

堤防前面河岸に土丹が露出する帯工袖部に設置された 袋詰玉石工による侵食対策の効果検討

袋詰玉石工 固液混相流解析 土丹保護 河川構造物

中央大学研究開発機構

○福田朝生

中央大学研究開発機構

福岡捷二

国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所 澁谷慎一

1 序論

河川堤防の侵食対策は、その前面河岸の侵食対策とともに一体的に考えることが基本である。しかしながら、河床が低下し、石礫消失が顕著で土丹が露出した河川では河岸侵食対策が容易ではない。河岸の侵食対策には一般的にコンクリート護岸が用いられるが、硬いコンクリート護岸等で土丹を保護すると、コンクリートは変形出来ないため土丹との隙間を埋めることができず、護岸と土丹の間が空洞化し護岸、ひいては堤防を破壊してしまう懸念が生ずる。一方、屈撓性材料である袋詰玉石工は、袋詰玉石工と河岸との間に多少侵食が生じて、侵食地形に応じて変形できるため、河川構造物の保護工として期待が持てる工法である。このような利点を有する袋詰玉石工は、土丹が露出する河岸の侵食対策として有効な工法と考えられるが、洪水中流出しやすい等、適切な施工が難しい欠点を有する。

図-1には、本研究で対象とする多摩川44.7k付近の土丹の露出状況と帯工袖部に設置された袋詰玉石工(上段)、平成29年10月洪水によって流出した後の土丹上の袋詰玉石工の状況(下段)を示している。多摩川では、帯工袖部や低水路河岸の土丹保護対策の一つとして、図-1に示す地点では土丹侵食が激しい帯工袖部や低水路河岸を守るために袋詰玉石工が設置されている。しかし、平成29年10月洪水で、特に帯工下流部の袋詰玉石工の多くは20m近く移動してしまった。

図-2には、移動した袋詰玉石工の近景を示す。袋詰玉石工は設置時には平面的に丸い形状をしているが、流出後は、流れの抵抗を受けやすい形状に内部の石が動き、大きく変形していた。現状の工法では、袋詰玉石工内部の石礫を密に詰めることが難しい。このため洪水中に袋内で石が動きやすく形を大きく変形する。袋詰玉石工のこのような変形は、対策工の弱点となっている。

このように河岸侵食対策工として、袋詰玉石工の屈撓性の利点を生かした河岸侵食対策が必要であるが、このためには、袋の中の石の投入方法などを含む構造上の弱点を改善し、また、河岸地形や現地流れ場に応じた流出しにくい適切な配置と、これらに基づく適切な設計方法を確立する必要がある。

まず洪水流中の袋詰玉石工の安定性を評価できる技術が必要となる。しかし、室内実験で幅2mもの大きな袋詰玉石工の洪水中の安定性を検討することは容易ではなく、また、複数の袋詰玉石工にどのような力が作用しているのか実験計測は困難である。多くの構造物の安定性

解析と同様に袋詰玉石工の安定性の詳細な分析には、数値解析による計算力学的アプローチが不可欠である。

袋詰玉石工のような屈撓性材料を取り扱う研究として、個別要素法によるソイルバッグの解析¹⁾などの研究例はあるが、水流と屈撓性材料である袋詰玉石の連成解析技術は著者らの知る限り構築されていない。

これに対し著者らは種々の形状の石礫と水流の三次元運動を詳細に解析することができる固液混相流解析手法を構築してきた²⁾。この手法では、石礫よりも小さな計算格子を用いて石礫周りの流れをEuler的に詳細に解析する。また種々の形状の石礫は、小球を隙間がないように重ね合わせた物体でモデル化され、これらの運動は剛体としてLagrange的に解析される。このような固液混相流解析法は袋詰玉石工の中の石礫群と水流の連成解析に極めて適した解析法である。

本研究では、さらに袋詰玉石の網袋を小球の連結としてモデル化し、その中に石礫群を入れることで、袋詰玉

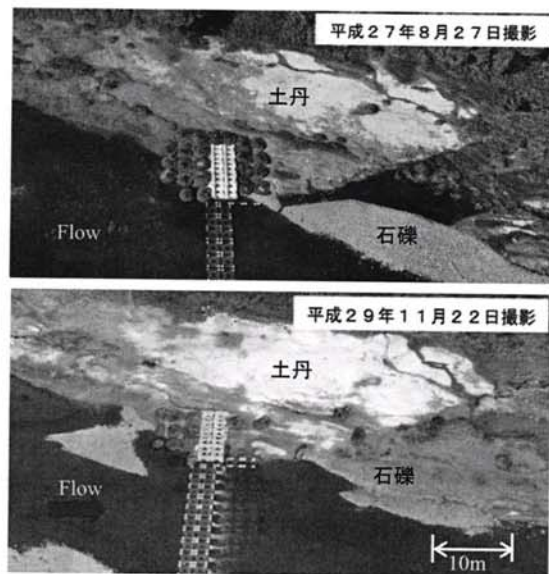


図-1 袋詰玉石工の流出前後の状況
(上段：流出前、下段：流出後)

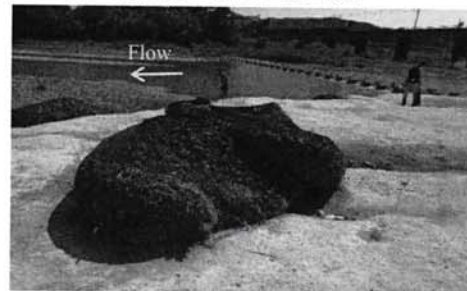


図-2 移動した袋詰玉石工の近景

Investigation of the effect of a river bank protection with gravel bags placed at a side of a bed girdle on a muddy-rock river bank in front of a levee.

Tomoo FUKUDA, Shoji FUKUOKA (Research and Development Initiative Chuo University), Shinichi SHIBUYA (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Kanto Regional Development Bureau, Keihin River Office.)

石工の解析モデルを作成する。これにより、高精度の固液混相流解析法の枠組みで、屈撓性材料である袋詰玉石工の洪水流中の安定性を適切に評価できる新しい数値解析法を構築する。

この解析法を用いて、最初に図-1 に示す多摩川の袋詰玉石工が流出した事例を解析する。次に、これらの解析と分析を踏まえて新しい構造と配置の袋詰玉石工を提案し、安定性解析からその有効性を明らかにする。

2 数値解析法

2.1 流体運動の解析法

最初に本研究の固液混相流解析法を概説する。液相の運動解析では、牛島ら³⁾の手法を参考に固相を密度の異なる流体として全体を非圧縮性流れとして解いている。乱流モデルとしてスマゴリンスキーモデルを用いている。以下に液相の解析の基礎式を示す。

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = g_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{ 2(v + \nu_t) S_{ij} \} \quad (2)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\nu = \mu / \rho \quad (4)$$

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (5)$$

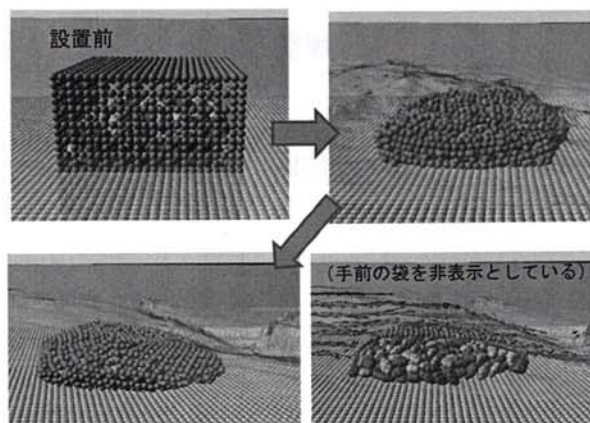
ここに u_i は固相部分も考慮した計算格子内の質量平均の*i*方向速度。 ρ および μ は計算格子内の体積平均密度および粘性係数である。 g_i は重力加速度、 P は圧力とSGS応力の等方成分の和、 C_s はスマゴリンスキー定数、 Δ は計算格子サイズである。これらを直交格子差分法で離散化し、SMAC法を用いて時間積分を行っている。なお、自由水面の変化はVOF法⁴⁾で解析している。

2.2 袋詰玉石工のモデル

本研究で構築した袋詰玉石工のモデルを数値的な水路に設置して安定性を解析した例を図-3に示す。図-3に示すように本研究では小球を連結させて紐状とし、これらを網の様に連結させることで網袋のモデルを構築している。石礫は9つの小球を隙間が無いように連結して作成している。粒子に作用する流体力は、液相の運動解析で解かれた混相流体の粒子部分に作用する力を体積積分することで求めている。解析法の詳細は文献²⁾を参照されたい。

2.3 接触力の算定法

本解析における接触力の算定法は2パターンに分類される。1パターン目は、網袋の紐を構成する小球が結合相手の紐の小球と接触する場合であり(結合接触と呼ぶ)、2パターン目はそれ以外(通常接触)である。この通常接触には、石礫同士の接触、石礫と紐の小球との接触、結合されていない紐の小球同士の接触が含まれる。これらの2パターンの接触力は、バネ、ダッシュポット、摩擦スライダーを用いて解析している。通常接触は、結合されていない小球間の接触であるため、引張力を作用させない。一方、結合接触では引張力を考慮した接触とする。また、結合接触で、通常接触と同様に接平面上の方向のバネを考慮して接触力を求めてしまうと、バネに



左図と同時刻の袋の中の石礫と流れの様子

図-3 水路の袋詰玉石工の安定解析例

表-1 袋詰玉石工のモデルの諸元

	単位	大袋モデル	小分け袋モデル
石礫径	m	0.2	0.2
石礫密度	kg/m ³	2,650	2,650
袋の小球径	m	0.1	0.1
袋の小球密度	kg/m ³	1,000	1,000
小袋内石礫数	—	—	84
小袋内石礫質量合計	kg	—	931
大袋内石礫数	—	334	336
大袋内石礫質量合計	kg	3,700	3,720

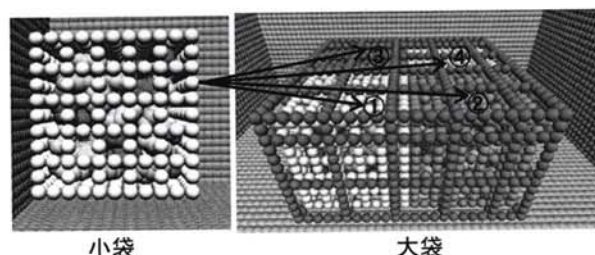


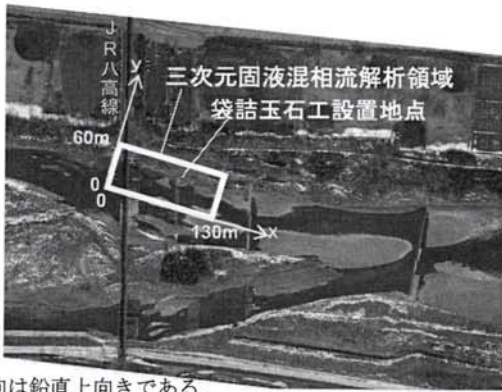
図-4 小分け袋詰玉石工モデル

よるエネルギーが蓄積され、剛性をもつ材料のような挙動になってしまう。一方、袋の紐はしなやかに変形させる必要がある。このため、結合接触では法線方向のバネについては考慮するが、接平面上の方向のバネについては考慮していない。

3 現地を対象とした袋詰玉石工の洪水流中の安定性解析

3.1 解析ケース

本研究では、図-1に示すJR八高線多摩川鉄橋直下流の帯工袖部の袋詰玉石工を対象とし袋詰玉石工が流出した平成29年10洪水相当の外力を与え、袋詰玉石工の安定性解析を2ケース実施する。ケース1(再現計算と呼ぶ)は、流出する前の袋詰玉石の大きさ、配置で安定性解析を実施する。再現計算では、現地に施工された袋詰玉石と同様に、図-3に示すように1つの大きな袋で石礫を包んだ袋詰玉石のモデルを用いる(大袋モデルと呼ぶ)。大袋モデルの諸元を表-1に示す。大袋モデルに詰めた石礫は3,700kgである。この解析からモデルの袋詰玉石工の流出の再現性を確認し、また、実際に流出した袋詰玉石の配置の課題を明らかにする。



z 方向は鉛直上向きである。

図-5 固液混相流解析対象領域および座標系の定義

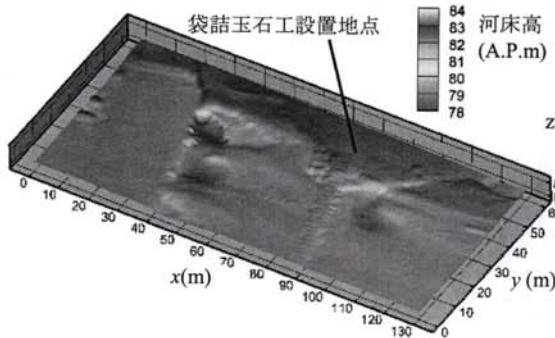


図-6 河床高コンター鳥瞰図

ケース 2 (新規案と呼ぶ) は、再現計算の結果を踏まえて、流出しにくいように工夫した新しい袋詰玉石の施工案で安定性解析を行い、その施工案の効果を評価した。図-4 には、新規案で用いた袋詰玉石工のモデル (小分け袋モデルと呼ぶ) を示す。小分け袋モデルの諸元は表-1 に示している。小分け袋モデルは、袋の中の石礫の空隙を減じ、動き(変位)を抑制するため、まず、約 1t の石礫を含む小袋を作成し、この小袋 4 つ分を 1 つの大きな袋で包む新しい袋詰玉石工である。

3.2 解析領域

図-5 には三次元固液混相流の解析領域および本解析の座標系の定義を示す。解析領域は縦断方向に 130 m 横断方向には 60 m である。解析領域は、計算負荷を考慮し、また、帯工地点の高速流が及ばない帯工から離れた場所が境界となるように設定した。なお、流体計算格子サイズは 0.25m とした。

3.3 境界条件

三次元の固液混相流の解析では、境界条件として上下流端に水位を与えた。また、横断方向は不透過とした。本解析は、詳細な三次元計算であり計算負荷が大きく、平成 29 年洪水のハイドロ全体を対象に解析することが難しい。そのため、当該洪水のピーク時の流況を定常で与えて袋詰玉石工の安定性を検討した。上流端水位には、近傍の 45k 地点で観測されたピーク水位 A.P.84.6m を与えた。下流端は、まず平成 29 年洪水の当該地点のピーク流量相当の 2,000m³/s を外力として固液混相流解析区間を含む広域を準三次元解析で解析し、その結果である A.P.83.4m を下流端の境界条件として与えた。

3.4 解析地形

袋詰玉石の安定性を評価するためには、現地の詳細な

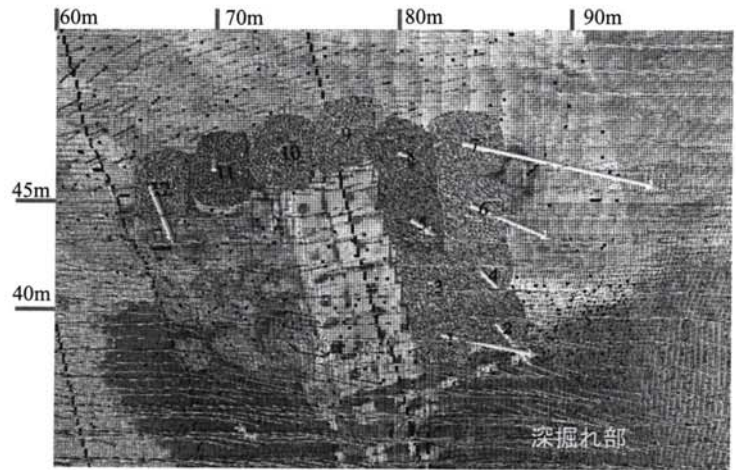


図-7 時間当たりの推定移動距離(再現計算)

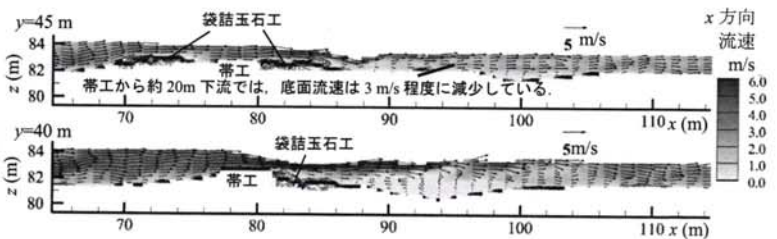


図-8 鉛直平面内の x 方向流速コンター図 (再現計算)

地形を境界条件として与える必要がある。本研究では、図-6 に示す ALB 測量により得られた 1m メッシュの地盤高データを解析地形データとして与えている。具体的には、河床と河岸の地形に合わせて 0.1m の小球を並べ地形を表現している。このようにすることで、袋詰玉石工が河床や河岸との接触を保ち安定性の解析を可能としている。

3.5 再現計算結果

再現計算について袋詰玉石工の移動速度を算出し、一時間当たりの移動距離としてベクトル表示したものを図-7 に示す。この図より、帯工の下流部では、1時間当たり 10 m 近くも移動することが推定されており、解析結果は、平成 29 年洪水で袋詰玉石工が移動した状況を概ね再現できていると考えられる。

図-8 には、 $y = 40 \text{ m}$ と $y = 45 \text{ m}$ の鉛直平面内の x 方向流速コンター図を示す。帯工を越流する付近では、6 m/s 近い高速流が発生している。一方で、帯工から大よそ 20 m 程度下流の河岸では、帯工を越流する局所流の影響は小さくなり、河床付近で流速が 3 m/s 程度まで落ち込んでいることがわかる。当該付近は、図-1 (下段) で流出した袋詰玉石工の多くが停止している領域であり、また、当該付近は河床に石礫の堆積が見られる。現地の状況からも、帯工から 20 m 程度下流まで行くと流速が低くなっていることが示唆されている。

3.6 新規案の検討

再現計算結果を踏まえて流出しにくい袋詰玉石工 (新規設置案) の設置方針を図-9 に示す。再現計算結果より、帯工から 20 m ほど下流では、帯工付近と比較し、流速は大きく減じられている。このため、新規設置案では、帯工直下から約 20 m ほど下流まで袋詰玉石を連続的に配置した。そして、最下流付近の比較的流速が減じ

られた位置に設置された袋詰玉石工がアンカー的役割を担い、上流の高流速部の袋詰玉石工を支えることを狙っている。なお、新規案では、49基の袋詰玉石を用いた。

図-10には、再現計算の図-7と同様に、時間当たりの移動距離を示している。この図より、再現計算(図-7参照)で見られた、帯工直下($x = 85$ m 付近)の袋詰玉石の10mほどの大きな移動は、ほぼ抑制できていることがわかる。一方、新規案では、河岸の斜面部を守るため、斜面部にも袋詰玉石を配置したが、配置方法が必ずしも十分ではなく、図-10では斜面部の袋詰玉石は河道中央方向に移動している。

当該部分の移動状況の詳細を示すため、図-11に $x = 86$ m 断面の初期と計算終了時の袋詰玉石の頂部の高さ分布を示す。図-8に示すように帯工を越流する流れは6 m/s 近くになっており、このような高速流を受けて斜面部の袋詰玉石は、洗掘の最深部へずり落ちている。ずり落ちの対策として、第1に図-12に示すように、洗掘の最深部から密に、かつできるだけ鉛直方向に力を伝えやすいように、袋詰玉石を斜面でも水平になるように設置していくことが重要である。また、第2には袋詰玉石それぞれを結び、引張力を発揮できるようにして平坦部の袋詰玉石が斜面部の玉石のずり落ちを抑制することも効果的と考えられる。第3には、最深部に重量があり河床地形変化になじむことのできる大型のサンドバック⁵⁾(幅5m程度)などを配置し、上部の袋詰玉石工の基礎として用いることも有効と考えられる。これらの第2、第3の工法については、必ずしも礫河川の施工法として確立されていないため、今後これらの技術を確認なものとしていく必要がある。

4 結論

本研究では、屈撓性をもつ河岸保護工である袋詰玉石工について、石の動きを抑えて玉石内部の空隙を小さくし、安定性を高める工法を工夫し、かつこの袋詰玉石工の洪水流中の安定性を評価することができる新しい技術を開発した。

技術的に三つの特徴を有する。第一は袋詰玉石工を小分けすることによって内部の石の動きを抑制し、変形を小さくすることによって安定性を向上させることができる構造上の知見である。第二は、袋詰玉石工を連続的に配置する縦断方向の距離についての知見である。帯工を越流する高速流は空間的に限定される。このため、袋詰玉石工を安定させるためには、高速流がある程度減速する帯工の数十メートル下流まで連続的に袋詰玉石を設置し、帯工直下の高速流部にさらされる袋詰玉石を、下流の袋詰玉石が支えるようにすることが重要である。第三は、斜面部に配置された袋詰玉石工の移動特性に関する知見である。帯工を越流する落ち込み流によって斜面に設置された袋詰玉石は、河道中央の洗掘部に向かうように斜面をずり落ちる傾向があることが明らかとなった。本稿では、この斜面部のずり落ちに対する対策として洗掘の最深部から袋詰玉石を十分に配置する方法、斜面部と平坦河岸部の袋詰玉石工同士を繋ぎ引張力でずり落ち

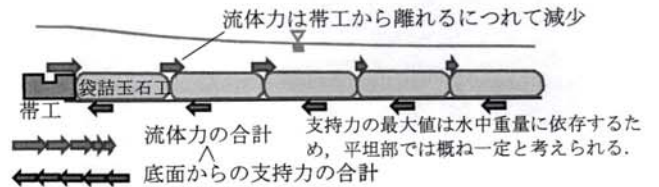


図-9 新規案の設置方針

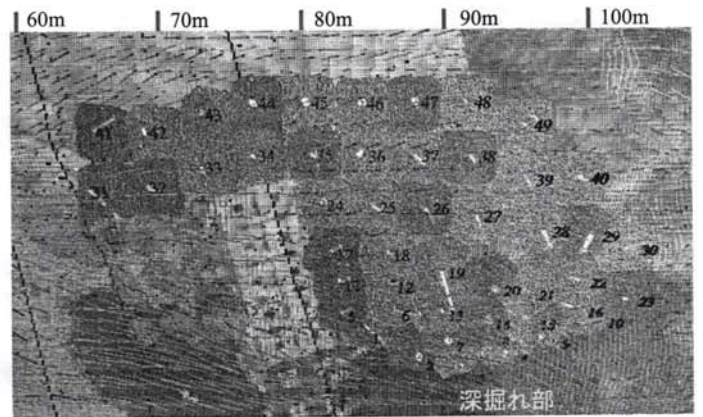


図-10 時間当たりの推定移動距離(新規案)

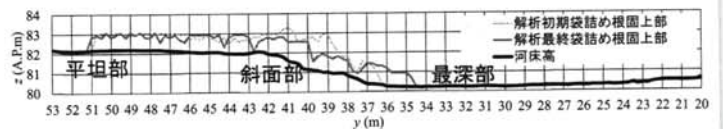


図-11 横断面内の袋詰玉石工の移動の様子($x=86$ m)(新規案)

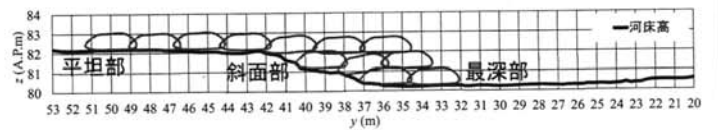


図-12 洗掘部へのずり落ちに対応した配置案($x=86$ m)

を防ぐ方法、また大型サンドバックを基礎として用いる方法などを提案した。今後は、現地施工を行いモニタリングを進めながら、より合理的な構造と設計法の検討を進めていく予定である。さらに、開発した屈撓性の高い河岸保護工を用いた管理手法は、治水だけでなく環境上も重要な役割を担うものと考えられる。

参考文献

- 1). H. Cheng, H. Yamamoto, K. Thoeni, Y. Wu: An analytical solution for geotextile-wrapped soil based on insights from DEM analysis, *Geotextiles and Geomembranes*, *Geotext. Geomembr.*, 45:361-376, 2017.
- 2). Tomoo Fukuda, Shoji Fukuoka: Interface-resolved large eddy simulations of hyperconcentrated flows using spheres and gravel particles, *Advances in Water Resources*, <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2017.10.037>
- 3). 牛島省, 山田修三, 藤岡奨, 福津家久: 3次元自由水面流れによる物体輸送の数値解法(3D MICS)の提案と適用性の検討, *土木学会論文集 B*, Vol.62, 1, pp.100-110, 2006.
- 4). Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. Comput. Phys.*, 39, pp.201-225, 1981.
- 5). 諏訪義雄, 野口賢二, 渡邊国広, 関口陽高, 石川祐介, 土橋和敬, 高垣勝彦, 弘中淳市: 浜崖後退抑止工の性能照査・施工・管理マニュアル-共同研究「海岸保全における砂袋詰工の性能評価技術に関する研究」報告書-, 国土技術政策総合研究所資料第745号2014年1月。