

## 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

川 上 英 男\*

Effects of crushed aggregate and super light weight aggregate  
on compressive strength and elastic modulus of concrete

Hideo Kawakami

The author reported previously that concrete with the larger water cement ratio showed the smaller value of elastic modulus than those of the theoretical obtained from the two-phase structural model and that the decrease of the value from the theoretical one enlarged with the larger gravel size and with the larger volume content of gravel in concrete at the same water-cement ratio. Experiments on concrete with crushed rock and super light-weight beads were carried out. The analysis revealed that the experimental value of the elastic modulus was lower than the theoretical and the decrease enlarged with the smaller cement water ratio.

### 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<sup>1)</sup>。したがって特定のコンクリートに適應する保証はない。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<sup>2)</sup>。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<sup>3,4)</sup>。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。

---

\* 建設工学科 建築学専攻

本報告では粗骨材として安山岩系砕石と近年開発された超軽量骨材を取りあげた。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。また超軽量骨材は球形に近く、表層の殻は硬質で表面は粗面、内部には気泡を有する。実験では粒径 10-13 mm を使用した。実験の手法は既報と同様に狭い粒度範囲いわゆる単一粒径の粗骨材とそれらを一定の割合に混合した骨材をそれぞれ用いたコンクリートの実験を行った。そのモルタルについても同様に試験体を作製した。その解析結果から粗骨材がコンクリートの強度と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。

## 2. 実験概要

砕石工場より採取した砕石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）を貼り付け歪を計測し弾性係数を求めた。コンクリートの実験は 3 水準の水セメント比についてそれぞれコンクリート中の骨材体積含有率を 36 % 程度とし、材齢 28 日で圧縮試験を行った。試験体の両側面に抵抗線ひずみゲージを貼り付けて歪度を計測し、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。

### 2. 1 材料と調合

セメント：普通ポルトランドセメント

砂： 九頭龍川産、粒大 2.5 mm, 表乾密度 2.56, 吸水率 2.66 %。

砕石：安産岩系。 5-10, 13-15, 15-20 mm に篩い分けた。混合（Blend）は各種を等量混合。

絶乾密度 2.67 g/cm<sup>3</sup>, 圧縮強度 196 MPa, 弾性係数 55.1 GPa (後述参照)。

超軽量骨材：10-13 mm, 絶乾密度 0.85 g/cm<sup>3</sup>, 弾性係数 9.04 GPa (後述参照)。

コンクリートの絶対容積調合を表-1に示す。スランプは 15-18 cm 程度である。

### 2. 2 コンクリート試験体の作製と圧縮試験

オムニミキサでモルタルを練り、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（各種 3 本）。また、そのモルタルを用いてコンクリートと同じサイズ（直径 10 cm x 高さ 20 cm）の試験体も作製した（6-8 本）。翌日キャッピング、翌々日脱型、以後標準水中養生を行い、材齢 28 日で圧縮試験を行った。

## 3 実験結果

### 3. 1 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-2に示す。

表-1 絶対容積調合 (l / m<sup>3</sup>)

碎石コンクリート	W/C (wt.)	C/W	水	セメント	川砂	粗骨材
	0.35	2.86	215	195	220	360
	0.45	2.22	213	150	267	360
	0.65	1.54	200	98	332	360
超軽量骨材	0.38	2.63	215	180	231	364
コンクリート	0.45	2.22	213	150	263	364
	0.60	1.67	185	109	332	364

表-2 碎石母岩の圧縮強度、弾性係数

No.	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	No.	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (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 (MPa) , 平均値は 192 (MPa) であった。

### 3.2 コンクリートの実験結果

試験体の圧縮強度 ( Fm, Fc ) および弾性係数 (Em, E) を表-3に示す。各値は碎石コンクリート用モルタルでは各8本, 超軽量骨材用コンクリート用モルタルでは各6本, そしてコンクリートは各3本の平均値である。

## 4. コンクリートについての考察

### 4.1 圧縮強度

セメント水比と圧縮強度の関係を図-1に示す。碎石コンクリートではc/wの増加につれて圧縮強度 (Fc) は上昇し, c/wの大きい範囲では Fcの増加は緩やかとなる。超軽量骨材コンクリートでは強度の頭打ちの現象が認められる。その理由は骨材破壊がコンクリートの破壊の起因となるためと思われる。

碎石粒径とコンクリート圧縮強度 (Fc) の関係を図-2に示す。採石粒径を各粒度範囲の中央値で表し、混合粒径 (Blend) では混合した3種の中央値の平均 (13 mm) として示してある。川砂利コンクリートでは川砂利の含有率が大きい程, 粒径が大きい程圧縮強度が低下する傾向が筆者

表-3 実験結果

砕石	F <sub>m</sub> , F <sub>c</sub>	E <sub>m</sub> , E	E <sub>c</sub>	J	超軽量骨材	F <sub>m</sub> , F <sub>c</sub>	E <sub>m</sub> , E	E <sub>c</sub>	J
w/c Aggr. [MPa] [GPa] [GPa] (E/E <sub>c</sub> )	w/c Aggr. [MPa] [GPa] [GPa] (E/E <sub>c</sub> )								
.35 Mortar 65.6 26.7 26.7 1	.38 Mortar 58.3 24.0 24.0 1								
.35 05-10 64.3 34.9 34.3 1.02	10-13 31.7 17.2 17.2* 1*								
.35 13-15 59.2 34.2 34.3 1.00	.45 Mortar 50.6 24.9 24.9 1								
.35 15-20 56.3 33.3 34.3 0.97	10-13 32.6 17.4 17.7 0.985								
.35 Blend 62.1 34.1 34.3 0.99	.60 Mortar 35.3 22.4 22.4 1								
.45 Mortar 55.0 24.3 24.3 1	10-13 24.3 15.1 16.4 0.92								
.45 05-10 54.6 32.1 32.2 1	F <sub>m</sub> , F <sub>c</sub> : モルタル, コンクリートの圧縮強度								
.45 13-15 49.5 32.0 32.2 0.99	E <sub>m</sub> , E : モルタル, コンクリートの弾性係数実								
.45 15-20 51.7 32.3 32.2 1	験値,								
.45 Blend 50.8 30.5 32.2 0.95	E <sub>c</sub> : 複合理論による弾性係数算定値								
.65 Mortar 31.6 20.6 20.6 1	J = E / E <sub>c</sub> : 複合理論値に対する実験値の比								
.65 05-10 27.3 27.9 28.7 0.97	* : 仮定値 (詳細は後述)								
.65 13-15 26.8 27.6 28.7 0.96									
.65 15-20 22.7 25.8 28.7 0.90									
.65 Blend 26.6 26.8 28.7 0.93									

の実験によって認められている。図-2でも採石粒径が大きい程圧縮強度は小さくなる傾向を示している。径13-15 mmと混合粒径とでは強度の差は比較的小さい結果となっている。

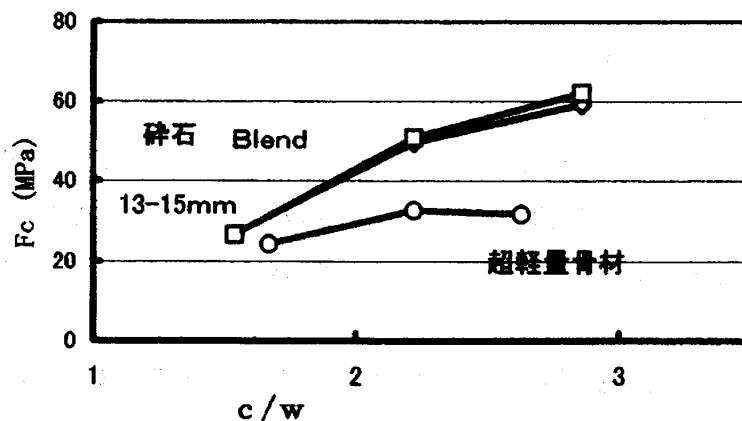


図-1 セメント水比と圧縮強度 (Fc)

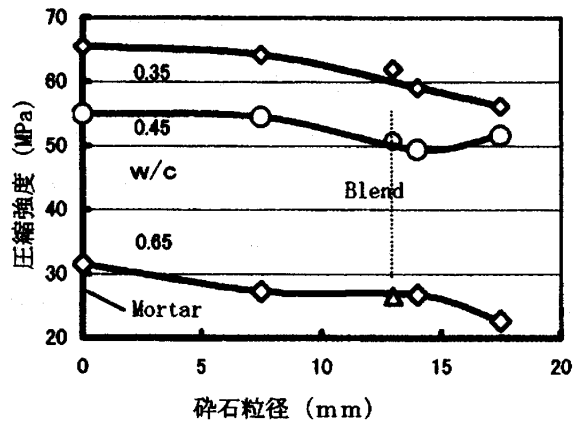


図-2 砕石粒径とコンクリート圧縮強度

#### 4.2 応力度・歪度関係と弾性係数

砕石母岩とモルタル及びコンクリートの応力度歪度関係を図-3に示す。モルタル及びコンクリートは水セメント比0.45の場合を示してある。砕石コンクリートの砕石は混合粒径、超軽量骨材は粒径 10-13 mm である。砕石コンクリートはモルタルと砕石母岩の間に位置している。超軽量骨材コンクリートでは骨材自体の剛性が低いため同一の歪度に対応する応力度は砕石コンクリートやモルタルに比べて大きく低下している。

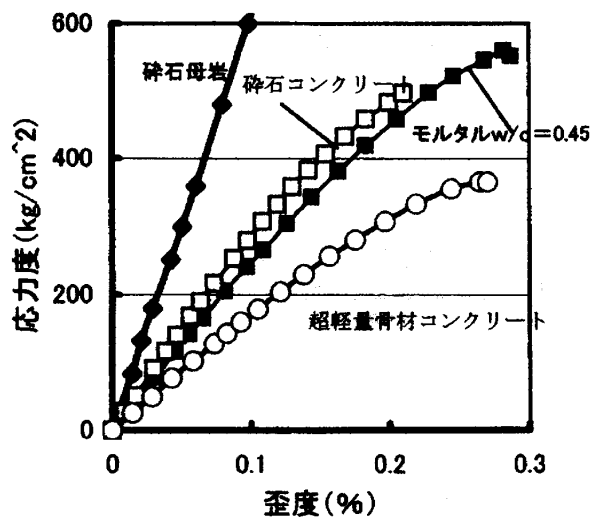


図-3 応力度・歪度関係

上述の現象を圧縮強度の 1/3 の応力度における割線弾性係数（以下単に弾性係数と言う）で比較する。砕石の弾性係数は母材モルタルの弾性係数より大きく（本実験ではその比は約 3-2.6）コンクリートの弾性係数は母材より増大する。超軽量骨材の場合は母材より弾性係数が小さく（約 1/3）コンクリートの弾性係数は母材モルタルより低下している。

図-4はこれらモルタル及びコンクリートの弾性係数とセメント水比の関係を示したものである。碎石コンクリートは碎石粒径 13 - 15 mm と混合粒径の場合を取り上げてある。

碎石コンクリートのシリーズではセメント水比が大きくなるとモルタルとコンクリートの弾性係数はほぼ直線的に増大する。コンクリートでは碎石含有による弾性係数の増加が明瞭である。一方、超軽量骨材コンクリートのシリーズではセメント水比の大きい範囲で弾性係数の増加が伸びにくい傾向がみられる。超軽量骨材の含有によってコンクリートはモルタルに比べて弾性係数が低下している。

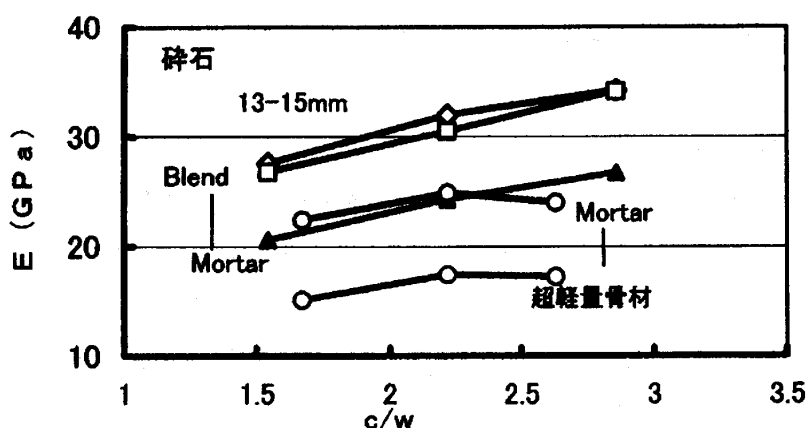


図-4 セメント水比 (c/w) と弾性係数 (E)

#### 4.3 複合理論による考察

弾性係数評価に対する複合モデルのうちで最も精緻とされる Hashin-Hansen モデルの解を式 (1) に示す。

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

$E_c, E_m, E_a$  : 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。式 (1) により複合体の弾性係数 ( $E_c$ ) を算定するには粗骨材の弾性係数が必要となる。碎石の場合は 3.1 に述べたように母岩より直径 32.6 mm のコアを10本切り出し, その圧縮試験より弾性係数を求めた。超軽量骨材の場合は最も水セメントの小さい (0.38) 試験結果から式 (1) を用いて  $E_a$  を逆解析に

よって求めた。既往の川砂利や碎石コンクリートの実験によって、水セメント比が小さい場合は骨材の境界層の影響が小さく、弾性係数の実験値と複合理論値との差が極めて小さいことが認められていることによる。

式(1)によりコンクリートの弾性係数理論値( $E_c$ )を求め、これに対する実験値の比を $J (=E/E_c)$ とする。図-5 にセメント水比と $J$ 値の関係を示す。

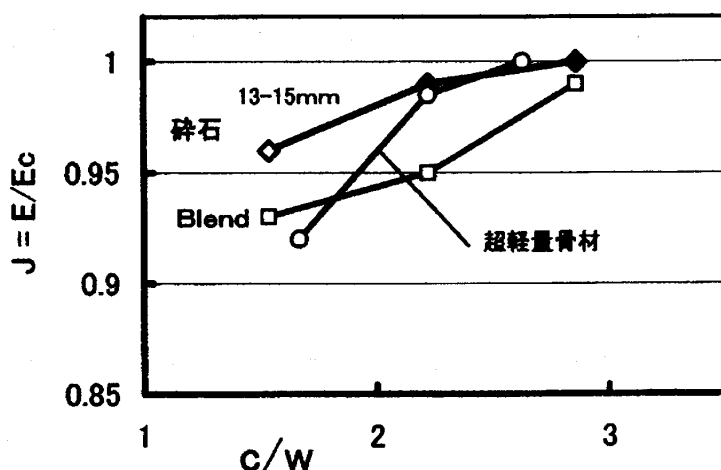


図-5 セメント水比と  $J$  値

セメント水比が低下する程  $J$  値は小さくなる。この算定によると碎石コンクリート(粒径 13-15 mm)ではセメント水比が2.86(水セメント比 0.35)では $J=1$ で、セメント水比1.54(水セメント比0.65)では $J=0.96$ である。その低下傾向は混合粒径ではやや大きく、 $J=0.93$ となっている。この差は混合粒径では骨材の充填度がよくなるため同一骨材量では骨材間の母材層厚が増す効果が考えられるが現段階では解明されていない。実用上の観点からは混合粒径の場合を想定しておくのが妥当である。

超軽量骨材コンクリートでは骨材自体の弾性係数がセメント水比の大きい場合のデータから逆解析によって求められた間接的推定値であるため $J$ 値の正確な値を示すものではないが、セメント水比1.67(水セメント比0.60)では2.63の場合に比べて $J=0.92$ を示した。すなわち碎石コンクリートと同様にセメント水比の減少につれて $J$ 値が減少するということが明らかとなった。

本実験範囲では粗骨材の弾性係数がモルタル母材より大きい場合(碎石)も小さい場合(超軽量骨材)もセメント水比1.67(水セメント比 0.6)で約0.92程度である。

## 5. 結び

本実験の範囲では碎石コンクリート及び超軽量骨材コンクリートの弾性係数実験値は複合理論値より低く、水セメント比が0.6程度では約8%程度の差を示すことが明らかとなった。その差はセメント水比が大きくなる程小さくなり、セメント水比が3程度では理論値に一致するとみなされる。高強度コンクリートでは複合理論による弾性係数評価の信頼性が高いと言えよう。

また、碎石は粒形が角張り表面は粗面という特徴をもち、超軽量骨材は球形で表面には細かい凹凸がある。粗骨材の弾性係数がモルタル母材より大きい場合（碎石）も小さい場合（超軽量骨材）も同様の傾向を示したことは、複合理論値との差に対しては粗骨材自体の弾性係数の大小は関係なく、その粒形と表面粗滑度の両方を含めた粗骨材境界層の影響であることを示している。

コンクリートの弾性係数評価に複合理論を用いる場合の難点となっているのは粗骨材の境界層に起因する現象が理論には取り入れられていない点にある。本報告は碎石と超軽量骨材を用いたコンクリートの実験によってその境界層の影響の一般的傾向と水セメント比との関係における定量的な実態を明らかにしたものである。

（本論文は参考文献（9）の拡充であって実験データ及び考察を加えると共に、一部図表の訂正補筆を行った。）

## 謝辞

実験は 福井工業大学学生 北谷内友将，福田悟志，野淵和哉その他の諸君の御協力によるものである。ここに謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 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
- 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, September 1965
- 3) 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
- 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) 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 in the University of Dundee, Scotland, UK., pp. 209-217, 1999.
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 川上英男：碎石及び超軽量骨材コンクリートの弾性係数評価，日本建築学会大会学術講演梗概集 A 1, pp. 821-822, 2002. 8

(平成14年12月2日受理)