

論文

[1081] セメント硬化体の弾性係数について

川上英男^{*1}, 松田勝彦^{*2}, 熊井雄大^{*3}

1. はじめに

コンクリートの弾性係数はコンクリート構造物の剛性の基本的要因である。ところでコンクリートは母材としてのセメント硬化体と細骨材及び粗骨材を主成分とする複合材料であって、その力学的性質はそれら各構成素材それぞれの力学的性質やその境界面の状況によって影響を受ける。したがってその弾性係数についても正確な評価を得ることは容易ではない。その評価手法には大きく分けて二つの流れがある。

一つはマクロ的観点から、コンクリートの圧縮強度、単位容積質量との関連で経験的に評価しようとするもので、例えば、日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準では設計基準強度と単位容積質量の指数を用いている。この場合には多数の実験結果から統計的に導かれた実験式[1]に基づいて実用的な係数を定めたものである[2][3]。一方、複合理論によって各構成素材の弾性係数とそれらの複合モデルを用いてコンクリートの弾性係数を理論的に評価しようとする試みがある。これらは弾性論に基づくものであって、評価の正確さを追及するほどその評価式は複雑になる[例えば4]。

本研究は複合理論によるコンクリートの弾性係数評価の可能性を探ることを意図したものである。構成素材のうち、セメント硬化体については、その強度や弾性的性質には未水和セメント、水和物、水和物結晶間の組織構造及び空隙などが影響し、これらに対してセメントの鉱物組成、粉末度、水セメント比、材令が影響を与えるとされている[5]。その弾性係数に対して例えば水セメント比と材令の影響に関する報告[6],[7]では指数関数の表現となっている。

ところで、複合理論の適用に当たっては各構成素材の弾性係数は簡単な表現が望ましい。そこで本論文はセメント硬化体の圧縮時の歪の弾性成分と非弾性成分について考察すると共に、初期弾性係数及び圧縮強度の1/3の応力度における割線弾性係数(ヤング係数)がその他の物理量すなわち圧縮強度、セメント水比、比重との関係においてより簡単な表現が可能かを検討したものである。ここでは検討対象を材令4週、標準水中養生直後の湿潤状態のセメント硬化体に限定した。

2. 材料、調合、試験体

材料：普通ポルトランドセメント、JIS R 5201(セメントの物理試験方法)による材令28日強度試験結果は、曲げ強度81.7-88.2 kgf/cm²、圧縮強度400-477 kgf/cm²であった。

調合：水セメント比は25、28、32.5^{*}、40^{*}、46.5、50^{*}、55%の7種。(＊印は2回)

混練、打ち込み：セメントペーストをセメント試験用モルタルミキサーで5分間練った後、湿布で覆って90分静置、改めて1分間練り直してからセメント試験用三連型枠2個に2層に

*1 福井大学教授 工学部環境設計工学科、工博(正会員)

*2 滋賀県庁

*3 福井大学大学院 工学研究科建設工学専攻

分けて打ち込んだ。混練直後はセメント粒子の沈降によって試験体の打ち込み方向の上下で不均一が生ずる懸念がある。できるだけその不均一を避けるためである。また同様の趣旨で水セメント比が 46.5 と 55 % の場合には急結剤を加えた場合も併せて行なった。この場合には 90 分練り置きは行なわず、練混後直ちに型枠に打ち込んだ（以下図中には黒塗りで示した）。

養生：その後の脱型、標準水中養生は JIS R 5201 の方法に準じた。

3 試験方法

圧縮試験に先立って、JIS A 1110（粗骨材の比重及び吸水率試験方法）に準じて、各試験体の比重を求めた。圧縮試験は図 1（a）に示すように JIS R 5201（セメントの物理試験方法）に準じて行なった。試験体は計 36 本である。この場合の圧縮強度を以下立方体強度という。

図 1（b）は歪み計測を行なった場合の加力方法を示す。試験体の両側面に検長 30mm の抵抗線歪

ゲージを貼り付けた。この試験方法による圧縮強度を以下柱体強度という。 載荷速度はほぼ毎秒 5 kgf/cm²、歪は荷重 250kgf または 150kgf ごとに計測した。ゲージ貼り付けのための部分的表面乾燥の他は極力試験体の乾燥を防ぐよう配慮した。試験体は計 36 本である。

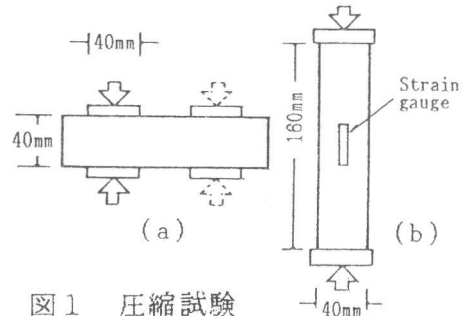


図 1 圧縮試験

4 解析方法

計測した応力度、歪度の関係をデータ数 36 組を用いて、式（1）で表すことにし、係数 A, B, C, D を求めた。相関係数はほとんどの場合 0.9999 以上であった。これより初期弾性係数 E₀ と圧縮強度の 1/3 の応力度における割線弾性係数（ヤング係数）E を算定した。

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

（s：応力度（kgf/cm²）， e：歪度）

（A は本来 0 であるが、s-e 曲線が原点を通らない場合の補正項である。）

5 実験結果の解析及び考察

5.1 圧縮強度

従来、コンクリートにおいては圧縮強度とセメント水比の間にはほぼ直線関係があるものと見做されている。立方体強度（F_c）及び柱体強度（F_p）各平均値とセメント水比（c/w）との関係を示したのが図 2 である。セメント水比が大きくなるほど、F_c、F_p 共にほぼ直線的に増加している。ただし、F_c では c/w = 4 の場合、強度の c/w に対する伸びは小さく、試験体の製作にあたって充填が十分でなかったことも考えられる。また、F_p は、c/w が 3.57 と 4.0 の場合に

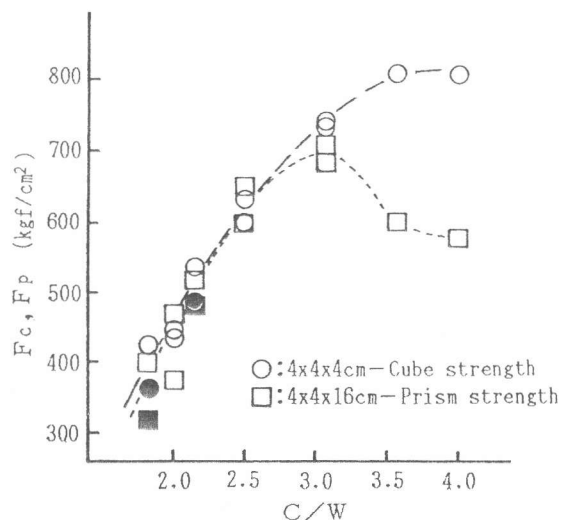


図 2 圧縮強度とセメント水比（C/W）

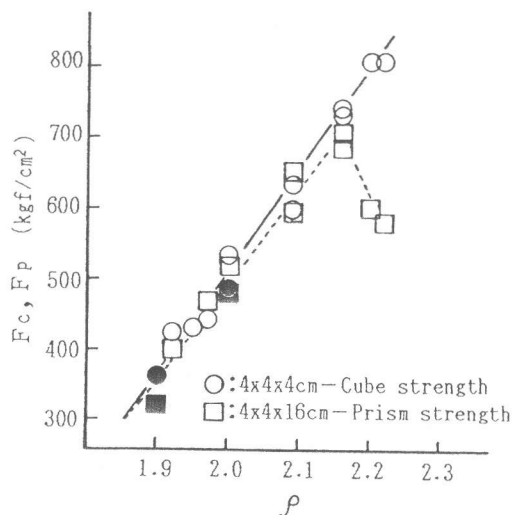


図3 圧縮強度と比重 (ρ)

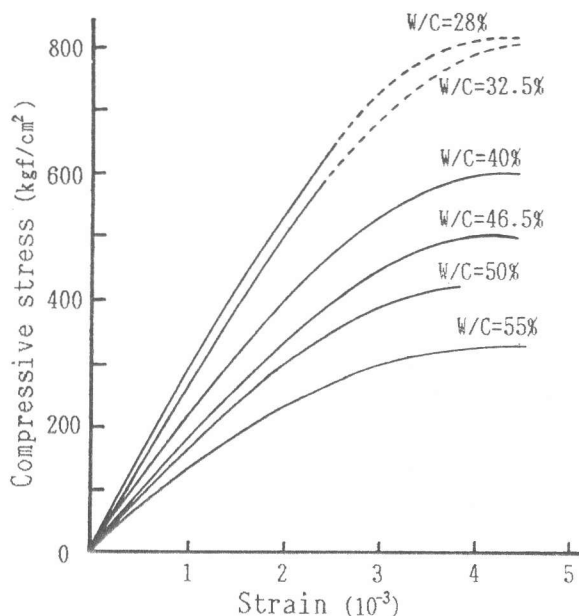


図4 セメント硬化体の応力度歪度関係

F_c より大きく低下した。試験体の不均一性あるいは偏心载荷などの影響によって応力が全断面にわたって十分に大きくなる前に局部破壊を生じた（未成熟破壊）可能性が大きい。

図3に圧縮強度と比重との関係を示した。圧縮強度は比重との関係においてもほぼ直線的関係にあることが明かとなった。回帰式と相関係数を後記の表1に示した。

5.2 応力度歪度関係

セメント硬化体の応力度歪度関係の例を図4に示す。これらは回帰式(1)で且つ原点を揃えたものである。実測曲線との差は図では識別できない程微小である。水セメント比の比較的大きい範囲では最大応力度まで歪を追跡できたが、水セメント比の小さい場合は未成熟破壊のため必ずしも最大応力度まで歪を計測できなかった。

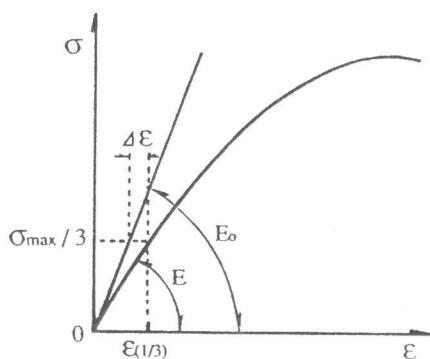


図5 応力度・歪度

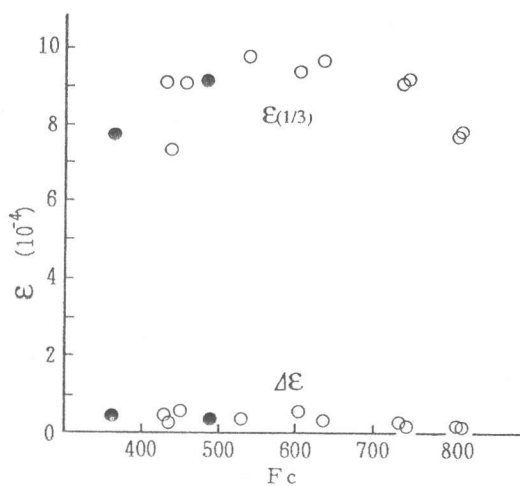


図6 $1/3 F_c$ における歪度 ($\epsilon_{(1/3)}$) および非弾性歪度 ($\Delta\epsilon$) と圧縮強度 (F_c)

圧縮強度の1/3の応力度における全歪度 ($\epsilon_{1/3}$) は圧縮強度に拘わらず $7.5-9.8 \times 10^{-4}$ の範囲に分布している。(図6参照)。また、図5に示す初期弾性係数より求められる歪度を全歪度より差し引いた分を非弾性歪度 ($\Delta\epsilon$) とすると、非弾性歪度は上記全歪度の $6.3-1.2\%$ の範囲にあった(図6参照)。これらの歪の算定にあたって、未成熟破壊と見られる場合の圧縮強度としては、柱体強度ではなく、立方体強度の85% ((柱体強度/立方体強度) の比[8]) を採用しておいた。

5.3 初期弾性係数 (E_0) 及びヤング係数 (E)

(1) セメント水比 (c/w) と E_0 及び E との関係

初期弾性係数及びヤング係数と c/w との関係を図示するにあたって、 c/w を横軸に、 E_0 及び E を縦軸にプロットするとき、 c/w の増加に対する E_0 及び E の増加は直線的とはならず、上に凸の曲線的傾向を呈する。そこで c/w の対数と E_0 、 E との関係を図示すると図7と図8である。セメント水比が4.0の場合に E の値が比較的小さいのは、その場合の圧縮強度が比較的低いことにも見られるように(図2参照) c/w を忠実に反映する試験体となっていなかったものと思われる。これを除外しても全体の傾向はやや上に凸の傾向はなくならないが、直線とみなして回帰式を求めた(後記表1参照)。

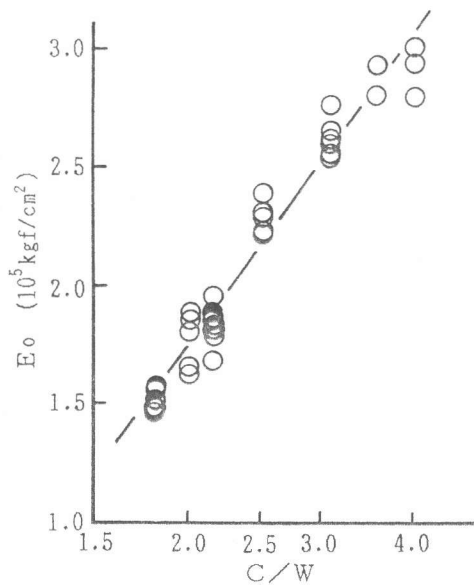


図7 初期弾性係数 (E_0) とセメント水比 (C/W)

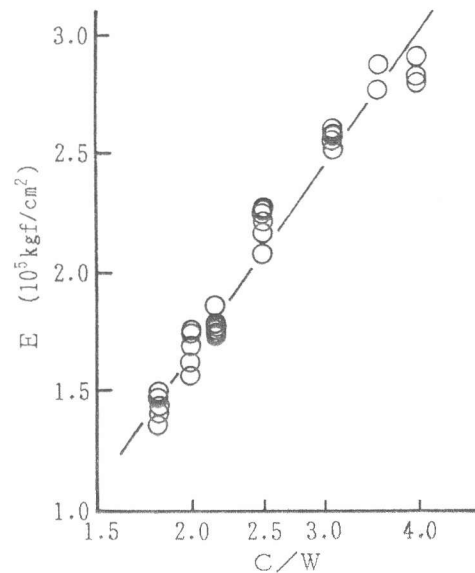


図8 ヤング係数 (E) とセメント水比 (C/W)

(2) 圧縮強度と E_0 及び E の関係

柱体強度は上述のように高セメント水比の場合に未成熟破壊と見られるものがあるので、ここでは圧縮強度として立方体強度を取り上げた。図9と図10に見られるように、圧縮強度の増加に対して E_0 、 E 共に大きくなり、両者の関係はほぼ直線的である。直線の回帰式を求めてみると、後記表1に示すように、 E_0 と E の勾配は極めてよく一致している。

(3) 比重と E_0 及び E との関係

先に圧縮強度は比重との関係において直線的であることを示した(図3参照)。そこで上述(2)から、 E_0 、 E は比重との関係においても直線的であることが推定される。図11と

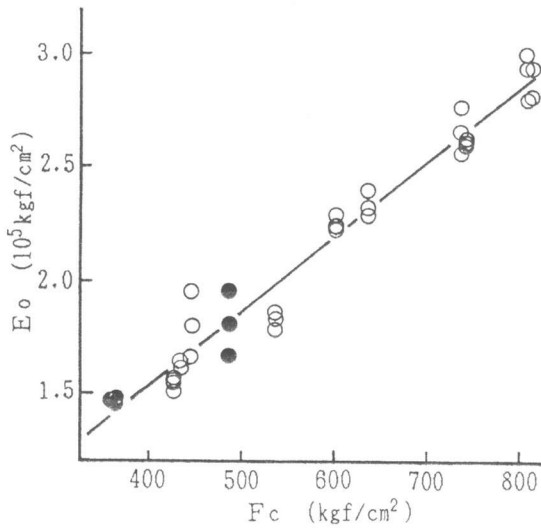


図9 初期弾性係数(E_o)と圧縮強度(F_c)

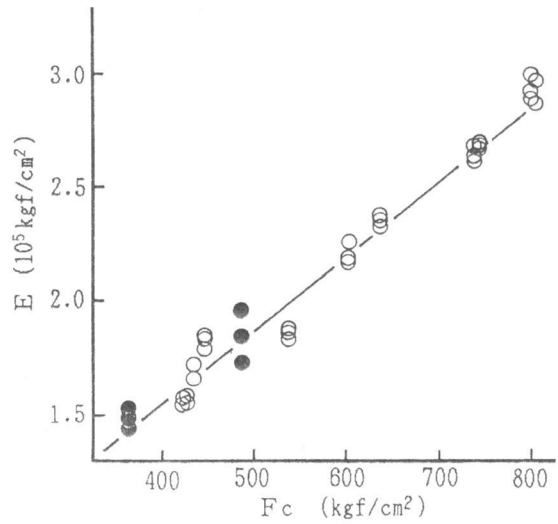


図10 ヤング係数(E)と圧縮強度(F_c)

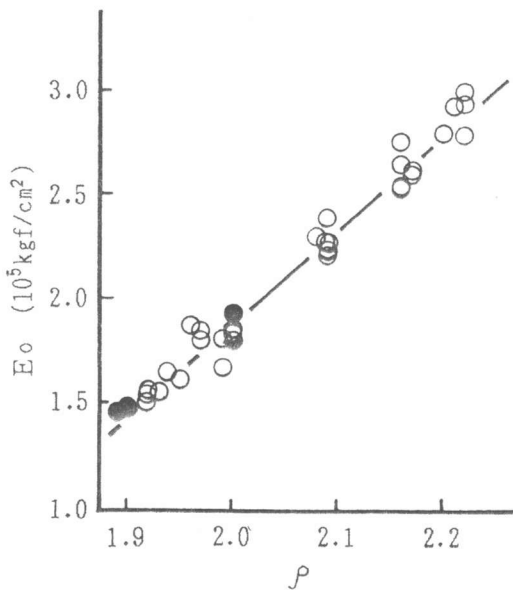


図11 初期弾性係数(E_o)と比重(ρ)

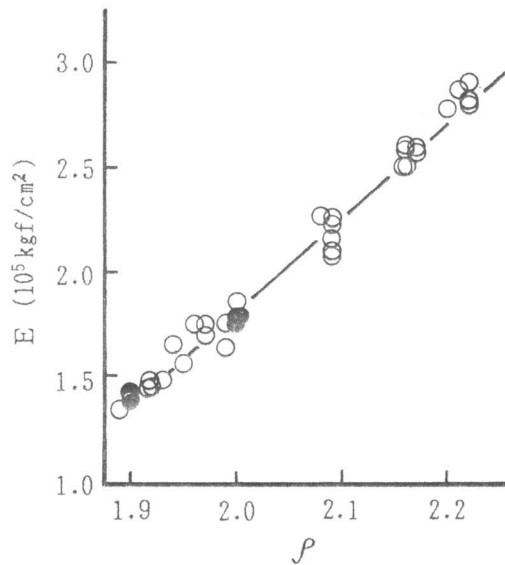


図12 ヤング係数(E)と比重(ρ)

表1 要因間の回帰式と相関係数

| 要因 | 回帰式 | 相関係数 | 備考 |
|------------------|----------------------------------|--------|----------------------|
| $F_c * \rho$ | $F_c = -2389 + 1446\rho$ | 0.9909 | ($\rho < 2.2$ の範囲) |
| $F_p * \rho$ | $F_p = -2249 + 1369\rho$ | 0.9783 | |
| $E_o * \log C/W$ | $E_o = 41890 + 440310(\log C/W)$ | 0.9763 | |
| $E * \log C/W$ | $E = 31970 + 445890(\log C/W)$ | 0.9824 | |
| $E_o * F_c$ | $E_o = 25210 + 323F_c$ | 0.9815 | |
| $E * F_c$ | $E = 17350 + 322F_c$ | 0.9862 | |
| $E_o * \rho$ | $E_o = -706850 + 448350\rho$ | 0.9889 | |
| $E * \rho$ | $E = -723340 + 452610\rho$ | 0.9919 | |

$F_c, F_p: (\text{kgf/cm}^2)$, $E_o, E: (\text{kgf/cm}^2)$

図1 2は比重と E_0 , E の関係を示したものである。同図によれば E_0 と E は比重との関係において直線的と見做すことが出来よう。それぞれの回帰式を表1に示す。

ここで表1において上記(1), (2), (3)について両者間それぞれの一次式の相関係数を比較する限りにおいては、 E_0 , E は比重との相関が最も高いと言える。

6 むすび

本論文はコンクリートの弾性係数の評価に複合理論適用の可能性を探る目的で、セメント硬化体の強度やヤング係数が圧縮強度、セメント水比、比重とどのような関係にあるかを実験的に検討したものであって、水セメント比 55-25% ($c/w=1.82-4.0$) のセメント硬化体の材令4週、湿潤状態の範囲において、表1に示すように比較的簡単な形の回帰式を求めた。これによれば 次の点が指摘できる。すなわち、

- 1) 圧縮強度はセメント硬化体の比重の大きいものほど大きく両者はほぼ直線的関係にある。
- 2) 初期弾性係数及びヤング係数はセメント水比の対数、立方体強度及び比重とそれぞれほぼ直線的関係にあり、実験結果の相関係数は比重との関係において最も大きい。

謝 辞

実験及び解析にあたり福井大学 脇敬一 文部技官の御協力を戴いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Adrin Pauw, A.: Static Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Density, Journal of ACI, Dec 1960, pp. 679-687.
- 2) 奥島正一、小坂義夫: 人工軽量骨材コンクリートの力学的性質、材料、Vol. 15, No. 157 (1966)
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準、同解説
- 4) 例えば 日本建築学会: 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)
- 5) 後藤孝治、魚本健人”ポルトランドセメントペースト硬化体の強度発現機構に関する研究”コンクリート工学論文集、第5巻、第1号、pp. 109-117, 1994. 1
- 6) Hirsh, T. J.: Modulus of elasticity of concrete affected by elastic moduli of cement paste matrix and aggregate, Journal of ACI, Proc. Vol. 59, No. 3, pp. 427-452, Mar. 1962
- 7) Mills, R. H. and Ono, K.: Estimation of elastic modulus of concrete from hydration parameters, Intern. Conf. on Mechanical Behavior of Materials, Kyoto, Abstracts Vol. 2, pp. 639-641, Aug. 1971
- 8) 岡田清、六車熙”コンクリート工学ハンドブック”朝倉書店 p. 377, 1981