透過型砂防堰堤における破壊検証実験の再現シミュレーション

防衛大学校　学生会員　○嶋川理　正会員　堀口俊行　別府万寿博　香月智

１．緒　言

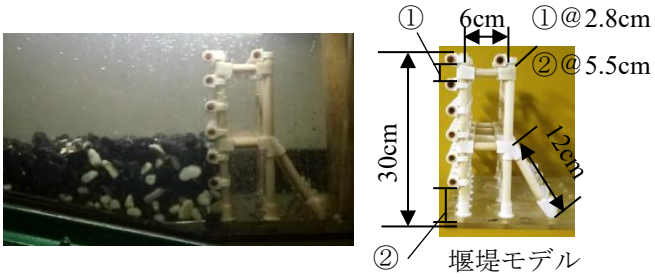
我が国の国土は急峻かつ脆弱であり，土砂災害が頻発している．特に近年は，短期的かつ局所的な強雨により土砂災害の発生件数は増加傾向にある[1]．さらに，石礫型土石流は先頭部に巨礫が集中し，住宅等の大規模な破壊を招く恐れがあるため，充分な衝撃荷重を抑えられる対策工を建設する必要が高まってきた．土石流の対策構造物としては透過型砂防堰堤（以下，透過型）が用いられている．透過型は，通常時は土砂を通過させ，土石流発生時には土石流のフロント部の巨礫を捕捉し，後続流を塞ぎ止めるものである．しかし，平成26年7月9日の南木曾読書地区では，土石流により梨子沢第1砂防堰堤の上部が破断するという事例が発生した[1]．著者ら[2]は，この破壊現象の検証のために現地観測データと崩壊後の礫径調査の粒形分布を用いて，実スケールの再現解析により土石流流体力の推定および堰堤の損傷状況について検討した．しかし，各部材の損傷状況や破壊に至った状況並びに部材の弱点部を含めた力学的な破壊メカニズムにまでは行っていない．そこで，継手を考慮した模型実験を行い，事前に土石が堆積した状況から，継手部の強度を設計基準通りにすると南木曽土石流と同様の破壊事例が生起することが分かった．しかし，現象を再現した実験であり，定量的なメカニズムの検証は不明確である．

そこで本研究は，個別要素法を用いて実験スケールにおける継手を考慮した模型実験をシミュレートするものである．その際，事前実験で得られた継手部のパラメータや使用部材の特性を断面分割法から推定したものを適用する．

２．直線水路実験

土石流モデルは，現地の礫径調査を参考にし，3種類の礫径を用いており，D_{95}：40 mm（25.5 kg），D_{80}：30 mm（31.5 kg），D_{60}：20 mm（18.0 kg）である．その礫量については総量75 kgとした．実験水路は，長さ4.35mの可変勾配型直線水路を用いて，上流側で水を溜め，一気に開放するというダムブレイク方式で行った．

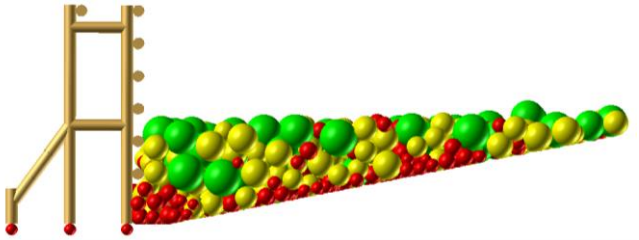
写真－1に，初期配置と堰堤モデルを示す．堰堤モデルは，部材部分をバルサ材で，連結部分を3Dプリンターで作成した結合部を用いて組み上げた．実験は，礫を事前に50 %堆積させた場合とした．本実験では，継手部分を考慮したケースと考慮していないケースを比較している．また，実堰堤の継手位置を参考に，バルサ材の曲げ強度が70 %となるように切り欠きを与えている．



写真－1　堰堤モデル

(a) 継手モデルなし　　(b) 継手モデルあり

写真－2　実験結果



図－1　堆積50 %における配置状況

写真－2に，破壊現象が生起したときの実験結果を示す．**写真－2**(a)に示す継手を考慮していない場合（Case-1）では，堰堤モデルは破壊に至らず，土石流を捕捉していることが分かる．一方で，**写真－2**(b)に継手を考慮した場合（Case-2）を示す．継手部は木材を赤く着色している．Case-2では堰堤上部が継手部で破壊し，越流した土石流が一気に堰堤を押し倒していることが分かる．また，後方側の部材も前面と同様に倒れており，土石流の荷重に耐えられなかったことがわかる．

３．個別要素法解析

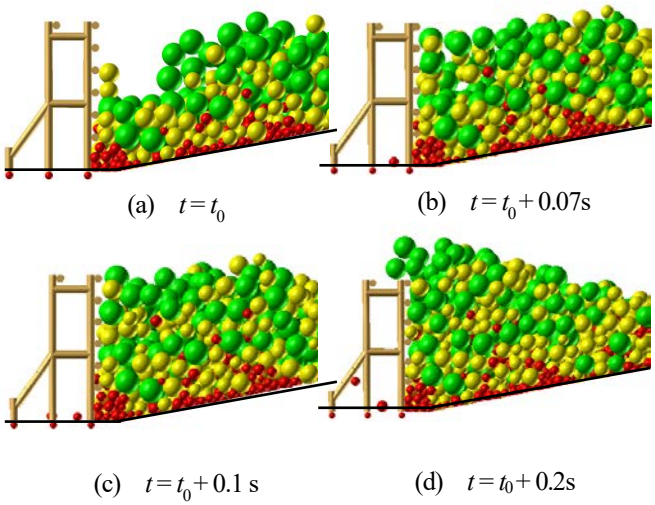
３．１　解析諸元

礫モデルは，実験で使用した粒径分布を参考に，形状は球

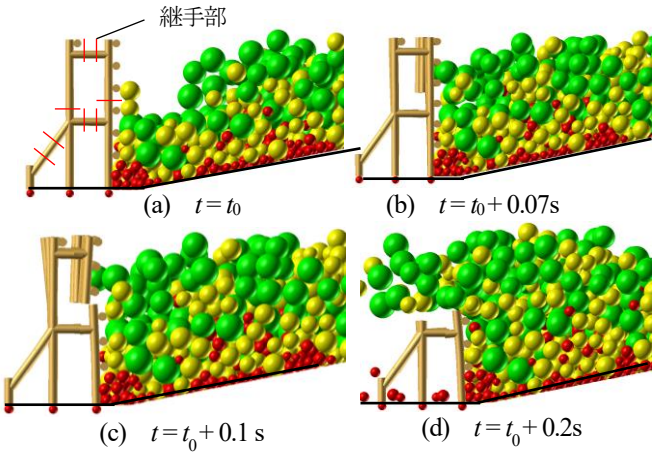
キーワード　石礫型土石流，個別要素法，鋼製透過型砂防堰堤，直線水路実験
連絡先　〒239－8686　神奈川県横須賀市走水1－10－20　防衛大学校　建設環境工学科　TEL：046-841-3810　FAX：046-844-5913

表－1　連結ばねのばね係数

項　目		値
鋼管部	軸力剛性 EA (N)	1.17×10^5
	曲げ剛性 EI (N/m^2)	2.78
	降伏応力(N/m^2)	5.25×10^6
	伸び(%)	5
継手部	軸力剛性 EA (N)	7.7×10^4
	曲げ剛性 EI (N/m^2)	1.72
	降伏応力(N/m^2)	5.25×10^6
	伸び(%)	5
基礎部	軸力剛性 EA (N)	3.82×10^5
	曲げ剛性 EI (N/m^2)	5.37



図－2　Case-1 の衝突過程



図－3　Case-2 の衝突過程

形要素を用いた．水路は，三角形平面要素を使用した．堰堤モデルは，円柱形要素を組み合わせて作成し，実験で使用した接合部分については集合体要素を用いた．

表－1 に，円柱形要素間を結ぶ連結ばねのパラメータを示す．ばね係数は，バルサ材のヤング率 $E=2.16\times10^9$ N/m^2 と断面積から継手の有無による軸力剛性 EA と曲げ剛性 EI を用いた．事前実験で．切り欠きを与えた部分には継手部のばねを与え，その他の部分は鋼管部のばねを与えた．実験では，基礎部は固定のため中空としていないことから別にばねを与えた．

図－1 に，本解析における堆積状況を示す．礫の色はそれぞれ，D_{95}：緑色，D_{80}：黄色，D_{60}：赤色とした．堰堤上流側の堆積部と，後方の礫群に分けて初期位置を決めた．流体の計算は，流速分布モデルを用いて礫群を流下させている．流速は，実験映像から，$v=3.0$ m/s で与えた．なお，堆積している礫に与える流体力は，後方の礫群が堆積部分に到達するまで，堆積している礫には流速は作用しない．

３．２　解析結果

図－2 に，継手を考慮しない場合の衝突過程を示す．図－2(a)は，後続から流下している土石流が堰堤に到達した時間を $t=t_0$ とした．図－2(b)，(c)は土石流が衝突して，衝撃荷重が大きく発生している時間であるが，堰堤形状は全く変化していないことが分かる．図－2(d)は，後続の土石が堰堤を越流しているが，堰堤の構造に変形はない．このことから継手を考慮していない場合では，堰堤に損傷が生起していない．

図－3 に，継手を考慮した場合の衝突過程を示している．図－3(a)は，後続から流下している土石流が堰堤に到達した時間であり，赤線で示す部分は継手部である．図－2(b)の $t=t_0+0.07$s で，礫先頭部の衝突により，上流側の継手部が破断した．図－2(c)の $t=t_0+0.10$ s で水平部の継手が後方に押し込まれて破断した．図－2(d)の $t=t_0+0.2$ s で最終的に下流側の継手部が破断し，堰堤上部が全て流出した．併せて，下部水平材の継手部もやや下流側に押し込まれていることが確認できる．また，継手部以外は破断しなかった．

４．結　言

本研究は，堰堤模型の破壊実験を個別要素法で再現することにより，その破壊に至る現象の再現性について検討したものである．以下にその成果を示す．

1)継手を考慮した場合では，上流側の継手が破断し，水平部が押し込まれることで下流側の継手の破壊に至り，土石流が下流まで流下した．

2)解析において，継手の影響によって堰堤上部が流出していることから，土石流の荷重が大きくなると堰堤の破壊に至る場合があるものと考えられる．

今後は，継手部に作用した外力について詳細なデータの分析が必要である．

参考文献

1)平松晋也ら：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，Vol67，No.4，pp.61-82，2014.

2)Horiguchi T., Richefeu V.：Post-analysis simulation of the collapse of an open sabo dam of steel pipes subjected to boulder laden debris flow. *International Journal of Sediment Research* 35(6), pp.621-635, 2020.