

巨礫衝突による砂防堰堤の損傷と3次元効果の影響に関する検討

中電技術コンサルタント(株) ○神立晋弥, 岩田直樹, 杉原成満
北海道大学 大学院工学研究院 福田大祐

1. はじめに

巨礫を多く含む石礫型土石流の発生時に砂防堰堤が受ける流体力や衝撃力は、径が大きくなるほど、堰堤の損傷リスクが大きくなると考えられる。一般に、これらの外力に耐え得る構造として、砂防堰堤の天板幅は衝突する礫径の2倍を満足するとして決定されるが、巨礫の衝突に伴う砂防堰堤の損傷について、検討された事例は少ない。

本稿では、巨礫が砂防堰堤に衝突する土石流を模擬した動的破壊過程解析を実施した。まず、2次元解析を用いて様々な礫径や流速が堰堤の破壊形態に及ぼす影響を考察した。また、2次元解析において損傷が最大となる条件に対して3次元解析を行うことで、損傷形態の観点から3次元効果の影響検討を考察した。

2. 解析手法および解析条件

本研究では、GPGPUを有効活用した大規模並列計算技術を導入した Combined FEM-DEM¹⁾を用いた。本解析手法では『i) 連続的な変形過程(応力波動伝搬)』、『ii) 連続体から不連続体への遷移過程(亀裂の生成・連結・分岐)』、『iii) 固体表面間の複雑な接触過程』を詳細に解析可能である。

図-1に堰堤、巨礫の解析モデルの概要および境界条件を示す。解析モデルとなる堰堤は、堰堤高10m、袖部3mおよび天端幅3mとし、3次元解析における奥行きは20mとした。2次元解析(平面ひずみ条件)では三角形要素、3次元解析では四面体要素から成る非構造メッシュにより空間離散化し、要素寸法は平均50mmとした。これらの要素間状の応力が引張強度或いはせん断強度(モール・クーロン基準)に達した場合、引張軟化、滑り軟化を実装した初期厚み0の Cohesive 要素をアダプティブに挿入して動的破壊過程を取り扱う。

表-1に解析用物性値を示す。堰堤はコンクリートとし、各種パラメータは文献^{1),2)}を参考に設定した。また、巨礫は非破壊条件の線形弾性体とした。図-2に解析ステップおよび荷重条件を示す。STEP1として、堰堤の下部を変位拘束した状態で、堰堤の自重および堰堤に作用する静水圧と堆砂圧を考慮した初期応力解析を行い、初期応力状態を模擬した。堆砂圧および静水圧は天端から2m下がりで常時作用しているものとした。この状態に対して、STEP2として、土石流流体力および巨礫衝突速度を考慮した衝突解析を開始した。この際、モデル下部からの不合理な反射波を避けるために、静解析で得られた節点力をモデル下部に逆向きに作用させて初期応力を保ちつつ、連続境界(透過境界)条件を適用した。巨礫の衝突速度は近年に発生した土石流災害報告^{3),4)}を参考に5m/sおよび7m/sとした。また、衝突位置は本体上部(水通し天端から礫径の1/2を下げた位置)で水平方向とした。2次元解析では、表-2に示すとおり衝突速度および礫径の組み合わせを変更し検討を行った。

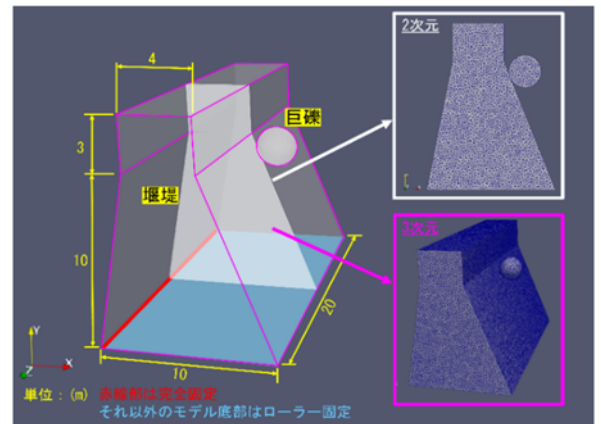
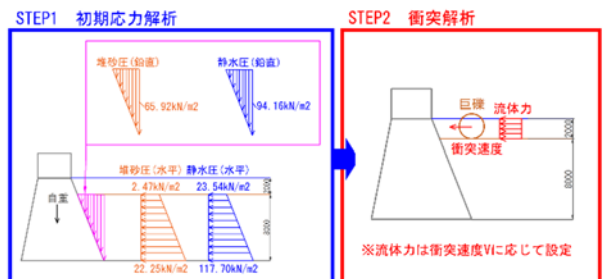


図-1 堰堤、巨礫の解析モデルの概要および境界条件

表-1 解析用物性値^{1),2)}

項目	堰堤(コンクリート) (破壊を考慮)	巨礫 (非破壊扱い)
質量密度 ρ (kg/m ³)	2300	2600
弾性係数 E (GPa)	22	50
ポアソン比 ν	0.20	0.23
内部摩擦角 ϕ (°)	37.00	—
粘着力 c (MPa)	2.5	—
引張強度 T_u (MPa)	1.58	—
Mode I (引張・開口型の亀裂) 破壊エネルギー(J/m ²)	150	—
Mode II (せん断・すべり型の亀裂) 破壊エネルギー(J/m ²)	237	—
接触ペナルティ係数(GPa)	10E	—
接触摩擦係数	0.6	0.6



※1: 堆砂圧および静水圧は水平・鉛直方向に作用させる。
※2: 流体力は衝突速度に応じて設定する。

図-2 解析ステップおよび荷重条件

表-2 衝突解析における検討ケース

衝突速度(m/s)	5.0				7.0			
礫径(m)	1.0	1.5	2.0	2.5	1.0	1.5	2.0	2.5

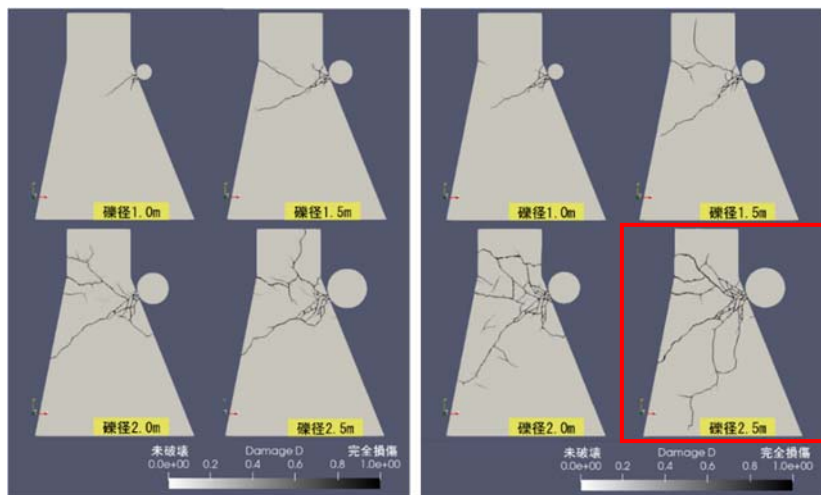


図-3 2次元解析における損傷度
(衝突速度 5.0m/s)

※赤枠は損傷が最も大きいケースを示す。

図-4 2次元解析における損傷度
(衝突速度 7.0m/s)

3. 解析結果

図-3 および図-4 に衝突速度を 5m/s および 7m/s とした場合の 2 次元解析における損傷度を示す。損傷度は 1.0 (黒色) に近づくほど損傷が大きいことを示す。どちらの衝突速度においても、亀裂は衝突部から放射状に広がり礫径 1.0m では亀裂が貫通しないが、礫径 1.5m で下流側に貫通している。また、礫径が大きいと損傷領域が大きくなるが、貫通状況にあまり差異はない。2 次元解析結果では、天板幅の 1/2 以下の礫でも亀裂が貫通する結果となった。この結果を踏まえ 3 次元解析では、最も損傷が大きいと考えられる衝突速度 7.0m/s および礫径 2.5m の検討を行った。

図-5 に 3 次元解析における損傷度を示す。2 次元解析結果における損傷度と比較すると、両者とも巨礫の接触部近傍で圧砕域が形成されているが、2 次元解析では、亀裂進展が面内のみで生じているため卓越亀裂が形成されやすく、伸長量も顕著に長くなる。一方、3 次元では伸長量も短く完全崩壊には至っていない。

検討結果の比較より同様の物性条件では、2 次元解析の方が損傷を過大評価しすぎる可能性が示唆された。これは、応力波動伝搬における幾何学的減衰の違いと、衝突時のエネルギー伝達における違いが考えられる。応力波動伝搬における幾何学的減衰の違いとして、図-6 に示す最大主応力図 (最も引張側) の時刻歴による比較から、2 次元解析では面内方向に依存した減衰となり、応力が比較的高いまま堰堤中を伝播しているのに対し、3 次元解析では衝突部から生成した応力波動が奥行方向も含めた 3 次元的な幾何学減衰を受けながら減衰している。また、衝突時のエネルギー伝達における違いとして、3 次元解析では巨礫が球状のため衝突部がほぼ点载荷とみなせるが、2 次元解析では巨礫が無限円柱のため衝突部は面载荷であり衝突エネルギーが見かけ上大きくなっていることが考えられる。そのため、2 次元解析では、亀裂進展が面内のみとなるが、3 次元解析では、衝突部で生じる破砕片動詞の連結・結合効果が生じることにより、亀裂が見かけ上進展しづらくなることが考えられる。

4. おわりに

本稿では、巨礫が砂防堰堤に衝突する土石流を模擬した動的破壊過程解析を実施し、損傷形態の観点から 3 次元効果の影響検討を考察した。その結果、同様の物性条件では、2 次元解析の方が損傷を過大評価しすぎる可能性が示唆された。

今後の課題としては、実際の土石流挙動に近い巨礫の形状のモデル化や複数回に及ぶ連続した礫の衝突の再現、礫の回転を含む外力の設定等、解析条件の整理を行うことで、実現に近い解析の精度向上につながると考える。

参考文献

- 1) Fukuda, D., Liu, H., Zhang, Q.B., Zhao, J., Kodama, J., Fujii, ., Chan, A., *Modelling of dynamic rock fracture process using the finite-discrete element method with a novel and efficient contact activation scheme*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021 **138**, Paper104645.
- 2) 石黒寛：ダムコンクリートの破壊力学パラメータの解析, 農業土木学会論文集, pp63-71, 2006
- 3) 今泉ら：令和 3 年 7 月静岡県熱海市で発生した土石流災害, 砂防学会誌, Vol.74, No.5, p.34-42, 2022
- 4) 平松ら：平成 26 年 7 月 9 日長野県南木曽町で発生した土石流災害, 砂防学会誌, Vol.67, No.4, p.38-48, 2014

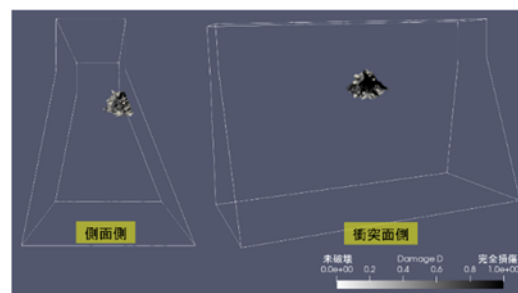


図-5 3次元解析における損傷度
(衝突速度 7.0m/s, 礫径 2.5m)

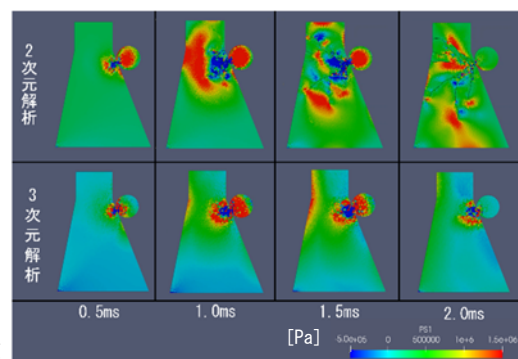


図-6 最大主応力図の時刻歴による比較