

論文 コンクリートの弾性係数と近似複合理論

川上英男*

要旨：コンクリートの弾性係数は通常、圧縮強度、比重をパラメータとして評価されている。本論文は、母材モルタル及び粗骨材の弾性係数とその含有量をパラメータとして、著者の提案する近似的複合理論によってコンクリートの弾性係数を評価する可能性を、実験データにもとづいて検討したものである。

キーワード：コンクリート、弾性係数、複合モデル、粗骨材、

1. はじめに

コンクリート構造物の剛性評価にとってコンクリートのヤング係数は基本的要因である。コンクリートのヤング係数の評価法には二つの流れがある。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して評価するものであり、多くの実験データを参考にした関係式が提案されている[1]。もう一つは、複合理論によって各構成素材のヤング係数を用いて、複合体のヤング係数を表現するものである[2]。それらは図1に示す二相複合体の構造モデルを用いた弾性理論解であって、精緻なモデルとなるほど、式の表現は複雑となり、コンクリートに対する工学的な取り扱いに適さない。このことが、従来、コンクリートへの複合理論の適用が控えられてきた一因と考えられる。

ところで、コンクリートの圧縮破壊の形態はその起因によって骨材、母材、境界面の破壊に分けられ、圧縮強度もそれぞれに対応する。筆者は、同一モルタル母材に岩種の異なる粗骨材をそれぞれ用いたコンクリートでは、ヤング係数の大小は圧縮強度の大小に対応せず、むしろ粗骨材の弾性係数と対応するという実験結果を報告した[3]。この事実は、強度とヤング係数とは全く別の物理量であって、混合複合体としてのコンクリートのヤング係数は、それぞれの構成素材のヤング係数にもとづいて評価するのが適切であることを示している。そこで筆者は先に上記の複合理論式に近い値を与える近似複合理論式を提案した[4]。

本論文は、コンクリートの実験結果に対して、この近似複合理論式及び通常の圧縮強度をパラメータとする評価式との比較を行ない、近似複合理論の適用性を検討するものである。

2. 近似複合理論

筆者は先に、コンクリートのヤング係数評価に複合理論を用いることを狙いとし、その簡便な近似式を提案しその特徴を論じた。すなわち、粗骨材含有率の実態が、建築用コンクリートでは、川砂利コンクリートの場合 0.4-0.48、碎石コンクリートの場合 0.35-0.41 の範囲であることから、図1の二相複合体の構造モデル(c)(d)(e)の弾性理論解の曲線について粗骨材含有率 0.5 以下では、曲線の曲率は比較的小さく、直線に近いことに着目し、これを直線で近似した式(1)を示した(図2参照)。kは構成素材のヤング係数比(E_a/E_m)によって異なるが、二相複合体構造モデル(d)の理論値との差が小さくなるような値として、 $E_a/E_m = 2.0-3.5$ に対して 0.82-0.64 を示した[4]。

* 福井大学 工学部 環境設計工学科、工博 (正会員)

$$E_c = E_m + k(E_a - E_m)V \quad (1)$$

E_c, E_m, E_a : コンクリート、母材、骨材のヤング係数、

V : 骨材含有率、 k : 係数

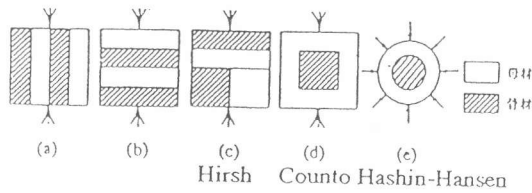


図1 二相複合モデル

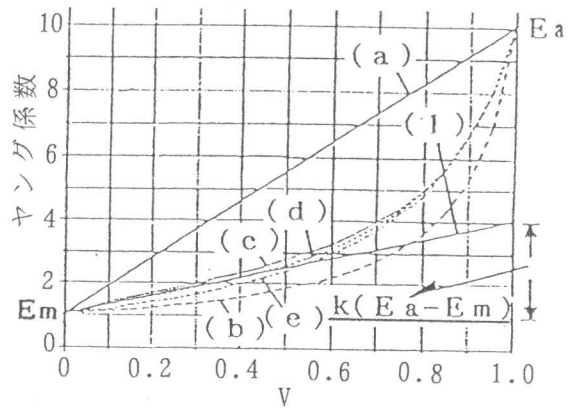


図2 複合モデル近似式

3. 実験概要

検討の対象とした実験の概要は次のようである。

材料：セメントは普通ポルトランドセメント。骨材は福井県九頭龍川産、砂：2.5mm以下、表乾比重2.56、砂利：5-25mm、一旦各粒径に篩い分けた後、改めて所定の粒度に配合した。各実験シリーズの粒度を図3に示す。

調合：水セメント比の範囲は 32.5-60%、砂利含有体積率は 10-67.3 % (表1参照)。

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(10φx20cm)のモルタル試験体も作製した。試験体はコンクリート276本、モルタル108本、計384本である。

養生：打ち込み2日後に脱型、標準水中養生を行なった。

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付け、各荷重段階ごとに歪度を計測した。

表1 調合および材齢

| 実験 No. | W/C (%) | 川砂利含有率 v (%/vol) | 材齢 (日) | モルタル調合 (絶対容積 l/m ³) セメント：川砂 |
|--------|--------------------|------------------|--------|--|
| 1 | 32.5, 40, 46.5, 55 | 45 | 28 | 1.0 : 1-1.7 |
| 2 | 40, 50 | 11.25- 60 | 7 | 1.0 : 2.0 |
| 3 | 40 | 12.4 - 67.3 | 14 | 1.0 : 2.0 |
| 5 | 50 | 14.5 - 61.5 | 7 | 1.0 : 2.0 |
| 6 | 50 | 45 - 60 | 14 | 1.0 : 2.0 |
| 7 | 40, 50, 60 | 10 - 55 | 28 | 1.0 : 1.5 |
| 8 | 40, 50, 60 | 10 - 60 | 28 | 1.0 : 1.5 |
| 9 | 50 | 45 - 60 | 28 | 1.0 : 2.0 |

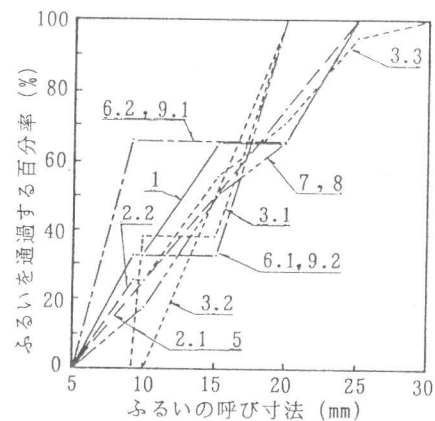


図3 砂利の粒度

4. 実験結果

コンクリートとモルタルの圧縮強度の1/3の応力度におけるヤング係数（割線弾性係数） E_c 、 E_m を算定した。実験5-9では計測した応力度歪度の関係を式（2）で表し、係数A, B, Cを求めた。相関係数はほとんどの場合0.999以上であった。これよりヤング係数を算定した。

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

s : 応力度 (kgf/cm²)

e : 歪度

それらの解析結果を、水セメント比 (W/C)、砂利含有率 (V)、圧縮強度 (Fc) と共に表2に示す。同表中の値は各調合の試験体（通常3-6本）の平均値である。

5. 考察

式（1）を用いてヤング係数の近似複合理論値を求めるには砂利のヤング係数 (E_a) が必要である。九頭龍川産の砂利は安山岩が多く、花崗岩、ひん岩、

砂岩、流紋岩その他が混在している。それら各岩種のヤング係数は玉石より採取したコアの圧縮試験によって求めた。岩種混合の砂利のヤング係数としては、 $5.09 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ を採用しておく。これは各2岩種の組み合わせに対して複合理論（図2-e）を順次適用して得た値である。kは E_a/E_m を参考にして0.8 とする。

（1）式によるヤング係数の算定値と実験値との関係を図4に示す。その回帰式（破線）のXの係数は0.86 その相関係数は0.83と高い値を示し、算定値と実験値の対応が認められる。図中の実線 $Y=X$ は算定値が実験値と一致する場合を表している。算定値より実験値の方が低い理由としては、砂利境界面の微視的な付着破壊の影響が現われたものとも考えられるが、これに関しては今後の課題である。

一方、コンクリートの圧縮強度をパラメータとするヤング係数の評価式として日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準に採用されている式（3）を比較のため示す。式中のgには各実測値（2.28-2.48）を、実測値の無い場合は2.3を用いた。Fcには圧縮強度を用いた。それらの算定値と実験値との関係を図5に示す。この場合、回帰式の相関係数は0.369と低く、

表2 実験結果

| 実験 No. | W/C (%) | V | E_m (10^5 kgf/cm^2) | E_c (kgf/cm^2) | Fc (kgf/cm^2) | 実験 No. | W/C (%) | V | E_m (10^5 kgf/cm^2) | E_c (kgf/cm^2) | Fc (kgf/cm^2) | | |
|--------|---------|-------|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------|---------|---|-----------------------------------|-----------------------------|--------------------------|------|-----|
| 1 | 32.5 | 0.45 | 2.94 | 3.72 | 504 | 6.1 | 50 | | 0.45 | 2.59 | 3.20 | 295 | |
| | 40 | | 2.51 | 4.18 | 419 | | | | 0.50 | | 3.27 | 286 | |
| | 46.5 | | 2.52 | 3.35 | 416 | | | | 0.55 | | 3.32 | 252 | |
| | 55 | | 2.40 | 3.29 | 369 | | | | 0.60 | | 3.52 | 223 | |
| 2.1 | 40 | 0.15 | 2.64 | 2.97 | 427 | 6.2 | 50 | | 0.45 | 2.59 | 3.20 | 343 | |
| | | | | 0.30 | 3.14 | | | | 375 | | 0.50 | 3.31 | 313 |
| | | | | 0.45 | 3.44 | | | | 346 | | 0.55 | 3.37 | 260 |
| | | | | 0.60 | 3.40 | | | | 357 | | 0.60 | 3.59 | 261 |
| 2.2 | 50 | 0.11 | 1.90 | 2.08 | 266 | 7 | 40 | | 0.10 | 2.46 | 2.42 | 519 | |
| | | | | 0.22 | 2.20 | | | | 238 | | 0.25 | 2.75 | 476 |
| | | | | 0.33 | 2.49 | | | | 229 | | 0.40 | 3.04 | 431 |
| | | | | 0.55 | 2.60 | | | | 203 | | 0.55 | 3.21 | 400 |
| 2.2 | 40 | 0.15 | 2.52 | 2.95 | 402 | 7 | 50 | | 0.10 | 2.02 | 2.50 | 395 | |
| | | | | 0.30 | 3.18 | | | | 378 | | 0.25 | 2.65 | 378 |
| | | | | 0.45 | 3.57 | | | | 341 | | 0.40 | 2.62 | 292 |
| | | | | 0.55 | 3.57 | | | | 341 | | 0.55 | 2.53 | 183 |
| 2.2 | 40 | 0.11 | 2.48 | 2.54 | 433 | 7 | 60 | | 0.10 | 1.83 | 1.69 | 316 | |
| | | | | 0.22 | 2.85 | | | | 397 | | 0.25 | 1.96 | 224 |
| | | | | 0.33 | 2.91 | | | | 357 | | 0.40 | 2.26 | 148 |
| | | | | 0.45 | 3.19 | | | | 345 | | 0.55 | 2.26 | 141 |
| 2.2 | 50 | 0.15 | 2.21 | 2.35 | 281 | 7 | 40 | | 0.10 | 2.37 | 2.41 | 517 | |
| | | | | 0.30 | 2.62 | | | | 251 | | 0.25 | 2.76 | 476 |
| | | | | 0.45 | 2.78 | | | | 238 | | 0.40 | 2.78 | 431 |
| | | | | 0.55 | 3.01 | | | | 200 | | 0.55 | 3.18 | 400 |
| 3.1 | 40 | 0.135 | 2.80 | 3.01 | 448 | 8 | 50 | | 0.10 | 2.03 | 2.52 | 395 | |
| | | | | 0.202 | 3.04 | | | | 431 | | 0.25 | 2.61 | 376 |
| | | | | 0.269 | 3.15 | | | | 425 | | 0.40 | 2.61 | 293 |
| | | | | 0.404 | 3.60 | | | | 388 | | 0.55 | 2.51 | 179 |
| 3.1 | 40 | 0.538 | 0.673 | 3.56 | 404 | 8 | 50 | | 0.10 | 2.03 | 2.52 | 395 | |
| | | | | 3.23 | 264 | | | | 0.25 | | 2.61 | 376 | |
| | | | | 3.23 | 264 | | | | 0.40 | | 2.61 | 293 | |
| | | | | 3.23 | 264 | | | | 0.55 | | 2.51 | 179 | |
| 3.2 | 40 | 0.124 | 2.80 | 2.95 | 456 | 8 | 60 | | 0.10 | 1.96 | 1.69 | 316 | |
| | | | | 0.186 | 3.01 | | | | 430 | | 0.25 | 1.94 | 223 |
| | | | | 0.248 | 3.25 | | | | 420 | | 0.40 | 2.18 | 156 |
| | | | | 0.371 | 3.74 | | | | 386 | | 0.55 | 2.18 | 135 |
| 3.2 | 40 | 0.495 | 0.619 | 3.49 | 403 | 8 | 60 | | 0.25 | 2.21 | 2.44 | 242 | |
| | | | | 3.82 | 345 | | | | 0.40 | | 2.72 | 187 | |
| | | | | 3.82 | 345 | | | | 0.40 | | 2.72 | 187 | |
| | | | | 3.82 | 345 | | | | 0.40 | | 2.72 | 187 | |
| 3.3 | 40 | 0.129 | 2.80 | 2.97 | 453 | 9.1 | 50 | | 0.45 | 2.56 | 3.19 | 295 | |
| | | | | 0.194 | 3.01 | | | | 429 | | 0.50 | 3.27 | 284 |
| | | | | 0.258 | 3.08 | | | | 398 | | 0.55 | 3.41 | 223 |
| | | | | 0.387 | 3.27 | | | | 398 | | 0.60 | 3.56 | 227 |
| 3.3 | 40 | 0.516 | 0.645 | 3.49 | 392 | 9.1 | 50 | | 0.45 | 2.56 | 3.14 | 342 | |
| | | | | 3.45 | 356 | | | | 0.50 | | 3.29 | 313 | |
| | | | | 3.45 | 356 | | | | 0.55 | | 3.37 | 257 | |
| | | | | 3.45 | 356 | | | | 0.60 | | 3.59 | 263 | |
| 5 | 50 | 0.153 | 2.06 | 2.16 | 300 | 9.2 | 50 | | 0.45 | 2.56 | 3.14 | 342 | |
| | | | | 0.305 | 2.32 | | | | 269 | | 0.50 | 3.29 | 313 |
| | | | | 0.457 | 2.60 | | | | 217 | | 0.55 | 3.37 | 257 |
| | | | | 0.615 | 2.06 | | | | 156 | | 0.60 | 3.59 | 263 |

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

E_c : ヤング係数 (kgf/cm^2), F_c : 設計基準強度 (kgf/cm^2), g : 単位容積重量 (t/m^3)

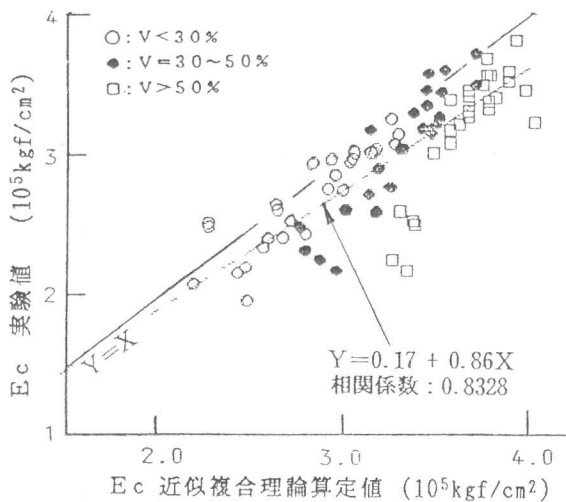


図4 近似複合理論算定値と実験値

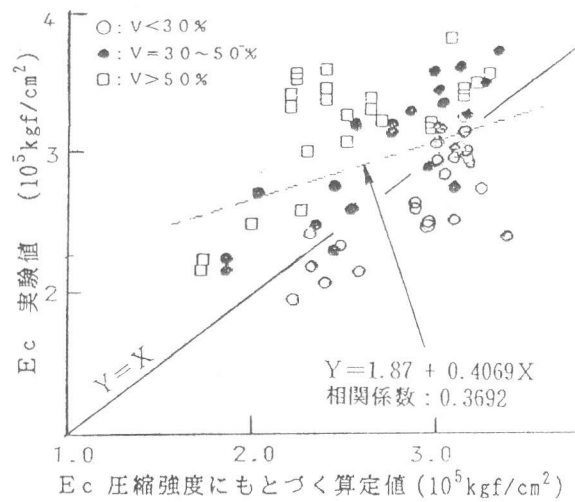


図5 圧縮強度にもとづく算定値と実験値

両者の関連性が極めて薄いことを示す結果となった。

以上の比較によれば、コンクリートのヤング係数評価においては、近似複合理論式による方が圧縮強度をパラメータとする方法に比べて、より広い範囲のコンクリートに対して実験値に近い値を与えることが明らかとなった。

6. 結論

ここで取り上げた実験の範囲（水セメント比：32.5-60%、圧縮強度：135-519 kgf/cm^2 ）では、コンクリートのヤング係数評価にあたって、骨材のヤング係数と含有率及び母材のヤング係数を用いた近似複合理論による方が、圧縮強度と単位容積重量をパラメータとする方法より相関性が高いことが明らかとなった。

謝辞

本研究に当たっては 福井大学技術官 脇 敬一氏のご協力を頂いた。実験結果は6年間の卒業論文の成果から採用した。それらの応力度歪度関係を改めて読み取り、解析するに当たっては学生小久保菊野君に負う所が大きい。ここに記して 各位に謝意を表します。

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) Newmann, K.: Composite materials-Concrete Systems-, Elsevier Publ. Co., pp. 336-452, New York 1966
- 3) 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
- 4) 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