

# 論文 コンクリートの弾性係数推定試案

川上英男\*

**要旨:** 先に筆者は、各種の粗骨材を対象としてコンクリートの弾性係数は母材・骨材の弾性係数と含有量の他、境界層の影響を受け、その実験値が複合理論値より低下し、その割合は水セメント比が大きい程、粒径が大きい程大きいことなど現象面の解明を報告してきた。本論文はそれらの現象を総合して、セメントペースト、モルタルそしてコンクリートへと複合理論を段階的に適用することによってコンクリートの弾性係数を算定する手法を示し、圧縮強度を指標としない弾性係数の推定法を提示するものである。

**キーワード:** コンクリート, 弾性係数, 複合理論, 粗骨材, 境界層

## 1. はじめに

コンクリートの弾性係数評価法の一つは経験的方法で、コンクリートの圧縮強度、密度あるいは骨材の岩種を参考に統計的平均値を算定するものである(例えば<sup>14)</sup>)。したがって特定のコンクリートに適用する保証はない。他の一つはコンクリートの弾性係数を構成素材の含有量と弾性係数に基づいて複合理論によって評価するものである。しかし、これらの複合理論解は弾性論に立脚していて、骨材境界面に起因するコンクリートの非弾性的挙動が弾性係数に及ぼす影響は考慮されていない。それらのモデルがコンクリートを対象に実用化されていない理由は理論解の複雑な表現に加えて、この非弾性挙動の影響が取り入れられていないことにあるものと思われる。

筆者は粗骨材とコンクリート強度に関する実験的研究に基づきコンクリート強度と弾性係数は本来全く別次元の因子であることを指摘し、強度とは独立に弾性係数を評価する可能性を求めてきた<sup>1-13)</sup>。すなわち1) 粗骨材の弾性係数、モルタルとの付着強度、ならびにコンクリートの弾性係数の関係、2) 複合理論の適用を

目的として母材としてのセメントペーストの弾性係数に関する因子について、3) 複合理論の近似的表現の開発とそれを用いた弾性係数の評価と強度に基づく弾性係数評価との関係、4) コンクリートの母材としてのセメントモルタルの弾性係数について強度を指標とする方法と複合理論による方法の比較、5) 多相の複合体であるコンクリートに対して複合理論を繰り返して適用するいわゆる多段階適用に対する検討、6) 母材より骨材の弾性係数が低い場合に対する複合理論の適用の妥当性についてなどである。そして筆者がもっとも重要と見なしたのは弾性論に立脚する複合理論に対して粗骨材の境界層が及ぼす非弾性的影響である。7) これらについても母材モルタルより弾性係数の大きい川砂利、砕石を始め、母材モルタルより弾性係数の小さい軽量粗骨材について実験的検討を進めた。その結果コンクリートの弾性係数実験値は複合理論による算定値より低下する場合があること、またその低下の割合はセメント水比と深い関係にあることを報告した<sup>9-13)</sup>。

そこで一応の目処が得られた現段階までの成果に基づいて評価法の提案を行うことにした。

\* 福井工業大学 工学部建設工学科 教授 工博(正会員)

## 2. コンクリートの弾性係数推定の方針

### (コンクリートの弾性係数の構成)

コンクリートは粗骨材、細骨材、セメント水合物、未水和セメント粒子、混和材微粉粒子、水、空隙、ゲルポアなど多種類の構成材から成る多相材料である。さらにセメントペースト中の水の挙動によって骨材特に粗骨材境界層では不均質な層を構成する。

このような材料の弾性係数評価に2相複合理論を適用するときどのような分け方を持って骨材と母材とするかについては意見の分かれるところである。骨材境界層に起因するコンクリートの非弾性挙動を問題にすると、粒径の大きい粗骨材の方が細骨材よりもその影響が格段に大きいと考えられる。そこでこの論文では、まずコンクリートをモルタル母材と粗骨材の2相材とみなすことにする。さらにモルタルについてはその細骨材の種類と含有率がコンクリートの用途に応じて多様であるところから、それらに対応するにはこのモルタルをセメントペースト母材と細骨材から成る2相の構成体と見なすのがよいと考えた。またさらに進んでセメントペーストについても2相材料としての取り扱いもあり得ると思われるが、筆者手持ちの資料は普通ポルトランドセメント単味の実験結果に限られるのでここでは触れない。

本論では、出来るだけ汎用性のある推定法を提案すべくコンクリートを3相の材料すなわちセメントペースト、細骨材及び粗骨材から成る材料と見なすことにする。そしてセメントペーストの弾性係数を出発点として、複合理論をセメントペースト母材と細骨材に適用してモルタルの弾性係数を求め、次にこのモルタル母材と粗骨材に複合理論を適用してコンクリートの弾性係数を推定する。すなわち既報「近似複合理論の多段階適用」<sup>6)</sup>を2段階に適用するものである。そしてさらに粗骨材の境界層に起因する非弾性的挙動の影響を算定に取り込むことにする。

この弾性係数算定の手法を下記の枠内に項目順に示す。

- |                                     |
|-------------------------------------|
| 1) セメントペーストの弾性係数                    |
| 2) モルタルの弾性係数<br>(ペーストと細骨材) <複合理論>   |
| 3) コンクリートの弾性係数<br>(モルタルと粗骨材) <複合理論> |
| 4) 粗骨材境界層の影響                        |

なお 上述の近似複合理論とは Hashin - Hansen の複合理論解である式(1)を使い易くするために筆者が簡略化した表現を指しており、式(1)と同義である。

以下の検討では式(1)そのままを用いることにする。最近ではパソコンの計算ソフトが普及し演算が容易になった。このことはさらに複合理論の多段階適用における演算をも容易にする。

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

$E_c, E_m, E_a$ : 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,  
( $V_m + V_a = 1$ )

ここでコンクリートの弾性係数の算定に必要な項目は次の通りである。

- 1) コンクリートの絶対容積割合
- 2) セメントペーストの弾性係数
- 3) 細骨材, 粗骨材の弾性係数

### 3. コンクリートの弾性係数評価の検証

ここでは既報 12), 10) の材齢4週の実験結果を取り上げて算定を行なう。以下その実験の概要と算定に必要な資料を記しておく。

#### 3.1 実験概要

粗骨材の粒径と含有量がコンクリートの弾性係数に影響するので、各試験体の粗骨材含有率を正確にするため、まずモルタルをミキサーで

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。練り量が少ないので十分な混練が可能であった。またそのモルタルで、コンクリートと同寸の径10 cm、高さ20 cmの試験体も作製した。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60 mm)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 k Nごとに行った。それらの圧縮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。

### 3.2 使用材料と調合

使用材料は次の通りである。(ここに表乾密度を $\rho$ 、吸水率を $\mu$ と略記する。)

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

$\rho$  : 2.56 g/cm<sup>3</sup>,  $\mu$  : 2.66 %。

砕石：福井県坂井郡上久米田産、安山岩質。

5-10, 13-15, 15-20 mmに篩い分け、等量混合。 $\rho$  : 2.67 g/cm<sup>3</sup>,  $\mu$  : 1.8 %。

川砂利：福井県九頭龍川産、5 - 20 mm,

$\rho$  : 2.62 g/cm<sup>3</sup>,  $\mu$  : 1.5 %

人工軽量骨材

A : 造粒型10-13mm,  $\rho$  : 0.85 g/cm<sup>3</sup>,  $\mu$  : 2.1 %

B : 造粒型10-15mm,  $\rho$  : 1.35 g/cm<sup>3</sup>,  $\mu$  : 7.2 %

M : 破碎型10-15mm,  $\rho$  : 1.38 g/cm<sup>3</sup>,  $\mu$  : 8.7 %

調合を表-1に示す。

試験体数はモルタル各6本、コンクリート各3本である。スランプ試験は行なっていないがスランプ値12-15 cm程度の軟度であった。

### 3.3 実験結果

実験結果から求めた弾性係数(E)を試験体種別それぞれの平均値で表-2に示す。

因みにこれらコンクリートの圧縮強度は62.1 - 14.5 (MPa)の範囲にあった。

表-1 調合表 (絶対容積 1/m<sup>3</sup>)

粗骨材	W/C	W	C	S	G
軽量骨材	0.38	215	180	231	364
(A, B, M)	0.60	185	109	332	364
砕石	0.35	215	195	220	360
	0.45	213	150	267	360
	0.65	200	98	332	360
川砂利	0.40	172	126	292	400
	0.60	200	98	292	400
川砂利	0.40	198	157	235	400
	0.50	228	145	217	400
	0.60	254	134	202	400
	0.50	186	118	236	450
	0.50	169	107	214	500
	0.50	186	118	236	450

(W:水, C:セメント, S:川砂, G:粗骨材)

表-2 弾性係数算定値と実験値

算定ステップ	1	2	3	4	実験値		
粗骨材	W/C	Ep	Em	Ec	cEc	E	E/cEc
軽量 A	0.38	21.5	26.2	18.3	18.0	17.3	0.96
量 A	0.60	12.8	21.7	16.0	14.9	15.2	1.02
粗 B	0.38	21.5	26.2	21.7	21.2	20.4	0.96
骨 B	0.60	12.8	21.7	19.1	17.8	17.6	0.99
材 M	0.38	21.5	26.2	21.9	21.5	20.3	0.95
M	0.60	12.8	21.7	19.3	18.0	17.4	0.97
砕石	0.35	23.1	27.2	34.8	34.4	34.1	0.99
	0.45	18.3	24.5	32.3	31.0	30.5	0.98
	0.65	11.3	20.1	28.2	26.0	26.8	1.03
川砂利	0.40	20.5	27.4	34.6	34.3	35.8	1.04
	0.60	12.8	20.9	29.1	25.6	30.3	1.18
川砂利	0.40	16.8	22.7	30.7	30.4	29.6	0.97
	0.50	16.3	21.7	29.9	27.8	25.7	0.92
	0.60	12.8	17.9	26.3	23.1	22.2	0.96
川砂利	0.40	16.8	22.7	30.7	30.4	27.2	0.89
	0.50	16.3	21.7	29.9	27.8	25.6	0.92
	0.60	12.8	17.9	26.3	23.1	21.4	0.92
川砂利	0.50	16.3	23.0	32.2	29.9	31.3	1.04
	0.50	16.3	23.0	33.4	31.1	32.1	1.03
	0.50	16.3	23.0	32.2	29.9	30.8	1.03

Ep, Em, Ec : セメントペースト, モルタル, コンクリートの弾性係数複合理論値 (GPa)

cEc : コンクリートの弾性係数 算定値 (GPa)

E : コンクリートの弾性係数 実験値 (GPa)

骨材の弾性係数採用値 (GPa) :  
川砂 37.7, 川砂利 50.0, 砕石 55.1  
(軽量骨材) A 9.04, B 15.3, M 15.8

## 4. 弾性係数評価と各影響因子

### 4.1 セメントペーストの弾性係数

これについては既報論文3)によることとする。すなわち普通ポルトランドセメントを用いたセメントペースト硬化体(水中養生,材齢4週)の実験結果を用いる。同論文ではセメントペーストの弾性係数と圧縮強度・セメント水比(C/W)・密度との相関性を検討している。三者とも相関係数は0.98以上を示している。ここでは本論の目的から弾性係数とセメント水比の関係すなわち式(2)を採用する。

$$E_p = 31970 + 445890 \times \log(C/W) \quad (2)$$

(kgf/cm<sup>2</sup>)

なお上記は普通ポルトランドセメント単味のペーストである。式(2)は養生条件や材齢,あるいは微粉体の混和材を含む場合には異なると考えられるが本例ではコンクリートと同じ条件であるのでこれを用いる。

セメントの水和はセメント種類,養生条件,材齢によって異なるのでセメント硬化体の弾性係数もそれに依存すると考えられるが,それらについては今後データを蓄積する必要がある。また混和材を含む場合については清原他<sup>17)</sup>が実験的検討を行なっている。セメント水和物,未水和セメント粒子及び空隙中に微粉体が加わった場合に対して複合理論の適用が可能かについても今後の課題である。

### 4.2 モルタルの弾性係数

セメントペーストと細骨材(ここでは川砂)から成る複合体とみなして式(1)と同じ形の式(3)を用いて算定する。

$$E_m = E_p \frac{[(1-V_s)E_p + (1+V_s)E_s]}{[(1+V_s)E_p + (1-V_s)E_s]} \quad (3)$$

$E_m, E_p, E_s$  : モルタル, ペースト, 細骨材の弾性係数

$V_p, V_s$  : ペースト, 細骨材の体積含有率,  
( $V_p + V_s = 1$ )

モルタル中の川砂の体積含有率( $V_s$ )を調査より算定する。

川砂の弾性係数( $E_s$ )については既報論文1)で川砂と同一水系にある福井県九頭龍川の代表的岩石5種類の実験から弾性係数と密度との関係が得られていることに注目し,既報論文5)では川砂の密度と上記の関係からその弾性係数を37.7 G Paと推定した。

細骨材には天然産,人工軽量骨材,産業副産物など成因や製造過程によって多様な性質が予想されるので今後それらの弾性係数の資料を蓄積する必要がある。

### 4.3 コンクリートの弾性係数複合理論値

モルタル母材と粗骨材に式(1)を用いてコンクリートの弾性係数複合理論値( $E_c$ )を算定する。砕石・川砂利の弾性係数( $E_a$ )は母岩から採取したコアの圧縮試験から求められた。それらの採用値を表-2の下欄に示す。

### 4.4 骨材境界層の影響に関する補正

式(1)を用いて求めた弾性係数複合理論値( $E_c$ )に比べて実験値( $E$ )は低くなることを既報<sup>6&9-13)</sup>で報告した。次に概略を記す。

a) その低下は水セメント比が大きい程,粗骨材の粒径が大きい程著しい傾向にある。おおよそ水セメント比が0.3程度以下ではその低下は無視できる。

b) 粗骨材の種類によってその低下の割合は異なる。水セメント比0.65程度では複合理論値に対する実験値の比( $J = E/E_c$ )は砕石では0.92程度であるのに対し川砂利では0.85程度が想定される。これらのJ値は調査によっても変動する場合がある。その変動幅は砕石より川砂利の方が大きいようである。砕石は表面が粗面で,粒形が角張っているのが上記の影響が緩慢になると考えられる(図-1参照)。

図-1の川砂利ではデータの間中値を採用して回帰式を求めてある。

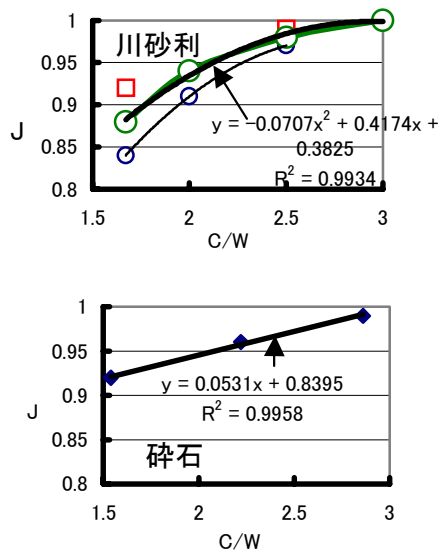


図 - 1 セメント水比 (C/W) と J 値

境界層に影響する要因としては母材モルタルの水セメント比, 細骨材の含有量, 細骨材の密度・吸水特性, さらに粗骨材の粒形, サイズ, 密度及び表面の粗滑度が想定される。この点について目下ブリージング量の測定を含め実験的な検討を進めているが, まだそれらの影響を特定するに至っていない。これらの現象については定性的には傾向が掴めたものの, 定量的には未だ解明の途上にある。

図 - 1 から各水セメント比に対応する J 値 (補正係数) を採用する。たとえば碎石コンクリートでは水セメント比 0.35, 0.45, 0.65 に対応する J 値 (補正係数) は 0.99, 0.96, 0.92 と得られる。人工軽量骨材は表面の粗滑度が目視では碎石に似ていることから, ここでは仮に碎石と同じ値とした。

複合理論値に J を乗じた値を算定値 (cEc) とする。

#### 4.5 コンクリートの弾性係数算定結果

算定値  $E_p$ ,  $E_m$ ,  $E_c$ ,  $cEc$  を表 - 2 に示す。算定値  $cEc$  と実験値  $E$  の関係を図 - 2 に示す。算定値に対する実験値の比率を同じく表 - 2 に示す。碎石と人工軽量骨材の場合は両者の差は 5% 以内に止まり, 川砂利の場合はバラツキが

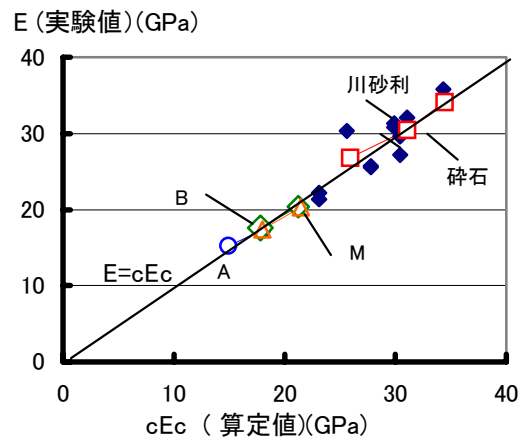


図 - 2 弾性係数の算定値と実験値

あり, その差が10数%の例も混じっている。

それでもこれらを見る限りにおいては従来の強度・比重を指標とする場合 (文献14) よりも精度良く推定されている。

#### 5. 結び

本論ではコンクリートの弾性係数の評価を, その強度を指標とせず, 材料の構成からアプローチする, いわば **Strength-free Estimation** の一方法を述べた。コンクリートの多質性に注目し, 弾性係数に影響する現象をなるべく忠実に取り入れる視点から, 複合理論の2段階適用と境界層に起因する補正係数 J を用いた。そしてその算定のプロセスでそれぞれ関連する現象について触れたのは, 今後の課題として解明を期待するからである。

一方, 評価方法の実用化に対しては現象面をなるべく忠実に反映させながら, しかも簡単な方法が望ましい。影響要因をどのように取り上げ, どのように単純化するかについてはいろいろな考え方があってよい。本論の表題を「試案」としたのもそうした視点による。今後工学的な判断に基づく巧みな工夫が望まれる。

最後に付け加えれば, 我が国で最初にコンクリートの弾性係数に複合理論を適用したのは1960年発表の若林の論文<sup>15)</sup>であり, 先駆的業績と言えよう。ここでは母材と骨材の直列モデ

ル、並列モデルならびにその組み合わせに対し理論解を示すと共に、ゴムや鋼材を骨材とする実験結果の解析をも報告している。一方、1965年の国際会議 Proceedings<sup>16)</sup>によると、欧米ではこの頃からこの種の研究が進んでいたことが示されている。そして我が国では上記若林論文のあと長い間空白が続いた。

近年この問題が注目され、活発な研究成果が見られるようになった<sup>例えば 17)</sup>ことは心強く、今後さらに現象解明の研究と共に、評価法の実用化へ向けて一層の進展が望まれる。

### 参考文献

- 1) 川上英男：骨材種類がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13, No. 1, pp. 63-68, 1991. 6
- 2) 川上英男，脇敬一，今井重行：コンクリートの共振周波数・超音波伝播速度と弾性係数及び強度との関係について，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15, No. 1, pp. 619-624, 1993. 6
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 川上英男，脇敬一：セメントモルタル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. 18, No. 1, pp. 543-548, 1996. 6
- 6) 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, No. 1, pp. 511-516, 1997. 6
- 7) 川上英男：モルタルの弾性係数評価と近似複合理論，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20, No. 2, pp. 559-564, 1998. 6
- 8) 川上英男：コンクリートの弾性係数と複合理論の適用，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 21, No. 2, pp. 619-624, 1999. 6
- 9) 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報告集，Vol. 22, No. 2, pp. 529-534, 2000. 6
- 10) 川上英男：コンクリートの弾性係数に及ぼす粗骨材粒径の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 23, No. 2, pp. 343-348, 2001. 6
- 11) 川上英男：砕石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. 24, No. 2, pp. 303-308, 2002. 6
- 12) 川上英男：骨材種類とコンクリートの弾性係数，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 25, No. 2, pp. 359-364, 2003. 7
- 13) KAWAKAMI, H. Estimation of Elastic Modulus of Concrete from Elastic Moduli of Its Constituents and Interfacial Zone, [Role of Interfaces in Concrete]--- Proceedings of the International Seminar at the University of Dundee, Scotland, UK, pp.209-217, Jul.1999
- 14) 日本建築学会構造委員会：コンクリート構造物の剛性評価に用いるヤング係数について，建築雑誌，Vol. 100, No. 1241, pp. 36-47, 1985. 12
- 15) 若林 實：コンクリートの弾性係数に及ぼす構成素材の影響，日本建築学会論文報告集，66-1, pp. 165-168, 1960. 10
- 16) 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
- 17) 清原千鶴・永松静也・佐藤嘉昭・三橋博三：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 25, No. 2, pp. 389-394, 2003. 7