

ポリスチロールコンクリートの強度と弾性係数 — 近似複合理論の検証 —

川 上 英 男*

Compressive Strength and Elastic Modulus of Polystyrol Concrete — Application of a Simplified Two-Phase Structural Model —

Hideo Kawakami

A simplified formula of structural model, based on elastic moduli of components of concrete and their volume fractions, was proposed by the author for estimation of elastic modulus of concrete. Experiments were carried out on concretes containing polystyrol beads as coarse aggregate. The elastic modulus of the beads are lower than the mortar matrix. The present report dissussed the validity of the formula in concrete containing polystyrol beads. The conventional method of estimation, based on compressive strength and the specific gravity of concrete, was also discussed.

Application of the simplified formula to exprimental results of the concrete containing polystyrol beads in stead of gravel was proven to give more accurate values of elastic modulus of concrete in wide range of mix proportion than the values obtained by the conventional method. It was also observed that concretes containing polystyrol beeds had lower values in specific gravity, compressive strength and elastic modulus than the values of mortar matrix. In case of polystyrol beads content of 18 % of total concrete volume, the specific gravity was decreased by 15 %, the elastic modulus by 25 % and the compressive strength remarkably by 60 % from the values of mortar matrix.

1 はじめに

セメント系材料はコンクリートをはじめ極めて広い分野において利用されており、今後、より多様で高度の品質が求められるであろう。ここではその複合機構について強度と弾性係数に焦点をあてて考察するものである。コンクリートの弾性係数の慣用的評価法の一つは工学的観点からコンクリートの比重、圧縮強度などをパラメータとするものである[1]。一方、後述のように複合理論によって、コンクリートの各構成素材の弾性係数とそれらの体積比を用いてコンクリートの弾性係数を理論的に算定する目的でいくつかのモデル(図9、図10)が提案されている[2]。しかしながら、その理論式は解析の精確さを増す程、複雑となり、却ってその適用を妨げる結果となっている。筆者は先に数種のシリーズのコンクリートを実験的に検討した結果、コンクリートの弾性係数は慣用的評価法によって算定するよりも複合理論に基づいて算定する方が、広範囲のコンクリート調合に対して適合性が優れていることを明らかにすると共に、さらに複合理論の実用を狙いとして、近似複合理論式(2)(後述)を提案した[3], [4], [5]。

本論文は母材モルタルより弾性係数の小さいポリスチロールビーズを粗骨材として用いたコンクリー

* 建設工学科 建築学専攻

トを対象に実験を行い、それらコンクリートの弾性係数実験値と近似複合理論による算定値ならびに慣用的方法による算定値との比較を行って、近似複合理論の適用性を検討したものである。

2 実験概要

2.1 材料

- a) ポリスチロールビーズ（粗骨材）
比重： 0.023 （水中浸漬法による測定結果）
粒度： 1.2 - 10 mm（図1参照）。
- b) セメント：普通ポルトランドセメント
- c) 砂： 山口県豊浦産標準砂 比重 2.63

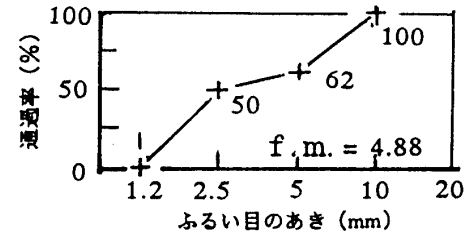


図1 ポリスチロールの粒度

2.2 調合

水セメント比 40 %、セメント：標準砂 = 1：1

ポリスチロールビーズ（以下単にビーズという）体積含有率： 0、4.5、9、13.5、18 % の5水準。

2.3 混練、養生

モルタルミキサを用いてモルタルを練り、所定のモルタルを別の練り鉢に取り分け、これに所定のビーズを加え、手練りを行った。1種の調合に対し、セメント強度試験用三連型枠（4×4×16cm）に仕切板を用いて、4×4×6 cm、4×4×8 cm 各3本ずつを打ち込んだ。前者は立方体圧縮試験用、後者は角柱圧縮試験用である。約1時間後に整形、翌日脱型、所定の材齢まで水中標準養生。

その試験体製作を3回行い、それぞれの試験材齢を1週、2週 及び4週とした。

2.4 圧縮試験

圧縮試験に先立ち、表乾状態の試験体の質量を計測し、これより比重を算定した。圧縮試験の載荷にはアムスラー型20トン耐圧試験機を、荷重検出にはロードセル（30t）を用いた。載荷速度は立方体圧縮試験では 80 kgf/sec、角柱圧縮試験では 2-3kgf/cm²/sec を基準とした。角柱試験体の歪み計測は試験体両側面に貼り付けた抵抗線歪み計（検長20mm）によった。

3.実験結果

角柱試験体の実験結果を表1にまとめて示す。

3.1 応力度 歪度 関係

応力度歪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ビーズ含有率の大きいもの程、応力度歪度線の立ち上がり部分の勾配は小さく、割線弾性係数が小さいことを示している。

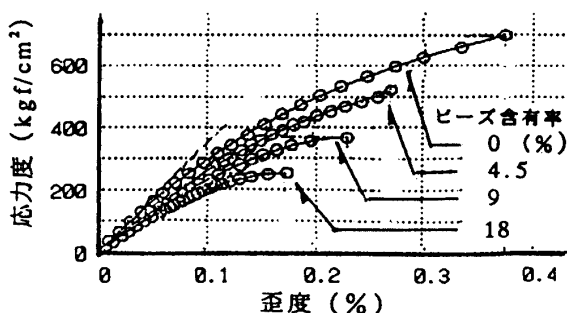


図2 応力度歪度関係の例（材齢4週）

表1 実験結果（各3本の平均値）

材齢 (週)	調合	ビーズ 含有率 (%)	比重	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 10 ⁵ (kgf/cm ²)
1	A	0	2.27	522	2.76
1	B	4.5	2.15	413	2.54
1	C	9	2.06	312	2.45
1	D	13.5	1.98	288	2.24
1	E	18	1.88	232	1.98
2	A	0	2.24	597	2.98
2	B	4.5	2.15	466	2.72
2	C	9	2.10	446	2.95
2	D	13.5	1.99	354	2.46
2	E	18	1.88	264	2.37
4	A	0	2.23	692	3.06
4	B	4.5	2.14	488	2.86
4	C	9	2.05	369	2.58
4	D	13.5	1.96	303	2.50
4	E	18	1.91	278	2.33

3.2 応力度歪度関係の解析

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。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。これらの解析結果を前掲の表1に示す。

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

s : 応力度 e : 歪度

4. 考察

4.1 比重、圧縮強度、弾性係数

a) 比重とビーズ含有率

図3に示すように、ビーズ含有率が高いほど比重は低下し、両者はほぼ直線関係にある。

b) 圧縮強度とビーズ含有率

図4に示すように、ビーズ含有率が大きくなるほど圧縮強度は低下し、含有率18%ではモルタルに比べて約40%程度にまで低下する。低下の度合いはビーズ含有率が高いほどやや緩やかになる傾向にある。

c) 弾性係数とビーズ含有率

図5に示すように、ビーズ含有率の増加と共に弾性係数は低下し、両者の関係はほぼ直線的である。

d) 比重と圧縮強度

図6に示すように、比重が大きくなるほど圧縮強度は大きい値を示す。

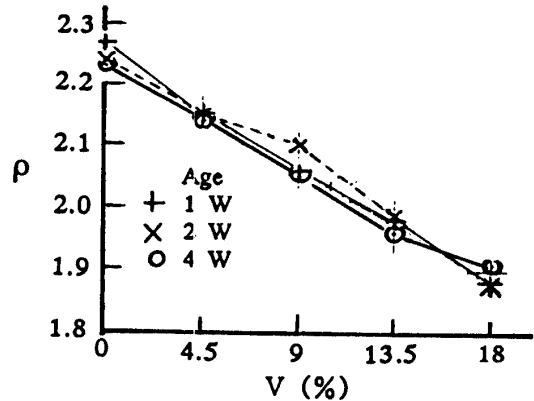


図3 ビーズ含有率 (V) と比重 (ρ)

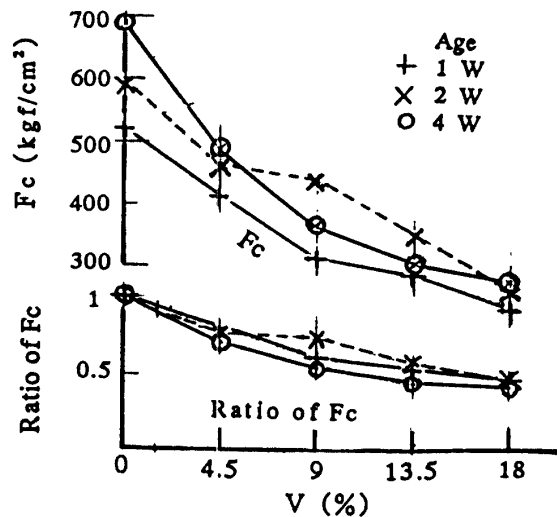


図4 ビーズ含有率 (V) と圧縮強度 (Fc)

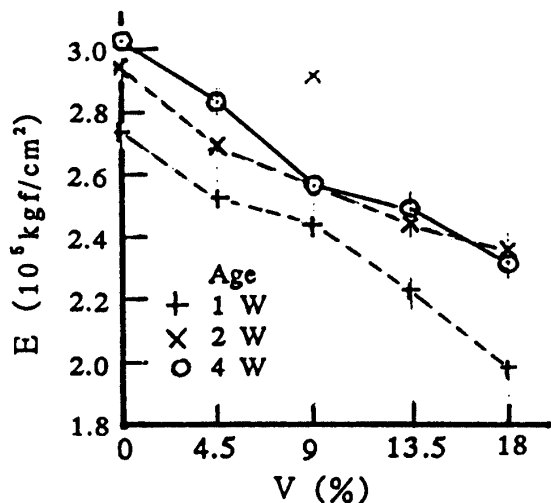


図5 ビーズ含有率 (V) と弾性係数 (E)

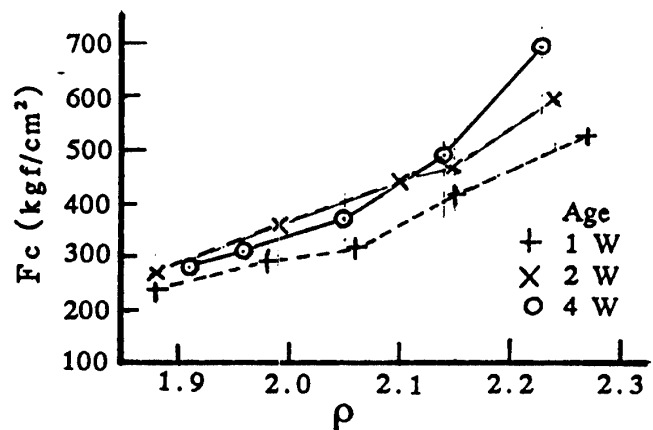


図6 比重 (ρ) と圧縮強度 (Fc)

e) 比重と弾性係数

図7に示すように、比重が大きくなるほど弾性係数は大きくなる。同図下部にモルタルに対する各弾性係数の比率を図示した。比重と弾性係数の関係は直線的と見做してよい。

f) 圧縮強度と弾性係数

圧縮強度と弾性係数の関係を図8に示す。圧縮強度が大きい程、弾性係数も大きくなる傾向が認められる。両者の全体の傾向としてはやや上に凸の曲線的関係にあるものと見做される。

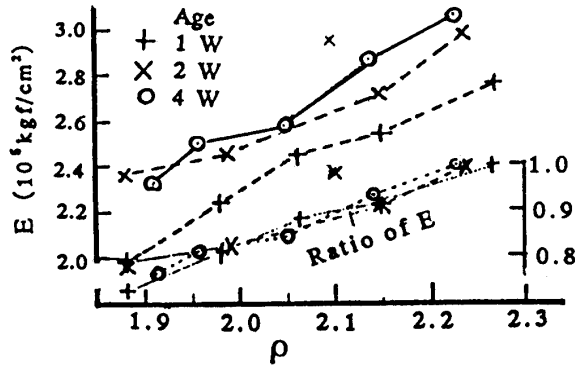


図7 比重 (ρ) と弾性係数 (E)

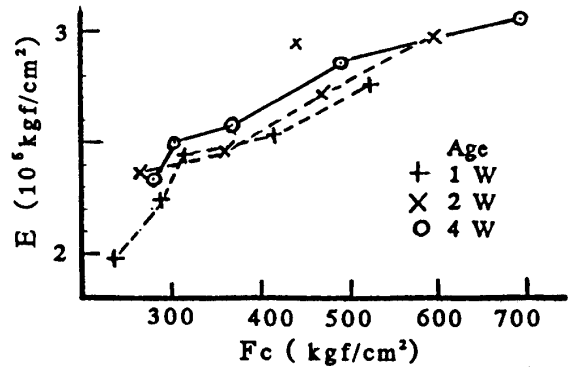


図8 圧縮強度 (Fc) と弾性係数 (E)

4.2 弾性係数評価と近似複合理論式

従来提案されている二相複合モデルを図9に示す。

これらのモデルを用いた複合体の弾性係数 E_c を表す式は次のようである。

ここに E_c, E_m, E_a : 複合体、母材、骨材粒子の弾性係数

V_m, V_a : 複合体中の母材、骨材粒子の体積含有率、($V_m + V_a = 1$)

ν_c, ν_m, ν_a : 複合体、母材、骨材粒子のポアソン比

$$E_c = E_m V_m + E_a V_a$$

Uniform strain

(a) Dantu

 ($\nu = 0$)

$$\frac{1}{E_c} = \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_a}{E_a}$$

Uniform stress

(b) Dantu

 ($\nu = 0$)

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{V_m E_m + V_a E_a} \right] + 1 - \frac{1}{2} \left[\frac{V_m}{E_m} + \frac{V_a}{E_a} \right]$$

(c) Dougill-Hirsch

((a),(b)各モデルの体積比 = 1)

$$\frac{1}{E_c} = \frac{1 - \sqrt{V_a}}{E_m} + \frac{1}{\left[\frac{1 - \sqrt{V_a}}{\sqrt{V_a}} \right] E_m + E_a}$$

(d) Counto

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

(e) Hashin- Hansen

(各材料のポアソン比を0.2とする)

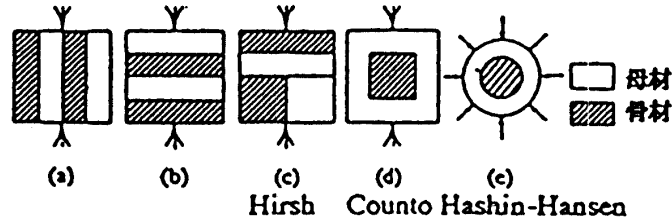


図9 二相複合モデル

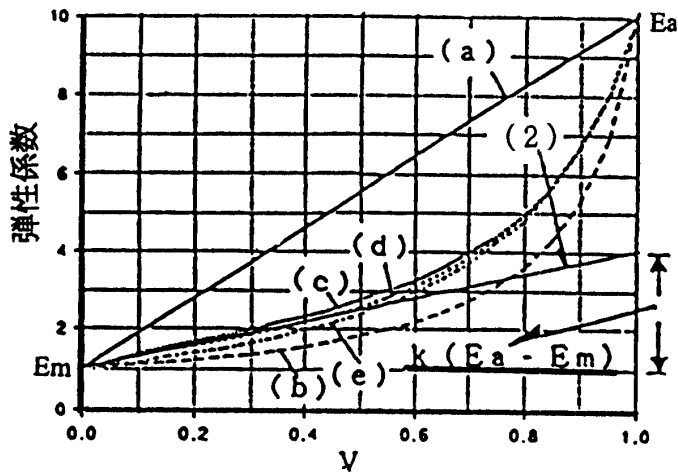


図10 複合モデル近似式

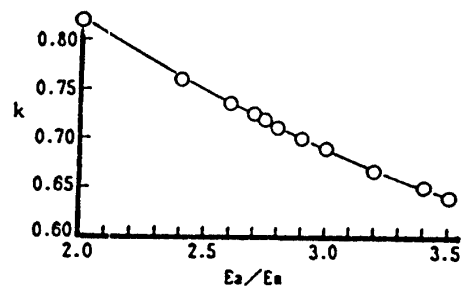


図11 弾性係数比 (E_a/E_m) と k
— モデル (d) —

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

E_c, E_m, E_a : コンクリート, 母材, 骨材の弾性係数

V : 骨材含有率

k : 係数

これらのモデルを用いて二相複合体の弾性係数を算定した値を、複合体中の骨材の含有率に対して示したのが図10である。また同図中の (a) (b) (c) (d) (e) はそれぞれ図9の各モデルに対応する。同一の骨材含有率における弾性係数算定値は 並列 (Uniform strain) モデル (a) が上限を、直列 (Uniform stress) モデル (b) が下限を示し、(c) (d) (e) 更に精密な解析を追及したものであって、それらの算定値はモデル (a) と (b) 中間の値を示す。

上述のように複合理論による弾性係数の算定式は、その解析精度を増す程、式は複雑となって、却って実用にそぐわない結果となっている。

筆者の提案している近似複合理論式とは (2) 式で表される直線式である。図10では (2) として示してある。比較的精密な理論式とされる (c) (d) (e) において、その骨材含有率と弾性係数算定値の関係が骨材含有率 0.5 以下では比較的直線に近いことに注目したものである。なお、実用のセメント系材料では、モルタル中の砂含有率、及びコンクリート中の粗骨材の含有率はいずれも 0.5 以下である。

ここに (2) 式の k は骨材と母材の弾性係数比によって定まる係数で、モデル (d) に対して $V_a < 0.5$ の範囲で、複合理論値と 近似式 (2) による算定値との差が ($E_a - E_m$) に対して $\pm 2\%$ 以内となる k 値を 図11 に示す [3]。

本論文の実験結果に対して、図(10)の近似複合理論式(2)と通常の圧縮強度をパラメータとする評価式(3)の適合性の比較を行なうと次のようである。

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

E_c : コンクリートの弾性係数 (kgf/cm²)

F_c : 設計基準強度 (kgf/cm²)

g : 単位容積重量 (t/m³)

ビーズの弾性係数は測定していないが、モルタルに比べて極めて小さい値であることは想定できる。そこで取りあえず並列モデル (Uniform Strain) (各種モデルの内では最大値を与え、図2では直線で表現される) を想定しておく。すなわち $k=1$, $E_a=0$ を式(2)に入れて式(2')を得る。

$$E_c = E_m (1 - k V) \dots\dots\dots (2')$$

この近似複合理論値と実験値との関係を図12に示す。回帰直線を求めて同図に記入した。回帰直線の勾配は、理論値と実験値が一致する場合、すなわち $Y=X$ に対して $1.35X$ と大きい結果を与えている。

図に式(3)による弾性係数の算定値と実験値との関係を図13に示す。回帰直線の勾配は $0.535X$ であり、 $Y=X$ との差は、ビーズ含有率が大きくて弾性係数が小さい程、大きくなる傾向にある。

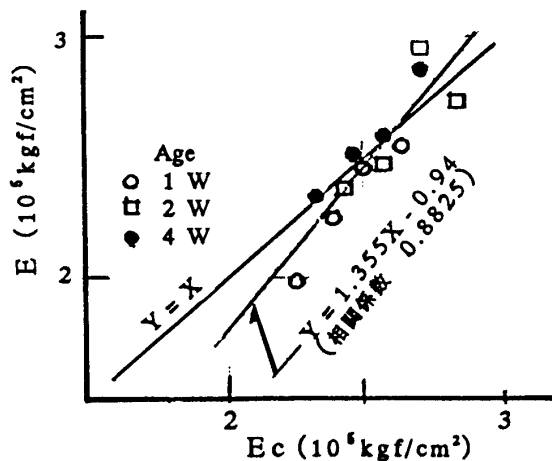


図12 近似複合理論値 (E_c) と実験値 (E)

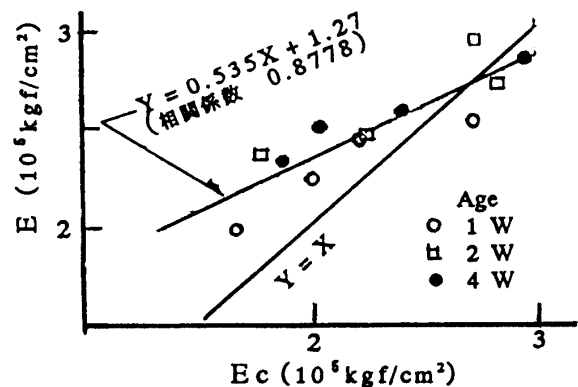


図13 式(3)による算定値 (E_c) と実験値 (E)

また、式(2')による E_c と実験値との関係が $Y=X$ に近づくように、 k の値を逆解析した。すなわち、 k の値を仮定して、 E_c を求め、これと実験値との関係を図12の場合と同様に求め、それらの中で $Y=X$ に近い k 値を選定する。

その結果、 $k=1.35$ が得られた。その場合を図14に示す。式(2')は Ishai [2] が提案した式と同じ形をしている。そして Ishai は $E_a=0$ に対しては $k=1.91$ を与えている。

k が1より大きいということは、図15に示すように並列モデルよりもさらに大きい勾配を想定する必要があることを示している。

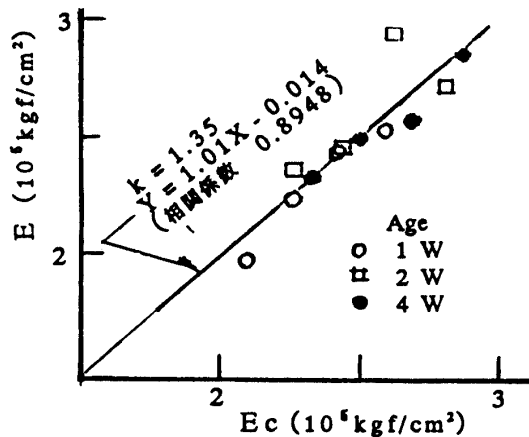


図14 近似複合理論値 (E_c) と実験値 (E)

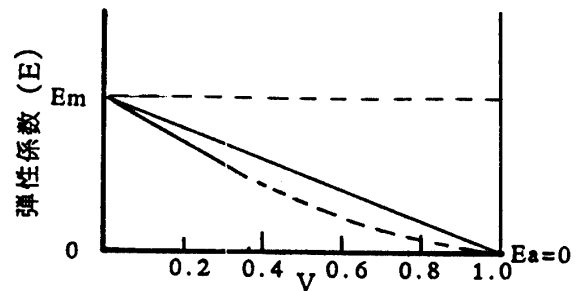


図15 弾性係数と骨材含有率 (V)

5 むすび

ここで取り上げたポリスチロールビーズを粗骨材としたコンクリートの実験の範囲で次の点が明らかとなった。

- 1) ビーズ含有率の増加につれて比重、圧縮強度、弾性係数は低下した。ビーズ含有率が18%では、モルタルに対して比重は約15%、圧縮強度は約60%、弾性係数は約25%低下した。
- 2) その弾性係数評価には、近似複合理論による方が圧縮強度と比重をパラメータとする慣用的方法より、実験結果により忠実な結果が得られた。また、実験結果に基づいて逆解析を行った結果によると近似複合理論式(2)の k 値として1.35が得られた。

本論では母材モルタルより骨材の剛性が小さい場合を対象として弾性係数評価について検討した。今後より広範囲の実験の蓄積によって、セメント系材料の複合機構が解明されることが望まれる。

(本論文は文献(6)を補筆、敷延したものである。)

謝 辞

本研究の実験は、福井工業大学 学生 林和人君に負うところ大きく、また、同学生 馬場世峰、滝悦生、大辻慎一の諸君の協力を頂きました。実験諸設備の調整には伊豆蔵庫喜氏のお世話になりました。また本研究には金井学園福井工業大学特別研究費の支援がありました。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) K.Newmann: "Composit materials," Elsevier Pub.Co. New York 1966 pp.336-452 -Concrete Systems
- 3) 川上英男 "複合モデルによるコンクリートのヤング係数評価についての一考察" 日本建築学会大会(東海) 学術講演梗概集A pp.875-876, 1994.9
- 4) 川上英男 "コンクリートのヤング係数評価について" 日本建築学会大会(北海道) 学術講演梗概集A pp.981-982, 1995.8
- 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、第17巻、第1号、pp.497-500, 1995.6
- 6) ポリスチロールコンクリートの強度と弾性係数---近似複合理論の検討---" 日本建築学会 北陸支部研究報告集第40号, pp.29-32, 1997.7

(平成9年11月4日受理)