

# コンクリートの弾性係数に及ぼす粗骨材の粒径と量の影響

川 上 英 男\*

## Effects of size and volume of coarse aggregate on elastic modulus of concrete

Hideo Kawakami

Concrete with the larger water cement ratio shows the smaller value of elastic modulus than those of the theoretical obtained from the two-phase structural model. The analysis based on the test results clarified 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.

### 1. はじめに

コンクリートの弾性係数の経験的評価法は A C I, A I J 及び C E B - F I P に採用されていて、コンクリートの圧縮強度、密度あるいは骨材の岩種を指標とするものである。これは多様なコンクリートのデータの平均値を与えるものであって、特定のコンクリートの値を評価する性格のものでは無い。一方コンクリートの平均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方法が提案されているものの、その複合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上、骨材境界面に起因するコンクリートの非弾性的挙動の影響は考慮されていない。それらが実用化されにくい理由はここにある。

筆者はこの複合理論の実用化を目指して研究を重ねてきて、既報<sup>1)</sup>では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>2, 3)</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。骨材境界層の問題では粒径の大きい粗骨材の方が細骨材よりもその影響が大きいと考えられる。そこで本報告では狭い粒度範囲いわゆる単一粒径の川砂利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。その結果、粗骨材の粒径が大きい程、また含有率が多い程、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見い出し、複合理論の実用化への手掛かりを得た。

---

\* 建設工学科 建築学専攻

## 2. 実験概要

実験は粒径の異なる単一粒径粗骨材4種と混合粒径(Blend)1種について、それぞれコンクリート中の体積含有率を0-60%の範囲で数水準としたコンクリートを作製し、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。

実験は Mo 2シリーズと, Fu 1シリーズの計3シリーズである。

### 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  $2.56 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ ，吸水率 2.66 %。

砂利：九頭龍川産，5 - 25 mm，表乾密度  $2.62 \text{ (g/cm}^3\text{)}$ 。

5-8 (5-10) ,10-15, 15-20, 20-25 mm にふるい分けて用いた（以下単一粒径という）。

また混合粒径(Blend) 5 - 25 mm は上記単一粒径の粗骨材を等量ずつ混合したものである。

実積率を表-2.2 に示す。なお実積率測定用の容器として型枠（直径10 cm x 高さ20 cm）を用いた場合の値を（）内に示す。

調合：水セメント比は 40 % と 50 %。粗骨材体積含有率 ( $V_a$ ) は 0 (モルタル)，15, 30, 45, 55 (または 60) % の 5 水準である。調合を表-1 に示す。

表-1 調合

実験	W/C シリーズ	モルタル調合 (%)	$V_a$ セメント: 砂* [% vol]
Mo	40	1 : 2	0, 15, 30, 45, 55 (60)
	50	1 : 2	0, 15, 30, 45, 55
Fu	50	1 : 2	0, 15, 30, 45, 60

(\* : 絶対容積比,  $V_a$  : 粗骨材体積含有率)

### 2.2 混練・養生・圧縮試験

アイリッヒ型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なった。また、そのモルタルを用いて、コンクリートと同じサイズ（直径10cm x 高さ20cm）の試験体も作製した。試験体は各種3本ずつで総数は Mo 132本, Fu 75本である。

翌日キャッピングを施し、翌々日脱型、以後標準水中養生を行なった。材齢7日の圧縮試験では試験体の両側面に差動トランス式コンプレッソメーターを取り付け、縦歪度を計測した。

## 3. 実験結果の解析

モルタル及びコンクリート試験体の密度、圧縮強度 ( $F_m, F_c$ ) ならびに応力度歪度関係より算定した圧縮強度の1/3の応力度における割線弾性係数 ( $E_m, E$ ; 以下単に弾性係数という) を表-2 に示す。各値は試験体各3本の平均値である。

表-2.1 実験結果 (Mo シリーズ)

w/c	$\phi$ [mm]	Va [%]	Fm, Fc [MPa]	Em, E [GPa]	Ec [GPa]	J (E/Ec)	$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )
0.4	5-8	0	46.1	24.6	24.6	1	2.25
	15		43.2	28.5	27.3	1.05	2.31
	30		40.5	30.4	30.2	1.01	2.36
	45		40.1	35.5	33.5	1.06	2.41
	55		27.7	31.7	35.9	0.88	2.44
0.4	10-15	0	47.2	23.8	23.8	1	2.24
	15		42.9	28.3	26.5	1.07	2.31
	30		39.9	29.3	29.5	0.99	2.37
	45		38.0	31.8	32.8	0.97	2.43
	55		33.2	26.4	35.3	0.75	2.46
0.4	15-20	0	46.0	25.5	25.5	1	2.26
	15		41.0	28.3	28.1	1.01	2.32
	30		37.7	31.3	31.0	1.01	2.37
	45		33.1	32.7	34.2	0.96	2.44
0.4	20-25	0	47.2	26.1	26.1	1	2.25
	15		40.6	27.7	28.7	0.97	2.32
	30		37.0	32.3	31.5	1.03	2.37
	45		32.6	33.2	34.7	0.96	2.43
0.4	5-25	0	45.4	25.9	25.9	1	2.24
	15		41.8	29.1	28.5	1.02	2.31
	30		36.8	30.8	31.4	0.98	2.37
	45		33.9	33.7	34.5	0.98	2.43
	60		35.0	33.3	38.1	0.87	2.48
0.5	5-8	0	29.4	22.3	22.3	1	2.24
	15		26.5	25.7	25.0	1.03	2.29
	30		25.8	28.1	28.1	1.00	2.34
	45		24.4	30.5	31.6	0.97	2.39
0.5	10-15	0	29.8	20.1	20.1	1	2.24
	15		26.4	22.1	22.0	1.00	2.29
	30		24.0	24.8	26.0	0.95	2.35
	45		22.2	28.4	29.6	0.96	2.40
0.5	15-20	0	30.9	22.1	22.1	1	2.24
	15		27.0	23.2	24.8	0.94	2.29
	30		24.2	26.8	27.9	0.96	2.35
	45		19.4	28.7	31.4	0.91	2.41
0.5	20-25	0	29.7	22.3	22.3	1	2.24
	15		27.7	22.4	25.0	0.90	2.30
	30		24.6	26.4	28.1	0.94	2.36
	45		17.2	27.7	31.6	0.88	2.41
0.5	5-25	0	31.5	21.7	21.7	1	2.24
	15		27.6	22.4	24.4	0.92	2.35
	30		24.6	23.0	27.5	0.84	2.62
	45		23.3	23.5	31.1	0.76	2.78
	55		19.6	23.9	33.7	0.71	3.01

表-2.2 実験結果 (Fu シリーズ)

w/c	$\phi$ [mm] 実積率 [%]	Va [%]	Fm, Fc [MPa]	Em, E [GPa]	Ec [GPa]	J E/Ec
0.5	5-10	0	30.4	18.3	18.3	1
	15		27.7	18.3	21.0	0.87
	64.4 (63.2)	30	25.8	22.3	24.2	0.92
	45		24.4	23.5	27.9	0.84
	60		17.2	24.6	32.4	0.76
0.5	10-15	0	28.5	16.3	16.3	1
	15		26.0	18.2	19.0	0.96
	64.3 (61.8)	30	21.9	20.1	22.2	0.91
	45		20.7	21.4	26.0	0.82
	60		15.9	21.1	30.6	0.69
0.5	15-20	0	30.6	17.3	17.3	1
	15		26.7	17.8	20.0	0.89
	64.1 (60.8)	30	23.1	21.7	23.2	0.94
	45		19.5	21.9	27.0	0.81
	60		13.5	20.2	31.5	0.64
0.5	20-25	0	33.3	18.0	18.0	1
	15		26.1	19.8	20.7	0.95
	63.7 (60.8)	30	20.6	20.0	23.9	0.84
	45		11.6	18.7	27.7	0.68
	60		9.7	17.2	32.2	0.53
0.5	5-25 (Blend)	0	35.6	19.1	19.1	1
	15		29.4	18.7	21.9	0.86
	67.0 (65.2)	30	26.4	21.5	25.0	0.86
	45		21.3	24.3	28.7	0.85
	60		15.3	24.4	33.1	0.74

$\phi$  : 粗骨材粒径 (mm), Va : 粗骨材含有率,  
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 実験値,  
Ec : 複合理論によるコンクリート弾性係数算定値  
Ea : 50 GPa (川砂利各岩種の構成比をもとに複合理論によって算定。)

J = E / Ec : 複合理論値に対する実験値の比

## 4. 考察

### 4.1 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 ( $F_c$  ratio) を求め、粗骨材含有率 ( $V_a$ ) との関係をも ( $w/c = 0.4$ ) と  $F_c$  シリーズ について各粒径ごとに示したのが 図-1 である。圧縮強度 ( $F_c$ ) は粗骨材含有率 ( $V_a$ ) が増加すると低下する。その割合は  $w/c$  が大きい程大きい傾向にある。

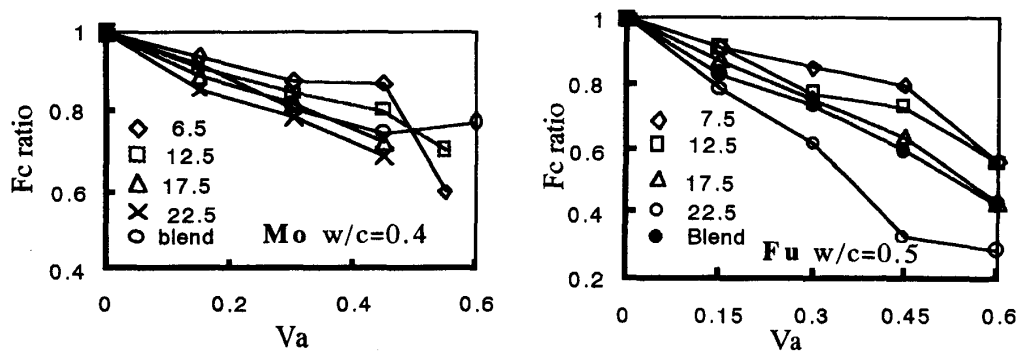


図-1 粗骨材含有率と圧縮強度比 ( $F_c$  ratio)

また粗骨材粒径 ( $\phi$ ) と圧縮強度比 ( $F_c$  ratio) の関係を  $w/c = 0.4$  の場合について各粗骨材含有率ごとに図-2 に示す。図中では粒径は各粒径範囲の中央値に対してプロットしてある (以下同じ)。

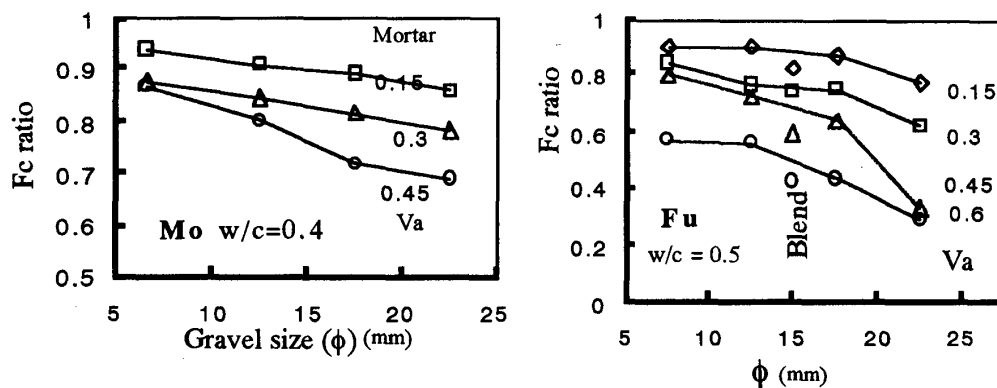


図-2 粗骨材粒径 ( $\phi$ ) と圧縮強度比 ( $F_c$  ratio)

粗骨材含有率が大きい程,  $F_c$  ratio は低下し粗骨材含有率が同一であっても粒径が大きくなる程圧縮強度が低下する傾向がある。すなわち粗骨材が強度上の欠陥となっていることを示している。この現象は水セメント比が大きい程顕著になる。これらの粗骨材がコンクリート圧縮強度に及ぼす影響については、すでに筆者が以前に詳細に論じたところである<sup>4)</sup> ので省略する。

### 4.2 弾性係数

母材の弾性係数に比べて骨材の弾性係数が大き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。本実験では粗骨材の母材モルタルに対する弾性係数の比は約 3 - 2.6 である。そこで母材モルタルの弾性係数 ( $E_m$ ) に対するコンクリートの弾性係数 ( $E$ ) の比率 ( $E$  ratio =  $E/E_m$ ) と粗骨材

含有率 ( $V_a$ ) との関係をも  $M_o$  ( $w/c = 0.4$ ) と  $F_u$  シリーズ について各粒径ごとに 図-3 に示す。粗骨材含有率が大きくなるほど  $E$  ratio の値が増加することが認められる。ただしその増加割合は粒径が大きくなる程緩慢になる傾向が認められる。

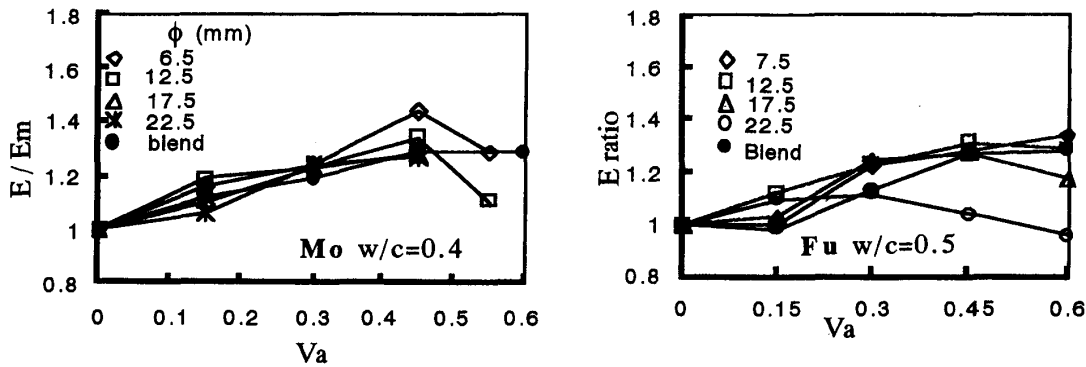


図-3 粗骨材含有率 ( $V_a$ ) と弾性係数比 ( $E$  ratio)

粗骨材粒径 ( $\phi$ ) と弾性係数比 ( $E$  ratio) との関係をも各粗骨材含有率ごとに図-4 に示す。同一粗骨材含有率の場合バラツキはあるものの粗骨材粒径が大きい程,  $E$  ratio が低下する傾向が認められる。

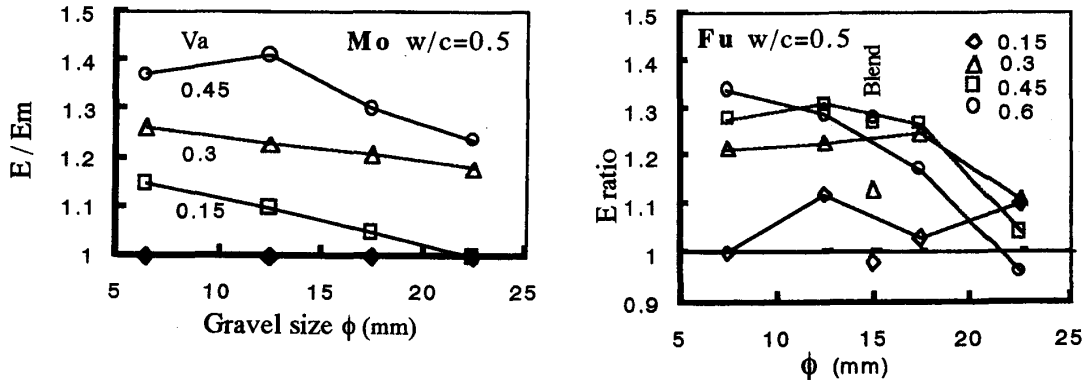


図-4 粗骨材粒径 ( $\phi$ ) と  $E$  ratio

#### 4.3 複合理論による考察

複合体の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)に表-2中の $E_m$ ,  $V_m$ ,  $V_a$ ならびに $E_a = 50 \text{ GPa}$ <sup>5)</sup>を代入し複合体の弾性係数( $E_c$ )を算定した。それらの値(以下理論値という)を表-2に併記した。これらの値は実験値( $E$ )に比べて大きいのが殆どである。

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( $E_c$ )に対する実験値( $E$ )の比率( $J = E/E_c$ )を求め、表-2に示す。

### (1) 粗骨材含有率( $V_a$ )とJ値

まず粗骨材含有率( $V_a$ )とJ値の関係をMo( $w/c = 0.5$ ), Fuシリーズについて各粒径ごとに図-5に示す。混合粒径の骨材の場合はJ値は粗骨材含有率が高い程、低下する傾向が認められる。単一粒径の場合もバラツキはあるものの粒径が大きいほどJが低下する傾向は同様である。またその低下の割合は粒径が大きい程著しい傾向が認められる。

Mo( $w/c = 0.4$ )シリーズでは $w/c = 0.5$ のシリーズに比べてJ値の低下は少ない傾向にある(表-2参照)。

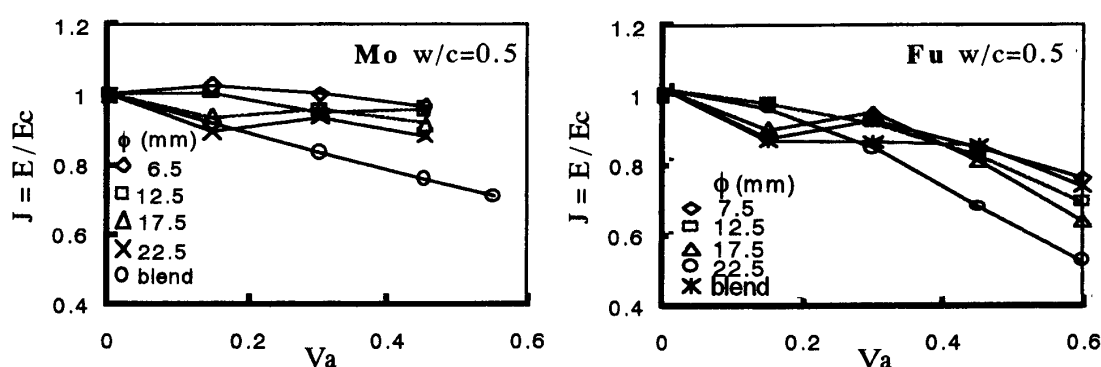


図-5 粗骨材含有率( $V_a$ )とJ値

### (2) 粗骨材粒径( $\phi$ )とJ値

図-6は粗骨材粒径( $\phi$ )とJ値の関係をMo( $w/c = 0.5$ ), Fuシリーズについて各粗骨材含有率ごとに示したものである。粗骨材粒径( $\phi$ )が大きくなる程J値は低下する傾向が認められる。なお両図を比較すると、Moシリーズでは粒径5-8mmでJ値は1前後にあるのに対し、Fuシリーズでは粒径5-10

mmでJ値は0.85附近を示し、その他の粒径の場合の値も全般的に低い値となっている。その理由は $E_m$ が前者では20.1 - 22.3 GPaであるのに対し、後者では16.3 - 19.1 GPaと低く、複合理論値 $E_c$ の算定に用いる $E_a$  (= 50 GPa) との差が大きいことにあると考えられる。

ここでMoシリーズについて前項を参考にして $V_a$ とJの関係性を直線的とみなして各 $V_a$ のJを $V_a = 0.45$ の場合に換算し、各粒径ごとの平均値を図-6同様に示したのが図-7である。粒径が大きい程J値は低下している。そしてその割合は水セメント比が大きい程顕著である点は既報<sup>3)</sup>において述べたところと一致する。

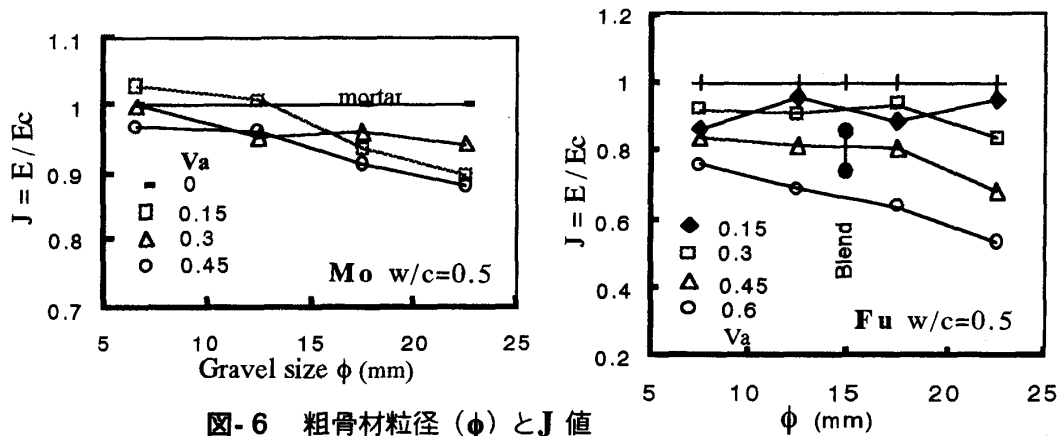


図-6 粗骨材粒径 ( $\phi$ ) とJ 値

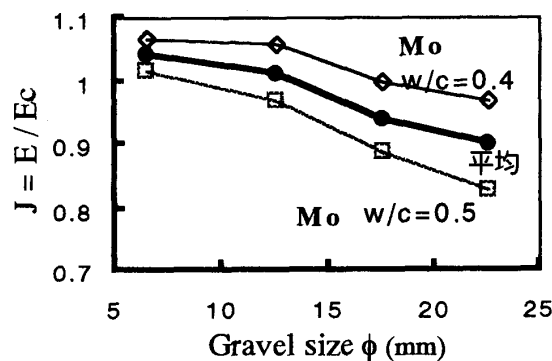


図-7 粗骨材粒径 ( $\phi$ ) とJ 値

## 5. 結び

本論文では単一粒径並びに混合粒径の粗骨材を用いたコンクリートの圧縮試験結果にもとづいて粗骨材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。

その複合理論による弾性係数の算定値より実験値は小さい値を与える。その理由はコンクリートの非弾性挙動に起因するものと考えられる。そこでその非弾性挙動を考慮した係数  $J = (\text{実験値}) / (\text{理論値})$  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、本実験の範囲では以下のような関係が抽出されるに至った。

- 1) 粗骨材含有率が大きくなる程、J値は低下する。

2) 粗骨材粒径が大きい程, J 値は低下する。一方, 粗骨材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。

ここに圧縮強度に対して粗骨材の含有率と粒径が及ぼす影響と類似の関係が, J 値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つことを示唆し, その現象の解明の手掛かりを与えよう。

粗骨材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。

本論で考察した J 値の性格がより明確になればコンクリートの弾性係数評価に複合理論を用いる可能性が開けることになる。

[本論文は参考文献 6) 7) の実験資料を総轄し、考察を加えて構成しなおしたものである。]

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 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, 1999.9
- 3) 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.
- 4) 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（その1），日本建築学会論文報告集，Vol.166, pp.19-27. 1969.12. および（その2）Vol. 167, pp. 7-11. 1970.1.
- 5) 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
- 6) 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.
- 7) 川上英男：コンクリートの弾性係数に及ぼす粗骨材の 粒径と量の影響，日本建築学会北陸支部研究 報告集，第44号, pp.5 - 8, 2001. 7.

(平成13年12月3日受理)