

## 論文 モルタルの弾性係数評価と近似複合理論

川上 英男\*<sup>1</sup>

**要旨：**先に筆者はコンクリートの弾性係数評価に従来の複合モデルに替わる近似複合理論式を提案した。本論文はコンクリートの母材であるモルタルを複合材として扱い、細骨材に天然砂の他に鋼砂、ゴム裁断片など弾性係数の極端に異なる材料を混合した実験を行い、近似複合理論を適用した結果、補正係数の導入によって理論値は実験値に近づくこと、またその段階的適用によって多相複合体への展開が可能であることを見いだした。なお近似複合理論値の方が慣用の圧縮強度と比重をパラメータとする弾性係数算定値より実験値により近い値を与えることを示した。

**キーワード：**セメントモルタル、弾性係数、複合モデル、細骨材、圧縮歪み

### 1. まえがき

コンクリートの弾性係数はコンクリート構造物の剛性評価にとって重要な因子である。セメントを結合材とするコンクリートは数種の物質の複合体であり、その弾性係数も水セメント比、骨材構成等、コンクリートの構成素材の性質と構成比によって異なる。

コンクリートの弾性係数評価の慣用的方法は、コンクリートの圧縮強度と比重をパラメータとするものである<sup>1)</sup>。川上は既報<sup>2), 3)</sup>において、コンクリートを母材モルタルと粗骨材という二相材として扱い、複合理論に基づいて構成素材の弾性係数と素材構成比によってコンクリートの弾性係数を評価する近似複合理論による評価の方がより合理的であることを報告した。

本論文は、既報<sup>4)</sup>の川砂モルタルからさらに細骨材の弾性係数の範囲を拡大して、鋼砂やゴムを含有するモルタルに対しても近似複合理論の適用が可能か、そしてまた二相から多相への適用の展開が可能かを検証するものである。

実験では高弾性係数材として鋼砂を用いた。また低弾性係数材の極限は気泡であるが、実験手法上安定した含有量を得るためにゴムを用いたものであって、ゴム自体の実用化を意図するものでは

はない。なお、本論文はセメント硬化体<sup>5)</sup>からモルタルへ、さらにコンクリートへと近似複合理論による弾性係数評価を系統化する上で基礎的な一環をなすものである。

### 2. 実験概要

本論文で検討の対象とした実験の概要は次のようである。

材料：普通ポルトランドセメント、比重 3.15  
 細骨材 豊浦産 標準砂 比重 2.63  
 鋼砂 径 0.3, 0.6, 1.2, 2.5 mm  
 を等量ずつ混合して使用  
 比重 7.8  
 ゴム 輪ゴムを裁断、約 1mm 角  
 とした。比重 1.0

調合：水セメント比 0.4,

セメント：標準砂 = 1 : 1 (質量比) のモルタルに対し、ゴムまたは鋼砂を加えた場合の試し練りの結果、それらの絶対容積含有率を最大 18% とした (図 1 参照)。

実験 1 鋼砂含有モルタル

鋼砂の絶対容積含有率は

18, 13.5, 9, 4.5, 0% の 5 水準

実験 2 ゴム含有モルタル

\*1 福井工業大学教授 工学部 建設工学科 工博 (正会員)

ゴムの絶対容積含有率は

18, 13.5, 9, 4.5, 0 % の 5 水準

実験 3 鋼砂, ゴム含有モルタル

絶対容積の 18 % を鋼砂とゴムで占め, 鋼砂とゴムの容積混合比は 5 水準とした (図 1 参照)。

混練、養生：モルタルミキサを用いて、標準砂モルタルを機械練りの後、鉢に移してピニールで覆い、約 30 分静置。再びよく攪拌してから試験体 (4x4x8 cm セメント試験用 3 連型枠を転用) 3 本分に対する所定量のモルタルと鋼砂やゴスを練り鉢に取り分け、手練りを加えて型枠に打ち込んだ。約 2 時間後上面整形、翌日脱型、材齢 1 週迄水中養生。

圧縮試験：試験体両側面に歪みゲージ (検長 20 mm) を貼り付け、荷重段階 1000 - 2500 N 毎に圧縮歪みを計測した。試験体は各種 3 本計 45 本である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 応力度歪度 関係 と解析

応力度歪度関係の典型的な例を図 2 に示す。鋼砂含有率の大きいもの程、応力度歪み度曲線は立ち上がっており、弾性係数が大きいことを示している。

得られた応力度歪度関係を式 (1) で表した。相関係数はほとんどの場合 0.999 以上であった。

$$s = Ae + Be^2 + Ce^3 \quad (1)$$

s : 応力度 e : 歪度

これらより最大応力度の 1/3 の応力度における弾性係数 (Ec: 割線係数) を求めた。これらの解析結果を比重、圧縮強度と共に表 1 に示す。各値は試験体 3 本の平均値である。

#### 3.2 鋼砂含有モルタル

鋼砂含有率と比重、圧縮強度および弾性係数との関係を図 3 に示す。

1) 比重は鋼砂含有率 (Vs) の増加につれてほぼ直線的に大きくなり、Vs=0.18 では Vs=0 の場合に比べて 1.45 倍となっている。

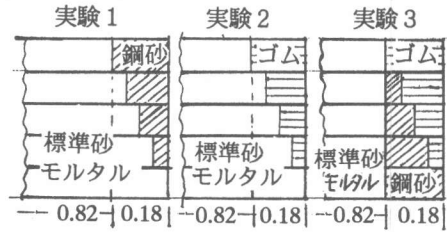


図 1 調合 (絶対容積)

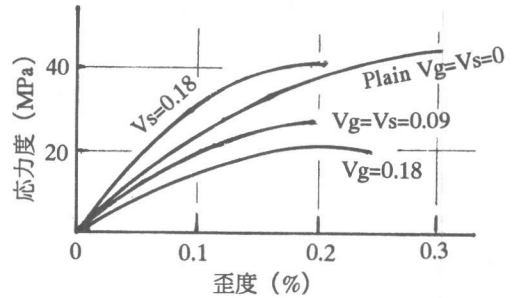


図 2 応力度歪度関係

表 1 実験結果

	Vs	ρ	Fc	E	
鋼砂含有 モルタル	0.180	3.20	37.8	35.3	
	0.135	2.96	37.5	32.4	
	0.090	2.69	38.0	30.3	
	0.045	2.47	42.5	28.7	
	0	2.21	43.6	27.0	
ゴム含有 モルタル	Vg	ρ	Fc	E	
	0.180	1.94	19.8	16.7	
	0.135	2.01	24.1	18.8	
	0.090	2.04	29.1	22.7	
	0.045	2.16	34.1	26.5	
0	2.20	52.1	28.6		
鋼砂, ゴム 含有 モルタル	Vg + Vs	ρ	Fc	E	
	0.180	0.000	1.92	14.2	16.9
	0.135	0.045	2.28	18.7	21.0
	0.090	0.090	2.58	27.5	25.0
	0.045	0.135	2.86	29.2	30.4
0	0.180	3.21	43.6	36.5	

Vs, Vg : 鋼砂, ゴムの含有率, ρ : 比重, Fc : 圧縮強度 (MPa), Ec : 弾性係数 (GPa)

2) 圧縮強度は鋼砂含有率の増加につれて低下し、 $V_s = 0.18$  では  $V_s = 0$  の場合に比べて 87 % となっている。

3) 弾性係数は鋼砂含有率 ( $V_s$ ) の増加につれてほぼ直線的に大きくなり、 $V_s = 0.18$  では  $V_s = 0$  の場合に比べて 1.31 倍となっている。

### 3.3 ゴム含有モルタル

ゴム含有率と比重、圧縮強度および弾性係数との関係を図 4 に示す。

1) 比重はゴム含有率 ( $V_g$ ) の増加につれて低下し、 $V_g = 0.18$  では  $V_g = 0$  の場合に比べて 88 % となっている。

2) 圧縮強度はゴム含有率の増加につれて顕著に低下し、 $V_g = 0.18$  では  $V_g = 0$  の場合の 38 % にすぎない。

3) 弾性係数はゴム含有率の増加につれて低下し、 $V_g = 0.18$  では  $V_g = 0$  の場合に比べて 58 % となっている。

### 3.4 ゴム、鋼砂含有モルタル

ゴムと鋼砂の含有割合と比重、圧縮強度および弾性係数との関係を図 5 に示す。

1) 比重はゴム含有率の増加につれてほぼ直線的に低下し、 $V_s = 0.18$ 、 $V_g = 0$  の場合に比べて  $V_s = 0$ 、 $V_g = 0.18$  の場合は 60 % となっている。

2) 圧縮強度はゴム含有率の増加につれて顕著に低下し、 $V_g = 0.18$  では  $V_s = 0.18$  の場合の約 33 % にすぎない。

3) 弾性係数はゴム含有率の増加につれて低下し、 $V_g = 0.18$  では  $V_s = 0.18$  の場合に比べて 46 % となっている。

### 3.5 全般的傾向

以上、比重と弾性係数は鋼砂とゴムの含有率の変化にほぼ直線的に対応しているのに対し、圧縮強度では、ゴムが無い場合の強度に対するゴム含有の場合の強度低下の割合はゴム含有率が小さい場合に著しく、ゴム含有率が大きい場合は比較的緩慢になる傾向が認められる。母材に比べて弾性係数の極端に小さい骨材を含む場合と全く含まない場合とは圧縮破壊の挙動が異なることを示唆している。

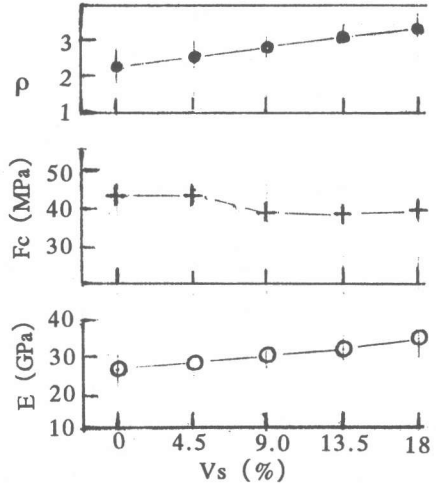


図 3 鋼砂含有モルタル

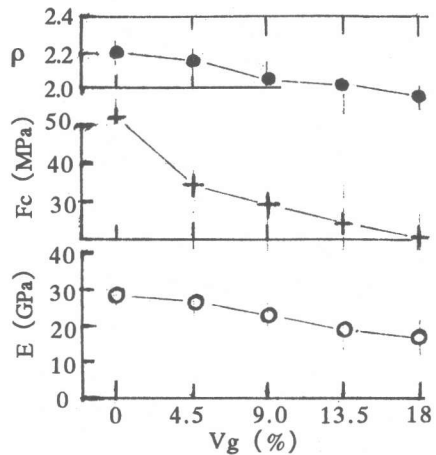


図 4 ゴム含有モルタル

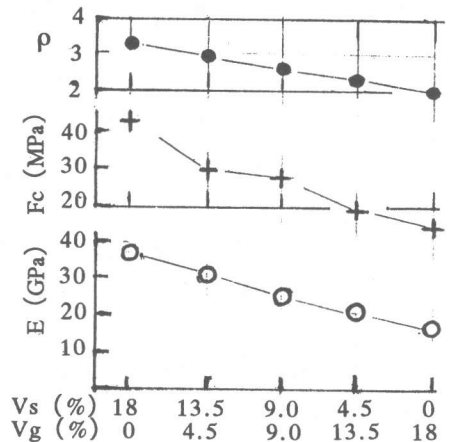


図 5 鋼砂、ゴム含有モルタル

## 4. 考察

### 4.1 近似複合理論

ここに言う近似複合理論とは著者が提案しているもので、図6に示すように従来の複合理論式を簡略化し、式(2)で二相複合体の弾性係数を算定しようとするものである。

$$E_c = E_m + k(E_a - E_m)V \quad (2)$$

$E_c, E_m, E_a$ : 複合体, 母材, 骨材の弾性係数

$V$ : 骨材含有率

$k$ :  $(E_a/E_m)$  に応じて決まる係数, 図6

のモデル(d)に対し $V=0.5$ 以下に適用

$E_a$ と母材モルタルの $E_m$ ,  $(E_a/E_m)$ に対応する $k$ および骨材含有率 $V$ を用いて式(2)より近似複合理論値 $E_c$ を求め、実験値 $E$ との関係を検討した。また比較のために比重と圧縮強度をパラメータとする慣用の式(3)<sup>1)</sup>による弾性係数を求めた。

$$E_c = 2.1 \times 10^5 (\rho/2.3)^{1.5} (F_c/200)^{0.5} \quad (3)$$

$\rho$ : 比重,  $E_c$ : 弾性係数 ( $\text{kg/cm}^2$ )

$F_c$ : 圧縮強度 ( $\text{kg/cm}^2$ )

### 4.2 鋼砂含有モルタル

鋼砂を含有しない母材の弾性係数実験値に基づいて、式(2)によって各種の鋼砂含有率の場合の弾性係数算定値( $E_c$ )を求めた結果を、実験値と比較して表2に示す。鋼砂の弾性係数( $E_a$ )には205.8 GPaを採用しておく。またそれらを図7に示す。鋼砂を含有した場合は実験値は理論値より小さく、鋼砂含有率が増える程その乖離は大きくなっている。複合理論が弾性論にもとづいていて、モルタルの非弾性挙動を取り入れていないことによるものと考えられる。

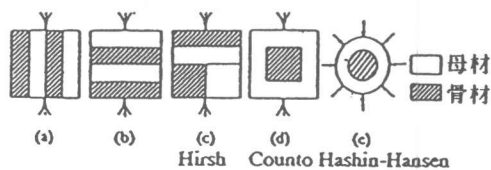
因に式(3)の算定値と実験値との差はさらに大きいものとなっている。

そこで式(2)に非弾性挙動に関する係数 $\alpha$ を導入して式(4)を得る。

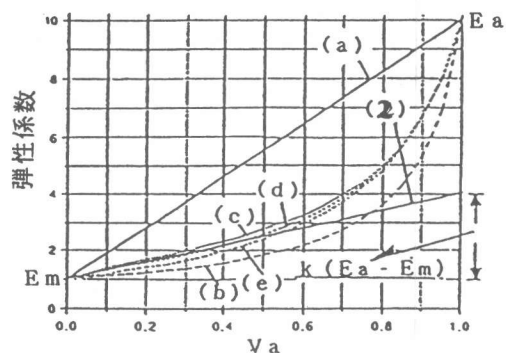
$$E_c = E_m + \alpha k(E_a - E_m)V \quad (4)$$

$\alpha$ : 非弾性挙動に関する係数

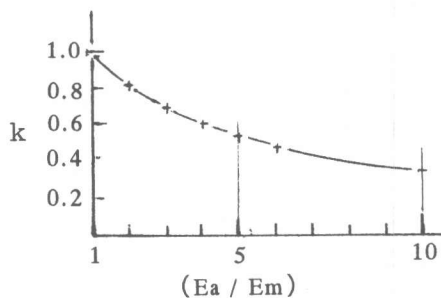
弾性係数実験値( $E$ )に式(4)を適用して逆解析を行い、係数 $\alpha$ を求めた。それらの値を表2に示す。



a) 二相複合モデル



b) 骨材含有率と弾性係数



c)  $E_a / E_m$  と  $k$

図6 二相複合モデルとその近似

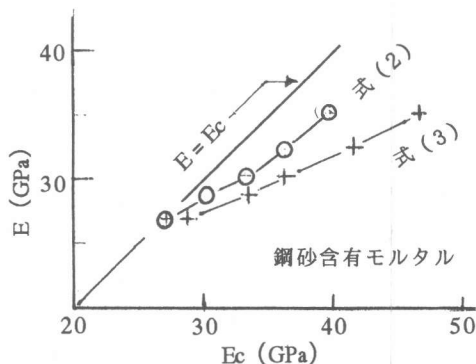


図7 算定値( $E_c$ )と実験値( $E$ )

係数  $\alpha$  は鋼砂含有率が大きい程、大きい値を採るように見える。当然のことながら、これらの  $\alpha$  を用いるときは式 (4) による弾性係数の算定値は実験値に一致する。

係数  $\alpha$  に母材、骨材の弾性係数と含有率がどのように影響するかについての普遍的な実態の把握は今後の課題である。

### 4.3 ゴム含有モルタル

輪ゴムの弾性係数 ( $E_a$ ) はその引張試験から 80 MPa と求められた。したがって  $E_a / E_m$  は 0.0028 と極めて小さい値となる。そこで解析に当たっては  $E_a = 0$  と見做す。ここに式 (2) は式 (5) となる。

$$E_c = E_m (1 - kV) \quad (5)$$

この式は Ishai<sup>7)</sup> の式と同じ形を与える。ただし式 (5) の  $k$  は前述のように  $E_a / E_m$  が 1 より大きい場合の値を採用出来ない。それと区別するために  $k'$  と書き改めて式 (6) としておく。

$$E_c = E_m (1 - k'V) \quad (6)$$

Ishai は  $E_a = 0$  に対して  $E_a / E_m$  が 1 より大きい場合からの外挿によって  $k' = 1.91$  と与えている<sup>7)</sup>。この値を用いて式 (6) より求めた  $E_c$  を実験値と比較して表 3 に示す。またそれらを図 8 に示す。

ゴムを含有した場合は実験値は理論値より小さく、ゴム含有率が増える程、その乖離は大きくなっている。因に式 (3) による算定値と実験値との差は上述の場合とほぼ同程度である。

そこで鋼砂の場合と同様に式 (6) を用いて実験値に一致する算定値を得るための係数  $k'$  を逆算した。それらの値を表 3 に示す。  $k'$  逆算値は 1 例を除き 2.3 より大きい。平均 2.2 である。  $k' = 2.2$  としたときの  $E_c'$  と実験値  $E$  との関係を図 8 に示しておく。

### 4.4 鋼砂ゴム含有モルタル

鋼砂とゴムを混合含有している場合には、式 (2) と式 (6) を段階的に適用して弾性係数を算定することになる。この場合鋼砂やゴムを全く含有しない母材モルタルの弾性係数 ( $E_m$ ) が必

表 2 鋼砂含有モルタル

$V_s$	$E_c$	$E$	$\alpha$
0.180	39.6	35.3	0.66
0.135	36.4	32.4	0.57
0.090	33.3	30.3	0.53
0.045	30.1	28.7	0.54
0	27.0	27.0	-----

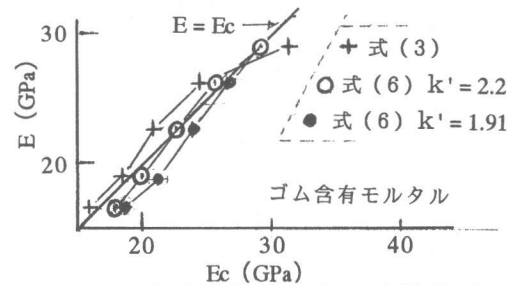


図 8 弾性係数算定値 ( $E_c$ ) と実験値 ( $E$ )

表 3 ゴム含有モルタル

$V_g$	$E_c$	$E$	$k'$	$E_c'$
0.180	18.8	16.7	2.31	18.3
0.135	21.2	18.8	2.54	20.1
0.090	23.7	22.7	2.30	22.9
0.045	26.1	26.5	1.62	25.8
0	28.6	28.6		28.6

$E_c : k' = 1.91, E_c' : k' = 2.2$

要となる。鋼砂のみ含有した場合の実験値と式 (2) を用いて繰返し法 (trial and error method) による逆解析を行い、  $E_m = 28.0$  GPa と求められた。また ゴムのみ含有の場合の実験値から式 (6) において  $k' = 2.2$  として逆算した場合も同じく  $E_m = 28.0$  GPa と得られた。この値から、まずゴムを含まないとした場合 (鋼砂含有率  $V'$ ) の各弾性係数 ( $E_s$ ) を式 (4) によって求め、これら 鋼砂含有モルタルの  $E_s$  値を新たに  $E_m, k' = 2.2$  として、式 (6) により鋼砂とゴムの両方を含有する場合の弾性係数  $E_c$  を算定した。その結果を表 4 に示す。算定値と実験値は図 9 に示すようによく近接している。因に式 (3) による算定値と実験値との関係を同図に示す。実験値との差は近似複合理論値の場合より大きい。

表 4 鋼砂,ゴム含有モルタル

$(V_s + V_g)$	$V_s'$	$E_s$	$E_c$	$E_c / E$	
0.180	0	0.1800	36.5	36.5	1.00
0.135	0.045	0.1414	33.7	31.2	1.026
0.090	0.090	0.9890	31.7	25.1	1.004
0.045	0.135	0.0520	30.0	19.7	0.938
0	0.180	0	28.0	16.4	0.947

$V_s'$  : ゴムを除いたモルタルの鋼砂含有率  
 $E_s$  :  $V_s'$  に対応する弾性係数算定値  
 $E_c$  : 鋼砂, ゴム含有モルタルの弾性係数  
 $E_c / E$  :  $E_c$  の実験値に対する比率

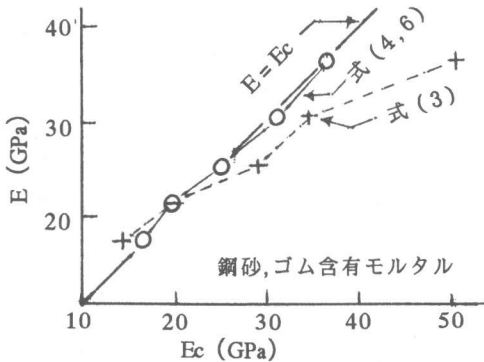


図 9 弾性係数算定値 ( $E_c$ ) と実験値 ( $E$ )

以上の考察から, 弾性係数が母材モルタルに比べて極端に大きい鋼砂や小さいゴムを混合含有する場合にも近似複合理論を段階的に適用して弾性係数を評価する可能性が見いだされた。

### 5 むすび

本論ではモルタル母材に比べて弾性係数が極端に大きい鋼砂や小さいゴムを含有する場合を対象として, その弾性係数評価に対して著者提案の近似複合理論の適合性を検討した。この実験の範囲で得られた結果は次のようである。

- 1) 鋼砂含有モルタルではその非弾性挙動を反映する補正係数を導入することで実験値に極めて近い算定値が得られる。
- 2) ゴム含有モルタルでは複合理論近似式中の係数  $k'$  は従来報告<sup>7)</sup> されていた外挿推定値 1.91 に対し 2.2 が得られた。
- 3) モルタル, 鋼砂, ゴムからなる三相系材料に対しても近似複合理論の段階的適用によってその弾性係数を評価する可能性が見いだされた。

4) これらの近似複合理論値は, 慣用の圧縮強度と比重をパラメータとする算定値よりも実験値により近い値を与える。

### 謝辞

実験については 福井工業大学学生 上原時子, 伊野浩司, 鈴木修 の諸君に負うところ大きく, 機器の整備には伊豆蔵庫喜氏の御協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

### 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) 川上英男 : コンクリートのヤング係数評価と複合モデルの近似, 第 21 回 セメントコンクリート 研究会論文報告集, pp.85-88, 1994.10
- 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集, Vol.17, No.1, pp.497-500, 1995.6
- 4) 川上英男, 脇敬一 : セメントモルタルの弾性係数と近似複合理論, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.497-500, 1995.6
- 5) 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
- 6) 川上英男 : 骨材種類がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.63-68, 1991.6
- 7) Newmann, K. : Composite Materials - Concrete Systems-, Elsevier Publ. Co., pp.336-452, New York, 1966