

セメント系材料の微細構造の同定手法に関する問題点の抽出

The influence of microstructure analysis method for cementitious materials

東京大学 特任講師 五十嵐豪

（研究計画ないし研究手法の概略）

本検討の目的および意義は、コンクリートの微細構造の正しい理解である。コンクリートのさまざまな特性は、セメントペースト中に生成するカルシウム（アルミノ）シリケート水和物（以降、C-(A)-S-H と略記）などの水和物によって形成される空隙構造ないしは微細構造に大きく依存するといえる。空隙構造ないしは微細構造は、塩化物イオンや二酸化炭素などの鉄筋コンクリート構造物においては、塩化物イオン、二酸化炭素などの鉄筋腐食につながる物質移動は、コンクリートの空隙構造ないしは微細構造に強く依存する。このことから、古くから多くの研究者によって、空隙構造ないしは微細構造を同定するための分析手法が提案され、その構造の同定が取り組まれてきた [1]。しかし、それぞれの分析手法における仮定条件や限定条件を正しく理解しないまま測定結果を分析してしまうと、その空隙構造ないしは微細構造を誤って解釈し、発信する危険性がある。Aligizaki は、空隙構造ないしは微細構造のさまざまな分析手法の原理、仮定条件や限定条件、測定事例についてまとめるとともに、それぞれの分析手法から導かれる空隙構造ないしは微細構造を比較するとともに、それぞれの同定結果が一致する原因、異なる原因についてまとめている [1]。しかし、セメント系材料の空隙構造ないしは微細構造がさまざまな要因によって不安定であることから、いまだに決定的な解釈には至っていない。本検討では、セメント系材料の古典的な空隙構造の同定手法に着目し、測定対象とするセメント系材料の荷重に伴う変形状や乾湿に伴う変形状といった観点から、機械的性質や乾燥状態などの条件で、どのようにその分析手法における仮定条件や限定条件が崩れるかを考察し、測定結果から導かれる空隙構造ないしは微細構造のよりもっともらしい解釈の仕方について再考する契機を与えることに取り組んだ。

（実験調査によって得られた新しい知見）

セメント系材料の古典的な空隙構造の同定手法として、水銀圧入法が知られる [2]。水銀圧入法は、水銀の表面張力が大きいことを利用して粉体の細孔に水銀を侵入させるために圧力を加え、圧力と圧入された水銀量から比表面積や細孔分布を求める方法である [3]。細孔分布は、圧力と圧入された水銀量の関係に対して、圧力を Washburn 式によって細孔径に換算することで導かれる [4]。

$$P = \frac{-4\gamma \cos \theta}{d} \quad (1)$$

ここに、

P : 圧力 (Pa)

d : 細孔径 (m)

γ : 液体（水銀）の表面張力 (N/m)

θ : 液体（水銀）と細孔壁面の接触角 (rad)

水銀圧入法は、原理上の仮定が単純で、かつ広い範囲で細孔分布が得られることから、さまざまな分野で利用されている。しかし、Washburn 式は、円筒細孔モデルであること、接触角および表面張力を一定値として扱っていること、また、測定対象が剛体でない限り、高圧での圧入に伴う圧縮変形が生じることである [5]。本検討においては、荷重に伴う変形状に注目して、考察を行った。

まず、水銀圧入法で得られる測定値は、測定原理に立ち返れば、圧力と測定容器に圧入された水銀量である。したがって、一般的に（積算）空隙量－細孔径の関係であらわされる水銀圧入法の測定結果は、単位体積あたりの圧入量－圧力の関係に一意に変換される。Winslow の報告した結果 [2]を再整理したグラフを図 1 に示す。引用したデータは、水セメント比 0.4、材齢 158 日の oven dried の前処理乾燥をおこなったセメントペースト試料である。引用グラフは、単位質量あたりの圧入量であらわされているが、同報告で示されている総空隙量の材齢変化から見かけの密度を同定し、換算した。図に示されるように、水銀圧入法は、測定原理どおり圧力の増加に伴い、水銀が圧入される傾向を示す。

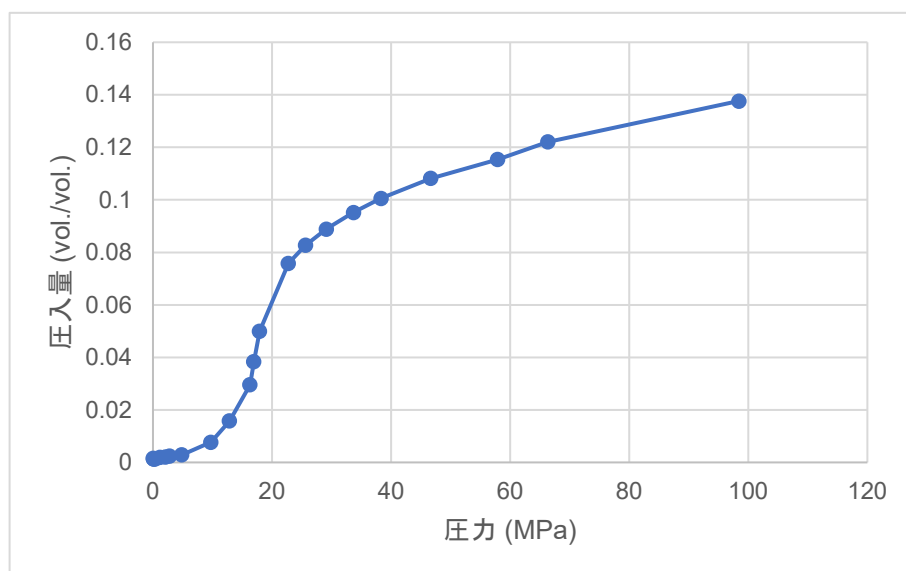


図 1 水銀圧入法の再整理

続いて、セメント系材料の三軸圧縮変形状について示す。このとき、体積ひずみを図 1 に示した空隙径分布における圧入量－圧力の関係に応じてオフセットした。Sfer et al. の報告した結果 [6]を再整理したグラフを図 2 に示す。図に示されるように、三軸圧縮試験は、拘束圧の増加に伴い、破壊に至るまでの軸方向圧力が増加することが確認できる。

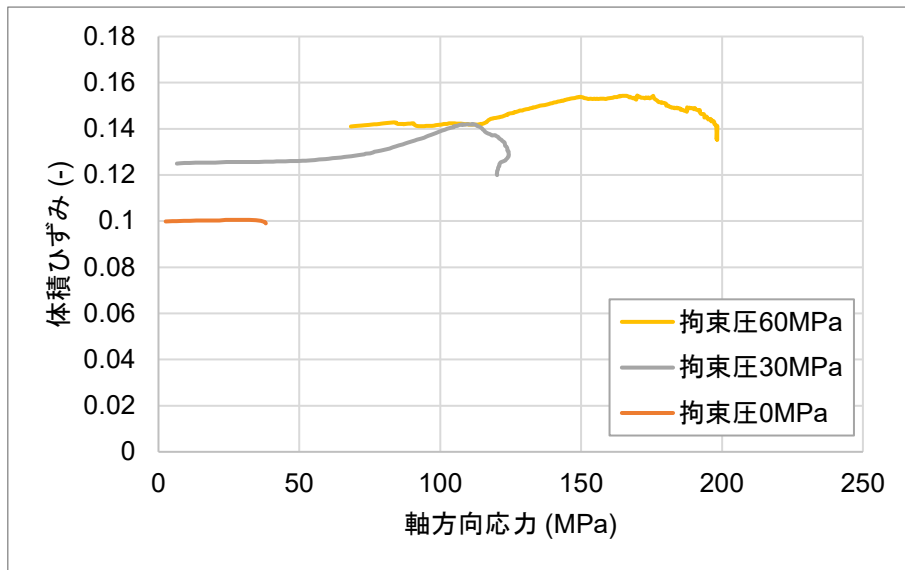


図 2 三軸圧縮試験の再整理

ここで、図 1、図 2 の結果を同じ応力-ひずみ座標上であらわす。図 3 に示されるように、水銀圧入法から得られる細孔径分布を、圧力-体積ひずみととらえると、その応力-ひずみ関係は、金属や樹脂などのそれに近く、理想的な等方応力での挙動ととらえられる。本検討においては、限られた文献数の、限られた実験条件のデータを用いて整理を行ったが、本検討のアプローチは、水銀圧入法の解釈について、再整理を行い、同分析法の活用方法について新たに示すものである。

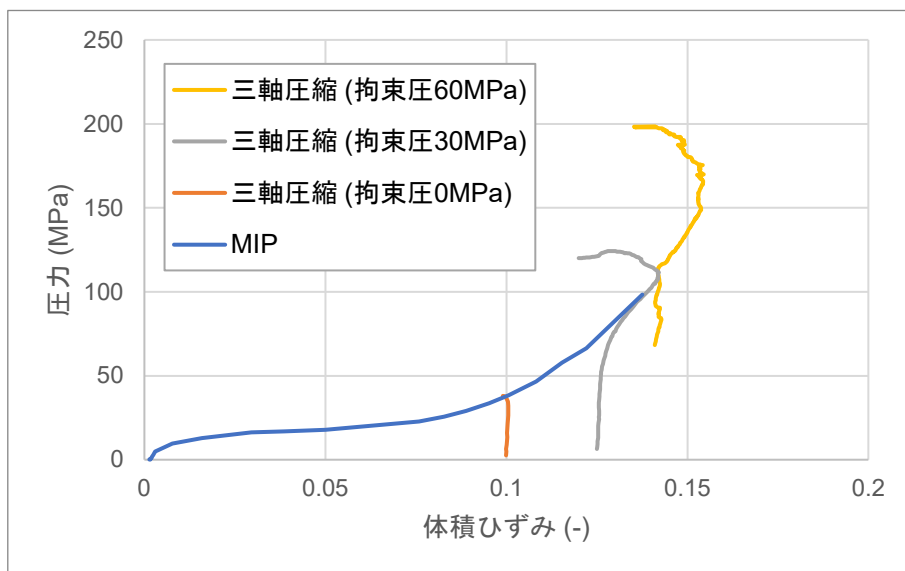


図 3 水銀圧入法と三軸圧縮試験から得られる応力-ひずみ曲線

(発 表 論 文)

日本建築学会論文集に投稿準備中

(参 考 文 献)

[1] K.K. Aligizaki, Pore structure of cement-based materials: testing, interpretation and requirements, CRC Press2005.

- [2] D.N. Winslow, S. Diamond, A Mercury Porosimetry Study of the Porosity in Portland Cement, *Journal of Materials*, 5 (1970) 564-585.
- [3] 島津製作所, 水銀圧入法による細孔分布測定,
<https://www.an.shimadzu.co.jp/powder/lecture/middle/m03.htm> (2022-04-28 accessed).
- [4] E.W. Washburn, Note on a Method of Determining the Distribution of Pore Sizes in a Porous Material, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 7 (1921) 115-116.
- [5] 島津製作所, 水銀圧入法で注意すべき項目,
<https://www.an.shimadzu.co.jp/powder/lecture/practice/p02/lesson12.htm> (2022-04-28 accessed).
- [6] D. Sfer, I. Carol, R. Gettu, G. Etse, Study of the Behavior of Concrete under Triaxial Compression, *Journal of Engineering Mechanics*, 128 (2002) 156-163.