

論文 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

川上英男*

要旨: コンクリートの弾性係数は通常、圧縮強度と比重をパラメータとして評価されている。一方、複合理論によって構成素材の弾性係数から評価する方法がある。本論文では、筆者が提案してきた二相複合理論の近似式の多段階適用の手法を示し、その例としてコンクリートの弾性係数評価に対して、セメント硬化体からモルタルへ、モルタルからコンクリートへと2段階に繰り返し適用する可能性を実験データに基づいて検討した。その過程で実験値に忠実な算定値を得るには骨材境界面のマイクロクラックに起因する非弾性的挙動に対する補正係数を導入する必要があることを示した。

キーワード: 弾性係数、複合モデル、コンクリート、モルタル、セメント硬化体

1. まえがき

コンクリートの弾性的性質、特に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[1]。筆者は既報[2],[3]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からコンクリートの弾性係数を評価する近似解法による方がより合理的であることを報告した。また、モルタルの弾性係数評価に対して、その構成素材であるセメント硬化体と砂とから成る二相複合材と考え、上記の近似複合理論の適合性を検討した[4]。なお、既報[5]ではセメント硬化体の弾性係数と水セメント比及び圧縮強度との関係について論じた。

本論文は、二相材料を対象とする近似複合理論を多相の複合材料に適用する手法を提示するものである。すなわち多相材料をそれぞれ二相からなる複合材に組分けし、そのそれぞれに対して近似複合理論を段階的に繰り返して適用するものである。その例として本論文ではコンクリートをセメント硬化体、川砂、川砂利の三相からなる材料として取り扱い、セメント硬化体からモルタルへ、モルタルからコンクリートへと、段階的に順次近似複合理論を適用して弾性係数を評価する手法の可能性を検討するものである。

2. 実験概要

本論文で検討の対象とした2組の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

九頭龍川産 川砂 : 2.5 mm 以下、表乾比重 2.56、吸水率 2.66 %

九頭龍川産 川砂利 : 一旦、各粒径にふるい分けた後、各試験体ごとに次の比率

* 福井工業大学 工学部 建設工学科 建築学専攻、工博（正会員）

に混合して用いた。

粒径 (mm)	5-10	10-15	15-20	20-25
比率	20	: 30	: 15	: 35

調合： セメント：砂＝1：1.5（絶対容積）

水セメント比（w/c）： 40%、 50%、 60%

モルタルの砂含有率（絶対容積）： 0.395、 0.364、 0.338

コンクリートの砂利含有率（絶対容積）：各 w/c 共 0.10, 0.25, 0.40, 0.55

混練： 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、所定の砂利（表乾状態）を加えて手練りを行なった。各種の調合について円柱試験体（径10cm、高さ20cm）3本ずつを製作した。

養生： 混練翌日キャッピング、2日目に脱型、材齢28日まで水中標準養生。

圧縮試験： 試験体両側面に歪みゲージ（検長：60 mm）を貼り付け、各荷重段階毎に圧縮歪みを計測した。

3. 実験結果

実験結果を表1に示す。各値は試験体各3本の平均値である。同表中の弾性係数は次のようにして求めた。すなわち、得られた応力度歪み度関係を式（1）で表し（相関係数はほとんどの場合 0.999 以上であった）、これより最大応力度（圧縮強度）の 1/3 の応力度における弾性係数（E、割線係数）を求めた。

$$s = A e + B e^2 + C e^3 \quad \dots\dots\dots (1)$$

s : 応力度 e : 歪度

表1 コンクリートの圧縮試験結果

		Series A		Series B	
w/c (%)	砂利含有率	E (GPa)	Fc (MPa)	E (GPa)	Fc (MPa)
40	0.10	23.7	50.9	23.6	50.7
	0.25	27.0	46.6	27.0	46.6
	0.40	29.8	42.2	27.2	42.2
	0.55	31.5	39.2	31.2	39.2
50	0.10	24.5	38.7	24.7	38.7
	0.25	26.0	37.0	25.6	36.8
	0.40	25.7	28.6	25.6	28.7
	0.55	24.8	17.9	24.6	17.5
60	0.10	16.6	31.0	16.6	31.0
	0.25	19.2	22.0	19.0	21.9
	0.40	22.2	14.5	21.4	15.3
	0.55	22.1	13.8	21.4	13.2

(E : 弾性係数、 Fc : 圧縮強度)

4. 考察

4.1 近似複合理論とその段階的適用

ここに言う近似複合理論とは、複合材料の弾性係数評価に対して著者が提案しているもので図1 (b) 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。

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

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

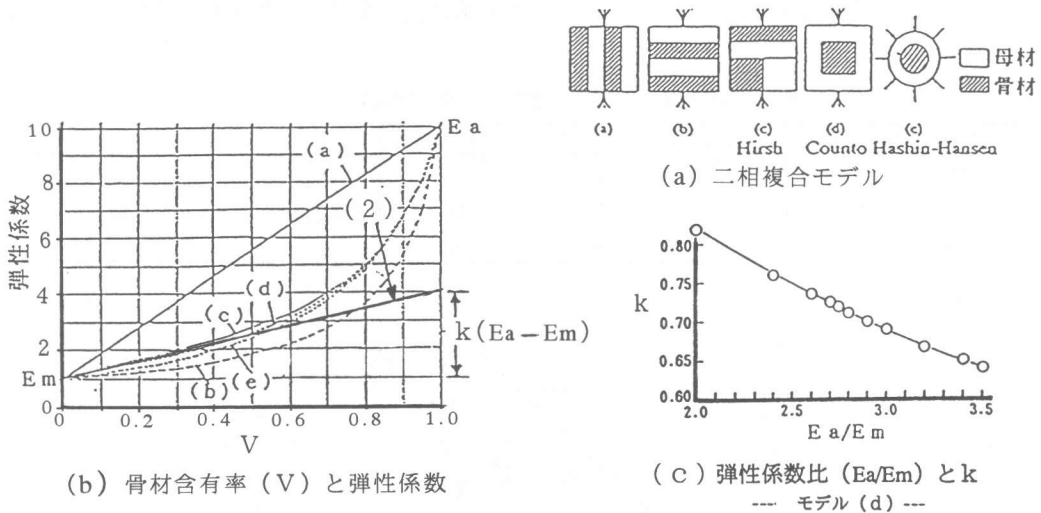


図1 二相複合モデルによる弾性係数理論値と複合モデルの近似

式 (2) は骨材含有率が 0.5 以下を対象として図1の複合モデル (d) を近似したものであって、コンクリートのように細骨材と粗骨材の合計の含有率が 0.7 程度になると、モデル (c) (d) (e) との乖離が大きくなる (図1 (b) 参照)。そこで、細骨材と粗骨材を別々に取り扱い、セメントペースト硬化体と細骨材との複合としてのモルタルと、モルタルと粗骨材の複合としてのコンクリートの2段階に分けて、近似複合理論を適用する。この手法によれば細、粗骨材全体の含有率の比較的大きい場合にも近似複合理論を適用できる他、細骨材と粗骨材の材質が異なる場合にも対応できる。さらに多種類の材質を含有するいわゆる Hyper Composite に対しても、その多段階適用によって弾性係数評価が可能になるものと考えられる。なお、従来の複合理論を適用するのに、セメントペーストと骨材全体、あるいはモルタルと粗骨材のどちらが妥当かについて未だ結論が出ていないが、本論の手法によれば、この問題もおのずから解消されることになる。

本論ではその2段階適用について検討する。すなわち、式 (3) と式 (4) に示すように式 (2) を段階的に繰り返して適用する。

$$E_{mo} = E_p + K_s (E_s - E_p) V_s \quad \dots\dots\dots (3)$$

E_{mo}, E_p, E_s : モルタル、セメント硬化体、川砂の弾性係数

V_s : 川砂含有率、 K_s : (E_s/E_p) に応じて決まる係数

$$E_c = E_{mo} + K_g (E_g - E_{mo}) V_g \quad \dots\dots\dots (4)$$

E_c, E_{mo}, E_g : コンクリート、モルタル、川砂利の弾性係数

V_g : 川砂利含有率、 K_g : (E_g/E_{mo}) に応じて決まる係数

4.2 コンクリートの弾性係数の近似複合理論による算定値と実験値

前掲の式(3)(4)の適用に際しては、 E_p, E_s, E_g の値が必要である。既報[3][4][5]からそれぞれ表2の値を採用することにする。

このようにして算定されたコンクリートの弾性係数は実験値に比べて大きい値を示している(図2参照)。

表2 セメント硬化体、川砂、川砂利の弾性係数

W/C (%)	C/W	E_p (GPa)	E_s (GPa)	E_g (GPa)	
40	2.5	20.5*	37.7	50.0	* [5]
50	2.0	16.3*	37.7	50.0	$E_p = 3.133 + 43.70 (\log C/W)$
60	1.67	12.9*	37.7	50.0	

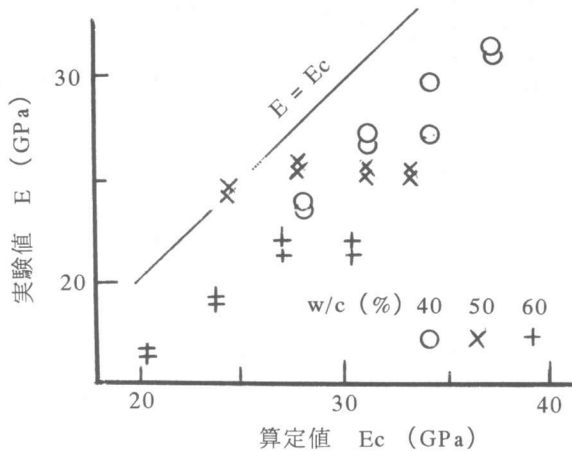


図2 弾性係数算定値 (E_c) と実験値 (E)

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、圧縮強度の1/3の応力度における弾性係数(割線係数)も原点における接線係数より低下する。この現象は骨材境界面に生ずるマイクロクラックに因るものとされている。複合モデルや近似複合理論式(2)は弾性論に基づいて成立している、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。式(2)による算定値が実験値に、より近くなるためにはその要因を取り込む必要がある。

4.3 コンクリートの弾性係数に及ぼす骨材境界の影響

そこで骨材境界面の影響に対し式(2')に示すように補正係数Jを導入することとする。

$$E_c = E_m + J_K (E_a - E_m) V \quad \dots\dots\dots (2')$$

$$E_{mo} = E_p + J_s K_s (E_s - E_p) V_s \quad \dots\dots\dots (3')$$

$$E_c = E_{mo} + J_g K_g (E_g - E_{mo}) V_g \quad \dots\dots\dots (4')$$

J, J_s, J_g: 骨材、川砂、川砂利の含有に対する補正係数

この J_s と J_g を、表 1 の実験値 E にもとづいて、式 (3') (4') を用いて逆解析した結果を表 3 に示す。J_s はコンクリートに用いたモルタル中の川砂含有率、J_g は実用のコンクリートに近い川砂利含有率 0.40 と 0.55 の場合の平均値を示す。

表 3 補正係数算定値

W/C (%)	V _s	K _s	J _s	K _s J _s	K _g	J _g	K _g J _g
40	0.395	0.85	0.57	0.49	0.82	0.65	0.53
50	0.364	0.77	0.61	0.47	0.75	0.53	0.40
60	0.338	0.72	0.51	0.37	0.71	0.40	0.29

水セメント比が 40 % から 60 % に大きくなっても、J_s にはあまり差が見られないが、J_g には小さくなる傾向が認められる。粒径の小さい川砂よりも、粒径の大きい川砂利の方が水セメント比が大きくなるほど弾性係数の低下をもたらす割合が大きい傾向にあることを示唆していると考えられる。ただし、これら J_s、J_g の値自体は限られた実験範囲から得られたものであり、実験データのばらつき、構成素材の弾性係数によって変わるものであるので、普遍的な値を得るには今後多くの実験データを参考とする必要がある。

4.4 コンクリートの弾性係数算定値と実験値の比較

表 3 の補正係数を用いて、式 (3') (4') から算定した値 E_c と実験値 (表 1) の対比を図 3 に示す。補正係数 J_s、J_g の導入によって、近似複合理論の 2 段階適用による算定値はかなり実験値に近い値となることが示されている。

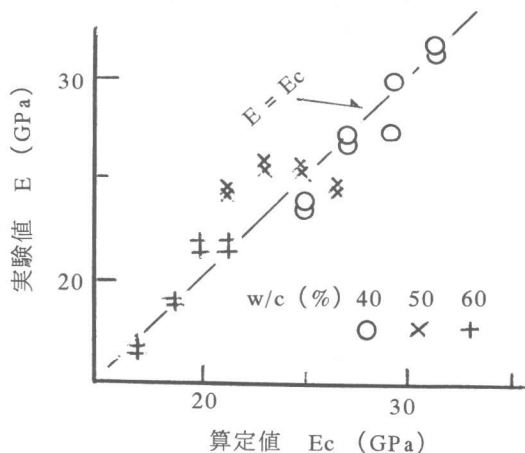


図 3 弾性係数算定値 (E_c) と実験値 (E)

4.5 今後の課題

複合理論の適用にあたっては各構成素材の弾性係数が基本となっている。近似複合理論の多段階適用についても同様である。この手法をコンクリートに対して適用するには次のような課題を解決する必要がある。細骨材や粗骨材の弾性係数については固有の値を定めることも可能であるが、セメント硬化体の弾性係数にはセメント種類、水セメント比、養生条件、材齢、乾湿程度などが関与しているところから、これらに関する多くのデータの蓄積が必要である。また、本論で明らかにしたように、骨材の境界面マイクロクラックに起因する非弾性的挙動に対する補正係数に関する資料を蓄積する必要がある。

5. むすび

本論では、まず近似複合理論の多段階適用の手法を示し、その特徴を述べた。次にその例としてコンクリートの弾性係数評価に対して2段階適用の可能性を提示した。また、その過程で実験値に忠実な算定値を得るためには、骨材境界面のマイクロクラックに起因する非弾性的挙動の影響を加味する補正係数を導入する必要があることを明らかにした。更に近似複合理論のコンクリートへの適用に当たって今後検討すべき課題についても指摘した。

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報告集、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報告集、Vol.18、No.1、pp.543-548、1996.6
- [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