

論文 骨材種類とコンクリートの弾性係数

川 上 英 男*

要旨：先に筆者は、川砂利コンクリートや砕石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する割合は水セメント比が大きいほど、粒径が大きいほど大きくなることを報告した。本研究では3種の人工軽量骨材コンクリートの実験を行ない、川砂利や砕石を用いたコンクリートとの比較を行った。特に弾性係数の実験値と複合理論値を比較した結果、人工軽量骨材コンクリートにおいても川砂利や砕石を用いたコンクリートと同様、上述の傾向があることが明らかになった。

キーワード：コンクリート, 弾性係数, 複合理論, 人工軽量骨材, 境界層

1. はじめに

コンクリートの弾性係数の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⁵⁾。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。

筆者は既報^{1,2)}で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^{3,4,7)}。そしてこの複合理論値と実験値との差に注目し、骨材の境界層がコンクリートの弾性係数に及ぼす影響の指標と見なしてきた。

骨材境界層を問題にするとき、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ところから、この問題については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。

本報告では特に粗骨材として人工軽量骨材2種と超軽量骨材に焦点を当て、それらを用いたコンクリートの圧縮強度と弾性係数について、既報の川砂利コンクリート及び砕石コンクリートとの比較を行った。実験では川砂利や砕石の場合と同様に狭い粒度範囲いわゆる単一粒径の粗骨材を用いた。そしてそれらコンクリートの圧縮強度や弾性係数をモルタル母材と比較することで粗骨材の影響を検討する。特に弾性係数の実験値と複合理論値との差について水セメント比との関連で考察するものである。

また川砂利を岩種別に分類した上、その代表的な4種類について粒度を揃えた粗骨材を用いて同一調合のコンクリートの実験結果についても複合理論値と実験値との比較を行い、骨材の弾性係数との関連を検討した。

* 福井工業大学教授 工学部建設工学科教授 工博（正会員）

2. 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及ぼす影響については、川砂利と碎石を用いたコンクリートで検討してあるので、本実験では水セメント比は3水準とし、軽量骨材の含有率をシリーズごとに一定とした。

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 kN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 使用材料と調合

使用材料は次の通りである。

セメント：普通ポルトランドセメント

川砂利：福井県九頭龍川産，粒大2.5 mm，

表乾密度2.56 g/cm³，吸水率2.66 %。

碎石：福井県坂井郡上久米田産，安山岩質。

表乾密度2.67 g/cm³。5-10，13-15，

15-20 mmに篩い分け，等量ずつ混合。

川砂利：福井県九頭龍川産，5-20 mm，

表乾密度2.62 g/cm³。

人工軽量骨材

A：造粒型10-13 mm，表乾密度0.85 g/cm³。

B：造粒型10-15 mm，表乾密度1.35 g/cm³。

M：破碎型10-15 mm，表乾密度1.38 g/cm³。

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。スランブは12-15 cmを目標とし，目視でその程度であることを認めた。

表-1 調合（絶対容積 1/m³）

粗骨材 種類	W/C (%)	水	セ メ ン ト	川砂	粗骨材
軽量骨材	38	215	180	231	364
	60	185	109	332	364
砕石	35	215	195	220	360
	45	213	150	267	360
	65	200	98	332	360
川砂利	40	172	126	292	400
	60	200	98	292	400
川砂利 (*)	45	168	118	253	451
(*)：花崗岩，ひん岩，安山岩，砂岩を 選り分けてそれぞれ別個に使用。					

4 実験結果と考察

実験結果を試験体種別それぞれの平均値で表-2に示す。

4.1 圧縮強度

粗骨材に川砂利や碎石を用いた場合，コンクリートの圧縮強度はモルタルより低下し，その低下量は粗骨材含有率（ V_a ）とほぼ比例することは既に報告した^{2,10)}。実験結果からコンクリートの圧縮強度とセメント水比の関係を図-1に示す。同一セメント水比に対する圧縮強度の値は碎石の場合が最も大きく，以下川砂利，骨材BとMそして骨材Aの順に低くなっている。

モルタル母材に対するコンクリートの圧縮強度比（ F_c/F_m ）をセメント水比との関係で示したのが図-2である。セメント水比が大きくなりモルタルの強度が増加するにつれて碎石や川砂利の場合は強度比（ F_c/F_m ）も増加しているが，軽量骨材ではこの強度比が小さくなる傾向にある。特に骨材Aの場合は低下が著しい。セメント水比が大きくなるほど母材モルタルと骨材の強度の差が大きくなり，破壊が骨材に生じ易くなるためと考えられる。

表 - 2 実験結果

粗骨材種類		W/C	(※1) Va	(※2) F	(※3) E	(※4) E _c	(※5) J
		%		M Pa	G Pa	G Pa	E/E _c
軽量骨材	A	38	0	57.9	24.0		1
		38	0.36	32.1	17.3		1
		38	0.36	47.7	20.4		1
		38	0.36	42.8	20.3		1
	B	60	0	36.3	22.4		1
		60	0.36	24.9	15.2	16.5	0.92
		60	0.36	30.8	17.6	19.5	0.9
		60	0.36	28.6	17.4	19.4	0.9
	M	35	0	65.6	26.7		1
		35	0.36	62.1	34.1	34.3	0.99
砕石	A	45	0	55.0	24.3		1
		45	0.36	50.8	30.5	32.2	0.95
	B	65	0	31.6	20.6		1
		65	0.36	26.6	26.8	28.7	0.93
	川砂利	40	0	57.1	29.3		1
		40	0.4	52.0	35.8	36.1	0.99
花崗岩	A	60	0	46.2	25.3		1
		60	0.4	38.3	30.3	32.9	0.92
	B	45	0	52.5	23.9		1
		45	0.45	39.7	30.0	34.8	0.86
	M	45	0.45	35.2	33.1	36.9	0.9
		45	0.45	37.6	31.4	35.1	0.89
砂岩	A	45	0.45	36.7	33.8	39.1	0.86

※1：粗骨材含有率，0はモルタルを示す
 ※2：モルタル・コンクリートの圧縮強度
 ※3：モルタル・コンクリートの弾性係数
 ※4：コンクリート弾性係数の複合理論値
 ※5：J = E / E_c，後述参照。
 ※6：川砂利を岩種別に選り分けて使用。

表 - 3 粗骨材弾性係数 E_a (G Pa)

砕石：55.1，川砂利：50.0，花崗岩：57.5，
 砂岩：79.2，ひん岩：66.9，安山岩：58.6，
 軽量骨材：（後述 5. 複合理論の項 参照）

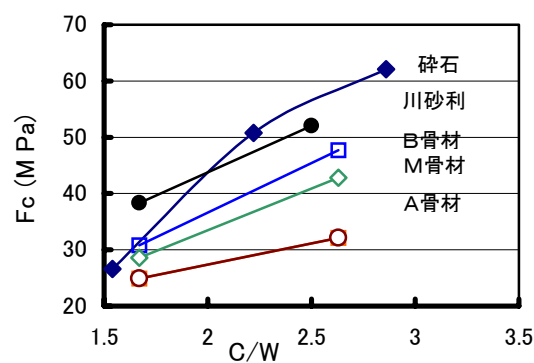


図-1 セメント水比と圧縮強度 (Fc)

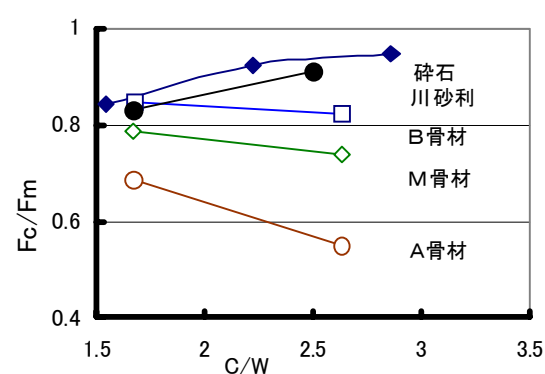


図-2 セメント水比 (C/W) と (Fc/Fm)

いずれの場合も強度比は1より低下している。
 すなわち 砕石，川砂利，軽量骨材など粗骨材
 の含有が強度上の欠陥となっていることを示し
 ている。

4.3 弾性係数

セメント水比が大きくなると圧縮強度，弾性
 係数共に大きくなる。図-3に弾性係数と圧縮
 強度の関係を示す。これにはモルタル母材の圧
 縮強度と弾性係数の増大効果が含まれているの
 で，骨材の影響を抽出するにはモルタルとの比
 較が必要である。

川砂利や砕石のように，モルタル母材の弾性
 係数より骨材の弾性係数が大きい場合には，骨
 材含有率が大きい程コンクリートの弾性係数は
 増大することはすでに報告した⁸⁹⁾。

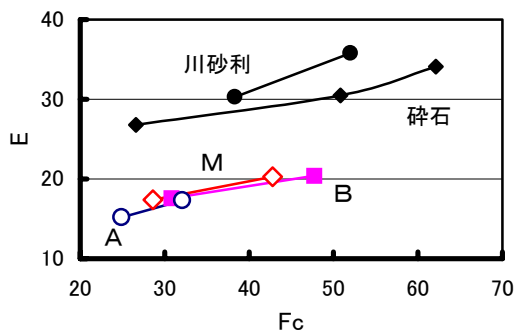


図 - 3 弾性係数と圧縮強度

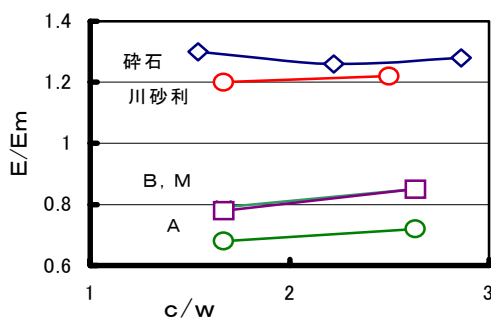


図 - 4 セメント水比と弾性係数比

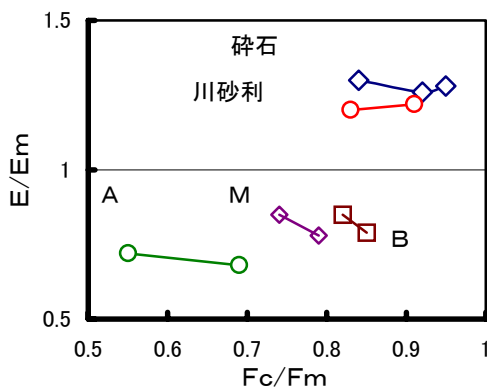


図 - 5 圧縮強度比と弾性係数比

モルタルに対するコンクリートの弾性係数の比率をセメント水比ごとに示したのが図 - 4 である。その弾性係数比は碎石コンクリートでは 1.26-1.3, 川砂利コンクリートでは 1.2 となっている。一方軽量骨材コンクリートの B, M 骨材では 0.78-0.85, A 骨材ではさらに低く, 0.68-0.72 となっている。

モルタルに対する強度比は碎石と川砂利のコンクリートでは, 前掲の図 - 2 に示すように 1 より低下しているのに対し, 弾性係数比は 1 より大きいと言うことは圧縮強度と弾性係数は全く独立した物理量であることを示している。

一方, 軽量骨材コンクリートの弾性係数はモルタルの弾性係数に比べて低下しているが, 強度比も 1 より低下している。そこでいま強度比 (F_c/F_m) と弾性係数比 (E/E_m) との関係を図 - 5 に示す。

同一種類の骨材の場合に注目すると軽量骨材は 3 種共プラスの相関性は認められない。やはりこの場合も圧縮強度と弾性係数は独立の物理量と考えられる。

5. 複合理論による弾性係数の考察

複合材の弾性係数評価に対していくつかの複合モデルが提案されてきた。そのうちで最も精緻とされる Hashin - Hansen モデルの解⁶⁾は式 (1) に示す通りである。

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

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,
 $(V_m + V_a = 1)$

ここではコンクリートをモルタル母材と粗骨材の 2 相複合体として扱うことにする。

式 (1) に E_m, V_a および前頁の表 - 3 に示す E_a を代入して複合体の弾性係数 (E_c) を算定した。それら E_c の値 (以下理論値という) は前頁の表 - 2 に示したように実験値 (E) に比べて大きい値を示しているのがほとんどである。

コンクリートの応力度歪度関係は応力度の増加につれて直線から外れて上に凸の形を示すのが通例で, この現象は骨材境界面に生ずるマイクロクラックに起因するものとされている。複合理論は弾性論に基づいており, この種の要因を取り込んでいないため, 実験値より大きい値を与えるものと考えられる。

その非弾性挙動が骨材境界層の付着に起因することを考えれば、その影響因子は、骨材の岩質、表面粗滑度、粒径、含有率と共に、セメントの性質、水セメント比、養生条件、材齢、など多岐にわたる。これらの諸因子が非弾性挙動に及ぼす定量的な影響についての知見は極めて少ない。

この弾性係数の理論値に対する実験値の比率 $J = E / E_c$ を求め表-2に示す。

砕石コンクリートではセメント水比が 2.86 のとき J 値は 0.99 を示し、セメント水比が小さくなると J 値は低下し、セメント水比 1.54 では 0.93 となっている。すなわち水セメント比が35%では J 値は殆ど 1 に近く実験値は複合理論値と同等である。

前報告⁷⁾では砕石コンクリートについてこの J 値はセメント水比が小さくなる程低下すること並びにその低下の割合が著しくなることを指摘し、さらにおおよその見当として水セメント比が30%以下の高強度コンクリートではその低下を考慮する必要がないことも示唆した。

軽量骨材コンクリートに複合理論を当てはめるには骨材の弾性係数が必要である。しかし焼成軽量骨材の内部は多孔質であるが表面は焼成過程で熔融して硬い外殻を形成している。このような粒状体では外殻の厚さが一定とすれば粒の大きさによって外殻と多孔質部の体積比が変わるため 1 個の粒の弾性係数は異なるという性格を持つ。また弾性係数を測定する適切な手段も見当たらない。

そこで上述のようにセメント水比の大きい範囲では J 値は殆ど 1 に近いことから、ここではセメント水比が 2.63 ($W/C = 0.38$) の場合に J 値が 1 と仮定して、式(1)を用いて骨材の弾性係数を逆解析した。このようにして求めた骨材の弾性係数を次に示す。

A 骨材	9.04	G Pa
B 骨材	15.3	G Pa
M 骨材	13.8	G Pa

これらは推定値であるが、セメント水比のより

小さい場合に対する複合理論値を求める手がかりとし、セメント水比の変化に対応する J 値の変化を考察することにする。これらの値と式

(1) を用いてセメント水比 1.67 (水セメント比60%) の場合の J 値を求めた結果を表-2に示す。

セメント水比と J 値との関係を図-6に示す。全体の傾向としては、セメント水比が小さくなると J 値が低下する。セメント水比の減少に伴う J 値の低下は砕石の場合がやや少なく、川砂利や軽量骨材はほぼ等しい。骨材 A は骨材 B や骨材 M に比べて圧縮強度や弾性係数が大きく低下しているが J 値はほぼ等しい。このことから J 値は骨材自体の弾性係数とは関係なく、骨材の表面の粗滑度やセメントペーストとの接着など境界層の影響を表していると思われる。

水セメント比60%の場合には J 値はほぼ 0.9 前後になっている。

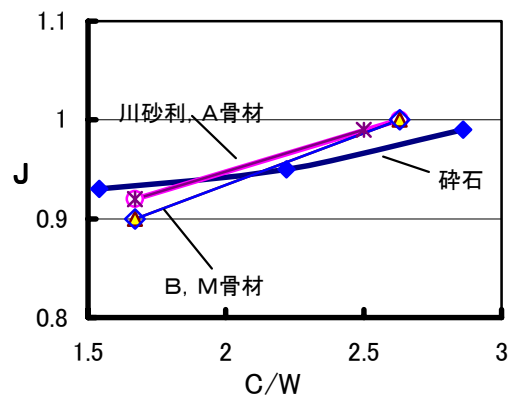


図-6 セメント水比 (C/W) と J 値

なお九頭龍川産の川砂利を母岩の種類ごとに分別し、それらの粒度を揃えて骨材としたコンクリートの実験資料に上記と同様の考察を加えて J 値を求め前掲の表-2に示した。

J 値は花崗岩の場合は 0.86 , ひん岩の場合は 0.90 で、その他は中間の値となっている。川砂利は砕石に比べて表面がやや滑らかである。J 値が砕石に比べてやや小さいのは骨材表面の影響が現れていると考えられる。

これらの資料からは母岩の弾性係数と J 値との相関性は認められなかった。

7. 結び

本論文では、焼成軽量骨材 3 種、碎石及び砂利を用いたコンクリートの圧縮強度と弾性係数の実験結果を比較した。特に弾性係数については、コンクリートをモルタル母材と粗骨材から成る 2 相複合体とみなして複合理論を適用し、その理論値と実験値を比較検討した。その結果次のことが推論されるに至った。

- 1) 3 種の焼成軽量骨材コンクリートについても、川砂利コンクリートや碎石コンクリートと同様に、圧縮強度と弾性係数は独立の物理量とみなされる。
- 2) 焼成軽量骨材コンクリートの弾性係数実験値の複合理論値に対する比 (J 値) は、川砂利や碎石のコンクリートと同様に、1 より小さくなる場合があり、セメント水比が小さくなるとその低下は大きくなる。その低下の度合いは、碎石の場合がもっとも小さく、川砂利や焼成軽量骨材はほぼ同程度である。
- 3) 碎石や川砂利及び焼成軽量骨材の場合にほぼ同程度の J 値が見られるので、J 値は骨材自体の弾性係数とは直接の関係はないように見受けられる。

以上骨材の形状や表面の粗滑度あるいはセメントペーストとの接着など骨材境界層はコンクリートの圧縮強度のみならず弾性係数にも影響を及ぼしていると言えよう。コンクリートの弾性係数を考察するとき、母材と骨材に加えて、それらの間の境界層をも視野に入れる必要がある。

謝辞

実験は卒業研究として分担された福井大学及び福井工業大学学生諸君のご協力によるものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, Vol. 1, pp. 497 - 500, 1995. 6
- 2) 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
- 3) 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, 1999.
- 4) 川上英男：骨材がコンクリートの弾性係数に及ぼす影響，骨材資源，Vol. 31, No. 123, pp. 217 - 221, 1999. 11
- 5) 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
- 6) 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, September 1965
- 7) 川上英男：コンクリートの弾性係数に及ぼす骨材境界層の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22, No. 2, pp. 529-534. 2000. 6.
- 8) 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集，Vol. 23, No. 2, pp. 343-348. 2001. 6.
- 9) 川上英男：碎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集，Vol. 24, No. 2, pp. 303-308. 2002. 6.
- 10) 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.