

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月15日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560512

研究課題名（和文） 固液混相粒子モデルを用いた砂防構造の耐衝撃性照査

研究課題名（英文） Development of the numerical tool for verification of impact performance of Sabo structures using the particle method equipped with solid and liquid particles

研究代表者

別府 万寿博（BEPPU MASUHIRO）

防衛大学校・システム工学群・准教授

研究者番号：90532797

研究成果の概要（和文）：本研究は、固液混相粒子モデルを用いて、土石流荷重を受ける砂防構造物の耐衝撃性照査法を開発したものである。研究の対象は土砂と礫が混ざった石礫型土石流であり、提案した手法により土石流による衝撃荷重の評価を行うとともに、衝撃荷重を受ける構造部材の変形解析を行った。土石流の流動解析では通常の流体向けに開発された粒子法と個別要素法を組合せ、石礫間および礫と床面との摩擦を考慮することで、土石流段波と衝撃的荷重を再現することができた。また、構造部材の変形解析では弾性ひびきを対象として、土石流モデルとの連成解析を行い、変位やひびきの再現性を確認した。

研究成果の概要（英文）：This study proposed the numerical tool for verification of impact performance of Sabo structures using solid and liquid particles. The impulsive load caused by the surge debris flow and deformation of the Sabo structures have been analyzed. In the numerical simulation of the debris flow, the discrete element method (DEM) was introduced in cooperation with the original particle method developed for fluid simulation. The surge formation of the debris flow and the impulsive load have been reproduced by the proposed method. The coupling analysis between the proposed debris flow model and Sabo structures has been proposed and validated by comparison with experimental result.

交付決定額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2009年度 | 2,300,000 | 150,000 | 2,450,000 |
| 2010年度 | 800,000 | 90,000 | 890,000 |
| 2011年度 | 600,000 | 45,000 | 645,000 |
| 総計 | 3,700,000 | 285,000 | 3,985,000 |

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：構造工学、減災

1. 研究開始当初の背景

急峻な山岳地帯の多い日本では、土石流が発生する危険性のある溪流が約8万箇所と非常に多いだけでなく、昨今の温暖化や気候変動による集中・ゲリラ豪雨の発生頻度の増加

にともない、土石流による深刻な被災が跡を絶たない。これまで、土石流の発生・流動メカニズムの解明はかなり行われてきたが、土石流防災構造（砂防構造物）の設計では、流体力と巨礫の衝突力を静的荷重に置き換えて

行われており、土砂や礫・岩石を含む複雑な土石流を考慮した実現現象に忠実なモデルによる性能照査法の検討は全く試みられていなかった。土石流危険箇所における砂防構造物の整備率は全国平均で約25%と低い状況にあり、ムダのない整備を行うためには砂防構造物の衝撃挙動を解明し、合理的な設計手法を確立することが求められていた。

2. 研究の目的

本研究は、砂防構造物の合理的な性能照査法を開発することを目指し、土砂や岩石・礫を含む土石流を粒子で模擬した固・液混相流として解析するとともに、この土石流モデルと砂防構造物との連成衝撃解析手法を構築するものである。

3. 研究の方法

(1) 土砂と大小の礫を含む土石流の固液混相流解析法を開発し、礫の粒度分布等を考慮した土石流の流動シミュレーションを行う。

(2) 開発した土石流モデルと砂防構造物の連成衝撃法を構築し、土石流を受ける構造部材の変位やひずみ応答を評価する。

4. 研究成果

(1) 石礫型土石流による衝撃的荷重の特徴を把握するために、急勾配水路を用いて実験を行った。粒度分布が異なる6種類の石礫型土石流モデルを止め板で天然ダム形状に堆積させ、流水の越流と共に止め板をはずして流下させる方法（天然ダム決壊型）を採用して、水路幅10cm、水路勾配18°の条件で流動実験を行った。天然ダムは、台形状に形成させ、ダムの高さ15cm、上幅30cm、下幅35cmとした。なお、水路床は棧粗度とした。荷重は天然ダムから5m下流に設置した分力計を用いて計測した。また、高速ビデオにより堆積状況を可視化した。

実験の結果、土砂と礫成分の比によって、段波形成状況と荷重特性が大きく変化することがわかった。図-1、2は、礫と土砂の質量比が7:3の場合に発生した土石流先頭部の段波形状と衝撃的な荷重を示している。このように、特定の条件下では土石流先頭部が盛り上がる段波が形成されるとともに、非常に大きな最大荷重が瞬時に生じることがわかる。これらの実験事実は、土石流モデルの段波形成を室内実験で観察した数少ない貴重な成果である。

(2) 石礫型土石流による衝撃荷重を再現するために、通常の粒子法と個別要素法を組み合わせる手法を提案した。本研究では、粒子法としてMPS (Moving Particle Semi-Implicit) 法を用いている。石礫型土石流の流動過程で

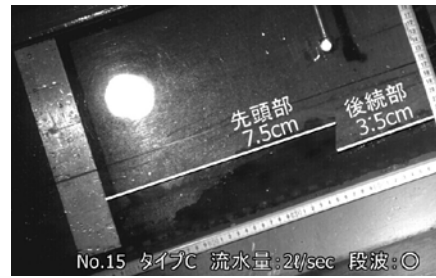


図-1 石礫型土石流モデルによる段波形成

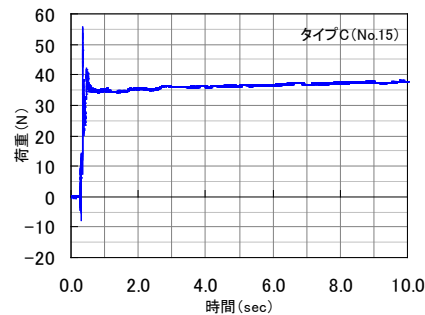


図-2 土石流モデルによる衝撃的荷重の例

は、礫同士の衝突や摩擦および礫と床面との摩擦が段波の形成に大きな影響を与えると考えられるため、これらの現象については個別要素法 (DEM) で考慮することにした。MPS法では、剛体と流体との相互作用モデルが提案されているが、本研究では、さらにこの剛体間にバネを設定することでDEM的な取扱いができるようにした。すなわち、剛体と流体との相互作用解析を行う際に、剛体同士の接触判定を行い、接触していると判定された場合には、接触力を評価して、剛体の移動量を計算する。同様に、剛体と床面との接触判定を行って、床面から受ける衝突力や摩擦力を計算する。

提案手法の妥当性を検証するために用いる実験として、軽石と清水を混ぜた土石流モデルの流下実験を選定した。実験は、勾配8度の水路(幅10cm)において、清水および桜島産軽石 (ボラ、湿潤密度 1.14g/cm^3) を用いた土石流モデルを流下させるものである。ボラは止め板で天然ダム形状に堆積させ、流水の越水と共に止め板をはずして流下させた。本解析は、ボラと水の混相流であるため、ボラを剛体粒子として取り扱った。なお、剛体と水粒子の直径は0.7cmとした。ボラについては、図-3に示すように剛体粒子5個を組合せて1個のボラを構成した。解析モデルを図-4に示す。解析は、剛体80個を清水内にランダムに配置した状態から5m流下させた。図-5に、解析で得られた流速分布を実験と比較して示す。図より、解析結果は実験と同様の段波を形成するとともに、剛体と水路床との摩擦によって水路床近傍の速度が小さいこと、土石流モデルの先端および表面部の速度が大きいことが確認できる。土石流モデル

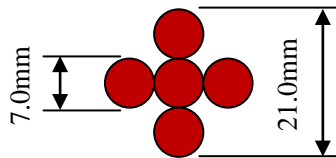


図-3 ボラ 1 個の構成

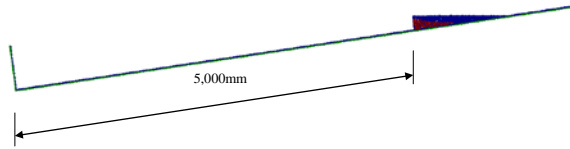


図-4 解析モデル

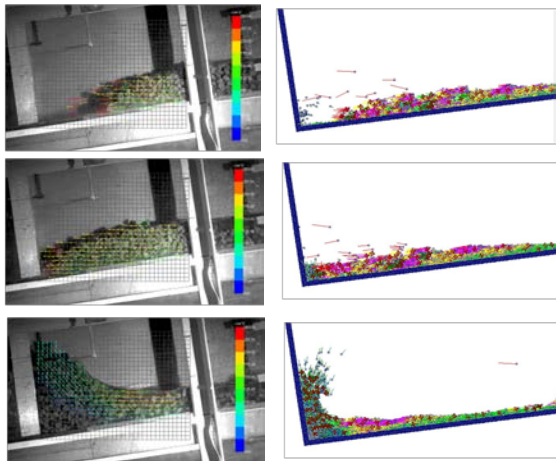


図-5 解析結果と実験結果の比較

が分力計に衝突した後に、分力計下部に堆積したボラは速度がほぼゼロになる挙動も再現できた。図-6は、解析による荷重～時間関係を実験と比較したものである。これより、本手法により荷重～時間関係も比較的良好に再現できることがわかる。

今後、本手法を用いて先に示した土砂と礫の分量比を変化させた実験データをより詳細に解析することによって、段波形成のメカニズムや段波の形状が衝撃荷重に与える影響の解明が期待できる。

(3) 土石流を受ける砂防構造物の衝撃応答を解析するため、粒子法とはりモデルの連成解析を行った。本解析では、流体力を受ける鋼薄板の挙動を振動方程式で表し、差分法で解析した。連成解析の方法については、まず鋼薄板を壁粒子としてモデル化して通常の流動解析を行う。次に、壁粒子に発生する圧力を、鋼薄板に作用する外力として変形解析を行う。このとき、鋼薄板の離散点と壁粒子を一致させて振動解析を行う。流体力によって生じた鋼薄板の変形を、次の時間ステップにおける壁粒子として同様の解析を行った。

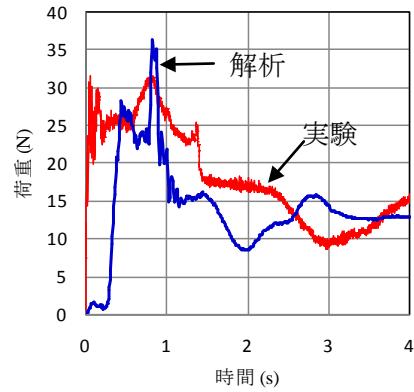


図-6 解析と実験の比較 (荷重～時間関係)

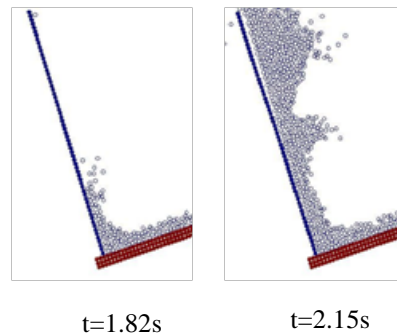


図-7 鋼薄板の変形過程 (薄板のみ変形を10倍にして表示)

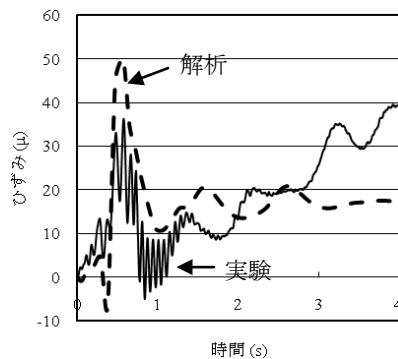


図-8 ひずみ～時間関係の比較 (5cm)

解析の対象は、勾配 18 度の急勾配水路(幅 10cm)に、清水を用いた土石流モデルを 4m 流下させた。下流側に高さ 30cm、板厚 2mm の薄肉鋼板を設置し、流体力を作用させた。清水は、止め板で天然ダム形状に貯留させ、先頭部の水深が 15cm になった時点で止め板をはずして流下させる方法を採用した。

図-7 に土石流モデルが鋼薄板に衝突した後の流動過程および薄板の変形状況を示す。なお、図中では鋼薄板の変形を 10 倍に表示している。これより、清水は鋼薄板に到達すると上方へ伝播している。鋼薄板は、清水が鋼薄板の上端まで载荷した後に大きく変形していることがわかる。図-8 に、鋼薄板下端から 5cm の位置に生じたひずみ～時間関係を実験値と比較して示す。これより、解

析では実験における高次の振動は発生せず、実験値より大きい最大ひずみ 50μ を示している。解析は実験と異なり後方から注入される清水をモデル化していないため、時刻 2s 以降での差異が広がっているが、連成解析によって鋼薄板の挙動をある程度再現できることがわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

①N. Ishikawa, R. Inoue, M. Beppu, Y. Hasegawa, T. Mizuyama, Dynamic Response Of Steel Specimen Under Debris Flow Surgemodel, International Symposium Proceedings of Interpraevent, 査読有、2012, pp.761-770

②浅井光輝、別府万寿博、石川信隆、眞鍋慶生、斉藤展、丹羽一邦、数値流体シミュレーションによる流体衝撃力評価に関する基礎的研究、構造工学論文集、査読有、Vol.58A、2012, pp. 1021-1028

③別府万寿博、井上隆太、石川信隆、長谷川祐治、水山高久、修正MPS法による土石流段波モデルのシミュレーション解析、砂防学会誌、査読有、Vol.63、2011, pp.32-42

④別府万寿博、井上隆太、石川信隆、長谷川祐治、水山高久、粒子法を用いた土石流段波モデルのシミュレーション、第10回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、査読無、2010, pp.97-102

⑤N. Ishikawa, R. Inoue, M. Beppu, Y. Hasegawa, T. Mizuyama, Dynamic Load Characteristics of Debris Flow Model Using Different Gravel Size Distribution, International Symposium Proceedings of Interpraevent, 査読有、2010, pp. 207-216

⑥N. Ishikawa, R. Inoue, M. Beppu, Y. Hasegawa, T. Mizuyama, IMPULSIVE LOADING TEST OF DEBRIS FLOW MODEL, 査読有、Proc. of 8th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures, 2009, pp. 53-62

[学会発表] (計 4 件)

①別府万寿博、井上隆太、石川信隆、長谷川祐治、水山高久、粒子法による流体力を受ける鋼薄板構造物の変形シミュレーション解析、平成23年度砂防学会研究発表会、平成23年5月19日、ワークピア横浜 (神奈川県)

②井上隆太、別府万寿博、石川信隆、長谷川祐治、水山高久、粒子法による砂礫を用いた土石流モデルの荷重解析、平成23年度砂防学

会研究発表会、平成23年5月19日、横浜産賀ホール (神奈川県)

③別府万寿博、石川信隆、園田佳巨、長谷川祐治、水山高久、MPS 粒子法による土石流段波モデルの荷重評価解析、土木学会第 65 回年次学術講演会、平成 22 年 9 月 3 日、北海道大学 (北海道)

④別府万寿博、石川信隆、園田佳巨、長谷川祐治、水山高久、粒子法による土石流モデルの流速解析、平成22年度砂防学会研究発表会平成22年5月27日、長野市若里市民文化ホール (長野県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

別府 万寿博 (BEPPU MASUHIRO)
防衛大学校・システム工学群・准教授
研究者番号：90532797

(2) 研究分担者

園田 佳巨 (SONODA YOSHIMI)
九州大学・工学部・教授
研究者番号：40304737

(3) 研究分担者

浅井 光輝 (ASAI MITSUTERU)
九州大学・工学部・准教授
研究者番号：90411230

(3) 研究分担者

玉井 宏樹 (TAMAI HIROKI)
九州大学・工学部・助教
研究者番号：20509632