

遷移帯を考慮したモルタルのヤング係数の推定に関する研究

Estimation Method of Young's Modulus of Mortar Including Transition Zone at Aggregate Cement Paste Interface

塚原 絵万*・加藤 佳孝*・魚本 健人**

Ema TSUKAHARA, Yoshitaka KATO and Taketo UOMOTO

1. はじめに

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これまで数多くなされてきた。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について検討した。

2. 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 $\phi 5 \times 10 \text{ cm}$ の円柱とし、所定の材齢（3, 7, 14 日）まで 20°C 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。

3. セメントペーストのヤング係数 E_{CP} の評価

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

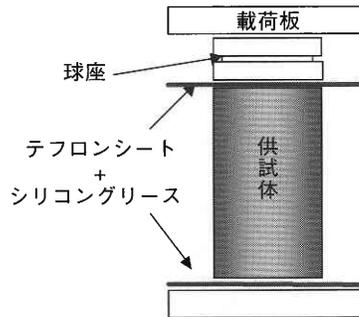


図1 載荷方法

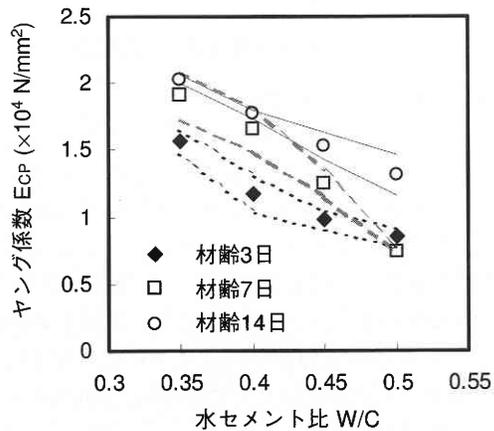


図2 水セメント比とヤング係数 E_{CP} の関係

*東京大学生産技術研究所 物質・生命部門

**東京大学国際・産学共同研究センター

研究速報

減少する傾向となった。ここで、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} の算出を行った。

図3にセメントペーストの水和率と総細孔量の関係を示す。水合率は、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。水合率と総細孔量の関係は、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、直線によって近似することができる。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。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。

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4に示す。これより、ヤング係数 E_{CP} 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)の様に表示することができる。

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

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4にあわせて示した。この結果から、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} と直線関係となることが考えられる。

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。

4. モルタルのヤング係数 E_m の推定

4.1 ヤング係数 E_m の測定結果

図5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伴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 が小さくなっていくものも見られる。

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⁴⁾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

4.2 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

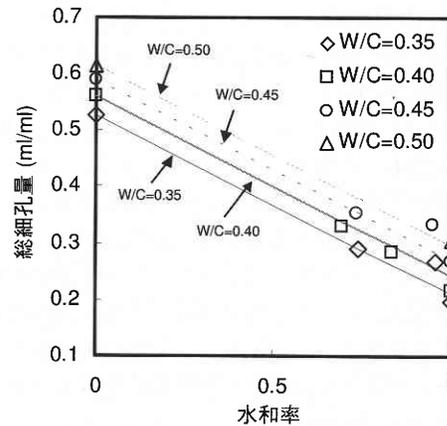


図3 水合率と総細孔量の関係

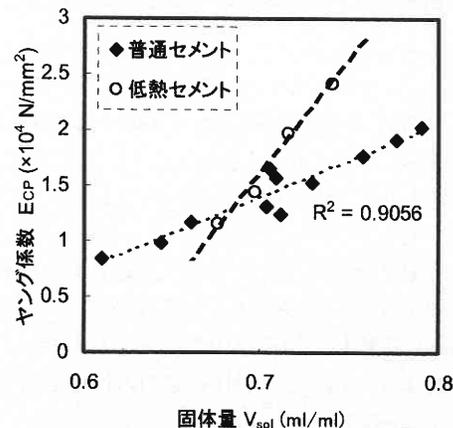


図4 固体量 V_{sol} とヤング係数 E_{CP} の関係

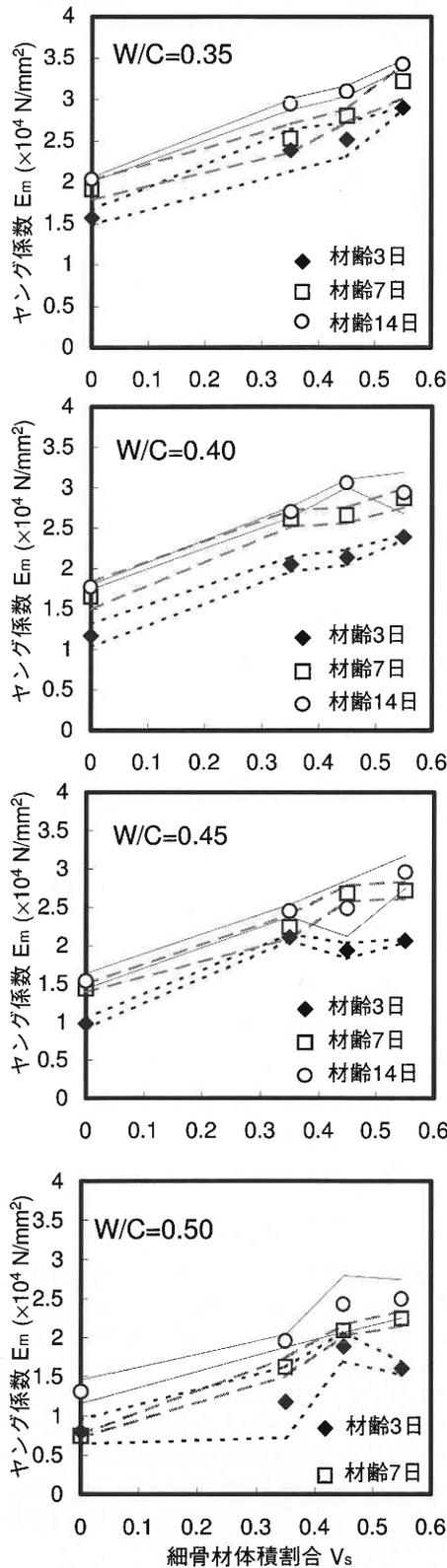


図5 細骨材体積割合 V_s とヤング係数 E_m の関係

比 0.35, 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.

4.3 複合則を用いたヤング係数 E_m の推定

図 6 に示した式(2)によるヤング係数 E_m の推定結果 (材齢 14 日) は, 水セメント比が大きいほど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 7 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⁵⁾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

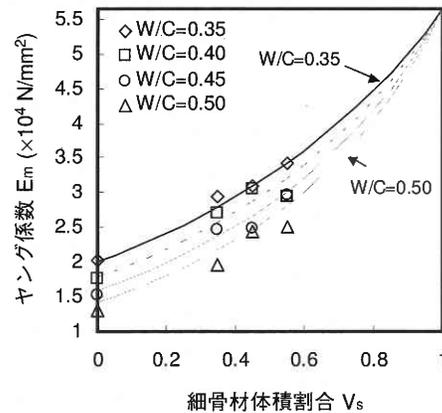


図6 ヤング係数 E_m の推定結果

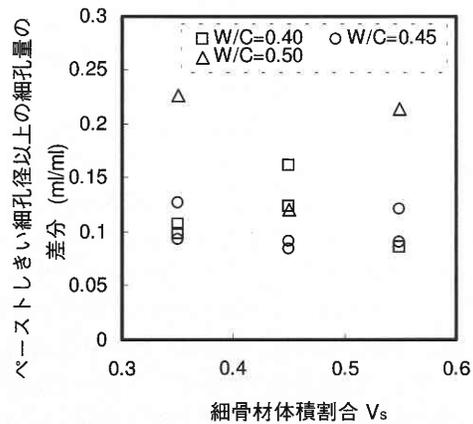


図7 セメントペーストしきい細孔径以上の細孔量の差分と細骨材体積割合 V_s の関係

研究速報

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5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 の増加に依らないヤング係数 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 model⁶⁾を用いてモルタルのヤング係数 E_m の推定を行い、遷移帯を考慮したヤング係数の複合則について検討を行った。

5. 遷移帯を考慮したヤング係数 E_m' の推定

Kingは物質移動現象をresistor networkを用いることにより表現した。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⁶⁾。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、すなわちヤング係数として適用させ、遷移帯の複合則への導入を試みた。

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。細骨材の粒径は実際に用いた細骨材の粒度分布を参考に、0.3, 0.6, 1.2 mmの3種とし、要素内にランダムに配置されるよう設定した。遷移帯は粒径0.6, 1.2 mmの細骨材の周囲に存在するとし、遷移帯厚さは $20 \mu\text{m}$ 一定と仮定した⁵⁾。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8にKing's modelによるヤング係数の推定結果を示す。これより、遷移帯をモルタルの構成要素に含んだ推定方法は、式(2)で表される複合則と比較して精度の良い結果が得られることが示された。しかし、細骨材体積割合の増加に反してヤング係数の低下・停滞するという現象を表現することはできなかった。これは、結局King's modelも構成要素の量に支配される平均的な値としてのみヤング係数を算出しているに過ぎないためである。これより、全体の

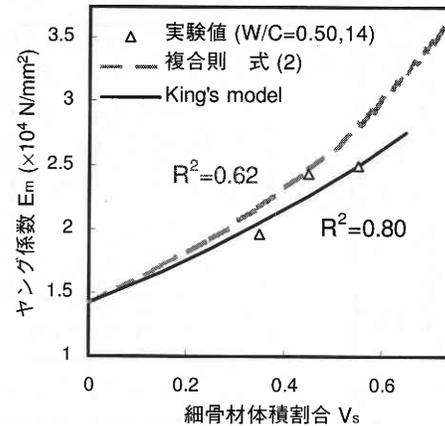


図8 King's modelおよび複合式(2)によるヤング係数 E_m の推定結果

平均的な変形特性にとって局所の変形特性が支配的となる領域が存在することが考えられる。従って、ある骨材量に達したときのヤング係数の停滞傾向を表現するためには、3相モデルにて変形解析を行い、全体のヤング係数を算出する必要があると考えられる。

6. 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可能である
- (2) 遷移帯はモルタルのヤング係数に影響を与え、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るが、ある骨材量以上で生じるヤング係数の停滞傾向を表現することは出来ない。このためには、3相モデルにて変形解析を行う必要がある。

(2000年6月12日受理)

参 考 文 献

- 1) 清原千鶴, 他: コンクリートヤング係数の推定式, JCI 年次論文集, 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, JCI 年次論文集, Vol. 21, No. 2, pp. 619-624, 1999.7.
- 3) 陶佳宏, 他: 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) Z. Hashin: The Elastic Modulus of Hetero-homogeneous Materials, J. of App. Mech., Vol. 29, No. 1, pp. 143-150, 1962.3.
- 5) 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.
- 6) King, P.R.: The Use of Renormalization for Calculating Effective Permeability, Transport in porous media, 4(1), pp. 37-58, 1989.