

論文 セメントモルタルの弾性係数と近似複合理論

川上英男*1・脇 敬一*2

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。本論文は、モルタルの弾性係数について、著者川上提案の近似複合理論による算定の方が圧縮強度に基づくよりも、より妥当であることを実験と解析により明らかにした。

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]。川上は既報[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によって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。

本論文ではモルタルの弾性係数評価に対して、試験体の寸法、形状の異なる2シリーズのモルタル実験に基づき、モルタルを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するものである。

なお、既報[4]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。セメント硬化体、モルタル、さらにコンクリートへと、細骨材、粗骨材の増加に対して、近似複合理論によるそれぞれの弾性係数評価を一連のものとして系統化する上で、本論文はその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 (表1 参照)

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

調合： 水セメント比 0.35 - 0.62, (表2 参照)

砂(絶対容積)含有率 0 - 0.60 (表2 参照)

混練、養生： 実験 A-- モルタルミキサを用いて、ペーストを機械練り4-5分の後、鉢に移してビニールで覆い、60分静置。再びよく攪拌してから試験体(φ5 x 10 cm) 3本分に対する所定量のペーストと表乾状態の砂をミキサで2分混練して型枠に打ち込んだ。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。

実験 B-- 各モルタルを機械練り5分、60分静置、これを再び練り返して、型枠

*1 福井大学 工学部 環境設計工学科、工博(正会員)

*2 福井大学 技術官

($\square 2.54 \times 2.54 \times 8.0$ cm) に打ち込んだ。翌日脱型、所定の材齢まで標準水中養生。

試験体の形状、寸法が圧縮強度や弾性係数に影響を及ぼすと考えられるので角柱試験体についても検討を試みたものである。

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 約 1-2 MPa 毎に圧縮歪みを計測した（図 1 参照）。試験体は各種 3 本、実験 A は 計 45 本、実験 B は 計 78 本である。

表 1 普通ポルトランドセメント

実験シリーズ	A	B-1	B-2	B-3
圧縮強度 (MPa)	41.2	39.3	42.6	37.6
曲げ強度 (MPa)	7.18	7.52	7.69	7.45

表 2 実験概要

実験	W/C	砂含有率（絶対容積） （%）					材齢 (日)
A	0.40	0	0.12	0.24	0.32	0.48	28
	0.444						
	0.50						
B-1	0.50	-	0.19	0.32	0.42		7
B-2	0.35	0	0.366	0.534	(*)		28
	0.45	0	0.334	0.500	0.60		
	0.62	0	0.292	0.450	0.55		
B-3	0.35						35
	0.45	0	0.16	0.32	0.48		28
	0.62						21

(*) 流動化剤使用、練りおき時間なし

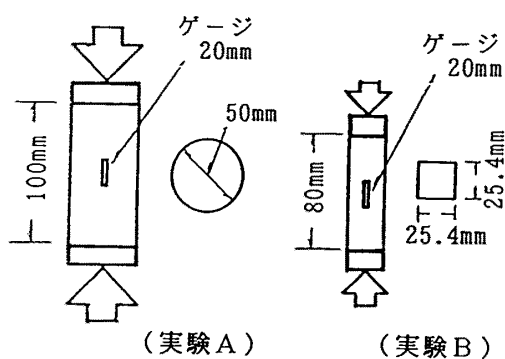


図 1 圧 縮 試 験

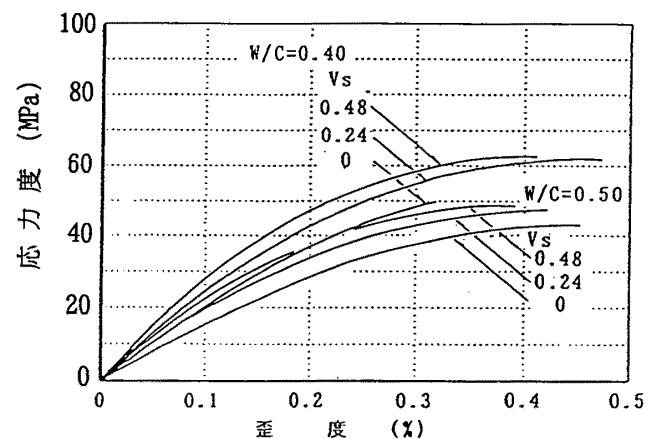


図 2 応 力 度 歪 み 度 関 係

3. 実験結果

3.1 応力度歪み度関係

実験 A の試験体の応力度歪み度関係の典型的な例を図 2 に示す。水セメント比が同一でも砂

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、割線弾性係数が大きいことを示している。

3.2 応力度歪み度関係の解析

得られた応力度歪み度関係を式(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。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)と初期弾性係数(E₀)を求めた。これらの解析結果を圧縮強度と共に表3及び表4に示す。

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

s : 応力度 e : 歪度

表3 実験結果 A (各値と平均)

W/C (%)	砂率 (%)	圧縮強度 F _c (MPa)	弾性係数 E (GPa)	初期弾性係数 E ₀ (GPa)
40	0	59.5	21.6	20.5
		48.9 (52.0)	20.8 (20.4)	22.1 (21.3)
		47.6	18.7	—
	12	49.1	21.0	—
		45.1 (48.9)	21.3 (21.3)	21.7 (21.7)
		52.7	21.6	—
	24	60.8	24.2	26.7
		62.3 (61.1)	24.1 (23.9)	26.6 (26.4)
		60.2	23.5	25.9
	36	58.7	25.4	27.7
		58.3 (58.6)	24.4 (25.1)	27.1 (27.7)
		59.4	25.4	28.1
44	0	61.8	28.1	31.1
		59.2 (60.6)	28.4 (28.1)	31.0 (30.9)
		60.4	27.8	30.6
	12	50.1	18.0	19.2
		55.0 (51.3)	18.6 (18.5)	19.4 (19.5)
		48.6	18.9	19.9
	24	56.7	19.9	22.2
		46.1 (50.1)	19.6 (19.8)	— (21.8)
		47.5	20.0	21.3
	36	58.6	21.7	24.4
		57.8 (57.5)	22.4 (20.3)	24.9 (24.4)
		56.1	21.5	23.9
50	0	57.5	24.1	26.8
		58.5 (58.3)	23.7 (23.9)	26.3 (26.6)
		58.7	23.9	26.7
	12	55.7	26.1	29.1
		57.7 (57.3)	25.6 (25.9)	28.4 (28.7)
		58.4	26.0	28.7
	24	42.7	15.3	16.1
		43.0 (40.5)	17.1 (16.5)	17.9 (17.4)
		45.9	17.0	18.0
	36	34.4	17.8	17.9
		37.4 (36.9)	18.2 (18.0)	19.1 (18.8)
		38.8	18.0	19.3
50	0	47.2	20.5	22.9
		48.1 (48.0)	19.8 (20.0)	— (22.6)
		48.6	21.3	22.2
	12	48.3	21.9	24.1
		48.8 (48.4)	21.8 (21.7)	24.8 (24.4)
		48.3	23.4	24.3
	24	48.4	22.9	26.3
		47.2 (47.6)	23.8 (23.3)	25.8 (26.3)
		48.3	—	26.8

表4 実験結果 B (平均値と変動係数)

No.	W/C (%)	砂率 (%)	圧縮強度 F _c (MPa)	弾性係数 E (GPa)	初期弾性係数 E ₀ (GPa)
1	50	19	36.2 (8.5)	17.4 (1.5)	19.2 (4.0)
		32	38.8 (5.1)	20.4 (2.7)	22.4 (2.4)
		42	45.0 (7.8)	22.8 (2.6)	25.1 (2.7)
2	35	0	79.2(14.7)	24.4	25.8 (*)
		34	73.5(13.7)	31.0 (3.8)	33.0 (6.5)
		54	70.0 (3.5)	32.5 (2.9)	34.0 (4.8)
	45	0	41.7(12.8)	21.2	21.2 (*)
		34	58.2(19.6)	26.1 (2.3)	27.8 (4.6)
		50	59.3(22.2)	29.7 (**)	32.2 (**)
	62	60	30.5(10.0)	26.6 (**)	27.5 (**)
		0	36.8 (4.3)	13.5	14.8(10.2)
		29	44.9 (2.5)	20.6 (7.7)	22.6 (8.9)
		45	44.8 (1.4)	24.1 (3.1)	26.2 (3.8)
		56	38.7 (1.7)	24.6 (**)	26.2 (**)
3	35	0	55.1(26.6)	23.9	25.8(10.3)
		16	73.6 (6.1)	25.8 (7.3)	27.7 (6.3)
		32	78.9 (1.2)	30.4 (1.8)	33.3 (2.6)
	45	48	70.8 (6.8)	33.0 (3.4)	35.8 (4.3)
		0	55.7 (8.0)	19.0	19.9 (*)
		16	63.5 (4.5)	23.6 (0.8)	26.3 (1.4)
	62	32	61.2 (9.9)	26.6 (4.0)	29.6 (6.2)
		48	59.5 (5.4)	28.4 (7.5)	31.5(10.7)
		0	30.8(14.9)	14.5 (4.5)	15.6 (6.9)
		16	31.2 (6.8)	19.1 (7.4)	21.3(13.5)
		32	28.8(19.8)	20.7 (4.5)	23.3 (6.7)
		48	31.1(11.7)	23.2 (3.0)	26.2 (3.2)

*:データ数 1, **:データ数 2

4. 考察

4.1 砂含有率 (V) と弾性係数 (E)

実験Aの砂含有率と割線弾性係数（以下の考察では単に弾性係数という）の関係を水セメント比ごとに図3-Aに示す。実験Bについては実験2と実験3の結果を併せて図3-Bに示す。

砂含有率の増加につれて弾性係数はほぼ直線的に増加している。砂含有率が50%を超えると弾性係数の増加に頭打ち傾向が見えるのは、モルタルの充填が不十分になるためと考えられる。図3-Bでは砂含有率50%以下の範囲について回帰直線を求めた。参考までに各水セメント比における砂含有率と弾性係数との関係の回帰直線式とその相関係数を同図に記入した。

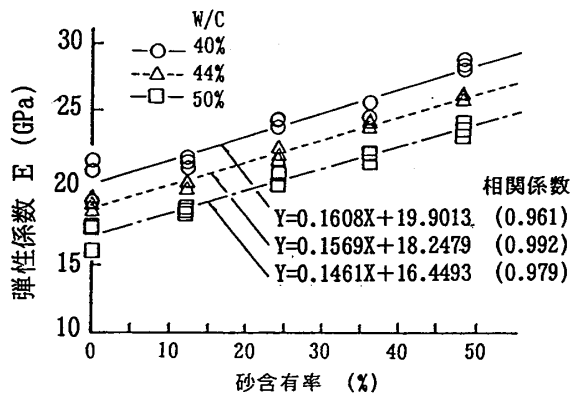


図3-A 弾性係数と砂含有率（実験A）

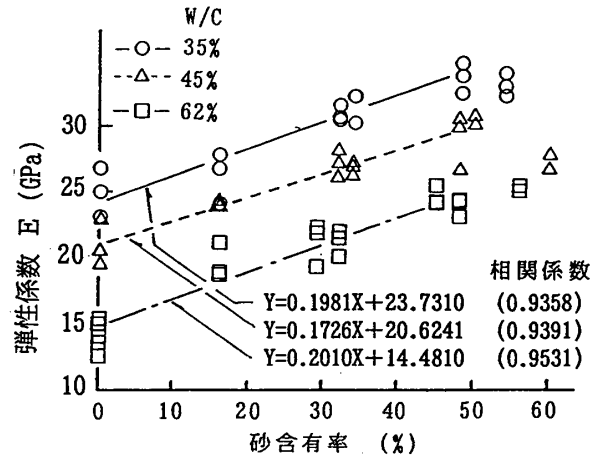


図3-B 弾性係数と砂含有率（実験B）

4.2 弾性係数 (E) と圧縮強度 (F)

各水セメント比ごとに弾性係数と圧縮強度の平均値を求め、それらの関係を示したのが図4-Aと図4-Bである。それぞれ同一の水セメント比（同一記号）内では、圧縮強度の大小に比べて弾性係数の差が大きい。その傾向は圧縮強度の高い（砂含有率の大きい）範囲で著しい。すなわち、両者の間には図3の弾性係数と砂含有率の関係に見られるような明瞭な対応は認められない。しかし、全体のデータについて仮に直線回帰式を求めてみると、同図の直線のようになり、大まかに見れば、弾性係数と圧縮強度は対応しているとも見做されよう。

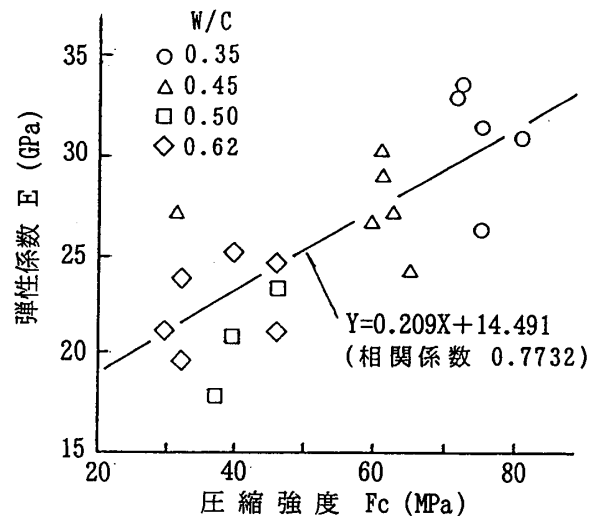
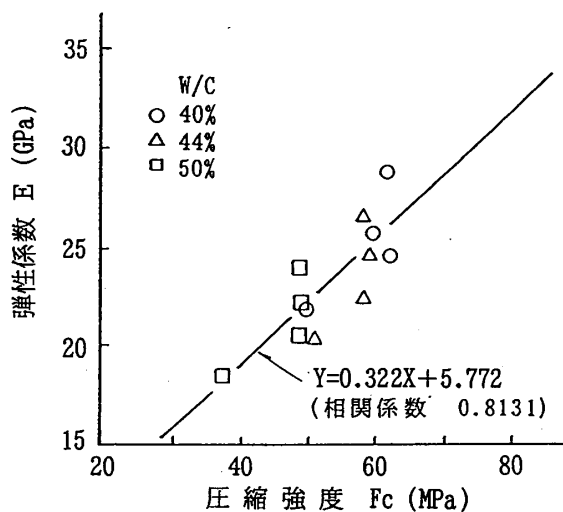


図4-A 弾性係数 (E) と圧縮強度 (Fc) -実験A- 図4-B 弾性係数 (E) と圧縮強度 (Fc) -実験B-

4.3 近似複合理論による弾性係数の評価

ここに言う近似複合理論とは著者の一人川上が提案しているもので、図5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 (通常 0.7~0.9)

砂の弾性係数を実験的に求めることはできないので、同じ九頭龍川産の玉石から採取した各岩種コアのヤング係数を参考とする。すなわち 代表的岩5種の試験結果[5]では比重と弾性係数がほぼ直線的関係にあることが示されたことから、その関係に基づいて、砂の比重2.56に対応する弾性係数を求めると、 $E_a = 3.77 \times 10^4$ MPa である。

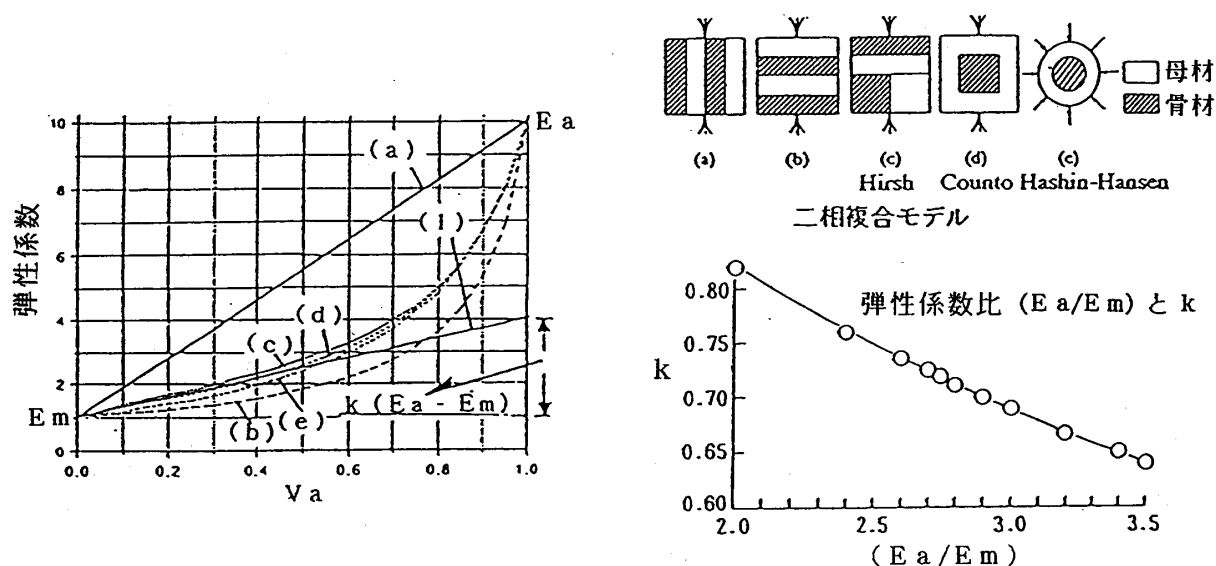


図5 二相複合モデルによる弾性係数理論値と複合モデルの近似

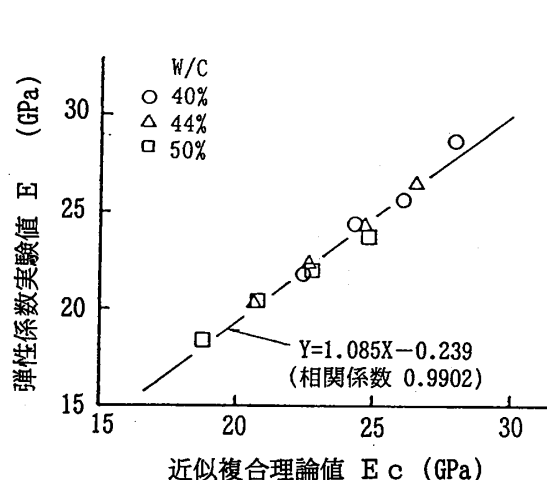


図6-A 弾性係数実験値 (E) と近似複合理論値 (E_c) (実験A)

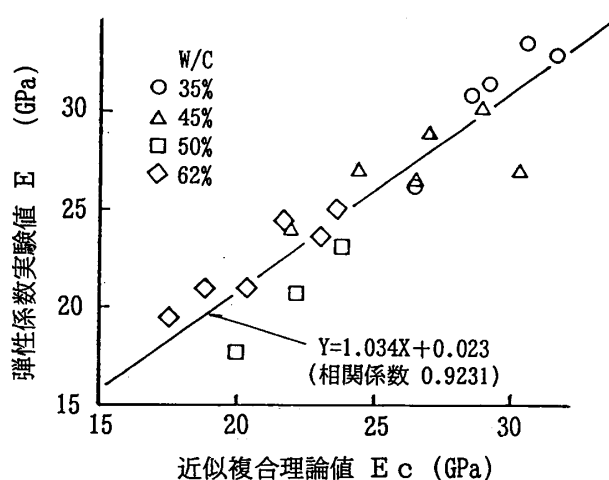


図6-B 弾性係数実験値 (E) と近似複合理論値 (E_c) (実験B)

この E_a と各セメント硬化体の E_m 、 (E_a/E_m) に対応する k 及び 砂含有率 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 との関係を示したのが図6である。

これらの図6を図4と比較すると、実験A、実験B 共に 回帰直線に対する実験値 E の分布範囲は図6の方が小さく、相関係数も大きい値を示している。

4.4 相関係数の比較

圧縮強度と近似複合理論値のどちらが、モルタルの弾性係数をよりの確に評価するパラメータとなるかについて、直線回帰の相関係数を指標とすれば表5に示すとおりである。

初期弾性係数についても同様に解析し、その結果を同表に併せて示した。

実験A、実験B共に、弾性係数(割線係数)と初期弾性係数の両方とも、相関係数は圧縮強度に対するよりも近似複合理論値に対する場合の方が大きい値を示した。

表5 相 関 係 数

実験名 対 応	実験 A (n=12)		実験 B (n=20)	
	弾性係数	初期弾性係数	弾性係数	初期弾性係数
圧 縮 強 度	0.8131	0.8215	0.7732	0.7873
近似複合理論値	0.9902	0.9734	0.9231	0.9022

5. むすび

本論ではセメントペースト及びモルタルの力学的性質に関する2シリーズの実験とその解析を行った。それらの試験体は $\phi 5 \times 10$ cm, 45本、 $2.54 \times 2.54 \times 8$ cm, 78本で、水セメント比は 0.35-0.62、砂含有率は 0-60%、圧縮強度は 78.9-28.8 MPa であった。

これらの実験データの解析より得られた弾性係数と、圧縮強度及び近似複合理論値との関係を比較したところ、モルタルの弾性係数評価には、圧縮強度よりも構成素材であるセメント硬化体及び砂の弾性係数に基づく近似複合理論値の方がよりの確であることが示された。

また上述の結果は、数種の素材から構成されるコンクリートの弾性係数を評価するにあたって、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段階的に二相複合体とみなして、順次近似複合理論を適用する手法の可能性を示唆するものである。

謝 辞

本研究に当たっては 学生 中村いずみ君の協力を得た。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報告集、Vol. 17、No. 1、pp. 497-500、1995. 6
- [4] 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
- [5] 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