

個別要素法を用いた透過型砂防堰堤の損傷メカニズム推定法の提案

防衛大学校 ○堀口俊行

1. 緒言

実規模における災害事例を基にして損傷原因や損傷メカニズムを検証することは、今後災害におけるリスク管理を検討する上で重要である。そのためには、実際に被災を受けた事例を基に再現性を検証してハード対策の限界値や必要な大規模土流荷重を好いてする必要があるのである。

そこで本研究は、南木曾の実破壊事例において得られている基本条件を基にして、文献 1)の流速分布モデルを用いた個別要素法を使用し、土流による鋼製堰堤の被災シミュレーションを試みたものである。その際、解析モデルの考え方や今後の課題について整理する。

2. 解析手法

2.1 流速分布モデルの概要 1)

本研究では、流体力の計算として流速分布モデルを使用した。流速分布モデルは、流水を流速分布として与え、その範囲内にある礫には水との相対速度に応じた流体力を作用させるものである。

次に、堰堤の被災状況の再現のため、図-1 に示すように流速分布モデルを流下領域（区分Ⅰ）と接近領域および捕捉領域（区分Ⅱ）に分けて解析を行った。流下領域（区分Ⅰ）とは、後述される先行堆積礫に土流が接触するまでの区間および先行堆積礫がない時は傾斜変換点を示す。それ以降は、区分Ⅱとなり、接近領域と捕捉領域を示す。なお、流速分布モデルは流量を一定にするように設定した。

2.2 堰堤モデル

堰堤モデルは、実験において材料物性値を基に、連結ばねでモデル化した堰堤モデルが再現できることを確認している 2),3)。その際、要素間の長さや継手と鋼管母材の強度などのモデル化について要素間の長さを小さくする必要があるなどの工夫が必要であるが、概ね堰堤の高さに対して 1/10 程度とし、継手の位置は実際の堰堤と同じ位置にすることで堰堤の損傷を再現した実験の傾向を概ね再現することできる。図-2 に堰堤モデルの側面図と俯角図を示す。このときの連結ばねの位置を図中に破線で示している。黒い破線は、母材を赤い破線は継手部の位置を表している。緑の破線は、押し込み変形を考慮した連結ばねを挿入している 3)。

2.3 水路・土石流モデル

礫モデルは、球形要素を使用し、被災時における現地の礫径調査を基にして粒径分布形状を一致させて、 D_{0-} - D_{80} (0.2 - 0.95 m), D_{80-} - D_{95} (0.95 - 1.6 m), D_{80-} - D_{95} (1.6 - 3.0 m)とし、それぞれ赤色、黄色、緑色の 3 色を用いた。さらに、被災現場において移動した土砂量が約 20000 m³であることから、球形要素の総体積も同じ量とした。

図-3 に、水路モデルの概要図を示す。水路モデルは、三角形の平面要素を用いており、勾配は現地の堰堤周辺の平均値から勾配 $\theta=11.3^{\circ}$ とした。水路長は 400 m で、堰堤の上流側には 20 m の水平部を設けている。水路底

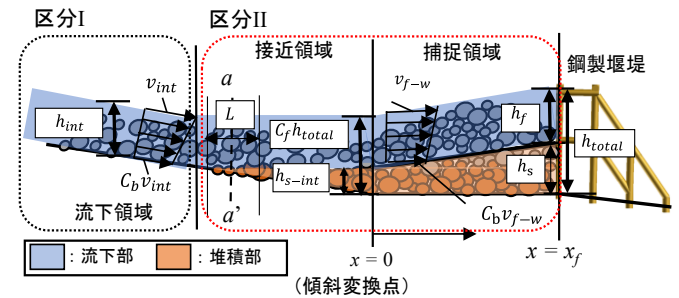


図-1 修正流速分布モデル

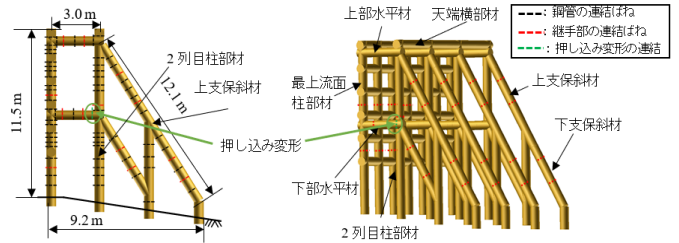


図-2 堰堤モデルと部材の呼称

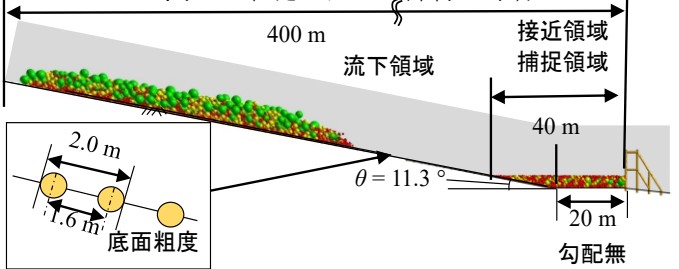


図-3 水路モデル

表-1 解析諸元

項目		値
堰堤モデル	円柱形要素 (個)	496
	集合体要素 (個)	74
礫モデル	$D_{95}-D_{100}$ (個)	378
	$D_{80}-D_{95}$ (個)	1111
	D_0-D_{80} (個)	6340
流体力	流速 v_0 (m/s)	9.7
	水深 h_{int} (m)	3.3
鋼管 $t=22\text{ mm}$	曲げ剛性 EI (N・m ²)	2.36×10^7
	降伏モーメント (N・m)	3.71×10^6
鋼管 $t=12.7\text{ mm}$	曲げ剛性 EI (N・m ²)	7.64×10^6
	降伏モーメント (N・m)	3.00×10^6
鋼管 $t=16\text{ mm}$	曲げ剛性 EI (N・m ²)	1.27×10^7
	降伏モーメント (N・m)	3.25×10^6
軸剛性 EA (N)		2.59×10^8
継手部 SM490	曲げ剛性 EI (N・m ²)	6.78×10^7
	降伏モーメント (N・m)	2.41×10^6
継手部 SM400A	曲げ剛性 EI (N・m ²)	6.45×10^7
	降伏モーメント (N・m)	2.36×10^6
継手部 SM400B	曲げ剛性 EI (N・m ²)	6.45×10^7
	降伏モーメント (N・m)	2.36×10^6
要素間ばね	法線方向 (N/m)	1.00×10^8
	接線方向 (N/m)	3.50×10^7
時間刻み Δt (s)		1.00×10^{-7}

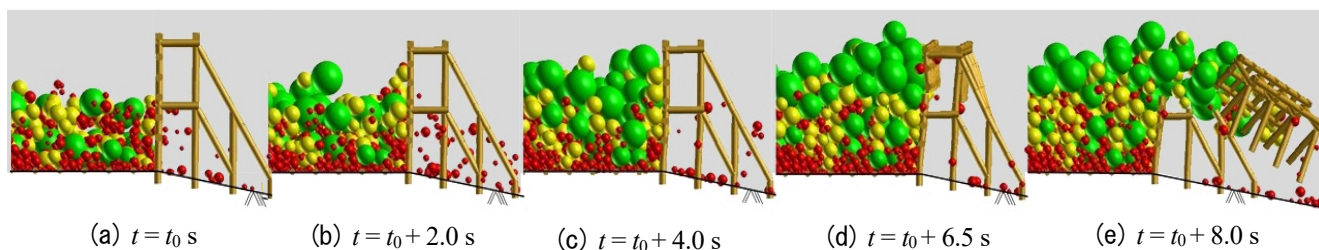


図-4 シミュレーション結果

面には、底面粗度として直径 40 cm の円柱形要素を純間隔 160 cm（中間粒径）で配置した。この底面粗度は、設計時に使用したマニング粗度に合わせており、大きな礫モデルが先頭部に集中しやすいように円柱形の底面粗度を使用し、礫径の平均値を用いて設置した。また、被災事例を基に、最初の土石流によって堰堤高さの 30 % 以上堆積した後に、2 回目の土石流が流下していることが報告されており、これを先行堆積礫として堆積させた。

2.4 解析条件

表-1 に解析諸元を示す。流速分布モデルは、初期流速 $v_{int} = 9.7 \text{ m/s}$ を用いた。なお、土石流モデル先頭部の流速は前述した手法によって求められる。本解析におけるパラメータ設定は、堰堤モデルに対して実験でのモデル化の検証と実際の鋼材や連結されている継手部分については既往の研究⁹⁾で使用されているパラメータを使用した。

3. 再現シミュレーション

図-4 に、被災状況のシミュレーションを示す。図-4(a)において、 $t = t_0 \text{ s}$ の時点で、礫が堰堤高さの約 4 割の位置に達している様子が見られる。図-4(b)の $t = t_0 + 2.0 \text{ s}$ の時点では、土石流モデルの先頭部が堰堤高さの半分程度まで到達していることが分かる。ここで、緑色の礫が多く、大粒径の礫が先頭部に集中している様子が分かる。この時点での堰堤の形状には大きな変化は見られず、正面部材も垂直のまま保持されている。図-4(c)において $t = t_0 + 4.0 \text{ s}$ の時点では、堰堤正面が僅かに下流側に傾いており、押し込み変形が $\delta = 140 \sim 190 \text{ mm}$ ほど生起している。また、土石流モデルが堰堤天端付近まで到達しており、明らかに緑色の礫が先頭部に集まっていることが分かる。図-4(d)の $t = t_0 + 6.5 \text{ s}$ の時点では、最上流面柱部材の上部継手が破断し、上部水平材変形していること、2 列目柱部材 4 本のうち 3 本が継手部で破断していることが確認できる。また、継手の破断が生じた段階で、一気に押し込み変形が生じていることが分かる。最初に継手が破断は、 $t = t_0 + 5.5 \text{ s}$ で生じ、 $t = t_0 + 6.5 \text{ s}$ の時点で押し込み変形が最大で約 300 mm に達している。このシミュレーションにより、押し込み変形の大きさが上部水平材を含めた上部の鋼管部材が一気に流下した後、押し込み変形が大きく生じることが分かった。図-4(e)の $t = t_0 + 8.0 \text{ s}$ の時点では、堰堤上部が継手部の破断により土石流の流れとともに下流側に流出しており、下部水平材はさらに押し込まれて、押し込み変形は $\delta = 300 \sim 360 \text{ mm}$ ほど生じている。ここで、推定した破壊メカニズムと比較して、最上流面継手部の破断と下部水平材の押し込み変形が先に生じ、その後 2 列目柱部材継手部の破断と上支保斜材継手部の破断という順番で堰堤が破壊したと推定されている。本解析は、図-4(b)

の最上流面継手部の破断および下部水平材の押し込み変形が生じた後、図-4(c)の 2 列目柱部材継手部の破断と図-4(d)の上支保斜材継手部の破断が同時に生じたことが分かった。シミュレーション結果と文献 6)の推定メカニズムでは、総じて堰堤の上流側から下流側の部材の順に破断が生じ、継手の損傷や、その後に押し込み変形が生じて堰堤上部が流下することについては概ね再現したが、上部水平材と天端の接合部に破断は見られなかった。これは、越流した礫が直接上部水平材に衝突する前に最上流面柱部材の継手部が破断したためと考えられる。

4. ハード対策の限界の定量化とは

構造物の被災シミュレーションは、リスク評価プロセスの中において脆弱性評価（構造物の限界状態等）に大きく関係しており、特定の災害での損害範囲を評価することが可能となる。災害事例は、同条件における再現がないため被災状況をリスク評価することで、ハード対策の限界状態について評価がある程度可能であると思われる。最初は、作用側である土石流の規模を再現超過確率の評価と抵抗側である堰堤の損傷評価（破壊、重度、中度、軽度）について検討し、リスクの定量化がより精密に行い、より適切なリスク管理や対策計画の策定が可能になる。このようなリスク評価のプロセスによって災害リスク管理における意思決定等の精度を向上させることができる。

5. 結論

本研究は、連結ばねの構成則として導入した個別要素法によって堰堤の破壊メカニズムを推定した。その結果、先行堆積礫高、継手部の母材強度比、押し込み変形を考慮することで堰堤上部が流出し、現地の破壊性状を検証することができた。今後、被災例における再現した検証を進めていくことでハード対策の限界について評価することができる。

参考文献

- 1) 嶋川理，堀口俊行，別府万寿博，國領ひろし：個別要素法を用いた補強された鋼製堰堤の補強効果に関する解析的検討，構造工学論文集，2024。
- 2) 嶋川理，堀口俊行，別府万寿博，香月智：DEMを用いた透過型砂防堰堤における破壊メカニズムの検討，令和 3 年度土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会，I-240，2021
- 3) 嶋川理，堀口俊行，別府万寿博，香月智：個別要素法を用いた透過型砂防堰堤の損傷事例解析，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.79, No.15(応用力学論文集 Vol.25)，ID：22-15044，2023