

不連続変形法 (DDA) による土石流中の巨礫の挙動解析

中電技術コンサルタント(株) ○岩田 直樹, 荒木 義則
 サンコーコンサルタント(株) 佐々木 猛, 萩原 育夫
 関西大学環境都市工学部 大西 有三
 関西大学社会安全学部 小山 倫史
 基礎地盤コンサルタンツ(株) 三木 茂

1. はじめに

近年多発している豪雨により 2014 年 7 月には長野県で巨礫を含む土石流で砂防堰堤が破壊する事例が発生した。これを契機として土石流における巨礫対策を検討するように通達が出たことから、土石流中の巨礫の挙動評価が重要な課題となっている。これまで巨礫を含む土石流に対しては、混相流と仮定した連続体として扱われてきたが、礫径が土石流水深に比べて十分に大きい場合には個々の巨礫の運動を捉える必要がある。そこで本研究では、3m を超える巨礫の流出が観測された 2014 年 8 月の広島土石流災害を事例として、2 次元および 3 次元の不連続変形法 (2D-DDA および 3D-DDA) を用いてシミュレーション解析を行い、地形や巨礫寸法等の影響について比較することにより DDA の土石流解析への適用性について検討を行った。

2. 解析手法

DDA は不連続体解析手法の一種であり、任意形状の弾性体ブロック間のすべり・分離および接触を考慮した大変形解析が可能で、落石問題等に用いられている。土石流解析への適用に当たっては、土石流の流体力を考慮する必要があることから、図-1 に示すように斜面上を流れる土石流を領域として定義し、この領域内を通過した巨礫ブロックに式(1)で示す領域内にあるブロックの体積に応じた流体力と浮力を作用させる¹⁾。

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_w A V^2 + \rho_w V_{dip} \quad (1)$$

ここで、 F_D ：土石流流体からブロックに作用する外力、 C_D ：抗力係数、 ρ_w ：土石流の密度、 A ：土石流に水没している（領域内の）ブロックの表面積、 V ：土石流流体とブロックの相対的な速度、 V_{dip} ：土石流に水没している（領域内の）ブロックの体積。また、領域内は流速一定とし、領域の高さが土石流の水深となる。

3. 広島災害で流出した巨礫の状況²⁾

本検討では多数の巨礫が流出した写真-1 に示す広島市安佐南区八木三丁目の溪流を対象とした。溪流の大部分は花崗岩からなり、表層 1~2m は風化したまき土であるが、深部にはブロック化した巨礫が分布しており、豪雨によりこの 2~4m 程度の巨礫ブロックが流出した。土石流は本川の標高 415m 付近に源頭部を持ち、標高 215m 付近で左岸側からの支川と合流して流下した。標高 60m 程度の溪流出口までの流路長は 980m 程度で平均勾配は約 20°、溪流出口から下流の平均勾配は 10° 程度である。巨礫は溪流出口より下流 100m 程度の箇所まで到達した。溪流出口付近の土石流の痕跡調査の結果、3 回の流出が確認されており、第 1 波は溪流出口付近の左岸側に堆積し、第 2 波、第 3 波が溪流出口の右岸側を浸食して巨礫とともに流下したものと考えられている。

4. 解析条件

モデル化領域は写真-1 に示す範囲であり、本川と支川の合流部を巨礫発生源（ブロック流下開始点）とした。図-2 に 3D-DDA モデルを示す。地山は 10m グリッドの LP データをもとに作成し、巨礫ブロックは立方体の角を面取りした形状とし、巨礫発生源から 1 つのブロックを流下させた。土石流の流速と水深は土石流の流下幅、河床勾配等を用いて Manning 式により設定した。その他の解析条件は表-1 に示す。

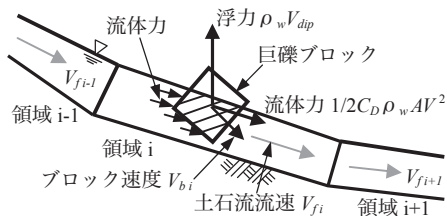


図-1 ブロックに作用する土石流流体力

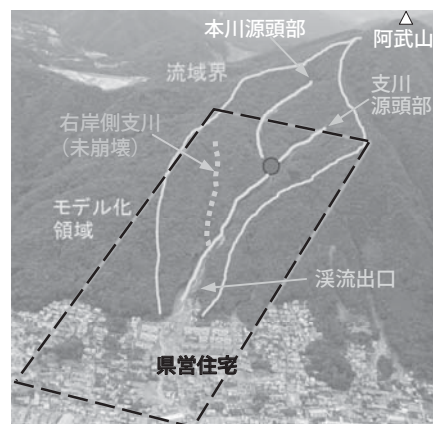


写真-1 対象溪流の全景とモデル化領域

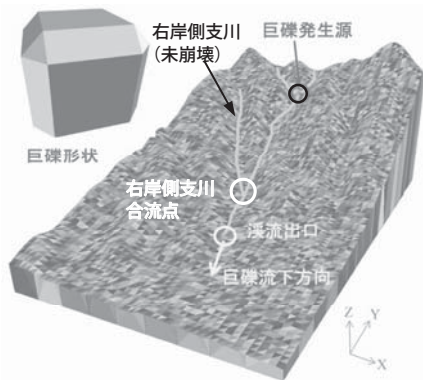


図-2 3D-DDA モデルと巨礫ブロック

表-1 解析用物性値

	弾性係数 (GPa)	0.5 (C _M ~C _I 級相)
巨礫	ポアソン比	0.2
	単位体積重量 (kN/m ³)	26.0
	ペナルティ (GPa/m)	0.5
	ブロック寸法 (m)	1.0~4.0 (0.5m 刻み)
溪流部	接触部の摩擦角 (°)	30
	速度比	0.8~0.4
溪流出口下流	接触部の摩擦角 (°)	10
	速度比	0.6~0.2
土石流	単位体積重量 (kN/m ³)	19.2
	抗力係数	1.5
時間刻み (秒)		0.0001

5. 解析結果

まず、土石流の流体力の影響と巨礫寸法の影響を評価するために、2D-DDA による検討を行った。図-3 は、土石流の流体力を考慮したケースと考慮しないケースについて、巨礫寸法 3m とした場合の速度分布と巨礫の軌跡を示す。溪流出口下流部の勾配が 10° 程度であることから、いずれのケースも完全に巨礫が停止することなくゆっくりと転がり続ける。このため、巨礫の速度が 1.0m/s 以下で 3 秒以上継続した場合に停止したものと判断して到達距離を算定した。溪流部の巨礫速度は、流体力を考慮したケースでは、流体力の作用により土石流の流速と同程度となるが、流体力を考慮しないケースでは流速よりも遅く、飛び跳ねる軌跡が見られる。このため、流体力を考慮しないケースでは、溪流出口付近で速度が 1m/s 程度となり一旦停まりそうになるが、その後再び転がり溪流出口から 45m で停止した。一方、流体力を考慮したケースでは、溪流出口の巨礫の速度が 4m/s 程度であり、溪流出口から 190m まで巨礫が到達した。

図-4 は、巨礫寸法を $1.0\sim 4.0\text{m}$ まで 0.5m 刻みで変化させ、流体力の有無の影響について到達距離の比較を行ったものである。この結果、流体力を考慮した場合、巨礫寸法が大きくなると到達距離が短くなる傾向は見られるが、流体力を考慮しない場合、巨礫の寸法によらず溪流出口付近で停止する結果となる。

次に、3 次元的地形の影響について検討するために 3D-DDA による検討を行った。図-5 は、 3m の巨礫に流体力を作用させたケースの軌跡を示す。巨礫は地形に応じて溪流部を流下するが、溪流出口付近で右岸側の斜面に衝突して完全に停止する。この傾向は、流体力を考慮しない場合も同様である。

図-6 は、3D-DDA で 3m の巨礫に流体力を考慮したケースの X 方向（概ね溪流横断方向）と Y 方向（概ね溪流縦断方向）の巨礫の流下速度と Y 方向の軌跡を示す。図示していないが、流体力を考慮しないケースでは巨礫の速度は土石流よりも非常に遅く、溪流部での飛び跳ねも多い。しかしながら流体力を考慮すると、流体力の影響により巨礫の流下速度は速くなり飛び跳ねもほとんどなくなる。ただし、2D-DDA と比較すると流下速度は遅く、巨礫が土石流とともに流下しているとは言いがたい。これは、巨礫の 3 次元形状を考慮したことで作用する流体力が小さくなったためである。一方、紙面の都合で結果を添付できていないが、巨礫寸法を 2m とすると、土石流に浸かっている割合が大きくなるため流下速度が大きくなり土石流の流速に近づく。このため溪流出口で停止せず、溪流出口から 50m 程度の位置まで到達する。

3D-DDA で巨礫が溪流出口付近に停止することについては、実際の土石流第 1 波が溪流出口付近に堆積したと整合しており、第 2 波、第 3 波が斜面を洗掘して巨礫が流出したことを考慮すると、2 次元よりも 3 次元が現地状況をより再現できているものと考えられる。

6. おわりに

本検討の結果、3次元の地形をモデル化し、流体力を考慮することで土石流中の巨礫の挙動をより精度良く評価できる可能性があることは分かってきたが、ブロックの寸法、形状等の違いが解析結果に大きく影響するものと考えられる。また、本検討では 1 個の巨礫の挙動に着目して解析を行ったが、実際には複数の巨礫が混在して流下する。このため今後は、複数のブロックを対象とした解析なども進め、巨礫の流下・運搬メカニズムも含めた検討を行い、巨礫の挙動評価の精度向上に努めたいと考えている。

参考文献 1)Sasaki, T. et al. : Parameter study of practical rockfall problems with fluid flow by 3D-DDA, *12th ICADD*, pp.48-56, 2015. 2)土木学会・地盤工学会：平成 26 年広島豪雨災害合同緊急調査団 調査報告書, 2014.

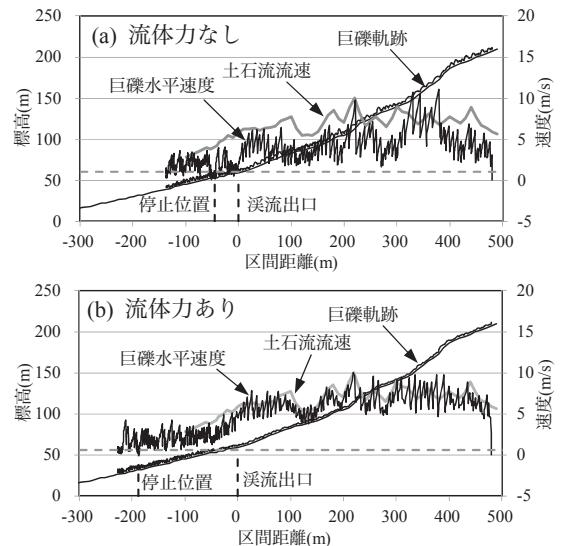


図-3 2D-DDA による巨礫の速度と軌跡の比較

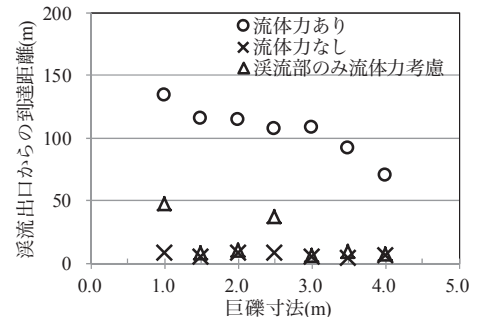


図-4 2D-DDA による巨礫寸法の違いによる到達距離の比較

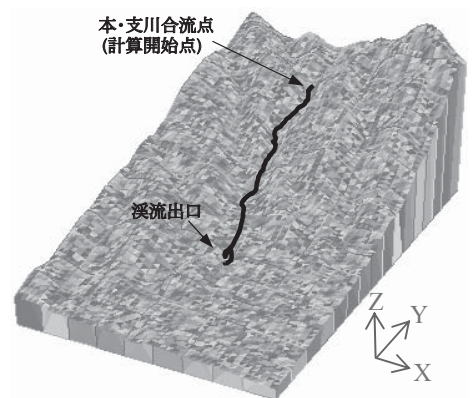


図-5 巨礫の軌跡(巨礫寸法 3m, 流体力あり)

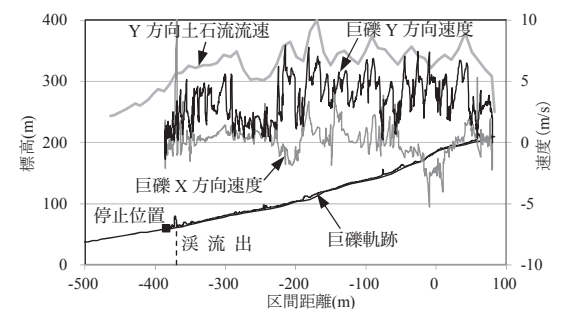


図-6 巨礫の速度と軌跡 (3D-DDA, 巨礫寸法 3m, 流体力あり)