

論文 多相複合理論に基づいたモルタルのヤング係数に関する一考察

塚原絵万*1・魚本健人*2

要旨: 細骨材の体積割合を変化させたモルタルの弾性変形を実験的に把握し、モルタルにおけるヤング係数の複合理論について検討を行った。その結果、構成材料であるセメントペーストのヤング係数は内部固体量で表現することが可能であり、またモルタルの複合則においては骨材界面に形成される遷移帯の影響を加味することが重要であることを示した。さらにモルタルをセメントペースト、細骨材、遷移帯の3相系材料として King's model を用いたヤング係数の推定を試みた。

キーワード: ヤング係数, 複合理論, 固体量, 遷移帯

1. はじめに

コンクリートの組織構成上の特徴として、不均質組織であること、組織内部に微細気孔を多数含むことなどが挙げられる。このために、コンクリート内部では応力の乱れが生じることとなり、骨材とマトリックスの界面における応力集中から付着ひび割れが発生・進展し破壊に至る。従って、コンクリートは低応力の段階から非線形的な挙動を示すと考えられている。

コンクリートの応力-ひずみ関係において、初期状態を弾性として線形的に評価したヤング係数は、往年数多く研究されている。通常、ヤング係数の推定では圧縮強度と密度をパラメータとした式が用いられている。しかし、コンクリートはセメント硬化体と骨材の二相系複合体であり、そのヤング係数は構成材料の性質と構成比によって異なるため、それらの影響を考慮した複合則の研究がなされてきた。なかでも骨材の弾性および骨材量の影響を加味した複合則についての研究^{1), 2)}は、新たに開発された種々のコンクリートの弾性評価もカバーしうるものである。しかし、構成材料中で唯一物質変化する材料であるセメントペーストの弾性的性質の評価は未だ確立されていない。また、コンクリートをモルタルと粗骨材、或いはセメントペーストと細骨材の二相系として表現した場合、

いずれにおいてもセメントペーストと骨材界面に形成される遷移帯は適当な補正係数により考慮されるのみであり、的確な表現がなされていない。

以上のことから、本研究ではモルタルの弾性変形を実験的に把握し、コンクリートの構成材料中で唯一経時変化する物質であるセメントペーストおよび骨材界面の影響に着目し、マトリックス中の固体量と遷移帯を考慮したヤング係数の複合則を検討した。

2. 複合則によるモルタルのヤング係数の推定

2.1 使用材料・配合および一軸圧縮試験概要

普通ポルトランドセメント、富士川産川砂を使用したモルタル及びセメントペーストの配合は、水セメント比 0.35, 0.40, 0.45, 0.55, 細骨材体積割合 (モルタル容積に対する割合) を $V_s=0, 0.35, 0.45, 0.55$ とした。供試体は $\phi 5 \times 10$ cm の円柱とし、所定の材齢 (3, 7, 14 日) まで 20℃ の水中養生を行った。

一軸圧縮試験の状況を図-1 に示す。圧縮試験は供試体上下面にシリコングリースを塗布した2枚のテフロンシート (厚さ 0.1 mm) を用い、端部摩擦を減じて行った。この減摩載荷方法により、均一な一軸圧縮応力の伝達を図った³⁾。載荷時に試験体側面に貼り付けたひずみゲージ (検長 60 mm

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 東京大学教授 国際・産学共同研究センター 工博 (正会員)

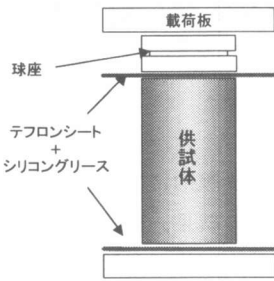


図-1 載荷方法

×1枚, 20mm×2枚)により, 圧縮ひずみを計測した。ヤング係数として, 圧縮応力-ひずみ曲線より割線弾性係数を求めた。試験体は各5本である。

2.2 セメントペーストのヤング係数の評価

(1) ヤング係数 E_{CP} の実験結果

図-2 にセメントペーストの水セメント比と各材齢におけるヤング係数 E_{CP} の関係を示す。セメントペーストのヤング係数は材齢を経るほど増加し, 水セメント比の増加とともに減少する傾向となった。ここでブリーディングの影響による水セメント比の減少を考慮するために, 実質の水セメント比(見かけの水セメント比)を測定した結果を図-3に示す。これは, 硬化体中に含まれるセメント重量を強熱減量により求め, 換算により得られるセメント体積と, もとの硬化体体積の差より水セメント比を求めたものである。図-3より, $W/C=0.5$ 以下のセメントペースト硬化体では, 配合上と見かけの水セメント比にほとんど違いが見られない。従って, 本研究で用いたセメントペースト硬化体は, 配合上の水セメント比を用いて評価してよいと考えた。

(2) セメントペースト中の固体の評価

セメントペーストのヤング係数 E_{CP} はセメントペースト中の固体成分の割合が支配的であると考えられる。そこで, 各水セメント比および材齢に対して, 水銀圧入式ポロシメータによる総細孔量の測定結果より, セメントペースト中の固体量 V_{sol} の算出を行う。

図-4 にセメントペーストの水和率と総細孔量の関係を示す。水和率は, 便宜的に材齢14日における結合水量に対する割合として表した。ここで,

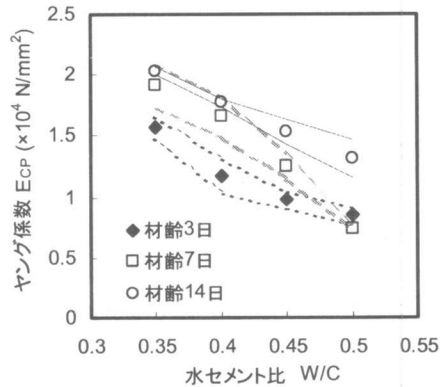


図-2 水セメント比とヤング係数 E_{CP} の関係

(*図中破線は標準偏差を示す)

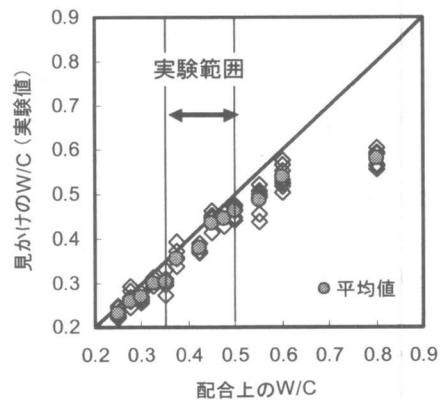


図-3 見かけの水セメント比

対象とするセメントペーストの体積に経時変化が無く同種のセメントにおける反応形態が同じであると仮定すると, 水和率と総細孔量の関係は線形にて表すことができる⁴⁾。さらに, 上記の仮定に基づいた場合, 異なる水セメント比における直線の傾きは等しくなる。この関係を用い, 近似直線により実験値を補正し, 各配合・材齢においてセメントペースト中に含まれる総細孔量の近似値を求めた。近似結果は図-4に示すとおりである。以上より, セメントペースト中の固体量 V_{sol} は単位体積と近似総細孔量の差から求めることができる。

近似により得られた固体量 V_{sol} とセメントペーストのヤング係数 E_{CP} の関係を図-5に示す。これより, 一軸圧縮試験から得られたヤング係数 E_{CP}

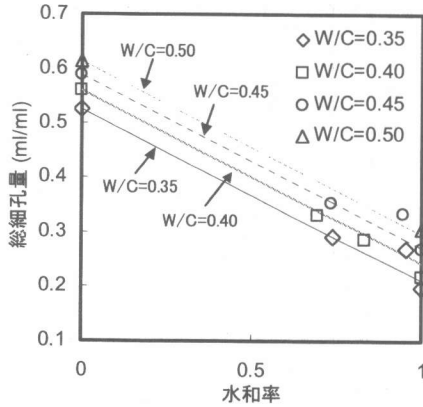


図-4 水和率と総細孔量の関係

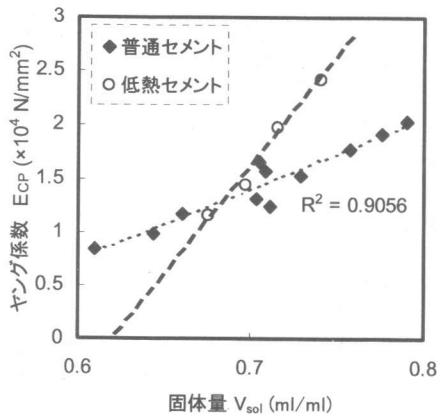


図-5 固体量 V_{sol} とヤング係数 E_{CP} の関係

と固体量 V_{sol} は直線関係にあることが分かる。従って、セメントペーストのヤング係数 E_{CP} はすべての配合・材齢において式(1)の様に表すことができる。

$$E_{CP} = a * V_{sol} + b \quad (1)$$

ここに、 a, b : 材料定数

ここで、低熱セメントを用いたセメントペースト(水セメント比 0.35, 材齢 3, 7, 14, 28 日)の固体量とヤング係数の関係を図-5 にあわせて示した。この結果から、今後多くの実験データを参考にすることが必要があるが、鉱物組成の異なるセメントにおいてもヤング係数 E_{CP} は固体量 V_{sol} と直線関係となる可能性が考えられる。

以上より、本研究ではヤング係数の複合計算を行う際、式(1)から推定される値をセメントペースト

のヤング係数 E_{CP} として用いることとした。

2.3 複合則によるモルタルのヤング係数の推定

(1) ヤング係数 E_m の実験結果

図-6 にモルタル中の細骨材体積割合 V_s と各材齢におけるヤング係数 E_m の関係を各水セメント比毎に示す。モルタルのヤング係数 E_m もセメントペーストと同様に、水セメント比の増加と共に減少する。水セメント比 0.35 の場合、細骨材体積割合の増加にともないヤング係数は増加する。しかし、その他の水セメント比の場合、細骨材体積割合 $V_s=0.45$ と 0.55 との間に顕著な差は見られず、細骨材体積割合 V_s が増すことにより、ヤング係数 E_m が小さくなっているものも見られる。

これらの実験結果を用いて、式(2)に示した Hashin - Hansen の複合理論⁵⁾に基づき、モルタルにおけるセメントペーストと細骨材の複合則を検討する。

$$\frac{E_m}{E_{CP}} = \frac{(1-V_s)E_{CP} + (1+V_s)E_s}{(1+V_s)E_{CP} + (1-V_s)E_s} \quad (2)$$

ここに、 E_m : モルタルのヤング係数

E_{CP} : セメントペーストのヤング係数

E_s : 細骨材のヤング係数

(2) 細骨材のヤング係数 E_s の推定

細骨材のヤング係数 E_s は式(2)に実験値をあてはめて求めることとした。ここで、複合モデルは弾性論に基づいて成立しており、セメントペーストと骨材の界面に生じるマイクロクラックや遷移帯などの要因を取り込んでいないため、式(2)から求めた骨材のヤング係数を用いたヤング係数の複合計算は実測値よりも大きな値となることが指摘されている¹⁾。しかし、遷移帯の形成はマトリックスの水セメント比が 0.40 以上の場合顕著であると報告されている。従って、遷移帯が形成されにくいと考えられる水セメント比 0.35 のみの材齢 14 日のヤング係数 E_m の実験値から、平均的な細骨材のヤング係数 E_s ($5.6 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$) を求めた。

(3) ヤング係数 E_m の複合則による推定結果

図-7 に示した複合則によるヤング係数 E_m の推定結果(材齢 14 日)より、式(2)は実験値を精度よく推定していることが分かる。しかし、水セメン

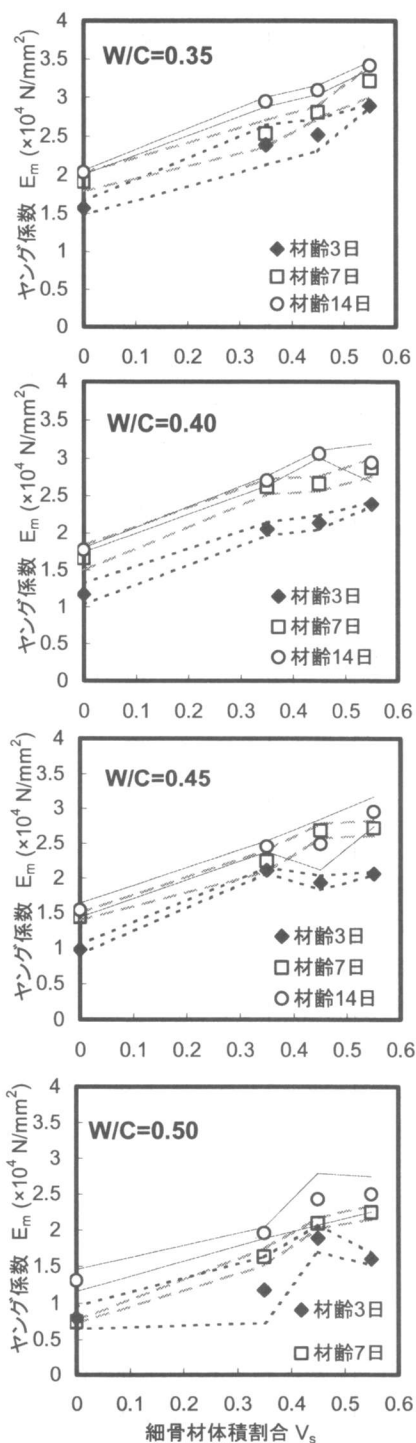


図-6 細骨材体積割合 V_s とヤング係数 E_m の関係

(* 图中破線は標準偏差を示す)

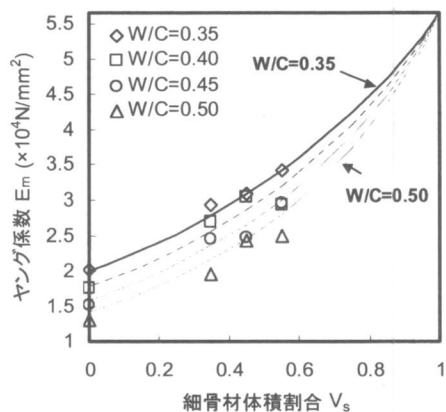


図-7 ヤング係数 E_m の推定結果

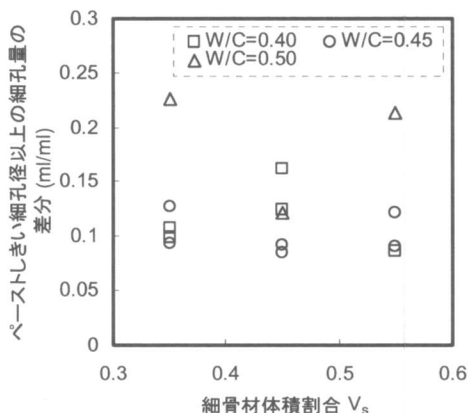


図-8 セメントペーストしきい細孔径以上の細孔量の差分と細骨材体積割合 V_s の関係

ト比が大きくなるにつれ、推定精度のばらつきがみられる。この要因として、本研究で用いた細骨材のヤング係数 E_s は、水セメント比 0.35 におけるモルタルのヤング係数 E_m (実験値) から平均的に求めたため、実際の骨材のヤング係数を正確に評価できなかったことが考えられる。しかし、前述の通り、遷移帯は水セメント比 0.40 以上の配合において形成されやすい。図-8 に同水セメント比のセメントペーストのしきい細孔径以上の領域におけるモルタル中のペースト分の細孔量とセメントペースト単体供試体のしきい細孔径以上の細孔量の差分と細骨材体積割合 V_s の関係を示す。既往の研究⁶⁾において、しきい細孔径以上の細孔量は細骨材体積割合の増加に伴い増加することが報告

されている。本研究の結果においては細骨材体積割合による影響はみられないが、セメントペースト単体供試体と比較して、モルタルでは細骨材の混入によって粗大な細孔が多く存在することは明らかである。このため、**図-6**に示したように、水セメント比 0.40 以上において細骨材体積割合 V_s の増加に伴わないヤング係数 E_m の低下がみられたと考えられる。

式(2)に示した Hashin-Hansen の複合理論では、遷移帯の影響は含まれず、骨材体積割合 V_s が大きくなるほど推定されたヤング係数 E_m は増加傾向を示す。しかし、実際は水セメント比および骨材量によってヤング係数は遷移帯の影響を受ける。従って、厳密なヤング係数 E_m の推定には、遷移帯の影響が顕著である領域とそれよりも骨材のヤング係数 E_s が卓越する領域、双方を表現できるような複合理論を確立することが必要である。

本研究では以上の見解から、King's model⁷⁾を用いたモルタルのヤング係数 E_m の推定を行い、モルタルを細骨材・セメントペースト・遷移帯の3相系として取り扱ったヤング係数の複合理論について検討を行った。

3. King's modelを用いたヤング係数 E_m の推定

3.1 King's model の概要

King は物質移動現象を resistor network を用いることにより表現した⁶⁾⁷⁾。これは、セメント硬化体全体の拡散係数を硬化体中の要素の抵抗の違いと捉え、直列・並列つなぎの違いを考慮しながら全体の抵抗を算出する手法である。

図-9に示すように4要素に異なる拡散係数が与えられた場合、ネットワークを構成するために分割すれば、下図の実線部分が移動経路として存在することが考えられる。ここで、 P_1 , P_2 間の横方向の移動を考えれば点線部分のネットワークを無視することができ、結果として**図-10**に示すようなネットワークが構成される。三角形要素と線分要素の変換を行い、直列つなぎと並列つなぎのネットワークとして捉えると、4つの異なる拡散係数を持った要素全体の拡散係数は、最終的に式

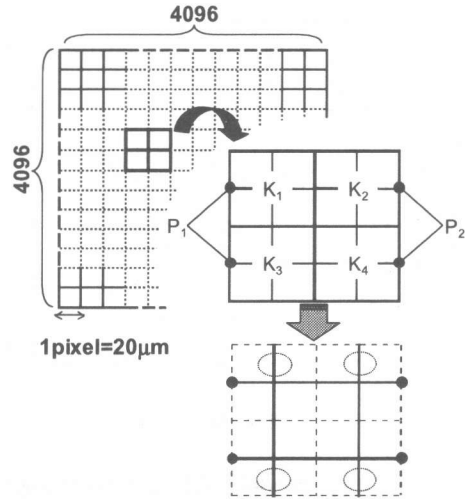


図-9 要素間のネットワーク化の概念

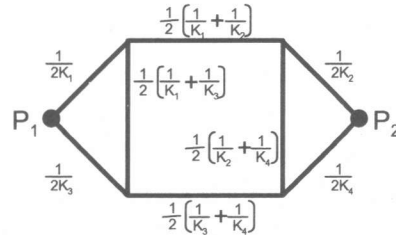


図-10 King's model おける
要素間のネットワーク化

(3)として表すことができる。

$$\begin{aligned}
 & f(K_1, K_2, K_3, K_4) \\
 &= 4(K_1 + K_3)(K_2 + K_4)[K_1 K_2 (K_3 + K_4) + K_3 K_4 (K_1 + K_2)] \\
 & \times \{ [K_1 K_2 (K_3 + K_4) + K_3 K_4 (K_1 + K_2)] [K_1 + K_2 + K_3 + K_4] \\
 & + 3(K_1 + K_2)(K_3 + K_4)(K_1 + K_3)(K_2 + K_4) \}^{-1} \quad (3)
 \end{aligned}$$

本研究では**図-9**に示すモデル(1pixel=20 μ m, 4096 \times 4096)にて解析を行った。

3.2 遷移帯を考慮したヤング係数 E_m の推定

本研究では King's model を「流れ」に対する抵抗ではなく、変形に対する抵抗、すなわち式(3)中の拡散係数 K をセメントペースト、細骨材および遷移帯各相のヤング係数として適用させ、特に遷移帯部分のヤング係数の複合理論への導入を試みた。

ヤング係数 E_m の推定は、最も遷移帯の影響が顕著であると考えられる水セメント比 0.50、材齢 14 日を対象として行った。セメントペーストのヤ

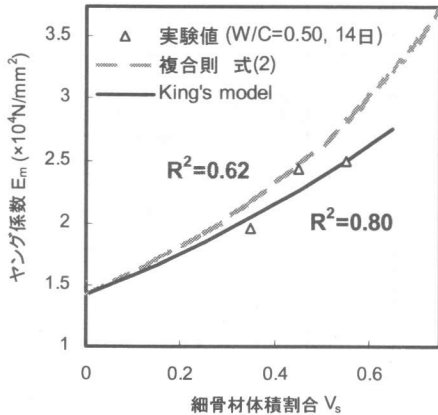


図-11 King's model および複合式(2)によるヤング係数 E_m の推定結果

ヤング係数 E_{CP} は固体量 V_{sol} と E_{CP} の関係を表す式(1)から求め、細骨材ヤング係数 E_s は水セメント比 0.35 の実験値から King's model により推定された値 $7.1 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ を用いた。細骨材は実際に用いた細骨材の粒度分布を参考に、粒径 0.3, 0.6, 1.2 mm の 3 種、分布割合は 3:4:3 とし、要素内にランダムに配置されるよう設定した。遷移帯は 0.6, 1.2mm の細骨材の周囲に存在するとし、遷移帯厚さは $20\mu\text{m}$ 一定(1pixel) と仮定した⁶⁾。遷移帯のヤング係数は実験データを基とした感度解析により、 $1.7 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ とした。

図-11 に King's model によるヤング係数の推定結果を示す。これより、遷移帯を構成要素に含む推定方法は、式(2)で表される複合則と比較して精度の良い結果がえられることが示された。しかし、King's model においても式(2)による推定と同様に、実験結果で得られた細骨材体積割合の増加に反してヤング係数の低下・停滞傾向がみられるという現象を表現することはできなかった。

本研究ではモルタルをセメントペースト、細骨材、および遷移帯の 3 相系材料として扱い、変形に対する遷移帯の量や連結性の影響とその他 2 相との兼ね合いを表現するべく、複合則として King's model を用いた。しかし、式(2)と同様に最終的には平均的なモルタルのヤング係数のみが得

られるため、実験値の厳密な推定は不可能であった。今後、現象を精度良く表現する推定手法の発展が望まれる。

4. まとめ

本研究により得られた成果を以下に示す。

- (1) セメントペーストのヤング係数は硬化体中の固体量により推定が可能である。
- (2) 遷移帯はモルタルのヤング係数に少なからず影響を与え、複合則によるヤング係数推定に誤差を招く。
- (3) モルタルをセメントペースト、細骨材、遷移帯 3 相系として扱った King's model は、複合式(2)と比較して精度良くヤング係数の推定を行うことができた。

謝辞: 本研究を行うにあたりご協力頂いた東京大学生産技術研究所魚本研究室 助手 加藤佳孝氏、芝浦工業大学 石山哲也君に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 清原千鶴, 松永静也, 佐藤嘉昭, 上田賢司: コンクリートのヤング係数の推定式, コンクリート工学論文集, Vol. 21, No. 2, pp.601-606, 1999.7
- 2) 川上英男: コンクリートの弾性係数と複合理論の適用, コンクリート工学論文集, Vol. 21, No. 2, pp.619-624, 1999.7
- 3) 陶佳宏, 松下博通, 鶴田浩章, 川原基嗣: 載荷面摩擦が一軸圧縮強度試験に与える影響, 土木学会年次学術講演会講演概要集 V, pp.872-873, 1999.9
- 4) 植松敬治, 魚本健人: 鉱物組成に着目したセメントペーストの細孔構造, 土木学会年次学術講演会講演概要集 V, pp.188-189, 1999.9
- 5) Z. Hashin: The Elastic Modulus of Hetero - homogeneous Materials, J. of App. Mech., Vol.29, No.1, pp.143-150, Mar.1962
- 6) 加藤佳孝: 遷移帯がコンクリートの物質移動現象に及ぼす影響: 東京大学学位論文, 1999
- 7) King, P. R.: The Use of Renormalization for Calculating Effective Permeability, Transport in porous media, 4(1), pp.37-58, 1989