

越流礫による透過型砂防堰堤の破壊再現シュミレーション

防衛大学校 ○齋藤 和樹 堀口 俊行

1. 緒言

わが国では、大規模土石流の影響によって対策構造物の損事例が報告されている。中でも、令和元年東日本台風の影響で、富士川水系大武川で発生した土石流によって大武川第5砂防堰堤と朴の木上流の砂防堰堤の部材が一部破損した。写真-1に示すように、大武川第5砂防堰堤である鋼製透過型砂防堰堤（以下、透過型）は、越流した土石流によって堰堤下流部の斜材が破損している。これは、透過型の高さを乗り越えた巨礫が斜材に沿って流れることや越流した巨礫が鋼管部分や継手部分に落下したことで生起したと考えられており、このような現象を防ぐためには、既存の構造物にとって補強もしくは新設構造物には堰堤の構造形式を変えて、越流礫に対して対応できる最適な透過型を検討する必要がある。

ところで、筆者ら¹⁾²⁾は透過型における損傷原因究明のために個別要素法で解析的に検討している。しかし越流礫における損傷事例の再現や鋼管部材の発生の原因については未検討のままである。

そこで本研究は、個別要素法を用いて損傷が生起するための解析条件を設定することで、巨礫の衝突時の初期条件による部材もしくは継手部分の破損の有無を解析的に検討するものである。

2. 大武川第5号砂防堰堤の被災状況

令和元年東日本台風では、富士川流域で甚大な被害が生じた昭和34年の災害において301 mm/日を上回る526 mm/日を記録した。そのため大武川流域では、計画を上回る規模の土石流が発生し、堰堤下流側に礫径約5.0 mの巨礫が確認されている。図-1に示すように、第5号砂防堰堤は大規模な土石流を捕捉したのち満砂状態となり、土砂管理時における土砂や礫などの越流が生じることで透過型の斜材が損傷・脱落した。脱落した部材は、下流側の斜材5列の内中央3列である。部材脱落の過程は、上流側部材が自立していることから推定して流出した土石流により満砂その後に越流した土石流もしくは転石などが二列目、三列目の部材に衝突し破損、最終的に脱落に至ったものと考えられる。設計荷重（衝撃力）は弾性領域までの変形を許容する



写真-1 被災景況

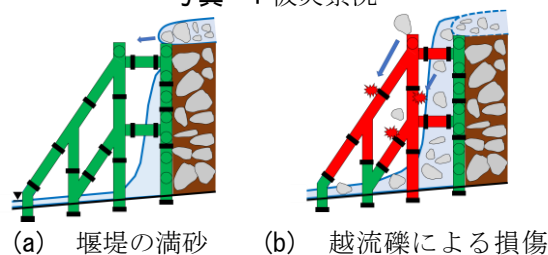


図-1 被災メカニズムの一例

— : 継手部の連結ばね
— : 母材連結ばね

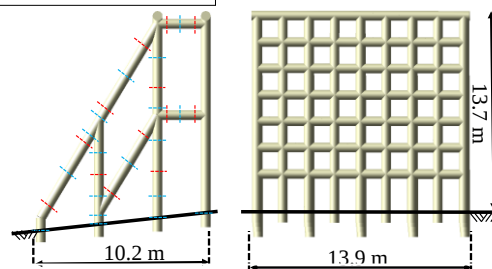


図-2 解析モデル

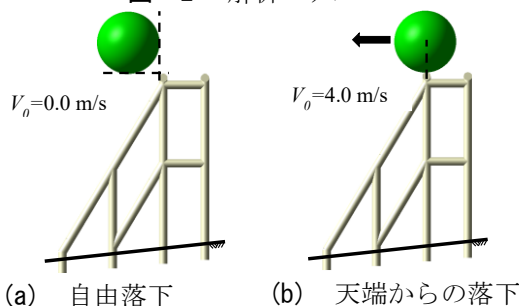


図-3 解析条件

が、残存する鋼管に塑性領域まで変形したものが確認されることから少なくとも累積衝撃力は設計荷重の数倍に及んだ。

3. 解析モデル

図-2 に解析モデルを示す。透過型モデルは、高さ13.5 m、横13.9 mである。モデル化として中空鋼管や継手部分について円柱形要素214個を用いて作成した。また、部材を溶接している部分は集合体要素で形状を実際の形に合わせており、その間は剛結している。なお、各要素間に連結ばねを設けることで、一定以上の

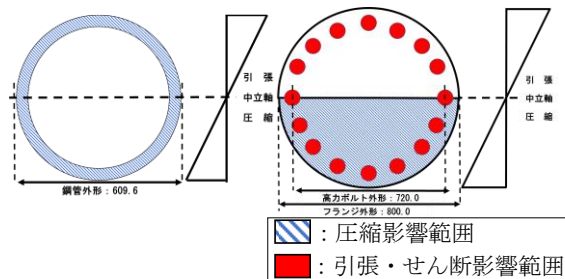


図-4 継手モデル

表-1 解析条件

項 目		値	
		密度[kg/m ³]	個 数
堰 堤 モデル	円柱形要素		
	STK490-22t(S-1)	1093	16
	STK400-22t(S-2)	1093	55
	STK400-19t(S-3)	949	15
	STK400-16t(S-4)	802	20
	STK400-12.7t(S-5)	641	211
礫モデル	球形要素	2600	1
接触バネ	法線方向 [N/m]	1.0×10^9	
	接線方向 [N/m]	5.0×10^8	
減衰係数		1.0	
摩擦係数		0.58	
時間刻み[sec]		5.0×10^{-7}	

表-2 連結ばねモデルの諸元

Item	継手部					
	J-1	J-2	J-3	J-4	J-5	J-6
軸剛性 EA [N]	3.34×10^{10}					
降伏軸力 [kN]	6015					
破断ひずみ	0.14					
曲げ剛性 EI [N・m ²]	5.38×10^9					
降伏モーメント M_v [kN/m ²]	2150	2151	2140	2151	2151	2151
破断回転角 θ_f [deg]	0.985	0.871	0.963	0.733	0.825	0.917
せん断剛性 GA [N]	1.39×10^9					

荷重またはモーメント力等を受けることで破断するように設定している。

図-3 に解析条件を示す。本解析では損傷を生起する条件を検討するため、単純な巨礫の落下衝突における解析条件で検証している。礫モデルの直径は大武川第5砂防堰堤で実際に越流した最大転石5.0mを用いた。表-1 に解析諸元を示す。次に連結ばねモデルの構成側は、図-4 に示すように鋼管部(4種類)および継手部(6種類)をそれぞれ断面分割法で求めた。鋼管部は、全断面有効として求めた。一方継手部は、圧縮応力はフランジプレート、引張応力およびせん断応力は高力ボルトが受け持つことで求めた。表-2 に断面分割法を基に設定した連結ばねモデルの諸元を示す。

4. 損傷解析

図-5 に天端から落下させた礫径5.0mの損傷状況を示す。図-5(a)は、礫モデルが部材に衝突する直前で

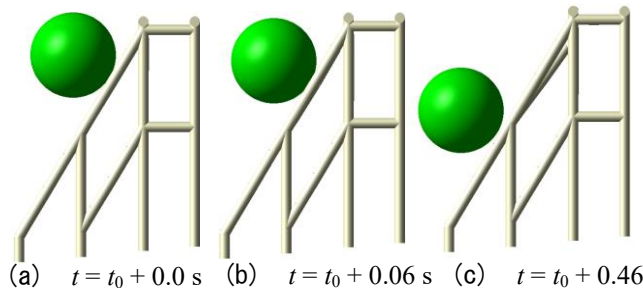


図-5 損傷状況(自由落下)

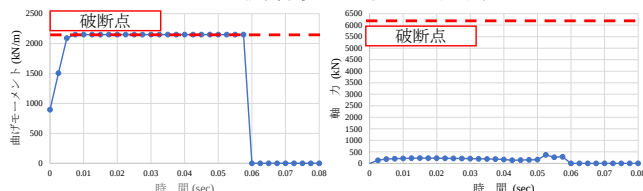


図-6 連結バネの内部応答

ある($t = t_0$)。図-5(b)に示す礫モデルが斜材衝突後0.06sに上部斜材の継手部分で破断し、図-5(c)の $t = t_0 + 0.46$ sには斜材中央鋼管の回転角が下向き5.4°まで進展した。同様に、礫径5.0mの礫を自由落下で衝突させたケースにおいても継手部にて破断が生起した。また、設計時における礫径を1.0mもしくは2.0mを越流させた解析や、礫径4.5m以下の礫を落下させたケースでは部材の破断が生じないことを確認している。

図-6 に天端から落下させたケースにて破断した斜材継手部の連結ばねの時刻歴応答を示す。軸力～時間関係を見ると降伏点まで達しておらず弾性応答範囲にある。しかし、曲げモーメント～時間関係では、 $t = t_0 + 0.07$ sに降伏モーメントに到達し、直後にわずか0.06sで破断回転角に至った。

5. 結 言

本研究は、個別要素法を用いて越流礫における透過型の損傷要因分析を検討したのである。そこでは、損傷が生起するための条件を設定し、越流礫の衝突における斜材の損傷に必要な巨礫の大きさや損傷の状について検討し、斜材に損傷を与えるには礫径5.0mが必要であることを示した。

参考文献

- 1) 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
- 2) 嶋川理, 堀口俊行, 別府万寿博, 香月智 : 個別要素法による透過型砂防堰堤の破壊メカニズムに関する検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol. 77, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 24), I_381-I_392, 2021.