

3次元有限要素法によるエアロゲル混入モルタルの熱伝導率の推定に関する研究

正会員 ○梅野徹也*
正会員 岩前篤**エアロゲル 熱伝導率 3次元有限要素法
熱橋 ばらつき

はじめに

シリカエアロゲルは低熱伝導率、低比重、透明性等の性質を持ち、非常に優れた断熱性能を有することから、建材としての活用が期待されている。シリカエアロゲルをモルタルに混入したエアロゲル混入モルタルは一定の強度がありながら高い断熱性能を有する建材である。エアロゲルと比べてモルタルの熱伝導率が高いことから、エアロゲル混入モルタルはエアロゲルとモルタルの混合状態によって内部での熱橋の発生状態に違いが生じることが考えられる。エアロゲルの含有率が高いほどエアロゲル混入モルタルの熱伝導率は小さくなるが、同じ含有率であっても混合状態の違いによって熱伝導率にばらつきを生じることが推測される。本研究では、エアロゲル混入モルタルについて3次元の熱伝導解析を行い、エアロゲルとモルタルの混合状態による熱伝導率の違いを検討した結果について報告する。

解析の概要

解析は筆者らが作成した熱伝導計算プログラム FEAT3Dを用いて、3次元有限要素法にて行った。解析対象は図1に示すエアロゲル混入モルタルの立方体モデルとした。モデルの大きさは16x16x16mmで、4096(=16x16x16)セルに分割した(図1(b))。一つのセルは1x1x1mmの大きさであり、それぞれのセルに、設定したエアロゲル含有率に応じて、モルタルまたはエアロゲルのいずれかをランダムに配置することにより、混入状態の違いを再現した。エアロゲルの配置はモンテカルロ法によるが、エアロゲルが極端に偏ることを防ぐため、モデルを8エリアに分け(図1(c))、それぞれのエリアでエアロゲル含有率が等しくなるよう配慮した。さらに、計算の安定性を図るため2x2セルの単位で同じ材料となるよう制限した。モデルの側面は断熱境界とし、上下面に単位温度差を与えたときの定常時の熱流入表面の平均熱流量をFEAT3Dで解析し、式(1)により熱伝導率を算出した。

$$\lambda = \frac{d}{\Delta T/q - 2/\alpha} \quad (1)$$

ここで、 λ : 熱伝導率 [W/m·K], d : 厚さ [m], ΔT : 温度差 [K], q : 熱流量 [W/m²], α : 表面熱伝達率 [W/m²·K]

モルタルとエアロゲルの熱伝導率はそれぞれ1.5と0.01 [W/(m·K)], 上下面の表面熱伝達率は8.0 [W/(m²·K)]とした。

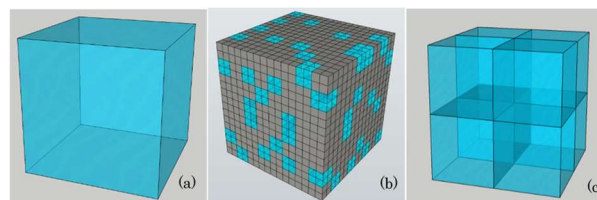


図1 解析対象モデル

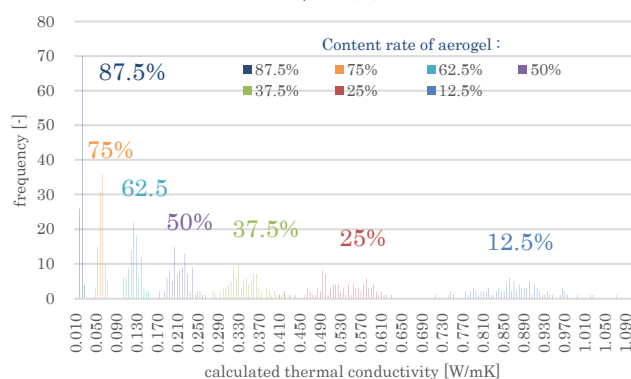


図2 熱伝導率解析結果の頻度分布

表1 熱伝導率解析結果

Content rate [%]	0	12.5	25	37.5	50	62.5	75	87.5	100
Average	1.5	0.867	0.530	0.340	0.214	0.124	0.060	0.021	0.01
Max.		1.066	0.627	0.425	0.260	0.154	0.073	0.027	
Min.		0.711	0.406	0.277	0.173	0.103	0.048	0.018	
SD		0.065	0.049	0.032	0.019	0.011	0.005	0.002	
Max. of 95% CI		0.880	0.540	0.346	0.217	0.126	0.061	0.022	
Min of 95% CI		0.854	0.521	0.334	0.210	0.122	0.059	0.021	

[W/m·K]

解析結果

12.5%、25%、37.5%、50%、67.5%、75%、87.5%と異なる含有率のエアロゲル混入モルタルについて、それぞれ100通りのモデルを作成し解析を行った。結果の頻度分布を図2に、統計値を表1に示す。エアロゲルの含有率が高いほど、熱伝導率が小さくなるとともに、ばらつきも小さいのに対し、12.5%など含有率が低い条件ではばらつきが非常に大きい結果が得られた。標準偏差は含有率87.5%が0.002、含有率12.5%で0.065と大きく異なる。

表1に100回の試行における95%信頼係数の信頼区間の最大値と最小値を示す。エアロゲル含有率が低いほど信頼区間の幅が広い。標本サイズNを100, 50, 10と変えたときの信頼係数を図3に示す。エアロゲルの含有率12.5%、N=10では信頼係数が0.039[W/(m·K)]となり、熱伝導率の

推定値としては誤差が大きいと判断される。一定精度で熱伝導率を推定するには、エアロゲルの含有率に応じて標本サイズを変える必要がある。

解析結果のばらつきは、エアロゲルの分布状況によりエアロゲル混入モルタル内で生じる熱橋性状の違いであり、数値解析のみならず実際に作製されるエアロゲル混入モルタルでも同様の性状を示すことが考えられる。エアロゲルの含有率が低いほど熱伝導率のばらつきが大きい材料となるため、評価の際はサンプル数を増やすなどの配慮が求められる。

熱伝導率の推定式

解析で得られた熱伝導率の平均値とエアロゲル含有率の相間を表す推定式を導出する。熱伝導率の推定式が指数関数で表され、その指数がエアロゲル含有率の3次関数であると仮定すると、推定式は式(2)であらわされる。推定式は熱伝導率解析結果の平均値とよい一致を示している(図4)。

$$\lambda = e^{-4.4c^3 + 4.4c^2 - 5c + 0.405} \quad (2)$$

ここで、c: エアロゲル含有率[m³/m³]

エアロゲル混入モルタルの熱伝導率推定式を測定値と比較する。測定には、エアロゲル含有率の異なる5試験体を用いた。300mm角、厚さ26~42mmの試験体について、熱流計法(ISO8301)により熱伝導率を測定した。結果を図5に示す。図5には測定値と推定式とともに、1次元熱伝導と仮定した際の理論値も併記した。図6に示すとおり、エアロゲルとモルタルが独立して存在する2モデルとしており、熱流方向に対し直列または並列で分布させた。直列は熱橋が最も発生しにくく、並列が最も発生しやすい状況を想定している。

熱伝導率の測定値は推定式と近い値であるが、エアロゲル含有率が低い試験体では推定式より小さく、乖離する結果となった。数値解析で示されたとおり含有率が低いほどばらつきが大きいことが測定値にも表れており、推定値との差が大きくなった一因と考えられる。一方、測定値が推定式より低くなる理由として、試験体作成および測定に起因する2つの要因も考えられる。モルタルに

対してエアロゲルは密度が低いいため試験体作成時にエアロゲルが上方に集まりやすく図6の直列配置に近い条件となることが考えられる。また、エアロゲル混入モルタルの表面は完全な平滑面ではないため、試験機の加熱版と試験体の間に空隙を生じ、その熱抵抗による測定誤差が、試験体の熱抵抗が小さい低含有率ほど大きく影響していることも考えられる。

まとめ

エアロゲル混入モルタルの熱伝導率を3次元有限要素法による熱伝導解析にて推定した。計算モデルの分割セルにモルタルとエアロゲルをランダムに配置することでエアロゲルの混入状態の違いを再現した。様々な含有率について各100回の試行を行った結果、含有率に応じた熱伝導率が得られるとともに、エアロゲルの含有率が低いほど、解析結果のばらつきが大きくなる特徴が確認された。エアロゲル混入モルタル内部で生じる熱橋の違いであると考えられる。混入状況による熱伝導率への影響は大きく、数値解析だけでなく実製品の評価においても含有率に応じた熱伝導率のばらつきを考慮する必要がある。

謝辞

本研究は近畿大学建築学科卒業生である西出友滉君、野口仁平君の卒業研究をまとめたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 片桐, 究極の多孔質材料-シリカエアロゲル-, 先進セラミックス研究センター年報 Vol.2, pp.13-17, 2013, 2) 日本建築学会, 建築設計資料集成 1 環境, 丸善株式会社, 2007, 3) ISO8301:1991, Thermal insulation — Determination of steady-state thermal resistance and related properties — Heat flow meter apparatus

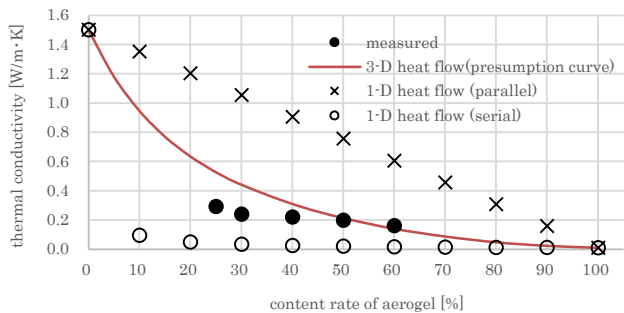


図5 推定式と測定値の比較

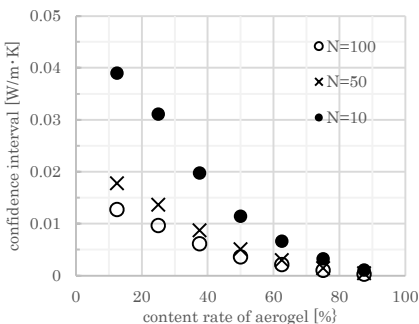


図3 標本サイズと95%信頼区間

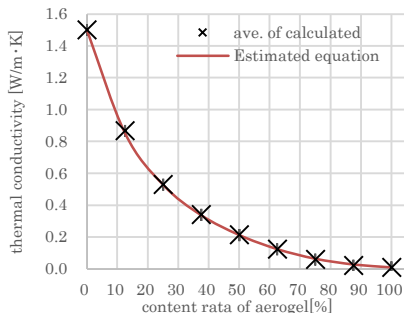


図4 解析結果と推定式の比較

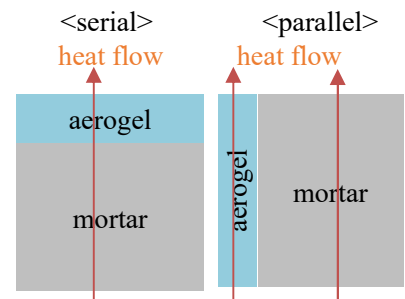


図6 1次元熱伝導モデル

* 積水ハウス 博士(工学)

**近畿大学 教授・博士(工学)

* Sekisuihouse CO. Ltd., Dr. Eng.

** Prof., Faculty of Architecture, Kindai university, Dr. Eng.