

論文 砕石コンクリートの弾性係数評価

川 上 英 男*

要旨：先に筆者は川砂利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¹⁾、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程大きくなることを報告した^{2 3 4)}。本研究では砕石コンクリートの実験を行うと共に砕石母岩の弾性係数をも実測した。それらに基づき複合理論値と比較した結果、砕石の粒径が大きい程、また水セメント比が大きいほどコンクリートの弾性係数実験値が複合理論値より低下する割合が大きくなることを示した。

キーワード：コンクリート、弾性係数、複合理論、粗骨材粒径、境界層

1. はじめに

コンクリートの弾性係数の評価には、従来二通りの方法が提案されてきた。そ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応する保証はない。他の一つは理論的な方法で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。それらの複合構造モデルの算定式は弾性論より導かれており、精密さを追求するほどその解は複雑な式となっている⁶⁾。しかしながら、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その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)}。

この現象は骨材境界層がその要因となっていることを示唆するものである。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。本報告では粗骨材として安山岩系砕石をとりあげた。砕石は川砂利に比べて表面が粗く、モルタルとの接着が良い。その半面粒形が角張っており、骨材境界面における弱点が生じやすいという性格を持っている。川砂利コンクリートとの違いを明らかにするのも本実験の目的である。実験の手法は川砂利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サイズ別に数種類用意し、それらを用いたコンクリートの実験を行った。その解析結果から粗骨材の粒径がコンクリートの弾性係数に及ぼす影響を水セメント比との関連で抽出することを試みたものである。

複合理論の適用に当たってはコンクリートをモルタル母材と粗骨材の2相から成る複合材として扱った。砕石母岩からコアを採取しその圧縮試験から圧縮強度と弾性係数を求め、複合理論の検証の基礎とした。

* 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

まずモルタルを練り、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手練りを行った。またそのモルタルを用いてコンクリートと同じサイズ（径10 cm x 高さ20 cm）の試験体も作製した。翌日キャッピングを施し、翌々日脱型、以後水中養生（20-25℃）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2-3 kg/cm²/sec で歪計測はほぼ 1 ton 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。

砕石母岩については砕石工場より採取した母岩を長方形の型枠にコンクリートと共に埋め込み、硬化後にコアカッターを用いて直径 32.6 mm の円柱を採取し気乾状態で圧縮試験に供した。試験体の両側面に抵抗線歪計（検長20mm）を貼り付け歪度を計測し弾性係数を求めた。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

砂：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 %。

砕石：福井県坂井郡上久米田産， 安山岩質。

5 号， 6 号砕石。表乾密度2.67 g/cm³。

5-10, 10-13, 13-15, 15-20 mm に篩い分け， 単一粒径または 3 種を等量ずつ混合して用いた。

3. 砕石含有率とコンクリートの力学的性質

3.1 実験対象

コンクリートの水セメント比は0.45 と一定とし、砕石の含有率を 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 の 5 水準とした。砕石は単一粒径（10-13 mm）と混合粒径（5-10, 10-13, 15-20 mm を等量混合）をそれぞれ用いた。試験体はそれぞれモルタル 4 本，コンクリート 3 本，合計32本である。

調査を表 - 1 に示す。

表-1 調査（絶対容積）

モルタル 水：セメント：砂			砕石含有率Va (%)
0.45	1	2.35	0, 10, 20, 30, 40

表-2 圧縮強度と弾性係数

砕石	Va (%)	Fm, Fc (M Pa)	E (G Pa)	Ec	J (E/Ec)
Blend	0	52.7	23.5	23.5	1
	10	51.0	24.5	25.5	0.961
	20	48.1	27.0	27.6	0.978
	30	49.2	28.3	29.9	0.946
	40	46.4	29.1	32.5	0.895
10-13	0	54.3	23.3	23.3	1
	10	50.2	24.3	25.3	0.960
	20	50.0	26.9	27.4	0.982
	30	48.6	28.3	29.8	0.950
	40	47.6	29.1	32.3	0.900

Va：砕石含有率，

Fm, Fc：モルタル，コンクリートの圧縮強度

Em, E：モルタル，コンクリートの弾性係数

Ec：コンクリートの弾性係数の複合理論値

3.2 実験結果と解析

実験結果を試験体種別それぞれの平均値で表-2 に示す。

（1）圧縮強度

コンクリートの圧縮強度は砕石含有率が増えるほどモルタルより低下し、その低下量は砕石含有率とほぼ比例している。モルタルに対するコンクリートの圧縮強度の比率（Fc/Fm）を図-1 に示す。砕石含有率が 0.4 では約12%の低下を示している。

（2）弾性係数

母材の弾性係数に比べて骨材の弾性係数が高い場合には骨材を多く含む程その複合体の弾性係数は増大する。本実験では骨材と母材モルタルの弾性係数の比は約 2.35 である。 砕石

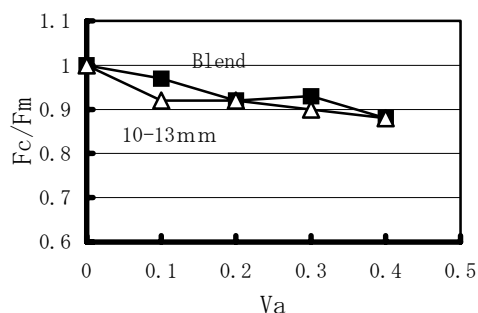


図-1 砕石含有率 (Va) と圧縮強度比 (Fc/Fm)

含有率が多くなる程コンクリートの弾性係数も大きくなっている (図-2 参照)。

このように圧縮強度と弾性係数は負の相関を示し、両者が全く独立した物理量であることを示している。この点は川砂利コンクリートの場合と同様である。

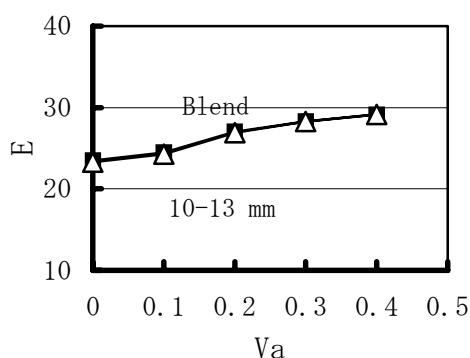


図-2 砕石含有率 (Va) と弾性係数 (E)

4. 砕石粒径・水セメント比とコンクリートの力学的性質

4.1 実験対象

コンクリートは3水準の水セメント比 (35, 45, 65%) のモルタルに対し、粒径の異なる単一粒径砕石3種と混合粒 (5-10, 13-15, 15-20 mm) を等量配合) 1種をそれぞれ用いた。スランブ15-18 cm程度を目標にその体積含有率は3.6%

とした。試験体は各種モルタル8本、コンクリート3本、合計60本である。調合を表-3に示す。

表-3 調合 (絶対容積 1/m³)

w / c	水	セメント	砂	砕石
0.35	219	198	223	360
0.45	217	153	271	360
0.65	203	99	338	360

4.2 実験結果と解析

実験結果を表-4に示す。各値はモルタルでは試験体各8本、コンクリートでは試験体各3本の平均値である。

表-4 実験結果

w / c (%)	砕石 (mm)	Fm, Fc (MPa)	Em, E (GPa)	Ec (GPa)	J (E/Ec)
35	Mortar	65.6	26.7	26.7	1
35	05-10	64.3	34.9	34.3	1.02
35	13-15	59.2	34.2	34.3	1.00
35	15-20	56.3	33.3	34.3	0.97
35	05-20	62.1	34.1	34.3	0.99
45	Mortar	55.0	24.3	24.3	1
45	05-10	54.6	32.1	32.2	1.00
45	13-15	49.5	32.0	32.2	0.99
45	15-20	51.7	32.3	32.2	1.00
45	05-20	50.8	30.5	32.2	0.95
65	Mortar	31.6	20.6	20.6	1
65	05-10	27.3	27.9	28.7	0.97
65	13-15	26.8	27.6	28.7	0.96
65	15-20	22.7	25.8	28.7	0.90
65	05-20	26.6	26.8	28.7	0.93

Va: 砕石含有率,

Fm, Fc: モルタル, コンクリートの圧縮強度

Em, E : モルタル, コンクリートの弾性係数

Ec : コンクリートの弾性係数の複合理論値

(1) 圧縮強度

モルタルの圧縮強度に対するコンクリートの圧縮強度の比率 (F_c / F_m) を水セメント比ごとに各粒径に応じて図-3に示す。粒径は粒径範囲の中央値で示してある。

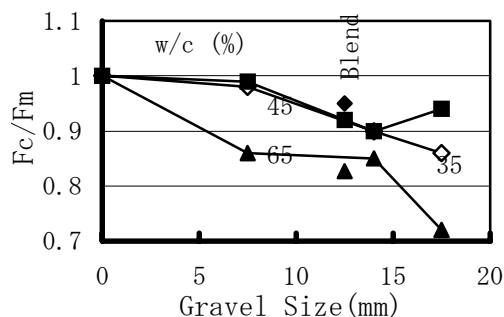


図-3 砕石粒径と圧縮強度比 (F_c / F_m)

粒径が大きくなる程圧縮強度比が低下する傾向がある。すなわち砕石が強度上の欠陥となっていることを示している。前報の川砂利コンクリートの場合水セメント比50%で F_c / F_m が約0.7程度であったのと比較すると砕石コンクリートでは0.8-0.85を示していて砕石の方が川砂利より強度比に及ぼす影響は少ないことが示されている。

またその低下の割合は水セメント比が35%と45%では差が少ないが65%になると大きい差を示し、低下の傾向が顕著である。このことはすでに筆者が以前に詳細に論じたところ^{8, 9, 10)}であるので、ここでは省略する。

(2) 弾性係数

粗骨材粒径と弾性係数との関係の水セメント比ごとに図-4に示す。モルタル（横軸上0に示す）の弾性係数は水セメント比が大きくなると減少しており、それらを母材とするコンクリートもそれらに対応した大きさを示している。

そこでモルタルの弾性係数に対するコンクリートの弾性係数の比と砕石の粒径の関係を図-5に示す。粒径5-10 mmのコンクリートでは水セメント比が大きいほど増加の比率が大きい。モ

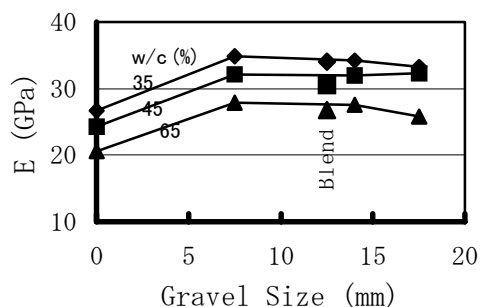


図-4 砕石粒径と弾性係数

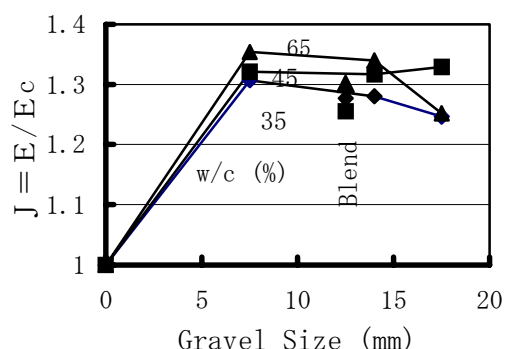


図-5 砕石粒径と弾性係数比 (E / E_m)

ルタル母材に対する砕石の弾性係数の比がそれぞれ 65%:2.7, 45%:2.27, 35%:2.06 と水セメントが大きいほど大きくなっているため砕石の含有率が同じでもその影響が大きくなっているものと考えられる。この傾向は川砂利コンクリートの場合と同様である。さらに粗骨材の粒径が大きくなると弾性係数比はわずかに減少する傾向が認められる。

5. 砕石母岩の圧縮強度と弾性係数

圧縮強度と弾性係数の各個の実験結果を表-5に示す。

表-5 砕石母岩の圧縮強度, 弾性係数

No.	F_c (MPa)	E (GPa)	No.	E (GPa)
1	183.3	60.08	10	46.24
3	173.5	48.70	15	56.08
4	188.2	54.19	16	61.19
5	223.4	48.70	17	60.84
9	—	54.61	18	60.12

試験体10本から得られた弾性係数 (E) の範囲は46-60 (G Pa) , 平均値は 55.1 (G Pa) であった。試験体 4 本から得られた圧縮強度 (Fc) は 173-223 (M Pa) , 平均値は 192 (M Pa) であった。

6. 複合理論による考察

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, E_a を代入して複合体の弾性係数 (E_c) を算定した。それらの値 (以下理論値という) は実験値 (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、表-4に示した。

6.1 砕石含有率 (V_a) と J 値

まず砕石含有率 (V_a) と J 値の関係を図-6に示

す。J 値は砕石含有率が大きい程、低下する傾向が認められ含有率が 0.4 では10%に達する。

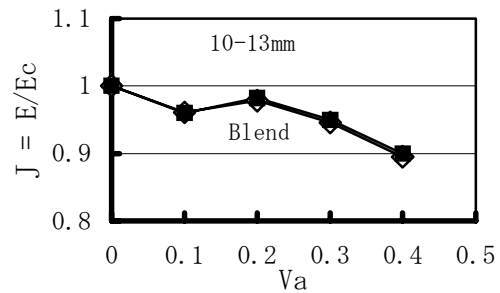


図 - 6 砕石含有率 (V_a) と E/E_c

6.2 砕石粒径と J 値

図-7は砕石粒径と J 値の関係を各水セメント比ごとに示したものである。砕石粒径が大きくなる程 J 値は低下する傾向が認められ、その割合は水セメント比が大きい程顕著である。

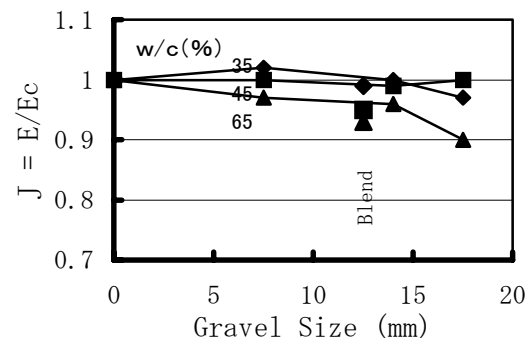


図-7 砕石粒径と J 値

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⁾では混合粒径川砂利を粗骨材としたコンクリートの実験に基づいて、この J 値は水セメント比が大き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、さらに凡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補正係数を考慮する必要がないことも示唆した。

砕石の場合も現象は川砂利コンクリートと同様である。ただし J 値は、直接の比較ではないものの、川砂利コンクリートで $J = 0.8$ に対応する水セメント比と粒度に対して砕石コンクリ

ートではおおよそ $J = 0.9$ 程度であると見なされる。

7. 結び

本論文では単一粒径並びに混合粒径の碎石を用いたコンクリートの圧縮試験結果を対象に碎石がコンクリートの弾性係数に及ぼす影響を検討した。ここではコンクリートをモルタル母材と粗骨材から成る二相複合体とみなして複合理論を用いた。

ここではコンクリートの非弾性挙動を考慮した係数 $J = (\text{実験値 } E) / (\text{理論値 } E_c)$ を導入し、この J 値と粗骨材の粒径や含有率との関係を考察した。その結果以下のような関係が抽出されるに至った。

1) 碎石含有率が大きくなる程、また碎石粒径が大きい程、係数 J は低下する。

2) 水セメント比が小さくなると J 値は大きくなり、水セメント比が35%ではほぼ1に近くなる。

さらに付言すれば、碎石の含有率が多くなる程また粒径が大きいほど圧縮強度が低下することも併せて述べた。これと類似の関係が、弾性係数の複合理論値に対する実験値の比、すなわち係数 J に関しても認められることが明らかとなった。

この類似性は弾性係数と圧縮強度という全く異質の物理量がコンクリートにおいては関連性をもっていることを示唆しており、その圧縮強度と非弾性挙動との関連を解明する手掛かりを与えよう。

粗骨材の境界層に起因する現象がコンクリートの弾性係数評価に対する二方法すなわち圧縮強度と密度にもとづく慣習的方法と複合理論による理論的方法との接点となっていることを示すものである。

謝辞

実験は福井大学協敬一技術官、卒業研究として分担された福井大学学生山崎健、福井工業大

学学生福田悟志 他の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：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，(その1)，Vol. 166, pp. 19-27. 1969. 12.
(その2)，Vol. 167, pp. 7-11. 1970. 1.
- 9) 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.