

微小硬さ試験のセメントペーストの弾性評価への適用に関する研究

A Study on Elastic Phenomena of Hardened Cement Composite Based on Indentation Test

塚原 絵万*・加藤 佳孝*・魚本 健人**

Ema TSUKAHARA, Yoshitaka Kato and Taketo UOMOTO

1. はじめに

現在、コンクリート構造物の設計体系が仕様規定から性能規定へと移行しつつあるが、これに伴い、要求性能に対して多種多様な材料が使用されることが考えられる。本研究ではこのことを踏まえ、圧縮試験等によりコンクリートの強度等特性値を把握するのではなく、構成材料に依存した強度・変形性能の汎用的表現法の確立を目標としている。

本報では、構成材料に基づいた形でセメントペースト硬化体の弾性的性質を表現することを目的とした。ここでセメントペーストを2相系としてとらえた場合、その変形挙動は固体相と空隙相とが合わさった挙動と考えることができる。今回は特に、①セメントペースト中の固体相の鉱物組成（セメント種類）、②固体相中の未水和・水和生成物の比率（水和率）に着目し、試験方法が比較的簡単である微小硬さ試験を用いた材料特性の評価について基礎的な検討を行った。

2. 測定項目

試験体は、微小硬さおよび総細孔量・水和率測定用として2×2×8 cm、圧縮試験用としてφ5×10 cmの型枠により作製した。

総細孔量は試験体の表乾状態時と絶乾状態時の質量差から求めた。試験体を真空吸引により飽水にした後、表面の水分を除去したものを表乾状態とし、105°C環境温度下で恒量になるまで乾燥させたものを絶乾状態として質量測定を行った。水和率は強熱減量法により測定し、理論結合水量に対する実測結合水量割合として表した。

微小硬さ試験体は高さ約1 cmに切断した後、切断面を鏡面研磨し測定面とした。各試験体について鋼球圧子

(φ1 mm)を用いて、負荷荷重（設定試験力）2.0 N、保持時間5秒とした負荷-除荷試験を行い、試験力と押し込み深さを測定した。図1に試験力-押し込み深さ曲線の一例を示す。図1除荷過程における試験力-押し込み深さ曲線より試験体の弾性変形領域を把握することができる¹⁾。本研究では、除荷過程における最大試験力時からその50%の試験力時における試験力-押し込み深さ関係を用いてセメントペーストの弾性変形を評価した。ここで、微小硬度計から求めるセメントペーストの弾性評価方法について説明する。除荷時の試験体を図2のように考える。ここで、 y_i は試験

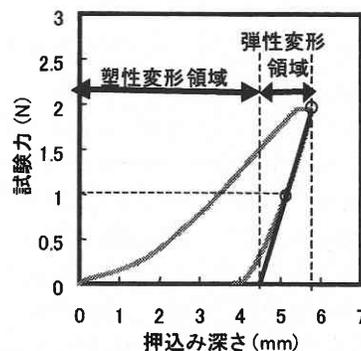


図1 試験力-押し込み深さの一例

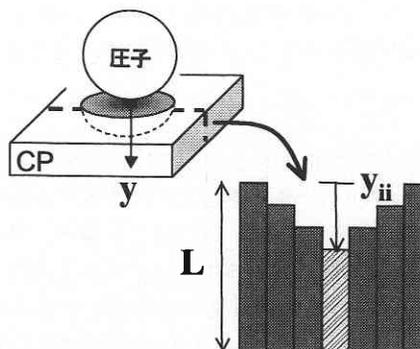


図2 試験体断面のモデル化

*東京大学生産技術研究所 物質・生命大部門

**東京大学国際・産学共同研究センター

より得られる押し込み深さ, L は変位を受け持つ有効長とする. 弾性係数 E が各要素同一で表せるとすれば, 各要素に関して以下の式が成立する.

$$\sigma_i = \epsilon_i E = \frac{y_{ii}}{L} E \dots\dots\dots (1)$$

ここで, y_{ii} : 各要素の押し込み深さ
これを試験時の全接触面積について考えると, 試験時対象範囲内の全応力-ひずみ関係は以下の様に表せる.

$$\sum \sigma_i = \frac{E}{L} \sum y_{ii} \dots\dots\dots (2)$$

本研究では, 右辺に示す E/L (単位: $N/mm^2/mm$) をセメントペーストの変形性能の指標として用いることとした. ここで, 有効長 L は試験力, 試験体により変化することが容易に考えられるが, L がどの様に变化しても E/L は相対的に弾性変形を示すと考えられる. 本研究では, セメント硬化体の微小領域における変形性能の評価手法として微小硬さ試験の適用の是非を把握することを目的としているため, 有効長を厳密に求めることはできず, これに関しては今後の課題とした.

また, 一軸圧縮試験の際, 圧縮ひずみを計測し, 圧縮応力-ひずみ曲線より割線弾性係数を求めヤング係数とした.

3. 鉱物組成に関する検討

3.1 試験体配合・養生

ここで用いたセメントペーストの配合は, 普通ポルトランドセメントは $W/C = 0.25, 0.35, 0.50, 0.60$, 低発熱ポルトランドセメントは $W/C = 0.25, 0.35, 0.50$ とした. いずれの供試体も, 打設 24 時間後に脱型し, 材齢 28 日まで標準水中養生を行った.

3.2 E/L と水メント比および総細孔量の関係

図 3 に水メント比と E/L との関係を示す. 普通ポルトランドセメント, 低熱ポルトランドセメントともに, 水メント比の増加に伴い E/L は減少する. これより, E/L は水メント比に依存することが考えられる. 図 4 に総細孔量と E/L の関係を示す. ここで, 図 5 は総細孔量と圧縮試験より求めたヤング係数 E の関係を示したものである²⁾. これより, 圧縮試験から求めたヤング係数 E は, 総細孔量との関係においてセメント種類が区別できることが分かる. 図 4 においても同様であり, 普通セメントと低熱セメントで総細孔量の増加に伴う E/L の減少傾向が異なっている. 従って, 同材齢・異なる水セメント比のセメントペースト間で比較した場合, 微小硬度計より求めた E/L はセメント種類, つまり鉱物組成の違いを表現できるといえる.

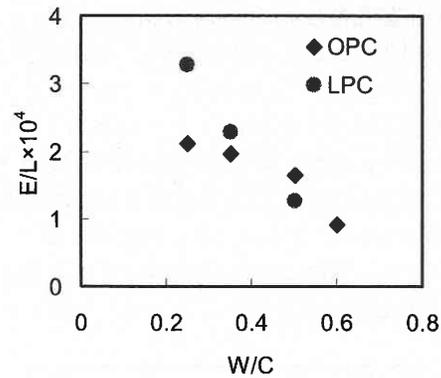


図3 水メント比と E/L の関係

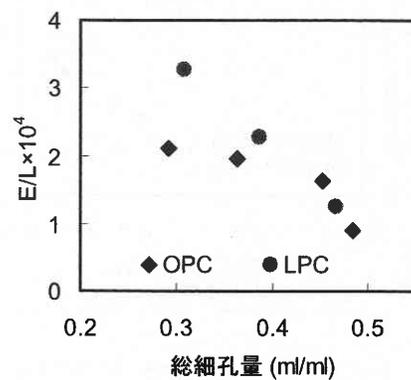


図4 総細孔量と E/L の関係

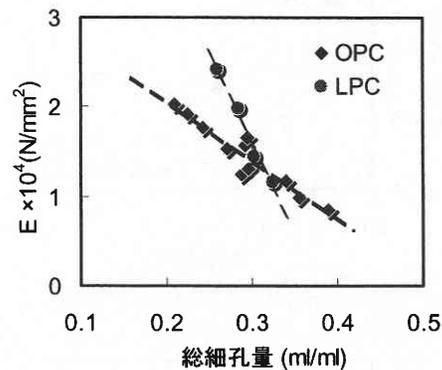


図5 総細孔量と E の関係²⁾

4. 水和率に関する検討

4.1 試験体配合・養生

ここで用いたセメントペーストの配合は, 普通ポルトランドセメント $W/C = 0.35, 0.50$ である. 打設 24 時間後に脱型し, 材齢 7, 14, 28, 56, 91 日まで標準水中養生を行った. なお, 各セメントペーストの水和率・総細孔量は, 通常得られるセメントペーストの経時変化と同様に材齢の増加に従って増加・減少した.

研究速報

4.2 E/L と総細孔量および水和率の関係

図6に総細孔量とE/Lの関係を示す。図4に示した同材齢・異なるW/C間での比較と異なり、各水セメント比において総細孔量が増加するに従い、E/Lは増加する結果となった。これより、同水セメント比の材齢の異なるセメントペースト間で比較した場合、細孔量よりも固体相の性質がE/L値に影響を及ぼしていることが考えられる。

図7に各水セメント比における水和率と圧縮試験より求めたヤング係数Eの関係を示す。ここで、セメントペース

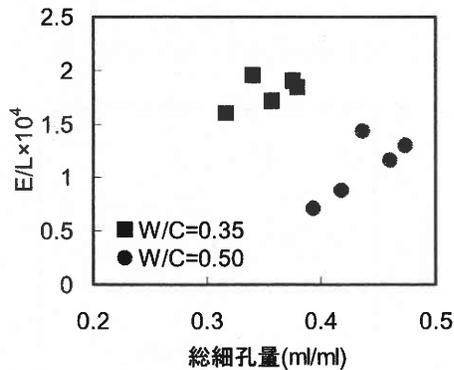


図6 総細孔量とE/Lの関係

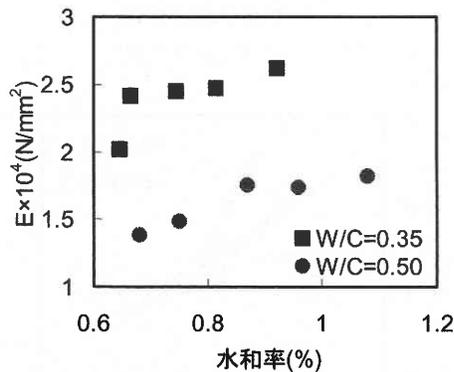


図7 水和率とヤング係数Eの関係

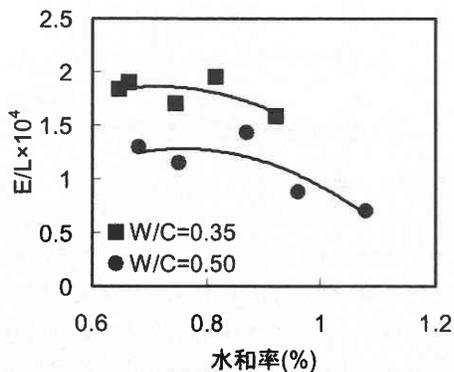


図8 水和率とE/Lの関係

ト中の固体相が未水和セメントと水和生成物からなっていると考えると、未水和セメントの方が水和生成物よりも硬いため、水和率が高いほど変形性能は低くなることが考えられる。図7においては水セメント比の差は明らかだが、水和率の増加によるヤング係数の変化は顕著には見られなかった。これは、圧縮試験というマクロな試験方法では固体相の性質は試験結果に反映されず、図5に示したようにセメントペースト中の細孔量が全体の弾性挙動に影響を及ぼしていることが考えられる。しかし、図8に示した水和率とE/Lの関係においては、どちらの水セメント比においても、水和率の増加に伴ってE/Lは減少する結果となった。つまり、比較の対象がマイクロである微小硬さ試験より求めたE/L値は固体相の性質を反映した結果と捉えることができる。また、同図における水セメント比0.35と0.50のE/L値の差は、配合上の総固体量(総細孔量)の差からなるものであり、図3において示したE/Lの水比依存性を反映したものと考えることができる。

以上より、水和率とE/Lとの関係において、水セメント比、つまり総細孔量、また鉱物組成、つまりセメント種類を考慮すれば、材料特性に依存した変形性能の一般化が可能になると考えられる。

5. ま と め

本研究により得られた成果を以下に示す。

- (1) 超微小硬度計を用いた負荷-除荷試験からセメントペーストの弾性挙動を評価する手法を提案した。
- (2) E/Lと細孔量の関係は、同材齢におけるセメントペーストのセメント種類を表現することができる。
- (3) E/Lは未水和・水和生成物の比率を表現することができる。
- (4) 材料特性に依存した変形性能の一般化の可能性を示した。

(2000年10月5日受理)

参 考 文 献

- 1) M. Sakai: Energy Principle of The Indentation-Induced Inelastic Surface Deformation and Hardness of Brittle Materials, Acta metal. mater, Vol.14, No.6, pp. 1751-1758, 1993.
- 2) 塚原絵万, 魚本健人: 多相複合理論に基づくモルタルの変形性状に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 22 No. 2, pp. 481-486, 2000.