

論文 コンクリートの弾性係数に及ぼす骨材と境界層の影響

川上 英男^{*1}

要旨：先に筆者はコンクリートの弾性係数は母材、骨材の弾性係数と含有量の他、境界層の影響を受けること¹⁾、弾性係数の実験値と複合理論値との比（補正係数 J ）はセメント水比と関係が深いことを報告した^{2,3,4)}。本論文はこの両者の関係について、さらに広範囲の川砂利コンクリートの実験資料を検証した結果、1) 補正係数 J は調合や養生条件によって差があるものの全般的にはセメント水比が小さい程減少する傾向にあること、2) 両者の関係から $J=1$ すなわち実用的に境界層の影響を無視できるセメント水比の限界が示されること等を明らかにした。

キーワード：コンクリート、弾性係数、複合理論、骨材、境界層、セメント水比

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。その一つは経験に基づく慣習的方法であって、ACI、AIJ 及び CEB-FIP 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参考に算定するものである^{例えは⁵⁾}。他の一つは理論的な方法で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⁶⁾。

筆者は岩質の異なる粗骨材を用いたコンクリートの実験からコンクリートの弾性係数は圧縮強度よりも構成素材の弾性係数との関係が深いことを報告し⁷⁾、複合理論解の近似式を提案してその実用的な適用を図った⁸⁾。また最も精緻とされる Hashin-Hansen モデルについて近似式を適用し、その結果、従来骨材の弾性係数が母材より大きい場合のみを対象としていたのに対し、母材よりも小さい場合に対しても適用できるように適用範囲を拡張した。すなわち母材と骨材の弾性係

数の大小に関係なく近似複合理論式の展開が可能であることを見いだした⁹⁾。

これらの複合理論解や近似複合理論式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。複合モデルが精緻になっても、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が複雑な式となっていることに加えて、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²⁾で複合理論による弾性係数算定値は上述のコンクリートの非弾性挙動に関する補正係数を導入することによって、実験値に一層忠実な算定値を得られることを報告した。また、その補正係数はセメント水比と直線的関係にあることを報告した^{3,4)}。

本報告はさらに広範囲の実験データを解析し、その補正係数とセメント水比の関係について検討した結果を述べるものである。

2. 実験概要

実験データは既報¹⁾の内、粗骨材含有率が実用に近い 30-50% を検討の対象とした。

*1 福井工業大学教授 工学部 建設工学科 工博（正会員）

以下にその概要をまとめておく。

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 %。
 砂利：九頭龍川産，5 - 25 mm，表乾密度
 2.62。一旦ふるい分けした後，改めて
 所定の粒度に配合した。各実験シリー
 ズの粒度を表-1に示す。
 調合：水セメント比は 40, 50, 60 %。
 砂利含有体積率は 30-50 %。
 調合表を表-2に示す。

表-1 川砂利の粒度 (% wt)

実験 No.	粒径 (mm)				
	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
1.1	25	25	25	25	---
1.2	* 25	25	25	25	---
2.1	** 38	---	62	---	---
2.2	---	50	50	---	---
2.3	25	30	15	25	5
3	25	25	25	25	---
4.1	* 33	---	67	---	---
4.2	* 67	---	---	33	---
5 & 6	20	30	15	35	---
7.1	* 67	---	---	33	---
7.2	* 33	---	---	67	---

(* : 5 - 8 mm, ** : 8 - 10 mm)

表-2 調合および材齢

実験 No.	W/C (%)	モルタル調合 セメント:砂*	Va [% vol]	材齢 (日)
1.1,1.2	40,50	1 : 2	30 - 45	7
2.1-3	40	1 : 2	37.1 - 49.5	14
3	50	1 : 2	30.5 - 45.7	7
4.1,4.2	50	1 : 2	45, 50	14
5	40-60	1 : 1.5	40	28
6	40-60	1 : 1.5	40	28
7.1,7.2	50	1 : 2	45, 50	28

(*:絶対容積比, Va:コンクリート中の砂利含有率)

2.2 混練と養生

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，所定の砂利を加えて手練りを行なった。
 そのモルタルを用いて，コンクリートと同
 じサイズ（径10cm x高さ20cm）のモルタル
 試験体も作製した。試験体は各種3本づつで
 ある。

打込み2日後に脱型，標準水中養生を行
 なった。

2.3 圧縮試験

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，あるいは歪みゲージを取
 り付け，歪度を計測した。

3. 実験結果の解析

コンクリートの圧縮強度 (Fc) ，圧縮強
 度の1/3の応力度におけるモルタルとコンク
 リートの割線弾性係数 (Em, E) を表-3
 に示す。各値は試験体各3本より得られた値
 の平均値である。

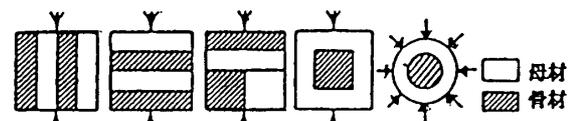
4. 考察

4.1 複合理論と近似式

複合材の弾性係数評価に対していくつかの
 複合モデルが提案されてきた (図-1参照)。
 例えば最も精緻とされるHashin-Hansen モデ
 ルの解は式 (1) に示す通りである。

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

Ec, Em, Ea : 複合体, 母材, 骨材の弾性係数
 Vm, Va : 母材, 骨材の体積含有率,
 (Vm + Va = 1)



(a) (b) Hirsh Counto Hashin-Hansen

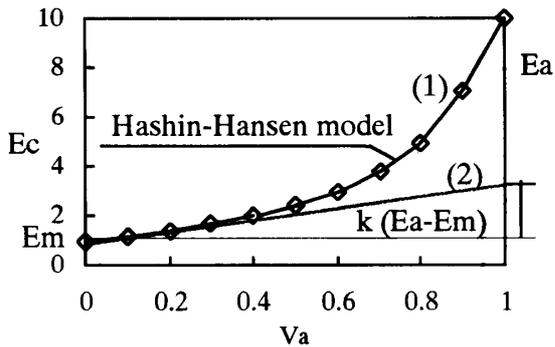
図-1 複合モデル

式(1)の解では骨材の体積含有率が0.5以下の場合、骨材含有率と複合体の弾性係数との関係は直線に近い。筆者はこれに着目して式(1)の精解に替えて図-2aに示すように近似式(2)を導いた。

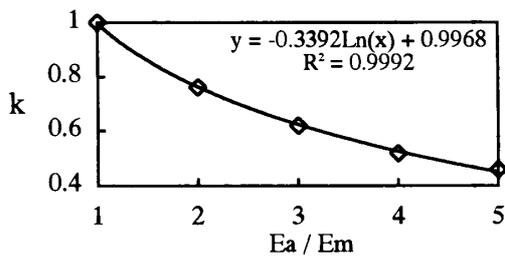
$$E_c = E_m + k(E_a - E_m)V \quad (2)$$

V: 骨材の体積含有率 (0.5 以下)
k: 係数

係数kは複合モデルの解と式(2)の差が最小となるように導入されたものである。この係数kは骨材と母材の弾性係数比に依存する。式(2)はどの複合モデルに対してもkを適切に与えることによって適用できるものである。式(1)のHashin-Hansenモデルに対するkを図-2bに示す。



[a] 弾性係数 E_c と骨材体積含有率 V_a



[b] 補正係数 k と弾性係数比 E_a/E_m

図-2 Hashin-Hansen モデルの解と近似式

4.2 コンクリートの非弾性挙動と補正係数

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

表-3 実験結果

実験 No.	w/c [%]	V_a [%]	F_c [MPa]	E_m [GPa]	E [GPa]	E_c [GPa]	J	
1.1	40	30	36.8	25.9	30.8	31.4	0.98	
	40	45	33.9	25.9	33.7	34.5	0.98	
	50	33	22.5	18.6	24.4	25.2	0.97	
1.2	40	30	37.1	24.7	31.2	30.3	1.03	
	40	45	33.5	24.7	35.0	33.6	1.04	
	40	33	35.0	24.3	28.5	30.6	0.93	
	40	45	33.8	24.3	31.3	33.3	0.94	
	50	30	24.6	21.7	25.7	27.5	0.93	
	50	45	23.3	21.7	27.3	31.1	0.88	
2.1	40	40.4	38.1	27.5	35.3	34.8	1.01	
	2.2	40	37.1	37.9	27.5	36.7	34.1	1.07
	40	49.5	39.5	27.5	34.2	36.7	0.93	
2.3	40	38.7	39.0	27.5	32.1	34.5	0.93	
	3	50	30.5	26.4	20.2	22.8	26.2	0.87
		50	45.7	21.3	20.2	25.5	29.9	0.85
4.1	50	45	28.9	25.4	31.4	34.1	0.92	
	50	50	28.1	25.4	32.1	35.3	0.91	
4.2	50	45	33.6	25.4	31.4	34.1	0.92	
	50	50	30.7	25.4	32.5	35.3	0.92	
5	40	40	42.2	24.1	29.6	31.9	0.93	
	50	40	28.6	19.8	25.7	28.1	0.91	
	60	40	14.5	18.0	22.2	26.3	0.84	
6	40	40	42.2	23.2	27.2	31.2	0.87	
	50	40	28.7	19.9	25.6	28.2	0.91	
	60	40	15.3	19.2	21.4	27.5	0.78	
	60	40	18.3	21.7	26.7	29.8	0.90	
7.1	50	45	28.9	25.1	31.3	33.9	0.92	
	50	50	27.9	25.1	32.1	35.1	0.91	
7.2	50	45	33.6	25.1	30.8	33.9	0.91	

V_a : 砂利含有率, F_c : 圧縮強度,
 E_m, E : モルタル, コンクリートの弾性係数実験値,
 E_c : 複合理論によるコンクリート弾性係数算定値
 E_a : 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 : 非弾性挙動に関する補正係数

ける弾性係数（E、割線係数）は原点における初期接線係数（E₀）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。その差は当然 E₀ よりも E において大きくなる。以下実用的観点から E を検討の対象とする。

式（2）による算定値を実験値に近づけるために既報²⁾では補正係数 J_g を砂利含有の影響として式（2）の第2項に乗じて式（3）を与えた。

$$Ec' = Em + Jg k (Ea - Em) Vg \quad (3)$$

J_g：川砂利の含有に対する補正係数

水セメント比が 40% から 60% に大きくなると、J_g は小さくなること、すなわち弾性係数は複合理論値より低下する割合が大きい傾向にあることを見いだした。このことは母材に関与する因子が浮上してきたことを意味する。

さてその非弾性挙動に由来する複合理論値の補正係数を式（3）に示す J_g のように含有骨材の項の係数にするか、あるいは下記の式（4）に示すように複合理論値全体の係数とするかについてはまだ今後究明すべき段階にある。含有骨材を補正の対象とする立場は上述のほか、細粗骨材全体を対象とした清原他の研究¹⁰⁾が報告されている。

本論ではその補正係数を複合理論値全体の係数として扱うことにした。補正係数との相関性が認められた水セメント比そのものは骨材に関与する因子ではなく、母材であるセメントペーストの因子であること、また複合理論値と実験値との比較を簡明にするにはその方が都合が良いことなどの理由からである。既報^{3), 4)}では式（4）を用いた。

$$Ec' = J [Em + k (Ea - Em) Va] \quad (4)$$

一方、複合理論の解と実用的評価を目的とした近似複合理論式とは本質は変わらないこと、本論のように補正係数の特性を追求する場合には近似複合理論式（2）では解析の途中に係数 k が関与してきて却って煩雑であることから、Hashin-Hansenモデルの解に補正係数を乗じた式（5）を用いることにした。

$$Ec' = J Em \frac{[Vm Em + (1 + Va) Ea]}{[(1 + Va) Em + Vm Ea]} \quad (5)$$

J：非弾性挙動に関する補正係数

4.3 実験データの解析

式（1）を用いた弾性係数の複合理論値（Ec）とそれに対する実験値（E）の比、すなわち補正係数 J の値を前掲の表-3 に示した。

図-3 に J の値とセメント水比の関係を示す。

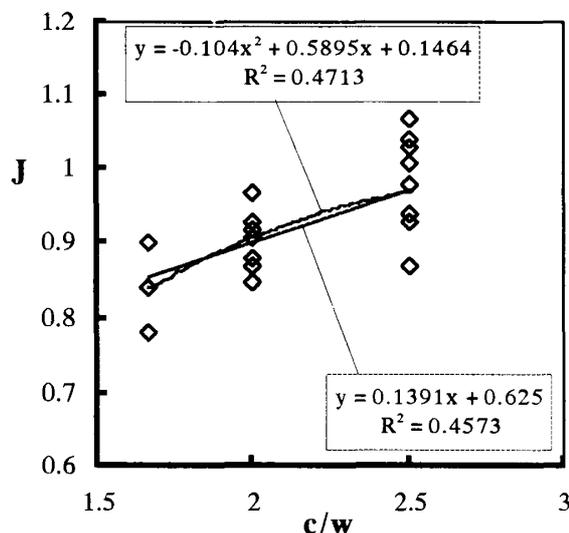


図-3 補正係数 J とセメント水比

多項式による回帰式を式（6）に示す。それは上に凸の曲線関係を意味し、セメント水比が小さくなるほど J 値の低下の割合が大きくなることを示している。

$$y = -0.104 x^2 + 0.5895 x + 0.1464 \quad (6)$$

また参考までに線形回帰式を求めた結果を式(7)に示す。

$$y = 0.1391 x + 0.625 \quad (7)$$

Jの値は同じセメント水比においても必ずしも同一ではない。また中には1より大きいという不合理な例も見られる。これらには試験体の作製のバラツキは勿論、前述のように境界層の付着強度に関与する多くの要因が影響しているものと考えられる。実験データについて材齢、モルタルの調合、粗骨材の粒度を比較検討してみたが、これらの点からはJ値のバラツキの理由を特定できなかった。

そこで統計的に整理した結果を表-4に掲げる。

表-4 水セメント比と補正係数(J)

W/C (%)	C/W	J 平均 (n , σ)
40	2.5	0.97 (12, 0.056)
50	2.0	0.91 (14, 0.027)
60	1.667	0.84 (3, 0.049)

(n : データ数, σ : 標準偏差)

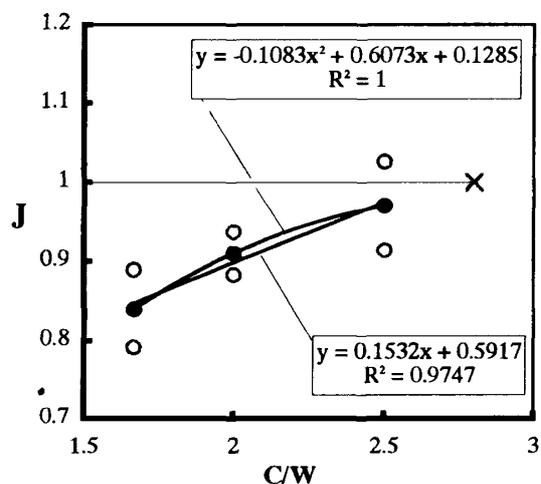


図-4 補正係数Jとセメント水比 c/w

表-4にもとづいて図-4に改めて補正係数Jとセメント水比との関係を示す。平均値を黒丸印で、標準偏差の範囲を白丸印で示してある。同図中には平均値による多項回帰式と線形回帰式を示してある。

4.4 c/w - J 関係の意義

前記の多項回帰式(6)からJ=1, すなわち複合理論算定値からの低減を考慮しなくてよい限界のセメント水比を求めると

$$c/w = 2.83 \quad (w/c = 35.3\%)$$

と得られる。

この限界値を図-4中にはx印で示した。

同様に線形回帰式(7)から求めると

$$c/w = 2.7 \quad (w/c = 37\%)$$

となる。

図-4の回帰式でもこれらとほぼ同じ値が得られる。

実験のバラツキもあるので上記のセメント水比の限界値はやや大きめに想定する必要があるが、凡その見当として水セメント比30%以下の高強度コンクリートでは補正係数を考慮する必要がないことが示唆されている。

またこれらの値は川砂利コンクリートについて求められたものであり、前述のような理由から岩質や表面粗滑度の異なる骨材の場合にはこれらの値も異なってくるものと考えられる。

いずれにしても補正係数を考慮せずに複合理論だけで実用的な弾性係数を評価出来る範囲のセメント水比が存在することが明らかとなった。

またこのことは各種の骨材に対するその限界値を本論文の手法によって求めることが可能であることを示した。

さらに進んでそのような低水セメント比のコンクリートの実験から骨材の粒状体の弾性係数を複合理論によって逆解析で求める可能性をも示唆するものである。

5. 結び

複合理論を用いたコンクリートの弾性係数算定値はコンクリートの非弾性挙動を考慮した補正係数 J を導入すれば最大応力度の1/3における割線弾性係数実験値に近くなる。

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。

本研究では川砂利コンクリートを対象に、その補正係数 J とセメント水比の関係をとり上げ次の点を明らかにした。すなわち

- 1) セメント水比が小さくなるほど補正係数 J は減少し、水セメント比 60 % (セメント水比 1.67) では約 0.84 となる。その減少の割合はセメント水比が小さくなるほどやや大きくなる傾向にある。
- 2) セメント水比が約 3 より大きい場合には $J=1$ 、すなわち補正係数 J を考慮せずに複合理論だけで実用的にコンクリートの弾性係数を評価できることが示唆された。
- 3) そのような高セメント水比 (高強度) のコンクリートの実験から粒状体である骨材の弾性係数を複合理論によって逆解析で求める可能性も示唆するに至った。

本論の成果はこの境界層問題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もなることを示すものである。

謝辞

実験と解析は 福井大学 脇敬一技術官と数年にわたって卒業論文として分担された学生諸君の御協力によるものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 川上英男：骨材がコンクリートの弾性係数に及ぼす影響，骨材資源, Vol.31, No.123, pp.217-221, 1999.11
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 川上英男：コンクリートの弾性係数と複合理論の適用，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp. 619 - 624. 1999.6.
- 10) 清原千寿ほか：コンクリートのヤング係数推定式，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp. 601- 606, 1999.6