨材の弾性係数
 V_m, V_a : 母材, 骨材の体積含有率,
 $(V_m + V_a = 1)$

③このようにして得られた弾性係数 E_c に対して骨材境界面の影響を取り入れた補正を行って算定値 (E_c') を求める⁵⁾。

3. 骨材の弾性係数測定とその問題点

本論では粗骨材を対象として取り上げる。

従来天然骨材すなわち岩石を母岩とする骨材の弾性係数はその密度(比重)から推定する方法あるいは母岩から採取した円柱コア試験体の圧縮試験時の歪測定から求められてきた。以下に母岩コアの測定例を掲げ、問題点を指摘する。

3.1 福井県上久米田産安山岩 (K)⁷⁾

砕石母岩から採取したコアを整形し、直径 32.6mm, 高さ 65mm の円柱試験体を 10 本作製し、その圧縮試験から求めた弾性係数測定値を表乾密度・吸水率と共に表－1 に示す。弾性係数は 46.2～61.2 GPa の範囲にあり、標準偏差 5.3 GPa, 平均値は 55.1 GPa であった。

表－1 上久米田産安山岩の性質

弾性係数 E_a , 圧縮強度 F_c (各個)						平均
E_a (GPa)	60.1	48.7	54.2	48.7	54.6	E_a (GPa)
F_c (MPa)	183	174	188	223	—	55.1
E_a (GPa)	46.2	56.1	61.2	60.8	60.1	F_c (MPa)
F_c (MPa)	—	—	—	—	—	192
表乾密度 2.62 (g/cm ³), 吸水率 1.5%, —: 計測なし						

3.2 福井県南条産珪石 (N)⁸⁾

この例では岩石内部に節理が分布している。節理の存在が弾性係数に影響することが想定される。表－2 は珪石コアの試験結果である。コア試験体の直径は 35mm, 高さは約 70mm, 試験方法は上記とほぼ同じである。弾性係数は 30.5～70.1 GPa と広範囲にばらつき、その標準偏差は 10.2 GPa となって上例の約 2 倍である。全体の平均値は 50.4 GPa と得られた。

表－2 南条産珪石の性質

試験体 No.	表乾密度 (g/cm ³)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
N 01	2.60	46.6	30.5
N 02	2.62	93.2	51.2
N 03	2.58	96.4	45.9
N -1	2.59	52.8	49.2
N -2	2.61	71.3	47.2
N -3	2.61	68.7	46.4
N -4	2.62	132.9	70.1
N -5	2.57	141.8	64.7
N -6	2.54	87.9	50.6
N -7	2.53	77.6	48.0

3.3 福井県九頭龍川産 川砂利⁹⁾

川砂利・海砂利・山砂利のように数種の母岩が混在している場合にはそれぞれの母岩コアの圧縮試験を行う必要がある。福井県九頭龍川産砂利の主要母岩 5 種に対し圧縮試験を行った。

九頭流川上流より採取した玉石より直径 50mm のコア各 3 本ずつを抜き取り、高さ 100mm の円柱体に整形した。これら円柱試験体の圧縮試験は JIS A1108 に準じて表乾状態で行った。このとき抵抗線歪ゲージを両側面に貼り付け歪を計測し弾性係数を求めた。また JIS A1110 により表乾密度と吸水率を求めた。実験結果のうち本論関係の資料を表-3 に示す。

表-3 九頭龍川産主要岩石のコア試験結果

岩種	密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	Fc (MPa)	弾性係数 (GPa)			
				(各個)			平均
花崗岩	2.71	0.54	192	58.0	57.0	57.4	57.5
ひん岩	2.76	0.33	161	66.6	67.5	66.7	66.9
流紋岩	2.55	1.66	104	20.1	20.0	22.1	20.7
安山岩	2.89	0.90	219	56.4	59.5	60.1	58.7
砂岩1	2.84	0.32	342	90.8	86.6	89.7	89.0
砂岩2	2.75	0.27	301	67.3	68.6	71.8	69.2
(Fc：圧縮強度、各3本の平均値)							

以上の3例の実験結果から表乾密度と弾性係数の関係を図-1 に示す。

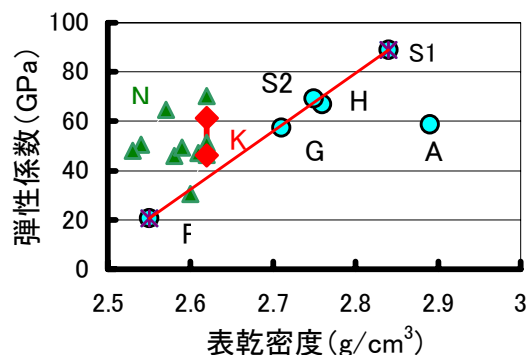


図-1 岩石の表乾密度と弾性係数

川砂利（図中○印）の場合には1種を除き、表乾密度と弾性係数は直線的関係にあるとみなされる。同図には上久米田産と南條産の碎石原石のデータも書き加えた。それらを比較すると産地や岩種によっては表乾密度と弾性係数の関係は必ずしも同じでないことが認められる。

川砂利には表-3 のように数種の岩種が混在している。川砂利全体の弾性係数としては岩種別の混在量構成比に合わせてそれら全体の弾性係数を評価する必要がある。筆者の採用した方

法を次に示す。

- 1) 川砂利を一粒ずつ岩種別に分類する。
- 2) 各岩種の砂利量の構成比を求める。
- 3) 2種類の岩種を組み合わせ、その構成比とそれぞれの弾性係数に基づいて式(1)を用いてこれらの2種の岩種に対する弾性係数を求める。
- 4) この手順を繰り返して5種の岩種を含む川砂利全体の弾性係数を算定する。

このようにして求めた九頭流川産砂利の弾性係数は 50.0 GPa であった。

3.3 人工焼成骨材

この場合骨材の弾性係数を密度によって評価する方法の物理的根拠が曖昧である。この種の骨材の特徴はその焼成過程において膨張して内部が多孔質となること、そして表面は溶融して緻密で硬い表面皮殻を形成する点にある。このため全体としては密度が低い割には丈夫な粒状体が形成される。このことはある焼成温度のもとで溶融層の厚みが同じとすると、粒の大小によって個々の粒状体内部の多孔質な部分と外殻硬質部の比率が異なることになる。このことは粒のサイズが小さいほど密度が大きいという性質にも現れている。粒としての弾性係数も当然サイズによって異なる筈である。こうなると骨材の粒度によっても弾性係数は影響を受けることになる。

4. 粒状骨材の弾性係数評価

ここでは上述のような問題点を一挙に解決する方法として、複合理論を用いてコンクリート中の粒状体としての骨材の弾性係数を推定する方法を提示するものである。すなわち碎石、川砂利、人工焼成骨材等の種類や粒度を問わないのは言うまでもなく、母岩コアの圧縮試験にも頼らないで、粒状体の骨材を用いてその弾性係数を推定しようとするものである。

その方法とはコンクリートとそのモルタル部分それぞれの試験体の弾性係数を計測し、その結果から複合理論を用いてそれら粗骨材の弾性係数を逆解析するものである。

コンクリートとモルタルの弾性係数が得られれば骨材の弾性係数 (Ea) を式 (1) を用いて trial and error 法によって求めてもよいし、また式 (1) を書き換えた 式 (2) を用いて Ea を算定出来る。この Ea は間接的に求めたものである。以下“見掛けの弾性係数 (pEa)”と呼び、母岩より直接求めた弾性係数 (Ea) と区別する。すなわち式 (2) では式(1)の Ea を pEa と置き換えてある。

$$pEa = Em \frac{[Vm Em - (1+Va) Ec]}{[Vm Ec - (1+Va) Em]} \quad (2)$$

5. 骨材の弾性係数算定例

ここではタイプの異なる 4 種の粗骨材を用いた実験例¹⁰⁾を掲げておく。すなわち水セメント比は 0.33, 0.45, 0.65 の 3 水準、細骨材は川砂 (福井県九頭龍川)、粗骨材には川砂利、安山岩系碎石、超軽量骨材及びガラス玉をそれぞれ用いた。

5.1 使用材料

セメント：普通ポルトランドセメント

川砂：福井県九頭龍川産、粒大 2.5 mm, 吸水率 2.66 %, 表乾密度 2.56 g/cm³

川砂利：福井県九頭龍川産 5~20 mm, 吸水率 1.6 %, 表乾密度 2.62 g/cm³

碎石：福井県上久米田産 (安山岩) 13~19mm, 表乾密度 2.62 g/cm³, 吸水率 1.5 %

超軽量骨材：造粒型 5~13 mm, 表乾密度 (24 時間吸水) 0.94 g/cm³ (以下 ALA と略記)

ガラス玉：直径 12.5 mm

5.2 実験概要

スランブ 12-15cm を目標に表-4 の調合を対象とした。

まずモルタルをオムニミキサーで練り、試験体 1 本に要するモルタルを練り鉢に取り分け、所定の粗骨材を加えて丁寧に手練りを行った。試験体はモルタル、コンクリートとも直径 10cm, 高さ 20cm の円柱試験体で、水セメント比、骨材種別ごとに各 3 本、合計 54 本である。ガラス玉

表-4 調合表 (絶対容積 l/m³)

粗骨材	W/C	水	セメント	川砂	粗骨材
川砂利,	0.33	214	205	171	400
碎石,	0.45	169	120	301	400
超軽量骨材	0.65	172	84	334	400
	0.33	205	196	164	425
ガラス玉	0.45	162	115	288	425
	0.65	165	80	320	425

コンクリートの実験ではモルタル各 5 本、コンクリート各 3 本合計 24 本である。

モルタルは練り上げてから約 1 時間ビニールを被せておき、これを繰り返して用いた。

翌日キャッピング、翌々日脱型、以後水中養生を行った。材齢 28 日で圧縮試験を行った。試験体の両側面に抵抗線歪計 (検長：モルタルには 20mm, コンクリートには 60mm) を貼り付け歪度を計測した。載荷速度は 0.2~0.3 MPa/sec で歪計測はほぼ 10 KN ごとに行った。それらの試験から圧縮強度と弾性係数 (最大応力度の 1/3 の応力度における割線弾性係数 (Secant modulus) を求めた。

5.3 実験結果

実験結果を表-5 に示す。モルタル及びコンクリートの圧縮強度を Fm, Fc, 弾性係数を Em, Ec としてそれぞれの平均値を示した。また表-5 の数値を用いて式 (2) によって得られる pEa の値を最右欄に示した。

表-5 実験結果

粗骨材	W/C	Fm (MPa)	Fc (MPa)	Em (GPa)	Ec (GPa)	pEa (GPa)
	0.33	67.7	57.2	25.4	33.2	50.7
川砂利	0.45	53.1	44.1	25.2	33.0	50.6
	0.65	31.7	24.5	20.7	28.5	47.9
	0.33	67.4	53.0	26.4	36.4	61.3
砕石	0.45	51.8	50.1	24.7	35.0	62.2
	0.65	30.7	26.8	20.1	28.1	48.6
超軽量骨材	0.33	73.5	34.2	25.9	17.2	8.53
	0.45	56.3	30.5	25.3	16.7	8.17
	0.65	31.6	19.7	21.6	13.8	6.26
	0.33	69.6	55.4	26.8	39.0	68.3
ガラス玉	0.45	52.3	42.0	24.9	36.7	65.8
	0.65	33.4	16.6	20.9	31.8	60.5

5.4 考察

水セメント比 (W/C) の替りにセメント水比 (C/W) と pEa の関係を図-2に示す。

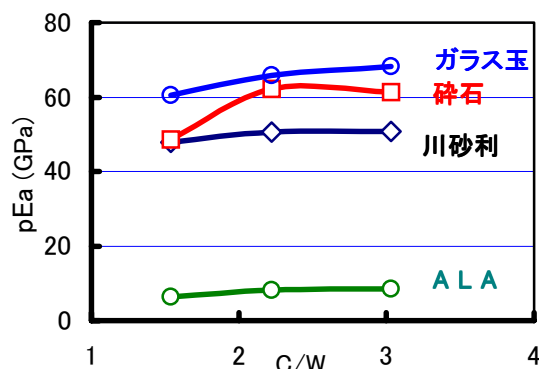


図-2 見掛けの弾性係数 (pEa) と (C/W)

図-2によると同じ粗骨材でもその pEa は C/W の小さい (水セメント比が大きい) 場合ほど小さい値を示している。これは先に筆者が指摘したように³⁾ 骨材境界層の弾性係数を低下せしめる影響が水セメント比が大きいほど著しくなることを反映しているためと考えられる。

C/W が大きくなるにつれて pEa の増加は少なくなり一定の値に近づくように見える。砕石では他の粗骨材とはやや異なる傾向にあるのは実験値のバラツキによると思われるが、C/W が大きくなるにつれて pEa が一定の値に近づく傾向にあるのは他の骨材と同じと判断される。

骨材境界層の影響の及ばない pEa を求めるには C/W が 3 以上を対象とするのがよいことが明らかとなった。

コアの圧縮試験から得られる Ea と C/W が 3 の場合の pEa の比較を表-6に示す。ガラス玉の弾性係数は文献から 71.6 GPa としておく。 Ea と pEa は比較的良く一致していると言えよう。

またそれ以下の C/W について得られた pEa も無用ではない。それらは既に境界層の影響を含む値であるので先に述べた境界層の影響に対する補正の必要が無い。そのまま用いて同じ C/W のコンクリートの弾性係数を求める場合に活用できる。

6. 骨材の見掛けの弾性係数評価に伴う問題点

この方法では母材モルタルとコンクリート複合体の両方の弾性係数に基づいて算定する。そのため骨材の弾性係数 pEa の算定に伴う理論上の問題点を検討しておく必要がある。

逆解析に用いた複合理論式 (1) を図-3に示す。

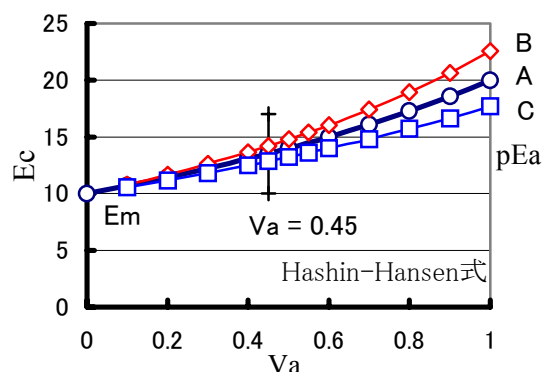


図-3 Hashin-Hansen 式

図-3では母材と骨材の値をそれぞれ 10GPa, 20GPa すなわち $E_m : E_a = 1 : 2$ としてある。実用的コンクリート中の粗骨材の含有率は 0.45 程度であるのでその含有率を例として取り上げる。

もしこの含有率の実験データから求められたコンクリートの弾性係数 (E_c) に 5% のバラツキがあったと仮定すると、それから算定される pEa は図中の本来の値 A 点に対して B 点, C 点すなわち +12.9% と -11.6% の値を与えることになる。すなわち pEa の値にはコンクリートの弾性係数実験値のバラツキが拡大されて現れてくることを意味する。因みに E_c に +1%, -1% の差があったとすると pEa の値は +2.75%, -2.5% となる。

表-6 Ea と pEa の比較

	pEa (GPa)	Ea (GPa)	$\frac{pEa}{Ea}$	E_c (GPa)	E_c' (GPa)	$\frac{E_c}{E_c'}$
川砂利	50.7	50.0	1.014	33.2	33.02	1.005
砕石	61.3	55.1	1.113	36.4	35.06	1.038
超軽量	8.53	—	—	—	—	—
ガラス玉	68.3	71.6	0.954	39.0	39.66	0.983

しかしこれらの値を(1)式に用いてコンクリートの弾性係数を求める段階では骨材の含有率(V_a)は 0.45 程度 (川砂利コンクリート標準調合表では 0.386~0.451) であるのでその差はやはり pE_a を求めた時の弾性係数実験値の差と同程度に収まることになる。実験と解析を行う度に pE_a の値が揺動してもそれらの pE_a を用いてコンクリートの弾性係数を算定する段階ではコンクリート実験と同等程度に収まると言えよう。このことを実験例に見ておくと次のようである。

表-6 に各骨材の E_a と解析値 pE_a を記載し、 pE_a/E_a を求めた。また実験に用いたコンクリートを対象に、 pE_a を用いた時のコンクリートの弾性係数 E_c (実験値そのまま) と E_a を用いた場合のコンクリートの弾性係数 (E_c') を求め、併せて E_c/E_c' を示した。各骨材の pE_a/E_a が +1.4%, +11.3%, -4.6% に対し、 E_c/E_c' はそれぞれ +0.5%, +3.8%, -1.7% と減少している。

一旦 pE_a が求まればその値はコンクリートとモルタルの実験値を基本としているだけに先述のような各種の骨材の弾性係数推定法に伴う煩雑さや問題点は解消する。そしてコンクリートの実験データが蓄積するにつれて pE_a 値の確度も向上する。

7. 結び

本論では先ず粗骨材を対象に母岩コアの圧縮試験例を示し、同一岩種内の実験値のバラツキ、異なる岩種間では密度・弾性係数の関係が異なる場合もあること、さらに川砂利では各岩種に対する実験が必要であることを指摘した。また人工焼成骨材の弾性係数を求めることに対する問題点を指摘した。

そしてコンクリート中に粒状体として分布する骨材の弾性係数を、コンクリートとモルタルの弾性係数から複合理論を用いて骨材の弾性係数を逆解析する方法を提示した。この方法は骨材の種別を問わない点でより普遍的と言えよう。

さらに実験的検討の結果、この方法ではセメント水比は 3 以上とすべきことを明らかにした。

またその解析からその過程に内在する理論的問題点を検証した。コンクリート中に分布する粒状骨材の弾性係数評価として、この手法の有効性がさらに検証されることが望まれる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法—，1999
- 2) HANSEN, T.C. : Theories of multi - phase Materials applied to concrete, cement mortar and cement paste. “The Structure of Concrete,” Proceedings of an International Conference, London, Sep. 1965
- 3) 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
- 4) 川上英男：近似複合理論の多段階適用とコンクリートの弾性係数評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19, Vol.1, pp.511- 516, 1997.6
- 5) 川上英男：コンクリートの弾性係数推定試案，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26, No.1, pp.417- 422, 2004.7
- 6) 川上英男，松田勝彦，熊井雄大：セメント硬化体の弾性係数について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.1, pp.497-502, 1994.6
- 7) 川上英男：碎石及び超軽量骨材がコンクリートの強度・弾性係数に及ぼす影響，福井工業大学研究紀要，Vol.33, No.1, pp.175-182. 2003.3
- 8) 川上英男：碎石のヤング係数とコンクリートのヤング係数，日本建築学会北陸支部研究報告集，Vol.39, pp.46-49, 1996.7
- 9) 川上英男：骨材種類がコンクリートの力学的挙動に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13, No.1, pp.63-68, 1991.6
- 10) 川上英男：複合理論によるコンクリートの弾性係数評価，福井工業大学研究紀要，Vol.35号，第1部，pp.125-132, 2005.3.