

水銀圧入試験における圧入過程の定式化と空隙径分布

千葉工業大学 建築都市環境学科 学部生 学生会員 田丸達也
 千葉工業大学 建築都市環境学科 講師 正会員 内海秀幸

1. はじめに

本研究は、水銀圧入試験の試験結果として得られる圧入圧力と水銀浸入量の関係(図-1 参照)を表現する理論式の構築とその理論式に基づく空隙径分布特性の評価手法の確立を目指したものである。

2. 水銀圧入試験の状態方程式と圧入圧力と水銀浸入量の関係を表す理論式

(1) 水銀圧入試験に対する状態方程式

水銀が圧入される場を支配する力学関係(支配方程式)は、次式の状態方程式により定められるものとする。

$$A_{eff} \Phi_m - p_c V = 0 \quad (1)$$

ここで、 p_c は圧入圧力、 V は圧入圧力 p_c に応じて空隙に浸入する水銀量[m³/g]である。 Φ_m は水銀の界面エネルギー[J/m²]であり、本論においては定数として扱う。また、 A_{eff} は有効比表面積であり、圧入の進展にともなって水銀により濡らされる試料空隙の正味の界面面積を意味するものである。

すなわち、式(1)の状態方程式は、圧入により成される仕事に相当した力学エネルギー $p_c V$ と、その圧入された水銀が試料の空隙界面を濡らすことにより成す界面仕事(界面エネルギー) $A_{eff} \Phi_m$ の収支として表現されている。

(2) 場の特性を表現する数理モデル

圧入圧力と水銀浸入量の関係に内包される多様な要因を包括的に反映するもっとも基本的な数理モデルを、式(1)に基づいて次式に示すような数理関係により定義することとする。

$$u = \frac{A_{eff}^* \Phi_m}{V^*} \quad (2)$$

$$u = \text{const.}$$

ここで、 V^* と A_{eff}^* は特に定数としての u [J/m³]を保障する水銀浸入量[m³/g]とその水銀浸入量により濡らされる試料空隙の正味の界面面積(有効比表

面積)[m²/g]を意味する。式(2)は、空隙への水銀浸入量 V^* とそれに応じて変化する界面エネルギー A_{eff}^* Φ_m が圧入過程において定数 u により一定として定められた場合を意味し、この定数 u の値は対象とする試料固有の微細構造特性を反映することとなる。

(3) 圧入圧力と水銀浸入量の関係を表す理論式の定式化

全空隙量 V_0 を有する多孔質体を対象に、水銀圧入試験における圧入圧力と水銀浸入量の関係を表す理論式を定式化する。式(1)の状態方程式が成立する水銀圧入試験の場を想定し、この場における水銀浸入量と界面エネルギーの相関は式(2)のように定数 u に基づいた数理関係が成立するものとするれば、圧入圧力と水銀浸入量の関係を表す理論式として次式を得る(詳細は文献 1)を参照されたい)。

$$V = \frac{V_0 U p_c}{1 + U p_c} \quad (3)$$

式(3)において p_c と V はそれぞれ実際の水銀圧入試験において実測される圧入圧力と水銀浸入量に対応し、 U は a と b を全空隙量ならびに界面エネルギーの収支を規定するための定数として $U = [(ab - 1) u]^{-1}$ と定義される定数である。この式より表現される水銀の圧入過程は定数 U に応じて図-2に示すようなものとなる。

(4) 試験結果への適用法

水銀圧入試験において実際に計測される圧入圧力と水銀浸入量の結果が理論式(3)に対応したもの

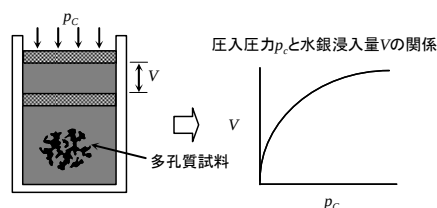


図-1 水銀圧入試験の概要

であるかどうか確認する場合、式(3)を

$$\frac{p_c}{V} = \frac{1}{UV_0} + \frac{1}{V_0} p_c \quad (4)$$

と表現し、図-3 に示すように試験結果における圧入圧力 p_c を x 軸に、圧入圧力を水銀浸入量で除した p_c/V を y 軸としてプロットし、直線になるかどうかを検討すればいい。このプロットの勾配より $1/V_0$ が、切片より $1/UV_0$ が定まり、式(4)に含まれる全空隙量 V_0 と定数 U を決定することができる。

(5) 理論式に基づく空隙径の分布特性

式(3)に対して、有効水理半径($R_h = V/A_{eff}$)を基準とした表現に基づく状態方程式(式(1))を導入することにより次式のような関係を得る。

$$V = \frac{U\Phi_m V_0}{R_h + U\Phi_m} \quad (5)$$

ここで、図-2 と同様な定数 U に応じた R_h と V/V_0 の関係(累積空隙容量曲線)を式(5)を用いて描画すると図-4 のようになる。計算に関して界面エネルギーは常温での水銀の代表的な値である $\Phi_m=0.48$ とした。式(3)が試験結果を正確に反映したものであれば(図-3 によるプロットが良好な線形関係となるのであれば)、その圧入圧力と水銀浸入量に対応した空隙の分布特性を表現する式として、式(5)は適切なものといえる。

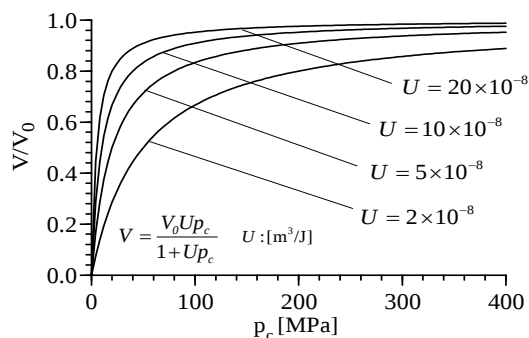


図-2 式(3)に基づく圧入圧力と水銀浸入量の関係

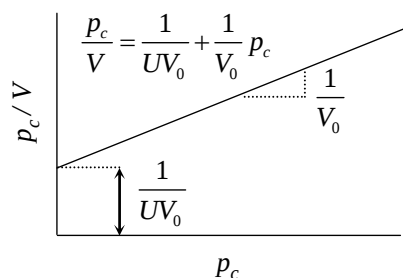


図-3 式(4)によるプロットの方法

3. 試験結果に対する理論式の適用

試料には50日間20℃の水中養生を施したモルタル($w/c=40,50\%$: 細骨材に対するセメントの質量比33%)を用いた。水銀圧入試験は0.1~400kPaの低压レンジと0.1~400MPaの高圧レンジでの試験を連続で行い、それぞれのデータを連結させた。試料の前処理は自由水の蒸発による質量減少が恒量となるまで105℃の炉乾燥を施した。また各試料ともに4mmのふるいを通り2.8mmのふるいに残ったものを使用し、試験に用いる試料の初期質量は2.5g程度目処とした。

試験結果を式(4)の形式のようにプロットした結果を図-5に示す。図中の実線はそのプロット結果を線形式によりフィッティングした結果である。図-5より、モルタルに対するプロット結果は極めて良好な線形関係を示している。この結果は、本論で定式化した理論式(式(3))のセメント系材料に対する適用の妥当性を強く支持するものといえる。

参考文献

- 1) 内海秀幸：セメント系材料の水銀圧入試験における圧入過程の定式化と微細構造特性の評価，土木学会論文集，部門E，Vol.63 No.4，2007。

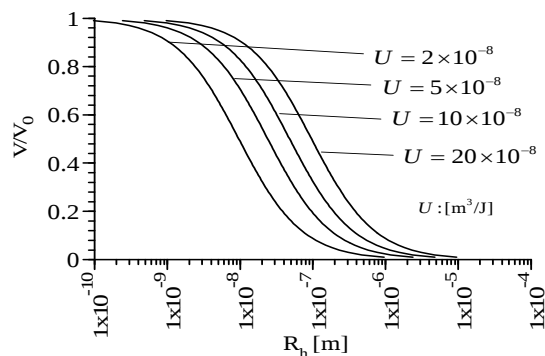


図-4 R_h と V/V_0 の関係(累積空隙容量曲線)

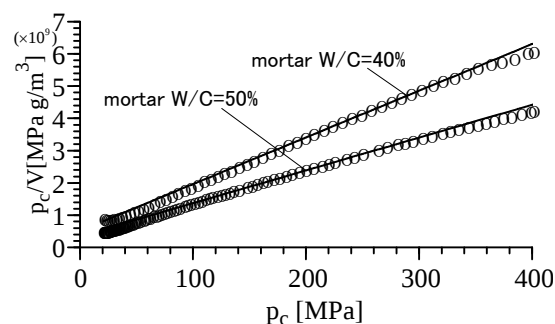


図-5 式(4)によるプロット
(モルタル：20℃水中養生50日)