

論文 コンクリートの弾性係数評価についての二三の考察

川上 英男^{*1}

要旨：コンクリートの構成素材の弾性係数と構成比から複合理論を用いてコンクリートの弾性係数を評価する方法について筆者は検討を進めてきた。骨材粒状体の弾性係数測定法の有効性を認めるに到ったことから上記方法による弾性係数評価の実用性が望めるに到った。本論考察の位置付けのため、先ずその背景となっている評価法の概略とその成果を述べる。本論考察では細・粗骨材の弾性係数測定結果からコンクリートの弾性係数に及ぼす影響の特性をセメント水比との関連で比較検討した。さらにその影響は骨材境界層の影響と同質と見なされること、その影響は粗骨材よりも細骨材の方が大きいことを見出した。

キーワード：コンクリート、複合理論、セメントペースト、細骨材、粗骨材、境界層

1. まえがき

1.1 背景

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⁾。

一方、母材と骨材から成る 2 相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）。

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直接的な関係は認められないこと、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。さらに複合理論を適用するに当たって、コンクリートの構成材料をセメントペースト、細骨材及び粗骨材の 3 種と見なした。その理由の一つは両者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異なることを見出したからである³⁾。もう一つの理由は天然骨材資源の枯渇と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。したがって細・粗骨材を別々に取り扱う方がより普遍的と考えた。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に対して、筆者は複合理論の 2 段階適用を提案した⁴⁾。

筆者が採用している手法を次の①～④に示す。

① セメントペーストのセメント水比とその硬化体の弾性係数（ E_p ）との関係を求めておき、想定セメント水比に対応するペースト硬化体の弾性係数を特定する。

② E_p ・モルタル部の調査、砂の弾性係数を用い複合理論を適用してモルタルの弾性係数（ E_m ）を求める。

③ E_m ・コンクリートの調査、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、

$$(V_m + V_a = 1)$$

④このようにして得られた弾性係数 E_c に対して骨材境界層の影響を取り入れた補正係数（ J ）を乗じてコンクリートの弾性係数（ E_c' ）を求める⁶⁾。

以下本論考察の位置付けを明確にするために関連資料を掲げておく。

1.2 セメントペースト硬化体の弾性係数

普通ポルトランドセメント単味のセメントペースト硬化体について行った実験結果⁷⁾を図-1に示す。微粉の混和材を含むセメントペーストでは上記の関係は異なるものと考えられる。これについては清原他の報告⁸⁾が見られる。またセメント種類によってどの程度の差があるものかについてもデータの蓄積が必要である。

1.3 粗骨材の弾性係数

(1) 問題点

*1 福井大学名誉教授・福井工業大学名誉教授 工博（正会員）

天然岩石を母岩とする骨材では母岩から採取したコアの圧縮試験時の歪測定から求める。この方法では測定結果にバラツキがあるので数多くの測定から平均値を求めることが必要となる⁹⁾。

また川砂利・海砂利・山砂利のように数種の母岩が混在する場合にはそれぞれの母岩コアの圧縮試験が必要になる上、岩種の体積構成比に合わせて全体の弾性係数を評価することになる。

さらに人工焼成骨材は多孔質な内部と硬質外殻からなるのでその弾性係数測定はさらに複雑である。

(2) 粗骨材粒状体の弾性係数測定

上述の問題点を一挙に解決する方法として、コンクリートとそのモルタル母材の弾性係数を計測結果から複合理論式(1)を書き換えた式(2)を用いて粗骨材の弾性係数を逆解析する方法を考えた。この方法によって得られた弾性係数は間接的に求めたものであるので以下“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と置き換えている。

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

川砂利、安山岩系碎石、超軽量骨材及びガラス玉を用いた実験例(材齢28日、水中養生)⁹⁾から得たC/WとpEaの関係を図-2に示す。

川砂利の弾性係数最大値はコアの圧縮試験から得られたEaの値50.0(GPa)に良く近接している。

どの粗骨材においてもpEaはC/Wの小さい場合ほど小さい。これは骨材境界層の弾性係数を低下せしめる影響はC/Wが小さい程著しくなることを反映しているためと考えられる。

1.4 細骨材の弾性係数

細骨材についてもその測定上の問題点は粗骨材と本質的に変わらない。セメントペースト母材とモルタルの弾性係数の測定から式(2)を用いて細骨材の弾性係数を算定する。

実験例¹⁰⁾を図-3に示す。C/Wの小さい場合ほどpEsが小さい値を示す点では粗骨材と同様である。

2. 本論の目的

複合理論によってコンクリートの弾性係数を求める方法によってあらゆる骨材の弾性係数の評価が可能となった。すなわち前記の複合理論によるコンクリートの弾性係数評価への道を切り開いたことになる。

一方、コンクリートの弾性係数実験値は上記③までの

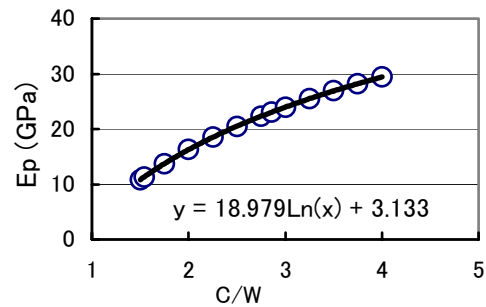


図-1 セメント硬化体の弾性係数(Ep)とC/W

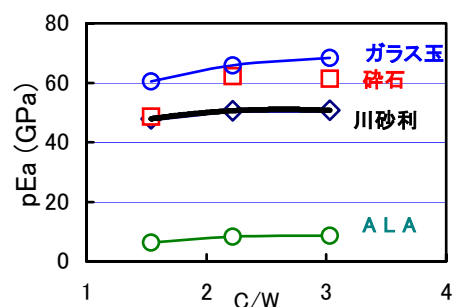


図-2 見掛けの弾性係数(pEa)と(C/W)

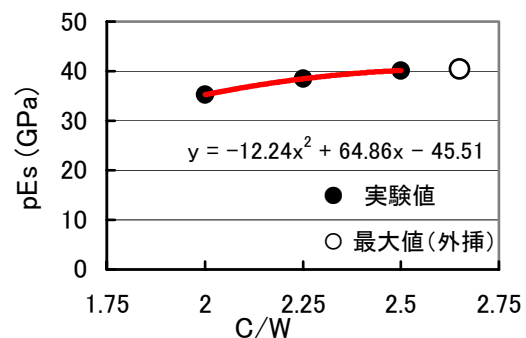


図-3 セメント水比と砂の弾性係数の関係

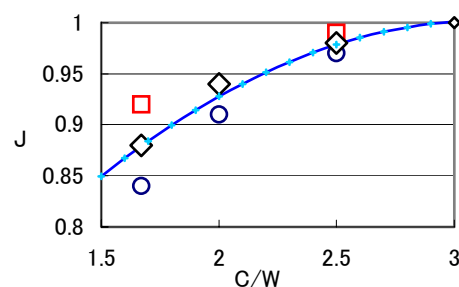


図-4 補正係数(J)とセメント水比

計算値より低下する傾向がある。図-4⁵⁾ は川砂利コンクリート（□，◇，○印の3系列）の実験例を示したものである。C/Wの減少につれてJ値の低下は著しくなり，C/W = 1.54 では10～15 % 程度の減少が認められる。この現象に対し筆者はその影響を複合理論値に補正係数（J）を乗ずる形で取り入れてきた。しかしその現象の内容については検討していなかった。

本論では今までに得られた細骨材・粗骨材の見かけの弾性係数実験結果に基づいて，粗骨材と細骨材それぞれの境界層がコンクリートの弾性係数に及ぼす影響の特徴を考察する。

3. 細・粗骨材の見かけの弾性係数（pEs, pEg）

前章の図-2，図-3 をまとめて対比したものを図-5 に示す。実験値を○印で表し，その回帰式を示す。川砂利の最大値は●印，川砂の最大値●印と◇印は外挿値である。

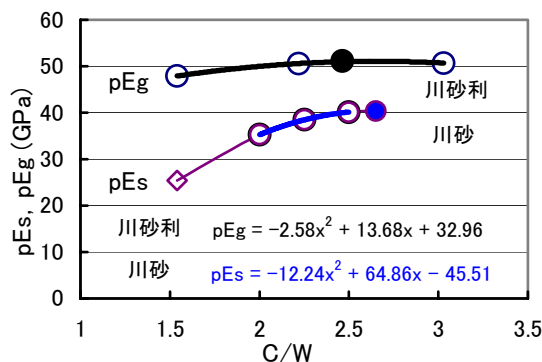


図-5 川砂・川砂利の見かけの弾性係数（pEs, pEg）とセメント水比（C/W）

この図では見かけの弾性係数（pEg）が C/W の減少に伴って低下する割合は川砂利より川砂の方が著しいことが認められる。このことから境界層がコンクリートの弾性係数に及ぼす影響も同様の傾向を示すことが考えられる。

ここで上記の実験結果を用いて広範囲の実用調査を対象にしてそれらコンクリートの弾性係数を求めることから考察を進める。

実用調査としては日本建築学会の「コンクリートの調査設計・調査管理・品質検査指針案・同解説」¹¹⁾ を取り上げる。同表には水セメント比とスランブに応じて参考調査が示されている。その付表 2「普通ポルトランドセメントを用いる砂・砂利コンクリートの参考調査表（その2），砂の粗粒率 2.8（2.5mm），砂利の最大寸法 25mm」の調査を対象とし，20 例を取り上げる。それらの絶対容積調査を表-1 に掲げる。

表-1 参考調査表

W/C (%)	スランブ (cm)	絶対容積 (l/m ³)			
		水	セメント	砂	砂利
40	8	171	136	232	451
	12	182	144	213	451
	15	193	153	193	451
	18	205	163	204	418
	21	221	175	208	386
45	8	168	118	253	451
	12	179	126	234	451
	15	188	133	218	451
	18	199	140	233	418
	21	215	152	237	386
50	8	167	106	266	451
	12	176	112	251	451
	15	183	116	240	451
	18	194	123	255	418
	21	209	133	262	386
65	8	165	81	299	445
	12	172	84	289	445
	15	178	87	280	445
	18	188	92	298	412
	21	204	100	307	379

表-2 ペースト・砂・砂利の弾性係数

C/W	Ep (GPa)	pEs (GPa)	pEg (GPa)
2.65	21.55	40.40	51.1
2.50	20.52	40.14	51.1
2.25	18.49	38.46	51.1
2.00	16.29	35.25	50.0
1.54	11.31	25.35	47.9

表-3 コンクリートの弾性係数（Ec'）算定値

スランブ	C/W	Ec' (GPa)	Ec' ratio
8 cm	2.50	35.23	1
	2.25	34.54	0.980
	2.00	32.51	0.922
12 cm	2.50	34.77	1
	2.25	34.03	0.979
	2.00	32.10	0.923
15 cm	2.50	34.32	1
	2.25	33.62	0.980
	2.00	31.81	0.927
18 cm	2.50	33.53	1
	2.25	32.88	0.981
	2.00	31.02	0.925
21 cm	2.50	32.62	1
	2.25	31.93	0.979
	2.00	30.09	0.922

ここではそれぞれの水セメント比に対応する砂・砂利の弾性係数として図-5 の資料から得られる値を用いる。

それらの値を表-2 に示す。したがって補正係数 (J) を乗ずることはしない。

ここで pEs, pEg の両方とも実験値が得られている C/W の範囲は 2.5~2.0 である。以下の考察では対象をこの範囲にしぼることにする。

このように算定したコンクリートの弾性係数 (E_c') を表-3 に示す。また同表には C/W = 2.5 の E_c' に対する比率 (E_c' ratio) をも示してある。

C/W と E_c' との関係を 図-6 に示す。

両者の関係はスランプに応じて差異があるものの、その傾向は良く似ている。

またセメント水比 2.5 の E_c' に対する各弾性係数の比率 (E_c' ratio) を求めてみるとスランプが異なってもその差は極めて小さい。

スランプ 15cm の場合について C/W と E_c' ratio の関係を 図-7 に示した。この関係は前掲図-4 の補正係数 (J) とセメント水比の関係と良く重なりと言えよう。

各 C/W に対応する細・粗骨材の弾性係数 (pEs, pEg) を用いた複合理論値は補正係数 (J) を用いた値と同等である。すなわち pEs, pEg はコンクリートの弾性係数に及ぼす境界層の影響を反映している値と言えよう。

4. 川砂・川砂利の境界層効果の特徴

図-5 によると C/W の減少に対応する骨材の見かけの弾性係数の減少の傾向は砂利よりも砂の方が著しい。

ここでペースト、砂、砂利の弾性係数 E_p , pEs, pEg が E_c' に及ぼす影響の程度を検出することを試みる。

前章で E_c' の比率 (E_c' ratio) はスランプ値が異なっても殆ど同じ傾向を示すことが明らかになったことから、ここでは代表としてスランプ値 15cm を取り上げ、次の場合を算定する。

C/W = 2.5 に対して 2.0, 2.25 の場合の E_c' 値を求めるために以下のケースを取り上げる。

A: ペーストの値のみ各水セメント比に対応

B: ペースト・砂利の値を各水セメント比に対応

C: ペースト・砂の値を各水セメント比に対応

算定した結果を表-4 に示す。

C/W とこれらの E_c' との関係を 図-8 に示す。

図中 A はコンクリートの弾性係数に及ぼすペーストの影響を、B と A の差は砂利の影響を、C と A の差は砂の影響を表すものと考えられる。

それら川砂利と川砂の影響の差を求めてみると表-5 に示す通りである。

C/W = 2 について E_c' の B~A の差は 0.29, C~A の差は 0.97 である。この点で見る限り川砂境界層の影響

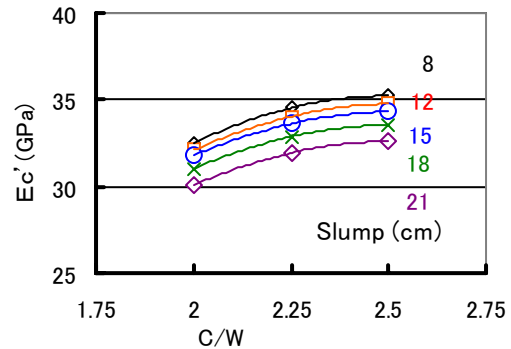


図-6 コンクリートの弾性係数 (E_c') とセメント水比

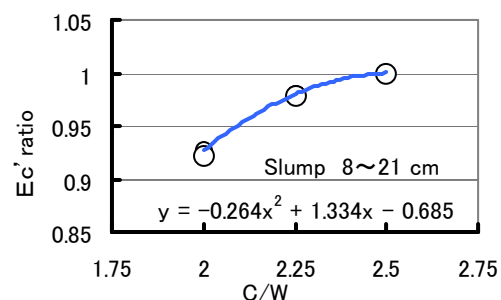


図-7 セメント水比とコンクリートの弾性係数

表-4 C/W とコンクリートの弾性係数 E_c' (GPa)

C/W	A	B	C	D
2.5	34.78	34.78	34.78	34.78
2.25	34.03	33.92	33.73	33.61
2.0	33.06	32.77	32.09	31.81

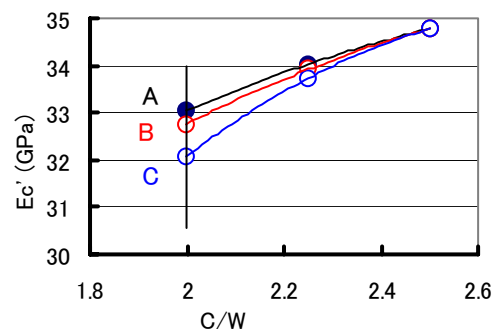


図-8 セメント水比と E_c'

表-5 E_c' の差

C/W	A	B	C	D
2.25	0.75	0.86	1.05	1.17
2.00	1.72	2.01	2.69	2.97

は川砂利境界層の影響に対して約 3.3 倍となっている。

以上は限られた実験からの考察であるので、その数値自体は必ずしも正確とは限らないが、コンクリートの弾性係数に及ぼす境界層の影響は粗骨材よりも細骨材の方が主であることを示している。

その理由としては同一体積では細骨材の方が粗骨材に比べて境界層の面積が極めて大きいことによるものと考えられる。

一方、コンクリートの圧縮強度に対しては境界面の付着破壊がコンクリート破壊の起因となる場合、主なる骨材の影響は粗骨材の粒径と量であって、細骨材は殆ど影響を及ぼさないことを報告した³⁾。

上記の考察結果から骨材境界層がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響は、破壊を対象とする圧縮強度に対する場合と、その 1/3 の応力度における弾性的性質に対する場合とでは全く様相が異なると言えよう。

このような視点に立つと、弾性係数評価に圧縮強度を指標とすることが適切かどうかについて疑問の余地が残る。

また最近母材・骨材・境界層の 3 相球状モデルの理論解が報告され¹²⁾、各要因の弾性係数に及ぼす影響を検討している。この場合には具体的数値を得るための項目が増える。実用上の算定は複雑となる。

5. 複合理論による骨材弾性係数評価の意義

複合理論による骨材粒状体の弾性係数評価はあらゆる骨材に適用できる汎用性がある。C/W の大きい範囲で得られる p_{Ea} の最大値は骨材自体の値に極めて近いと推定される。またそれ以下の C/W について得られた p_{Ea} (p_{Es} , p_{Eg}) は既に境界層の影響を含む値であるので、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。先に述べた補正係数 (J) を乗ずる必要が無い。

6. むすび

本論の背景としてコンクリートの弾性係数評価に複合理論を用いる方法の概略をまとめた。また母材と複合材の弾性係数測定から複合理論を用いて骨材粒状体の見かけの弾性係数を算定する方法の特徴を述べた。

本論考察では限られた範囲の実験結果に拠るものの、その範囲では次の点が考察されるにいたった。

- 1) 細骨材と粗骨材ではその見かけの弾性係数 (p_{Es} , p_{Eg}) が C/W の減少に伴い低下する傾向の特徴は異なる。
- 2) 骨材の見かけの弾性係数最大値は骨材自体の弾性係数に極めて近いと推定される。
- 3) 骨材の見かけの弾性係数には骨材境界層がコンク

リートの弾性係数に及ぼす影響を含むと考えられる。したがってこの値を用いる時は境界層の影響を取り入れるための補正をする必要がない。

- 4) コンクリートの弾性係数に骨材の境界層が及ぼす影響は粗骨材よりも細骨材の方が大きい。

コンクリートの弾性係数評価に対するこの種の方法に関する研究と実験データの蓄積が進めば新しい評価法のシステムへの道が開かれることになろう。

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－許容応力度設計法一，1999
- 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：粗骨材とコンクリート強度に関する基礎的研究，日本建築学会論文報告集，Vol.166, pp.19-27, 1969, Vol.167, pp.7-11, 1970.
- 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 川上英男：複合理論による骨材の弾性係数評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.29, No.1, pp.111-116, 2007.7
- 10) 川上英男：複合理論による細骨材の弾性係数評価，日本建築学会大会(九州)学術講演梗概集，A 1，pp. 1075-1076, 2007. 8
- 11) 日本建築学会：コンクリートの調査設計・調合管理・品質管理指針案・同解説，1976, p.152
- 12) Li, C.-Q. and Zheng, J.-J. : Closed-Form Solution for Predicting Elastic Modulus of Concrete, ACI Materials Journal, Vol.104, No.5, pp.539-547, Sep / Oct. 2007

