

令和元年6月27日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04421

研究課題名(和文)多孔質体間隙構造解析とそれに基づく乱れの生成メカニズムの解明に関する基礎研究

研究課題名(英文) A Fundamental Study on analysis of pore structure of porous media and elucidation of generation mechanism of turbulence based on the analysis

研究代表者

重松 孝昌 (Shigematsu, Takaaki)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80206086

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：まず、X線CTを用いて、多孔質体の複雑な3次元間隙構造の定量的評価を試み、構成材のアスペクト比や形状が間隙形状に及ぼす定性的な影響について新たな知見を得た。同手法をポーラスコンクリートの間隙構造の計測にも適用し、粗骨材粒径と粗骨材・ペーストの体積比が空隙率、および、透水係数に及ぼす影響を明らかにした。

次に、複雑な形状を有する多孔質体間隙中の流れを計算できるように、Immersed Boundary Methodの境界条件設定法について検討するとともに、間隙形状が多孔質体通過流れに及ぼす影響について検討した。その結果として、間隙の大きさが部材作用力および圧力降下量に及ぼす影響を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

社会基盤構造物は、物流や防災・減災の拠点として、強固な強度や耐久性が必要とされる。防波堤の基礎マウンドや海底地盤の洗掘対策、海岸堤防や腹付工の洗掘防止対策としての被覆ブロックの設置とその安定性の検討には、これらの間隙中の流体運動が密接に関わっている。一方、平時には、水質浄化機能や生物生息環境への適合性などの機能が求められ、これらの要望に応えるためには、間隙部の詳細な流動の把握が不可欠である。本研究は、これまでほとんど明らかにされていない多孔質体内の間隙構造を明らかにするとともに、間隙構造が多孔質体内の流動および構成材に作用する流体力に及ぼす影響について新たな知見を得ている。

研究成果の概要(英文)：First, quantitative evaluation of the complex three-dimensional pore structure of the porous body was attempted using the X-ray Computed Tomography technique. Some new findings were obtained about the qualitative influence of the aspect ratio and shape of the component of the porous media. The same technique was applied to the measurement of the pore structure of porous concrete. It was found that the size of the coarse aggregate and volume ration of the coarse aggregate to the paste effected on the porosity and hydraulic conductivity of the porous media.

Next, in order to be able to calculate the flow through the pore of the porous media with complicated shape, the boundary condition setting method of the Immersed Boundary Method was examined, and the influence of the pore shape on the porous media flow was examined. It was clarified that the effect of the pore size on the force acting on the component of porous media and on the pressure drop through the porous media.

研究分野：海岸工学

キーワード：多孔質体 空隙形状 X線CT画像 3次元画像計測 代表スケール 流路 Immersed Boundary Method

1. 研究開始当初の背景

社会基盤構造物は、物流や防災・減災の拠点として、強固な強度や耐久性が必要とされる。東日本大震災後、粘り強い海岸構造物を目的として、防波堤の基礎マウンドや海底地盤の洗掘対策、海岸堤防や腹付工の洗掘防止対策としての被覆ブロックの設置とその安定性の検討が国土交通省をはじめとするさまざまな機関で行われてきた。これらの構造物に求められる機能のうち、安定性には構造物の間隙中の流体運動が密接に関わっている。一方、平時には、水質浄化機能や生物生息環境への適合性などの機能が求められ、これらの要望に応えるためには、間隙部の詳細な流動の把握が不可欠である。

しかし、間隙部における流体運動の実測が困難であったため、このような多孔質体を構成する個々の粒子に作用する流体力を定量的に評価できず、また、多孔質体内の物質輸送やこれに伴う水質浄化機能・生物生息環境に直接的な影響を及ぼす乱流特性の解明はほとんどなされていない。したがって、上記の検討にあたっては、固体・流体間作用力を経験則に基づいて与えざるを得ず、その際に必要となる係数は試行錯誤的あるいは実験を行って決定するしか術がないのが実情である。

申請者は、主に固相誘起型固液混相流を対象として、個別要素法とSMACを併用した数値モデルを開発し、個々の粒子と流体との相互作用を考慮した水中を沈降する粒子群の挙動を予測するとともに、その堆積形状を定量的に予測する手法を開発してきた。しかし、上記の理由により、個々の粒子と流体間の相互作用力は平均流を介したモリソン型のモデルを採用するに留まっているという課題を有していた。そこで、固相・流体間の相互作用力の定式化を目的とした基礎的研究として、多孔質体間隙部を流れる流体運動の計測に着手し、多孔質体模型と流体の屈折率を整合させる屈折率整合法を用いて物体背後域の可視化を図り、二次元画像流速計測法(PTV)によって流体運動を高空間・高時間解像度で計測した。その結果、多孔質体を構成する個々の粒子周りに生成される乱流諸量の計測に成功し、一方向流場、振動流場および波動場において、間隙内を流体が流下・流出する過程における乱れの生成・減衰過程を把握するに至っている。さらに、その後、3次元乱流構造の詳細な検討を行い、多くの適用事例を有する線形せん断モデルでは多孔質体間隙部における乱流諸量を定量的に表現することができないことを明らかにし、定量的な乱流諸量を表すことができる非線形乱流モデルを提案し、一連の実験結果に基づいてこの非線形乱流モデルで唯一必要な実験定数を提案するに到っている。

2. 研究の目的

粘り強い港湾施設の整備を達成するために用いられる捨石やブロックの安定性の検討や、これらもたらす環境への影響の検討などには、間隙中の詳細な流体運動に関する知見が不可欠である。多孔質体間隙部の流動には、間隙形状そのものが大きな影響を及ぼすことは容易に想像されるものの、それを計測し定量的に評価する手法がないために、その検討はこれまでほとんどなされていない。本研究では、多孔質体の間隙形状の計測に基づいて、間隙形状や間隙の空間分布特性を定量的に評価する手法を開発し、画像流速計測手法が適用できるような多孔質体模型の製作方法の開発を試みるとともに、水理実験および数値解析を通して多孔質体間隙構造とそれが乱流生成や乱流特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

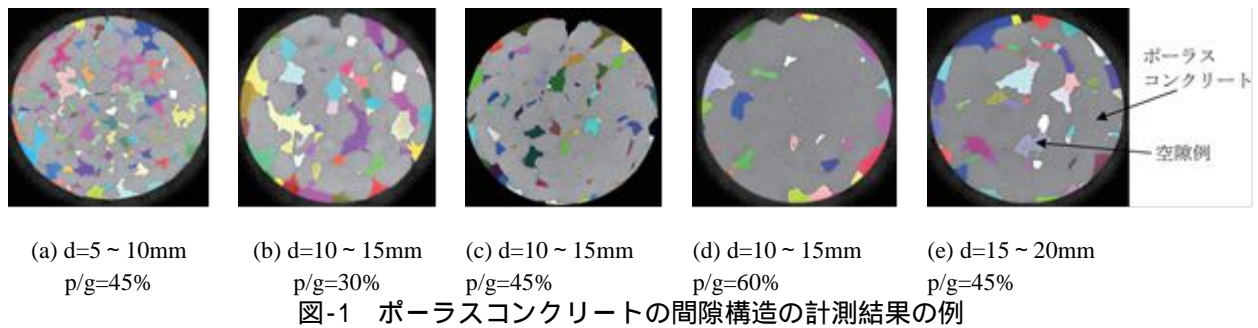
本研究は、(1)多孔質体の間隙構造の定量化、(2)多孔質体通過流体の3次元流動計測、(3)多孔質体通過流体の3次元流動計算手法の開発、の3本柱で構成され、これらの研究成果を取り纏めることによって、多孔質体間隙構造と乱れの生成・発達過程を明らかにしようとするものである。

4. 研究成果

多孔質体の複雑な3次元間隙構造を定量的に評価するため、X線CTを用いて乱積みした球・円柱・楕円体などで製作された多孔質体模型を計測するとともに、X線CTによって得られた情報を基に3Dプリンターを用いて多孔質体模型を再現作製した。多孔質体模型は、直径10mmの球、長径20mm×短径10mmの楕円形、直径10mm×長さ10mmの短柱、直径10mm×長さ20mmの長柱を用いて、一辺40mm～80mm程度の直方体の容器にランダムに詰めて製作し、X線CT撮影を5回ずつ行って計測精度を検証した。得られた3次元画像に画像解析を施して間隙構造を計測し、計測のばらつきは小さいこと、構成材のアスペクト比が大きくなると間隙率が増加すること、構成材が角を有すると扁平な間隙形状の出現頻度が多くなることなどの特長が明らかになった。

このように、多孔質体の間隙構造の計測に対するX線CTの有用性を検証した後に、ポーラスコンクリートを対象としてその間隙構造の計測を行った。図-1にその一例を示すように粗骨材粒径 d と、粗骨材とセメントペーストの体積比 p/g を変化させた供試体をX線CTによって撮影し、間隙構造の計測を行うとともに、透水性との関係について検討した。一連の検討において、 p/g が大きくなると空隙率が低下し空隙の大きさの空間的なばらつきも減少する傾向があること、その結果として透水係数が低下すること、独立した空隙の割合は0.1%のオーダーであり、ほとんどすべての空隙は連続していること、供試体内における空隙率の変動は20%程度であることを明らかにした。また、 p/g が小さくなると粗骨材の形状の影響が大きくなって透水係数が大きくなるが、このとき、水頭差の増加に対する透水係数の減少の割合が大きくなる傾向を示すことが明らかになった。

上記の検討に用いた 3 次元画像を用いて、市販の画像計測ソフトによるノードストラット法を適用して空隙の連続性評価を試みた。計測に先立ち、ポーラスコンクリート内部の空隙の特徴を切り出し、ノードストラット法による計測結果を確認した後、ポーラスコンクリートの一部に適用してみた。その結果、直線や蛇行、そして 2 経路が合流するなど、単純な経路の寸法は計量できた。しかし、局所的な曲率や空隙径変化が大きいなどの複雑さのため、局所的な計測は可能だが、巨視的な空隙特性の評価は難しいということが改めて明らかになった。



粗骨材とペーストで作成された供試体を X 線 CT によって撮影して、得られた 3 次元画像に基づいて 3D プリンターを用いて多孔質体模型を作成した。多孔質内の 3 次元流れ場を計測するためには、高精度で計測可能なシステムが必要であるが、本研究では、既に開発していた PTV アルゴリズムの 3 次元化を図るとともに、画像流速計測法の高精度化・高速化を図った。改良した PTV アルゴリズムの検証として、X 線 CT で撮影されたコンクリート供試体内の応力ひずみ計測に適用し、良好な結果が得られるに至っている。

多孔質体を構成する固体の形状特性による流れへの影響を検討するため、矩形管水路中の一方向流場に設置された単一円柱、単一楕円体、単一球周りの流況を、Particle Tracking Velocimetry 技術を適用して計測し、乱流特性について検討を行った。本実験によれば、物体背後に形成される後流域中の乱れ特性には、顕著な物体の形状依存性は見られないことが明らかになった。ただし、レイノルズ数の影響および後流域スケールと計測解像度の観点から、更なる検討が必要である。

本研究の実用化への取り組みのひとつとして、波浪場に設置された多孔質体近傍、および、その空隙部の流動を画像解析手法により計測することを試み、流速の時系列データに対する周波数解析等によって、波周期相当の流動の変動成分が空隙部において顕著に減衰することが明らかになった。

複雑な境界を有する多孔質体空隙部の流況を、実験のみで明らかにすることは甚大な労力を必要とする。実験条件を厳選するために予め数値計算によって流況特性を把握しておくことは、本研究の進捗に大きな影響を及ぼす。このような観点から、複雑な空隙形状を有する多孔質体通過流れを、厳密な境界条件を課して計算する手法として Immersed Boundary Method (IBM) を採用してその妥当性について検討した。まず、球体で構成される多孔質体の一部を取り除いて非均質空隙構造を対象として計算を行い、空隙構造の非均化によって多孔質体全体に

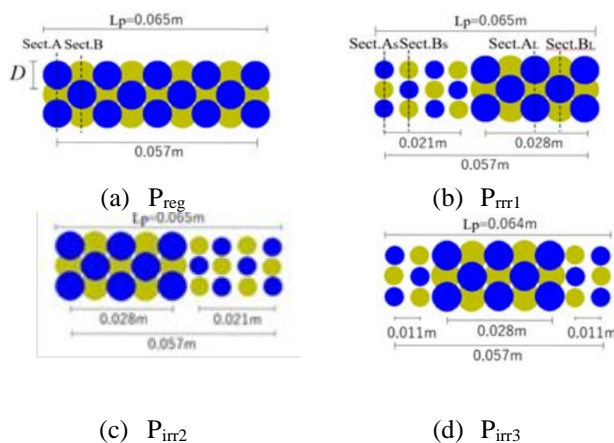


図-2 多孔質体構成要素の大きさや配置作用する圧力低下量が 6.4 ~ 7.8% 減少することが明らかになった。

空隙構造が多孔質体の流動特性に及ぼす影響の検

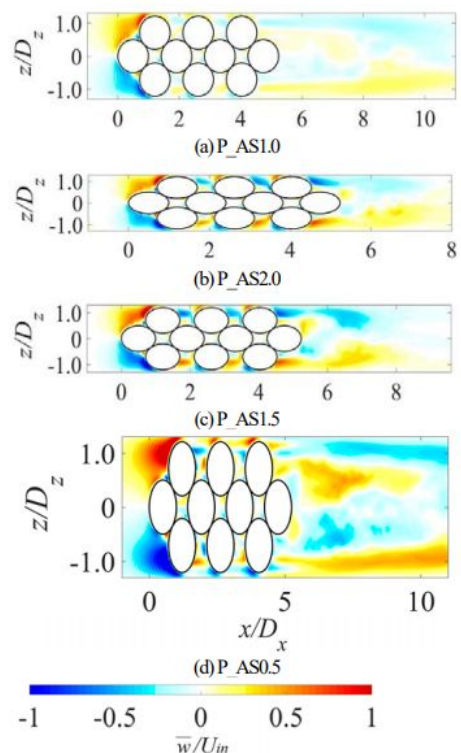


図-4 アスペクト比と時間平均鉛直流速 w ($U_{in} = 64.0 \text{ mm/s}$)

討のひとつとして、図-2に示すように、多孔質体の構成材の球形を変えて配置し、多孔質体の通過に伴う圧力降下量を計算によって求めた。単一球で構成された多孔質体 P_{reg} と、異なる径を有する部材で構成された多孔質体 $P_{irr1} \sim P_{irr3}$ の結果を比較した場合、通過前後の圧力差には 10%程度の差が生じ、 $P_{irr1} \sim P_{irr3}$ すなわち異なる径で構成される多孔質体の方が大きな圧力降下量が生じる傾向が見られた(図-3)。圧力降下量の空間変化によれば、部材の径が小さい区間では圧力降下量の空間変化が小さくなっており、空隙が大きくなることによって粘性作用が低下した効果が現れていると考えられる。一方、空隙が小さい区間では相対的に抗力が大きくなる傾向があることも明らかになり、空隙スケールと部材作用力および圧力降下量との定性的な関係を見出すことができた。

さらに、多孔質体を構成する部材として配向のある回転楕円体を想定し、回転楕円体のアスペクト比(長軸/短軸比)や傾角が後流域の形状や抗力・揚力に与える影響を、開発した数値モデル(Immersed Boundary Method:IBM)を用いて検討した。本計算結果によれば、抗力については傾角の増大とともに増大したが、抗力係数については傾角 90 度では 0 度の時の約 30%に低下した。これは多孔質体部材単位であっても多孔質体通過流の代表長さの決定が困難であることを意味している。また、一方向流を対象として、回転楕円体で構成される多孔質体の通過流れについても同様な検討を行ない、回転楕円体の廃校によって多孔質体後流域の形成に影響が現れることを明らかにした。なお、往復流動場に物体を固定した場合には、剥離に伴って発生する渦流の移動方向が流向とともに変動する位相において計算が不安定となることが明らかとなり、数値モデルの課題が明らかになった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

1. 麓 隆行・新木本尚志：砕石粉を用いたポーラスコンクリートの締固め性状に及ぼすペースト性状の影響，建設用原材料，第 24 巻，21-26, 2016 .
2. 中條 壯大・渡辺友哉・重松孝昌：多孔質体間隙部の微細流動計算と部材欠損が流動及び作用流体力に及ぼす影響の検討，土木学会論文集 B 2 (海岸工学)，第 73 巻，I_877-I_882, 2017 .
3. 松本弘史・重松孝昌：揺動する固体周りの高精度気液に流体運動解析手法に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，第 73 巻，I_1, 2017 .
4. 久末信幸・竹原幸生：傾斜壁を用いた鉛直取水設備の渦対策工の渦抑制効果に関する実験的検討，土木学会論文集 B1(水工学)，I_691-I_696, 2018 .
5. T. Goji Etoh・Kazuhiro Shimonomura・Anh Quang Nguyen・Kosei Takehara・Yoshinari Kamakura・Paul Goetschalckx・Luc Haspeslagh・Piet De Moor・Vu Truong Son Dao,・Hoang Dung Nguyen・Naoki Hayashi・Yo Mitsui・Hideo Inumaru：100 Mfps image sensor for biological applications, Proceedings of SPIE, High-Speed Biomedical Imaging and Spectroscopy III, 10505-10506, 2018 .
6. 江藤剛治・下ノ村和弘・竹原幸生・犬丸秀夫・林 直樹・三井 鷹・井口昭彦・三原 勉：究極の時間分解能のイメージセンサを目指して - 10 ns から 50 ps へ - , 映像情報メディア学会技術報告，9-12, 2018 .
7. 麓隆行・崎本和秀：X 線 CT 画像を用いたポーラスコンクリートの空隙形状計測に関する基礎検討，建設用原材料，9-16, 2017.
8. 松本弘史・重松孝昌：揺動する固体周りの高精度気液二流体運動解析手法に関する研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，I_865-I_870, 2017 .
9. 中條 壯大・小塚 泉・辻本 剛三・重松 孝昌：波動場における多孔質体近傍の微細流動特性についての基礎的研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，I_991-I_996, 2018 .
10. Takaaki Shigematsu・Sota Nakajo・Yuya Okada：An Experimental Study on the Interaction between Oscillatory Flow and Idealized Porous Bed, Journal of Coastal Research, 981-985, 2018.
11. 山野貴司・酒井大樹・重松孝昌・藤原隆一：スリット諸元が有脚式離岸堤の 局所洗掘特性に及ぼす影響に関する研究，土木学会論文集 B2 (海岸工学)，I_835-I_840, 2018 .
12. 中原悠輔・重松孝昌：低い鉛直平板脚部の洗掘特性に関する研究，土木学会論文集 B2(海岸工学)，I_829-I_834, 2018 .
13. 中原悠輔・重松孝昌・山野貴司：波動場における多孔質体近傍の微細流動特性についての基礎的研究，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，I_814-I_819, 2018 .

〔学会発表〕(計 16 件)

1. 渡辺友哉・中條壯大：空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，土木学会関西支部年次学術講演会，2017 .
2. 田邊礼佳・重松孝昌・中條壯大：スロッシング発生時に傾斜板群に作用する流体力に関する研究，土木学会関西支部年次学術講演会，2017 .
3. 中條壯大：多孔質体間隙部の微細流動計算と部材欠損が流動及び作用流体力に及ぼす影響の検討，日本流体力学会年会，2017 .
4. 田邊礼佳・重松孝昌：スロッシング挙動に及ぼすプレートの設置条件の影響に関する数値シ

- ミュレーション, 日本流体力学会, 2017.
5. 中原悠輔・重松孝昌: 波動場におかれた鉛直平板が洗掘特性に及ぼす影響に関する実験的研究, 日本流体力学会, 2017.
 6. Kazuhiro Shimonomura, Kohsei Takehara, Takeharu Etoh, et al.: Ultra-High-Speed CCD Image Sensors for Imaging TOF MS, 11th International Symposium on Atomic Level Characterizations for New Materials and Devices '17, 2017.
 7. 竹原幸生: 高速ビデオカメラの開発と水表面現象への適用, 高速イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム 2017, 2017.
 8. 三井鷹・下ノ村和弘・竹原幸生・江藤剛治: 5千万枚/秒の超高速ビデオカメラ用イメージセンサーの原理実証, 高速イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム 2017, 2017.
 9. 林直樹・下ノ村和弘・竹原幸生・江藤剛治: 1枚の撮像素子で1億枚/秒の超高速撮影ができるマルチフレーミング撮像素子, 高速イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム 2017, 2017.
 10. 高野保英・江藤剛治・竹原幸生: 高速ビデオカメラのユーザーの要望と変遷, 高速イメージングとフォトニクスに関する総合シンポジウム 2017, 2017.
 11. Takaaki Shigematsu・Sota Nakajo・Yuya Okada: An Experimental Study on the Interaction between Oscillatory Flow and Idealized Porous Bed, The 15th International Coastal Symposium 2018, 2018.
 12. Takaaki Shigematsu and Hiroshi Matsumoto: Turbulent Flow Induced By Oscillatory Circular Cylinder Arrays, The 36th International Conference on Coastal Engineering, 2018.
 13. 渡辺友哉・重松孝昌・中條壮大: 一方向流中の楕円体周りに形成される乱れ構造の検討, 日本流体力学会, 2018
 14. 中條壮大・小塚 泉・辻本剛三・重松孝昌: 波動場における多孔質体近傍の微細流動特性についての基礎的研究, 海岸工学講演会, 2018.
 15. 中原悠輔・重松孝昌: 低い鉛直平板脚部の洗掘特性に関する研究, 海岸工学講演会, 2018.
 16. 中原悠輔・重松孝昌・山野貴司: 波動場における多孔質体近傍の微細流動特性についての基礎的研究, 海洋開発シンポジウム, 2018.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 中條 壮大

ローマ字氏名 : NAKAJYO Sota

所属研究機関名: 大阪市立大学

部局名: 大学院工学研究科

職名: 講師

研究者番号(8桁): 30315981

研究分担者氏名: 麓 隆行

ローマ字氏名 : FUMOTO Takayuki

所属研究機関名: 近畿大学

部局名: 理工学部

職名: 准教授

研究者番号(8桁): 30315981

研究分担者氏名: 竹原幸生

ローマ字氏名 : TAKEHARA Kosei

所属研究機関名: 近畿大学

部局名: 理工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 50216933

(2)研究協力者

なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。