第Ⅱ部門

間隙の不均一性が多孔質体通過流れおよび構成材に働く流体力に及ぼす影響について

大阪市立大学大学院工学研究科 学生員 渡辺 友哉 大阪市立大学大学院工学研究科 正会員 中條 壮大

1. 研究背景・目的

幾つかの水工構造物は,部分的あるいはその全体が 間隙を有する多孔質体としてモデル化され,その内部 を通過する流動が消波・減勢機能や構造物の安定性, 物質交換に及ぼす影響が検討されている.既往のモデ ルでは巨視化の段階に幾つかの違いはあるものの,い ずれも基本となる質量および運動量の保存式に対して 局所体積平均操作を施したモデルを採用している.こ れらは多孔質体通過前後における平均的な圧力差の知 見に基づく経験的巨視的モデルである.そのため,不 均一な間隙形状が多孔質体内部における流動や,構成 材に働く流体力に及ぼす影響については原理上,検討 できない.本研究では,複雑な固体壁面の境界条件を 容易に取り込める数値計算手法を用い,間隙の不均一 性が多孔質体内の流動や多孔質体の構成材に働く流体 力に与える影響について基礎的な検討を行った.

2. 研究方針・方法

非圧縮流体運動の基礎式である質量保存則(式1) と運動量保存則(式2)を基礎方程式とする.

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \tag{1}$$

 $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \left(\vec{u} \cdot \nabla \right) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{u} + \vec{F} + \vec{g} \qquad (2)$

ここに, \vec{u} は流速ベクトル,Pは圧力,tは時間, ρ は 流体の密度, μ は粘性係数, \vec{g} は外力ベクトル(ここ では重力のみ考慮)である. \vec{F} は,固体壁面の境界条 件を導入するための強制外力ベクトルである.

多孔質体は複雑な間隙形状をもつため,通常の直交 格子法では壁面の解像度に制約があり,境界適合格子 による計算は間隙形状が複雑になると適用が困難であ る.著者らは強制外力を導入することで任意の固体壁 を表現し得る Immersed Boundary 法はこうした難点 を回避するために有効な手法であると考えている.こ こでは強制外力の計算に Lima e Silva ら (2003) に より提案された Physical Virtual Model を導入した.

ここでは管路内の一方向流中に設置された多孔質体 周りの流れを対象とした.図-1に計算領域を示す.流





表-1 計算した多孔質体の条件

多孔質体	size			球径		球の伊参	万英朝
	Lp[m]	Hp[m]	Bp[m]	球1	球2		大冷即
Preg1	0.057	0.026	0.026	0.01		41	
Plack1	0.057	0.026	0.026	0.01		40	A1x=0.092
Plack2	0.057	0.026	0.026	0.01		40	B1x=0.085

下長さ *L* =0.156 m (多孔質体は *Lx* =0.05 m から配置), 管路高さおよび幅は *H* = *B* =0.026 m とし, 流入部では流速の水平成分を一様に, 鉛直成分を0 で与え, 流出部では Sommerfeld 放射境界条件とした.側方境界はすべて non-slip 条件を与えた.

表-1 に多孔質体の条件を示す.比較する多孔質体 は,規則的な間隙構造を持つ多孔質体 (P_{reg1}),構成 材が1個欠落する(全体積の3%に相当)ことで不均 ーな間隙形状となった多孔質体2ケース(P_{lack1} およ び P_{lack2})とした.ここでは多孔質体を構成する部材 は球体であり,かつ面心立方格子配置したものを用い た(図-2). P_{lack1} はx=0.0924 mの隅角部で, P_{lack2} はx=0.0853 mの縁辺部で構成材が欠落した条件であ る.流況の指標となる Reynolds 数は $R_e = U_m D/\nu$ で定義した(U_m :流入流速,D:構成材の径, ν :動 粘性係数).今回の条件では R_e =640 となる.計算の 格子解像度は $\Delta x = D/18.4$ とした.

計算結果・考察

上流端を0とする断面平均圧力の流下方向分布を 図-3に示す.構成材の配置に依存してステップ状に 圧力損失が生じており,構成材の個数に応じて変化量 には差が見られる.



図-5 中央断面 (y = 0.013m) における $P_{lack2} \ge P_{reg1}$ の 水平方向の流速差分

P_{reg1} と比較すると,構成材が欠落した場合には損 失量が減少しており,その損失量は欠落箇所の違いに 依存していないことがわかる.この結果より,巨視的 な圧力降下量については多孔質体の間隙部体積(ある いは間隙部表面積)が支配因子であり,間隙形状には それほど依存していないことが示唆された.

次に,多孔質体の各構成材に働く流体力の変化を見 るために,抗力および揚力係数の分布を図-4に示す. 図中の破線は同一多孔質体の各断面における平均値で あり, は隅角部および縁辺部に位置する構成材を, ×は中央に位置する構成材を示す.構成材に働く抗力 は隅角部>縁辺部>中央部の順で大きくなる傾向に

ある.ただし,流入端での抗力は比較的小さく,それ に続く2列目以降の構成材で,隅角部および縁辺部 では最大値を示した後に,流下に伴い低下する傾向が 見られた.流下とともに抗力係数が低下するのは,圧 力損失によって平均流速が低下し,流体力が減少する ことに対応すると思われる.巨視的モデルではこうし た流下方向のトレンドとしての流体力の低下は表現 されるが,構成材の配置によるばらつきについては表 現できない.図に示すように平均と比較して抗力は大 きくばらついており,流下位置が同じでも2倍近く差 が生じているものも見られる.構成材が欠落した場合 には, P_{rea1}と比べ全平均としては約13%抗力が減少 し, 欠落箇所にはあまり依存しない結果となった. た だし, 欠落箇所の背部の構成材については Plack1 で 34%, Plack2 で16%の増大が確認された.図-5 は中 央断面 (y = 0.013m) における P_{lack2} と P_{reg1} の水 平方向の流速差分を示している.図中の破線は欠落部 を示す.欠落前と比べると水平流速は欠落部背部で増 加しており、これが抗力増加の一因と考えられる。

構成材に作用する揚力は, P_{reg1}では間隙形状の対称性が保たれているので,各流下地点で正負の値がほぼ同値となっており,中央の構成材に作用する揚力はほぼ0になっている.構成材が欠落した場合には,間隙形状の対象性が失われた結果,流路の偏重が生じ,特に P_{lack2}においては全体的に上向きの揚力が生じている.これに対して P_{lack1}の変化は局所的である.このように,局所的な間隙構造の違いは構成材に作用する流体力に大きく影響を及ぼすことが示された.

4. まとめ

巨視的な圧力降下量は間隙形状にはそれほど依存していない.しかし,流入端での抗力は比較的小さく, 2列目以降の構成材で最大値を示し,流下に伴い低下するなど,局所的な間隙構造の違いが構成材に作用する流体力に大きく影響を及ぼすことが示された. 参考文献

- 竹岡佑介,重松孝昌,中條壮大:一方向流中に設置された固体群に 作用する流体力に関する数値計算,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.66,2010.
- 2) 中條壮大,重松孝昌,辻本剛三,竹原幸生:多孔質体によって生成される乱流諸量に及ぼすレイノルズ数の影響に関する実験的研究,海岸 工学論文集, Vol. 54, pp. 801-805, 2007.
- 3) Lima e Silva, A. L. F., Silveira-Neto, A. and Damasceno, J. J. R.: Numerical simulation of two-dimensional flows over a circular cylinder using the immersed boundary method, *Journal of Computational physics*, Vol. 189, pp. 351-370, 2003.
- Ergun, S.: Fluid flow through packed columns, *Chemical Engineering Progress*, Vol. 48, pp. 89-94, 1952.