

3차원 토석류 수치해석을 통한 원통형 대책구조물의 배치조건에 따른 에너지 저감효과 분석

김범준*·윤찬영^{ID**}

Kim, Beom Jun*, Yune, Chan-Young^{ID**}

Analysis on Effect of Energy Mitigation by Arrangement of Cylindrical Countermeasures through 3D Debris Flow Numerical Analysis

ABSTRACT

In this study, to investigate an energy reduction effect by field application of cylindrical baffle arrays, the 3D Debris flow numerical analysis was conducted with various baffle configurations for the simulation of a real-scale valley, where the cylindrical baffle arrays were installed. For this, the valley of the watershed was modeled using terrestrial LiDAR data from the real-scale experiment site. Numerical analysis simulated the flow behavior of debris flow and the structures using Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) technique of ABAQUS (Ver. 2021). The numerical analysis results that the case without cylindrical baffle arrays had a similar velocity change to that of the real-scale experiment. Also, the installation of baffles significantly reduced the frontal velocity of debris flow. Furthermore, increasing the baffle height increased the downstream energy reduction because of the higher flow impedance of taller baffles.

Keywords : Debris flow, Numerical analysis, Cylindrical baffles, Real-scale test, Velocity, Energy reduction

초 록

본 연구에서는 원통형 대책구조물의 토석류 에너지 저감효과를 확인하기 위해, 대책구조물이 설치된 실제 규모의 계곡부를 수치적으로 모사한 후에 대책구조물의 배치조건을 변화시켜가면서 토석류 수치해석을 수행하였다. 해석단면은 강원도 진부면 실규모 실험장에서 측량된 지상 LiDAR 데이터를 토대로 계곡부를 모델링하였고, 해석은 ABAQUS (Ver. 2021)의 Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) 기법을 이용하여 토석류-구조물의 상호 흐름거동을 모사하였다. 해석결과, 대책구조물이 설치되지 않는 조건에서의 흐름속도는 기존 실규모 토석류 실험결과와 유사한 흐름속도 변화를 보이는 것으로 나타났으며, 원통형 대책구조물을 설치하면 토석류의 속도를 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 또한, 대책구조물을 높이면 토석류의 흐름저항이 증가함에 따라 하류부의 에너지 저감효과를 더욱 증가시키는 것으로 나타났다.

검색어 : 토석류, 수치해석, 원통형 대책구조물, 실규모 실험, 속도, 에너지 저감

* 종신회원·강릉원주대학교 방재연구소 연구교수, 공학박사 (Gangneung-Wonju National University · casper1004@nate.com)

** 종신회원·교신저자·강릉원주대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Gangneung-Wonju National University · yune@gwnu.ac.kr)

Received November 24, 2022/ revised March 17, 2023/ accepted May 10, 2023

1. 서론

최근 기후변화로 인한 태풍 및 집중호우가 빈번하게 발생함에 따라 토석류 피해가 점차 증가하고 있다. 물과 거석, 흙 등이 함께 흐르는 토석류는 빠른 이동속도로 인해 하류부에 큰 인명 및 재산피해를 유발한다. 이러한 토석류 피해를 예방하기 위하여 토석류가 흐르는 경로에 대책구조물을 설치하고 있으며, 최근 들어 투과형 대책구조물의 일종인 그룹형 강성 기둥 대책구조물의 설치가 늘어나는 추세이다. 하지만, 국내외적으로 기둥형 강성대책구조물의 설치를 위한 제원 및 배치에 대한 설계법이 제시되어 있지 않고, 많은 부분을 엔지니어의 경험적 설계에 의존하고 있다. 기둥형 강성대책구조물은 상류부에서 발생하는 토석류의 선단부 유속을 일시적으로 감소시키고 유목 및 큰 거석 등을 걸러 하류부로 흐르는 토석류의 에너지를 저감시키는 역할을 한다(Kim et al., 2019). 여기서 토석류의 에너지 저감 효과는 설치되는 구조물의 높이와 유로차단비율, 그리고 중방향 배열 수에 영향을 받으므로, 대책구조물을 설계함에 있어 중요한 인자로 활용될 수 있다. 강성 기둥 대책구조물과 관련한 연구들은 국내외에서 다양하게 수행되었다. 먼저 실험적 연구들을 살펴보면, Ng et al.(2015)와 Choi et al.(2014)는 건조모래를 이용하여 강성 기둥구조물의 배치조건이 토석류의 에너지 저감효과에 미치는 영향을 연구하였으며, Wang et al.(2017a, 2017b)은 강성 기둥구조물의 다양한 형상 및 배열 간격 변화에 따른 토석류의 에너지 저감효과를 연구하였다. Fei et al.(2020)는 다양한 입자크기의 모래를 이용하여 원통형 강성 기둥구조물의 배치조건에 따른 에너지 소산, 퇴적, 런아웃 거리를 확인한 후, 수치해석을 통하여 흐름특성을 평가하였다. Hu et al.(2020)는 슬리트 구조물이 토석류 속도 감소와 포착에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다. 또한, 수치해석 연구들에서 Li et al.(2020)는 계단식 구조물(step-pool structure)의 형상이 토석류의 흐름특성에 미치는 영향을 분석하였고, Yang et al.(2021)는 그룹형 사각형 강성 기둥구조물의 토석류 흐름 저감효과, 런아웃 거리, 운동에너지 소산 특성을 분석하였다. Wang et al.(2019)는 단일형 강성기둥 구조물의 다양한 형태가 토석류의 항력에 미치는 영향을 연구하였으며, Leonardi et al.(2019)는 단일형 슬리트 구조물이 다량의 거석의 흐름에 미치는 영향에 대한 해석적 연구를 수행하였다. 최근 들어 일부 연구자들(Lee et al., 2016, 2019)에 한하여 3차원 수치해석을 통해 토석류의 속도, 동적 충격하중의 크기, 연행, 퇴적 두께 등을 확인하기 위한 연구가 시도되었다. 이처럼 그동안 다양한 실험 및 해석적 연구들이 수행되어 왔지만, 대부분이 단면이 일정한 직선형 수로 또는 소규모 조건하에서 실험 및 해석을 진행함에 따라 복잡한 지형변화를 갖는 계곡부에서의 토석류 흐름을 모사할 수 없었다. 특히, 국내에서는 주로 연속체

해석방법 중 하나인 2차원 유한차분 모형(Finite Different Model, FDM)을 이용하는 FLO-2D, RAMMS, DEBRIS-2D 등을 이용하여 토석류의 이동거리, 확산, 퇴적거리 등의 수치해석 연구를 수행해 왔다. 하지만, 이러한 해석들은 모두 토석류 흐름-구조물 간의 상호작용을 고려하기 어렵다는 한계점을 지니고 있다. 따라서 실제 지형과 대책구조물을 수치적으로 모사하고, 흐름-구조물 간의 상호작용을 고려하여 토석류 에너지 저감효과를 연구한 사례는 거의 전무한 실정이며, 이에 대한 연구가 필요한 상황이다.

본 연구에서는 원통형 대책구조물이 토석류의 에너지 저감에 미치는 영향을 분석하기 위하여 대책구조물이 설치된 실제 규모의 현장 계곡부를 수치적으로 모사한 후, 대책구조물의 배치조건을 변화시켜가면서 3차원 수치해석을 수행하였다. 해석단면은 강원도 진부면 실규모 실험장의 지상 LIDAR 데이터를 이용하여 계곡부를 모델링한 후에 원통형 대책구조물을 계곡부에 추가적으로 모델링 하였다. 해석은 ABAQUS (Ver. 2021)의 Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) 기법을 이용하여 토석류-구조물의 상호 흐름거동을 모사하였으며, 기존의 실규모 토석류 실험결과(Jun et al., 2015)와 해석결과를 비교함으로써 SPH 해석기법의 타당성을 검증하였다. 그 이후에는 원통형 대책구조물의 배치조건에 따른 토석류의 흐름속도를 확인하였고, 이를 바탕으로 토석류의 에너지 저감효과를 비교, 분석하였다.

2. 토석류 실험실 규모 실험

Fig 1은 강원도 진부면 봉산리에 위치한 실규모 토석류 실험장

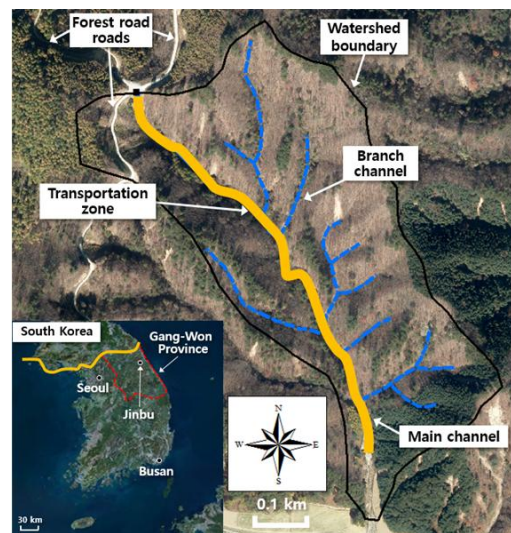


Fig. 1. Study Area for the Real-scale Debris Flow Experiment

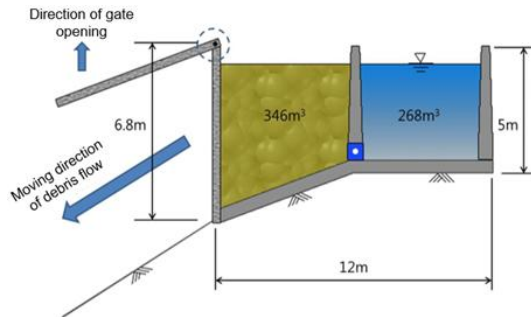


Fig. 2. Debris Flow Initiation Facility at Real-scale Test Site

의 위치와 유역을 보여준다. 유역면적은 280,000 m², 유하부의 총 길이는 824 m이며, 수로 경사와 폭은 각각 평균 8.0°와 9.0 m이다. 유역 상부에는 토석류를 계곡부로 흘려보낼 수 있는 토석류 발생시설(Debris flow initiation facility)이 설치되어 있다. Fig. 2는 실험유역 상부에 설치된 토석류 발생시설을 보여준다. Fig. 2(a)에 나타난 발생시설의 길이와 폭은 126 m와 120 m이며, 전면부 토조(Soil container)와 후면부 수조(Water container)로 구분된다. 토조와 수조는 각각 346 m³ (505 t)와 268 m³ (269 t)의 용량을 가지며 최대 약 600 m³의 토사와 물을 Fig. 2(b)와 같이, 게이트가 열림과 동시에 계곡부로 흘려보낼 수 있다. 실험에서 토석류의 초기체적은 500 m³로 설정하였다. 이 때, 초기체적은 토석류의 규모와 발달에 큰 영향을 미치므로, Jakob(2005)이 제시한 토석류의 규모에 따른 퇴적규모, 침투유량, 범람면적, 하류부에서의 잠재적 결과(potential consequences)와 현장여건 등을 고려하여 최종 결정하였으며, 하류부에서 콘크리트 구조물을 파괴할 정도의 운동량을 가진 토석류에 해당된다. 실규모 실험을 위한 토사는 실험장 주변 인근에서 확보하였다. Fig. 3은 진부 실험장 주변 인근에서 채취한 자연 풍화토의 입도분포를 나타낸 것이다. 토사의 구성은 자갈 26.6%, 모래 70.9%, 실트 및 점토 2.5%이며, 통일분류법에 의한 공학적 분류는 SP로 나타났다. 토조와 수조 내 토사와 물의 설치방법은 굴착기(excavator)를 이용하여 토조 전면부에 토사를 채우고, 이후 급수차량(water tanker)을

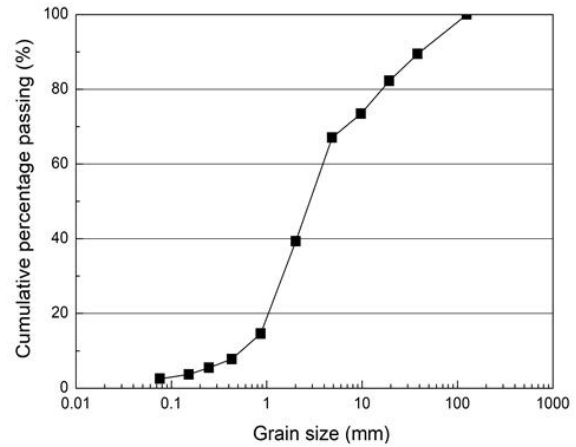


Fig. 3. Grain Size Distribution

이용하여 토조 후면부에 물을 채웠다.

3. 토석류 수치해석

3.1 입자완화 유체동역학 기법

입자완화 유체동역학 기법(Smooth Particle Hydrodynamics method)은 커널함수(Kernel function)에 의하여 계산되며, 입자의 함수 $A(r_a)$ 와 디랙분포(Dirac distribution) δ 의 합성항으로 표현된다. 여기서, 디랙분포는 h 의 완화길이(Smoothing length)를 갖는 커널함수(Kernel function) W 에 의해 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(r_a) = \int A(r_b) W(r_{ab}, h) dr_b \quad (1)$$

식 (1)에서 r_a, r_b 는 각 입자의 a, b 위치를 나타낸다. 위 식을 유체 입자 a 에 대해서 이산화하면 식 (2)와 같이 표현된다.

$$A(r_a) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W(r_{ab}, h) \quad (2)$$

식 (2)에서 b 는 입자 a 에 대한 커널 함수의 완화길이 h 내의 모든 입자들을 나타낸다. 커널함수는 3차 스플라인 함수(Cubic-spline)가 이용되었으며, 식 (3)과 같이 표현된다.

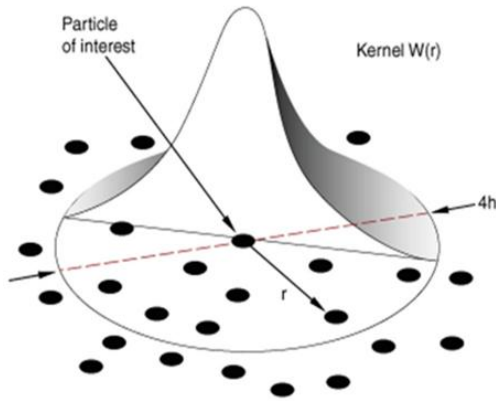


Fig. 4. Support Domain of Kernel Function

$$W(R, h) = \alpha_d \begin{cases} \frac{2}{3} - R^2 + \frac{1}{2}R^3 & 0 < q \leq 1 \\ \frac{1}{6}(2-q)^3 & 1 < q \leq 2 \\ 0 & R \geq 2 \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)에서 2차원(2D) 및 3차원(3D)에서 각각의 α_d 는 $10/(7\pi h^2)$, $1/(\pi h^3)$ 이다. q 는 입자 사이의 무차원 변수이며, r_{ab}/h 의하여 계산된다. Fig. 4는 커널함수의 형태를 나타내고 있다.

SPH 기법에서의 운동량은 WCSPH (Weakly Compressible SPH)의 연속방정식(Continuity equation)과 나비에-스토크스 방정식(Navier-Stokes equation)으로 설명되며, 식 (4), (5)와 같다.

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot u = 0 \quad (4)$$

$$\frac{du}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \cdot (\nu \nabla u) + F^c \quad (5)$$

여기서, ρ , u , p , ν , F^c , t 는 유체 밀도, 속도 벡터, 압력, 동점성계수, 외력, 시간을 의미한다. WCSPH에서 압력은 식 (6)과 같이 상태방정식에 의해서 결정되며, 흐름에 약간의 압축성이 고려된다.

$$p = \frac{\rho_0 c_0^2}{\gamma} \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right) \quad (6)$$

여기서, c_0 는 유체의 물리적인 음속, ρ_0 는 유체의 밀도, γ 은 폴리트로픽 지수로서 7의 값을 일반적으로 사용한다.

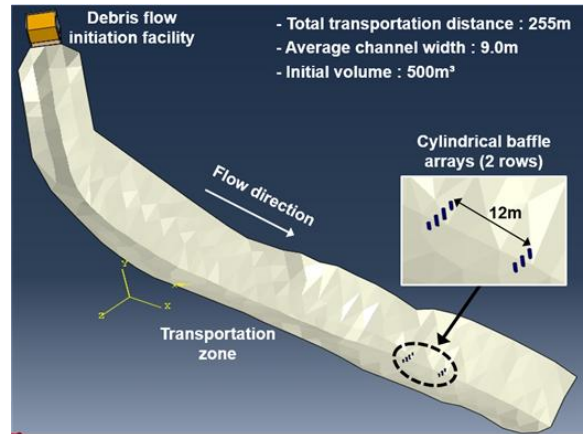


Fig. 5. Simulated Real-scale Debris Flow Watershed

3.2 해석방법 및 조건

해석단면 구성을 위하여 전체 계곡부 길이 중 토석류 발생시설에서부터 255 m까지의 계곡부를 대상으로 지상 LiDAR 측량을 수행하였고, 이후 LiDAR 데이터를 토대로 실제 유역을 수치적으로 모델링하였다. 또한, 계곡부 내 원통형 대책구조물은 Kim(2021)의 소형수로 실험적 연구결과를 토대로 1/17의 상사비를 적용하여 배치조건을 결정하였다. 이 때, 대책구조물의 배치형태는 전체 수로 폭에 대해 중방향으로 설치된 각 구조물 폭의 합에 대한 비율로 정의되는 차단비율(Transverse blockage ratio)을 40%에 맞추어 대책구조물을 모델링하였다. 해석은 ABAQUS (Ver. 2021)의 Smooth Particle Hydrodynamics (SPH) 기법을 이용하여 토석류 흐름-구조물 간의 상호거동을 모사하였으며, 기존의 실규모 토석류 실험결과(Jun et al., 2015)와 해석결과를 비교함으로써 SPH 해석기법의 타당성을 검증하였다. 이후에는 유역 내 대책구조물의 높이를 변화시켜가면서 해석을 추가적으로 수행하였다. 해석과정에서는 대책구조물의 설치로 인한 토석류의 에너지 저감효과를 중점적으로 확인하고, 해석의 단순화를 위하여 지반의 침식 및 연행작용은 고려하지 않았다.

이를 위해, 토석류가 흐르는 계곡부는 변형이 발생하지 않는 Rigid body로 설정하여, 토석류의 흐름거동만을 모사하였다. 이 때, 흐름과 계곡부 사이의 마찰계수는 기존 연구결과(Hungr and Morgenstern, 1984)에서 제안된 범위(0.05~0.3)를 고려하여 0.2의 마찰계수 값을 적용하였다. 모델링된 유역의 하부와 측면에는 X, Y, Z 방향의 변위를 모두 구속하였고, 하중은 토석류가 중력에

Table 1. Input Parameters for Numerical Analysis

Type	Density (kN/m ³)	E (kPa)	Viscosity (Pa·s)
Debris flow	18	-	5.0
Basin	27	200,000	-

Table 2. Numerical Analysis Condition

Test condition	Baffle condition	Cylindrical baffle arrays				Designation
		Height (H)	Number of rows (R)	Spacing between successive rows (L)	Transverse blockage ratio (B)	
Real-scale test (Jun et al., 2015)	Without baffles	-	-	-	-	H0_RT
Numerical analysis	Without baffles	-	2	12m	40%	H0_NA
	With baffles (Cylindrical shape baffles)	1.0m				H1_R2_NA
		2.0m				H2_R2_NA

※ RT: Real-scale test, NA: Numerical analysis

의해서만 흘러내리도록 모델링하였다. Fig. 5는 수치적으로 모사된 토석류 유역과 함께 계곡 중앙부에 설치된 원통형 대책구조물을 보여주는 것이다. 대책구조물은 토석류 발생장치로부터 188 m 지점에 설치되었다. 토석류의 발생부 초기체적(Initial volume)은 물, 흙, 거석 등이 섞여 있는 단일 밀도의 점성유체로 간주하였다. 토석류의 밀도와 점성은 실험 당시 유사한 범위의 지반특성

이 고려된 지반물성(Kim, 2021)을 해석에 적용하였으며, 해석을 위한 물성은 Table 1과 같다. 토석류가 발생부에서부터 유하부를 거쳐 대책구조물의 배열을 통과하기까지의 흐름과정을 충분히 모사하기 위해, 해석시간은 총 20초 동안 수행되었다. 본 연구에서는 기존에 수행된 실험 토석류 실험결과를 해석적으로 검증하고, 추가적인 수치해석을 통해 원통형 대책구조물의 높이에 따른 토석

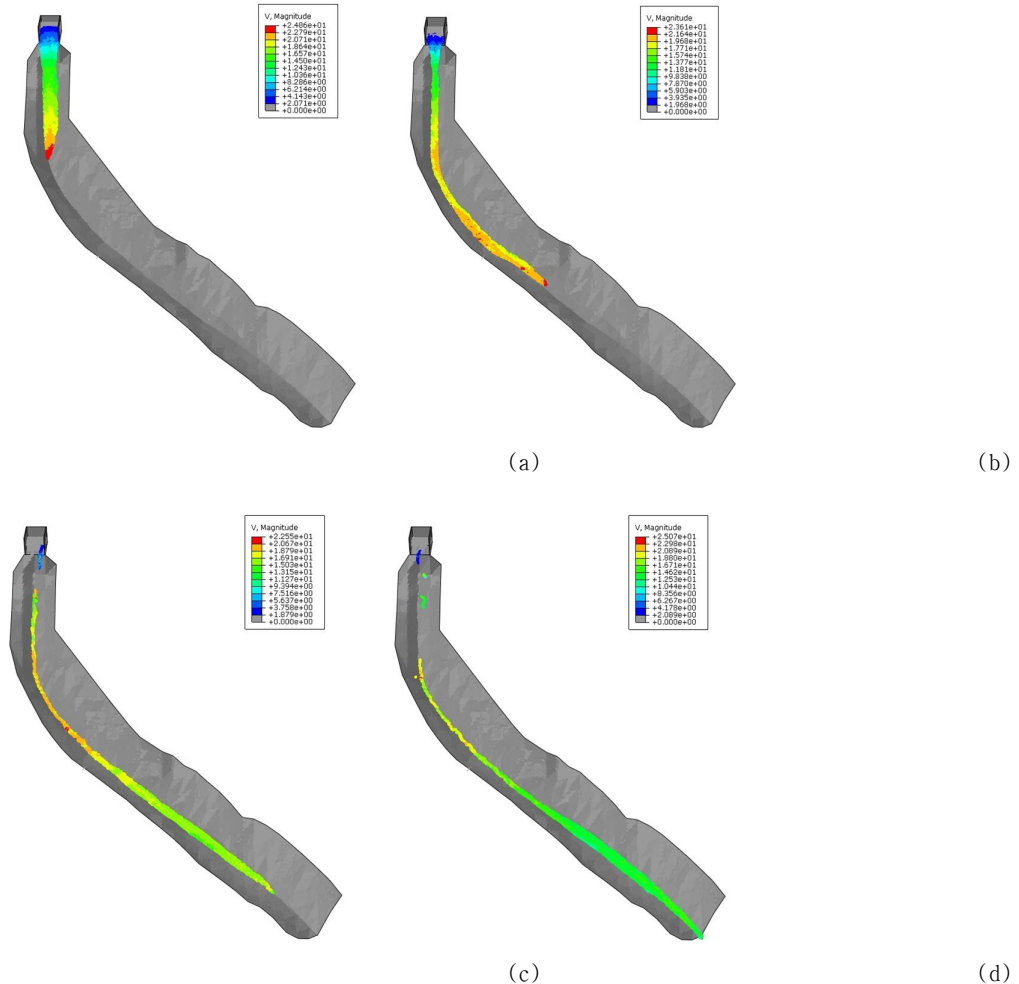


Fig. 6. Behavior of Debris Flow without Baffle Arrays in Numerical Result: (a) t=5.38 s, (b) t=9.13 s, (c) t=13.25 s, (d) t=15.13 s

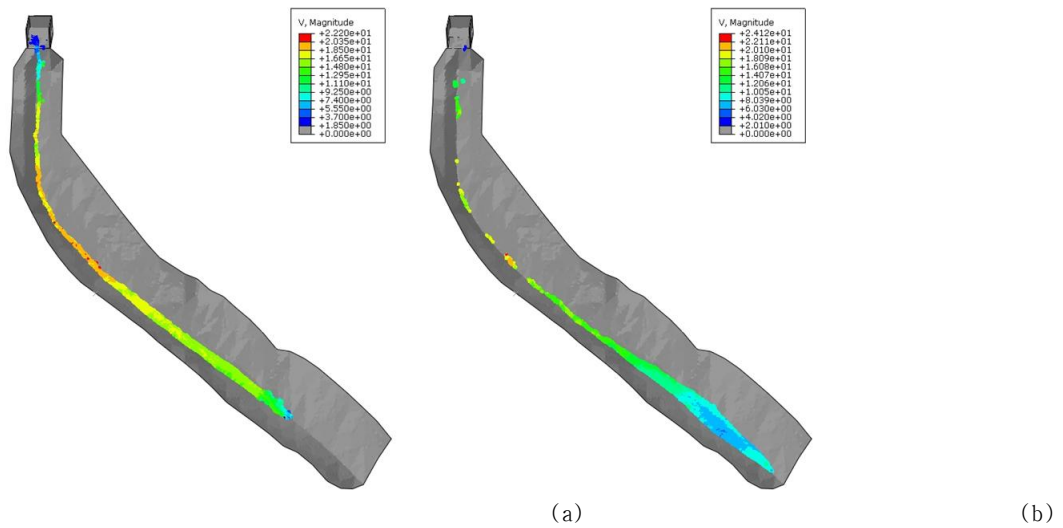


Fig. 7. Behavior of Debris Flow with Baffle Arrays in Numerical Result: (a) $t=13.76$ s, (b) $t=15.36$ s

류의 에너지 저감효과를 분석하였다. 대책구조물의 높이, 배열 수, 배열 간격 등에 대한 해석조건은 Table 2와 같다.

4. 해석결과

4.1 토석류의 흐름거동 변화

Fig. 6과 7은 수치해석을 통한 계곡부 내에서 대책구조물의 설치 여부에 따른 토석류의 흐름거동을 도시한 결과이다. 먼저 Fig. 6를 보면, 토석류 발생장지에서 흘러나온 토석류의 선단부 속도는 최대 2486 ms를 보였으며, 급경사 상류부를 지나 계곡부를 따라 유하하는 것이 관찰된다(Fig. 6(a)). 이후 토석류의 흐름은 유하부로 갈수록 흐름의 체적이 길게 늘어지는 형상을 보이면서 9.13초 후 선단부의 속도가 23.61 m/s로 이전 흐름 보다 약 5% 감소하였고, 흐름의 중앙 및 하단부의 전반적인 속도도 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 6(b)). 이와 같이 상류부의 흐름 특성은 대책구조물의 설치여부와 상관없이 유사하지만, 대책구조물이 시공된 하류부로 도달하면서 토석류의 속도는 대책구조물의 설치 여부에 따라 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다. Fig. 6(Fig. (c), (d))와 같이, 대책구조물이 설치되지 않은 구역에서는 계곡부의 경사가 완만해지면서 토석류의 속도도 일정 비율 줄어든 이후 흐름 전반에 걸쳐 지속적으로 속도가 유지되면서 흘러가는 양상을 보여주고 있다. 반면, Fig. 7(Fig. (a), (b))에서는 대책구조물이 설치된 구역에서의 토석류의 속도가 대책구조물로 인해 크게 줄어들고(Fig. 7(a)), 흐름이 구조물 주변으로 넓게 퍼지면서 속도가 크게 지체되는 양상을 보여준다(Fig. 7(b)).

4.2 토석류의 위치별 속도 변화

Fig. 8은 토석류의 이동거리에 따른 위치별 속도변화 결과를

보여주는 것으로, 기존 실규모 토석류 실험결과(Jun et al, 2015)를 그림에 추가하여 속도변화를 함께 비교할 수 있도록 하였다. 그림 상에서 기존 연구결과는 RT(Real-scale test)로 표기하였고, 해석 결과는 NA(Numerical analysis)로 표기하였다. 대책구조물이 설치되지 않는 경우의 토석류 위치별 속도를 보면, 실험 및 해석결과(H0_RT와 H0_NA) 모두 경사가 급한 초기 상류부에서 토석류의 선단부 속도가 최대를 보였으며, 이후 흐름이 완만한 계곡부에 도달하면서 속도가 줄어들어 따라 서로 유사한 속도감소 경향을 보였다. 특히, 실규모 토석류 실험결과에서 188 m에서부터 210 m까지는 직선형의 유로와 노출된 기반암의 영향으로 인하여 토석류의 선단부 속도가 상대적으로 크게 증가하는 경향을 보였다. 이후에는 다시 하부 지반과의 침식, 퇴적 및 마찰 등에 따라 속도가 점차 감소하면서 유하하는 경향을 보여주고 있다. 두 결과 간에 전반적인 경향성은 매우 유사하게 나타났으나, 흐름 초기에는 최대 50 ms 이상의 위치별 속도차이를 보이고 있다. 이는 흐름과정에서 지반 침식 및 연행과정, 흐름과 지표면 간의 마찰 특성이 속도에 영향을 미친 것으로 판단되며, 이를 위해서는 보다 정밀한 현장조사 와 해석기법의 보완이 필요할 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고, 대책구조물 통과 전·후 속도 감소경향은 전반적으로 유사하므로, 해석결과는 실험결과를 적절히 모사하는 것으로 나타났다.

대책구조물이 설치되지 않은 조건에서 수치해석 및 실험결과에서 토석류의 위치별 속도감소 경향이 서로 유사하다는 것을 확인한 후에는 계곡부에 원통형 대책구조물을 모사하고, 대책구조물의 높이를 변화시켜가면서 수치해석을 수행하였다. 대책구조물이 설치된 구역(H1_R2_NA)에서는 토석류의 선단부 속도가 구조물로 인하여 급격하게 줄어들었으며, 대책구조물을 높일수록 하류부의 속도가 더욱 감소하는 것으로 나타났다.

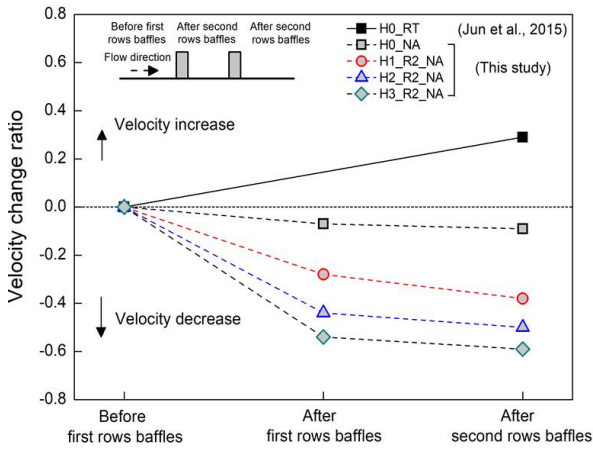


Fig. 9. Flow Velocity Reduction Ratio

Fig 9는 대책구조물의 설치 높이에 따른 토석류의 속도 변화비율을 대책구조물 통과 전(Before the first row of baffles), 첫 번째 열 통과 후(After the first row of baffles), 두 번째 열 통과 후(After the second row of baffles)로 구분한 것이다. 또한, 대책구조물이 설치되지 않는 구역(H0_RT와 H0_NA)에서의 속도 결과를 추가적으로 그림에 도시하여 대책구조물의 설치 여부에 따른 속도 변화를 함께 비교할 수 있도록 하였다. 여기서, 첫 번째 및 두 번째 열 통과 후의 속도는 모두 초기 접근 속도(Before first rows baffles)로 정규화하였다. 대책구조물이 설치되지 않는 실규모 현장시험에서의 토석류 속도변화(H0_RT)를 보면, 하류부의 속도가 30%까지 증가하였지만, 대책구조물 설치에 따른 토석류의 속도는 대책구조물로 유입되기 전의 상류부 흐름에 비해 평균 50% 감소하는 것으로 나타났다. 게다가, 대책구조물의 높이를 1 m (H1_R2_NA)에서 2 m (H2_R2_NA)로 높이면 두 번째 구조물을 통과한 하류부의 선단부 속도가 20% 더 줄어들었다. 마찬가지로 대책구조물의 높이를 2 m (H2_R2_NA)에서 3 m (H3_R2_NA)로 높이면 하류부에 대한 선단부의 속도가 10% 더 줄어드는 것으로 나타났다. 따라서 대책구조물의 높이를 증가시킬 경우, 토석류의 더 큰 흐름저항을 유도하여 하류부의 속도저감 효과를 증가시키는 것으로 나타났다. 이와 같이 원통형 대책구조물의 높이를 증가시킴에 따라서 흐름 저항이 증가하고 토석류의 속도가 감소하는 결과는 최근 실내시험을 통하여 수행된 연구에서도 동일하게 확인할 수 있다(Kim and Yune, 2022).

4.3 원통형 대책구조물의 에너지 저감효과

본 연구에서는 역학적 에너지 관계를 이용하여 대책구조물의 높이에 따른 토석류의 에너지 저감효과를 비교하였다(Choi et al., 2014; Song et al., 2019; Wang et al., 2017b). 흐름과정 동안의 토석류의 밀도는 압축성이 변하지 않는 비압축성 유동(Incompressible flow)으로 가정하였고, 토석류의 상·하류부 간의

에너지 손실은 식 (7)의 베르누이 에너지 원리를 이용하여 산정하였다.

$$\left(h_u + \frac{v_u^2}{2g} + z_u \right) - \left(h_d + \frac{v_d^2}{2g} + z_d \right) - \Delta E = 0 \quad (7)$$

$$E_u - E_d - \Delta E = 0 \quad (8)$$

여기서, z_u 는 대책구조물의 통과 전 상류부(Upstream)의 위치 수두(m)이고, z_d 는 대책구조물의 통과 후 하류부(Downstream)의 위치수두(m)이다. h_u 는 상류부의 흐름깊이(m), h_d 는 하류부의 흐름깊이(m), v_u 는 상류부 선단부 속도(m/s), v_d 는 하류부 선단부 속도(m/s)이며, g 는 중력 가속도(m/s^2)를 나타낸다. 상류부 대책구조물을 통과하기 전의 흐름에너지는 E_u 로 나타내며, 대책구조물 하류부를 통과하는

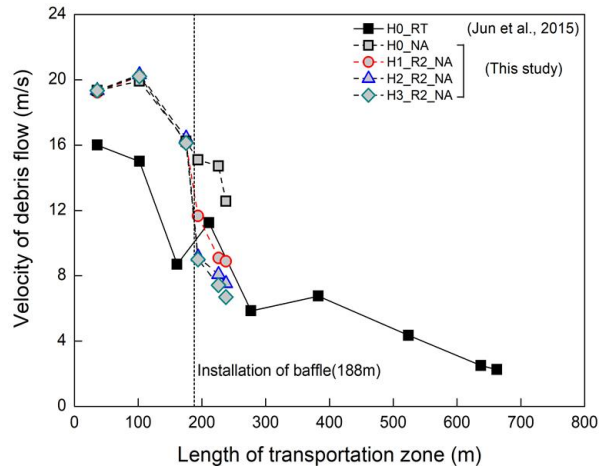


Fig. 8. Flow Velocity of Debris Flow

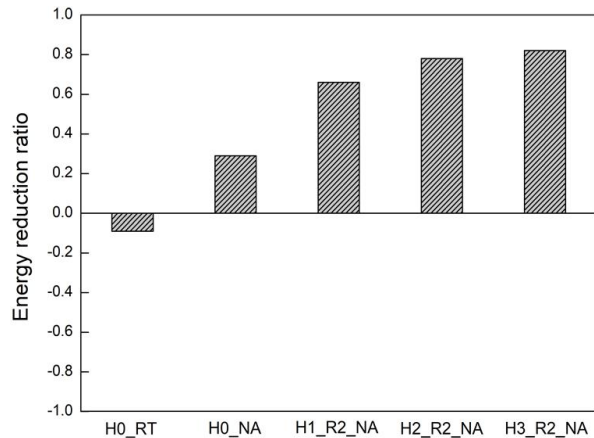


Fig. 10. Energy Reduction of Debris Flow with Baffle Height

Table 3. Comparison of Energy Reduction Ratio

Test ID	Baffle height (m)	Energy reduction ratio
H0_RT	-	-0.09
H0_NA	-	+0.29
H1_R2_NA	1.0	+0.66
H2_R2_NA	2.0	+0.78
H3_R2_NA	3.0	+0.82

H0 : Without baffles

H1, H2, H3 : Baffle height 1 m, 2 m, 3 m

흐름에너지는 E_a 로 나타낸다. 이 때, 대책구조물 상·하류부 간의 에너지 손실차이는 ΔE 로 나타낸다.

Fig. 10은 토석류가 대책구조물을 통과한 후, 하류부의 에너지 저감효과를 대책구조물의 설치 높이에 따라 비교한 것이다. 각 실험에서의 에너지 저감효과는 대책구조물을 통과하기 전의 초기 접근에너지(E_a)로 정규화하였다. 토석류의 에너지 저감효과를 보면, 대책구조물이 설치되지 않는 경우, 에너지 저감효과가 크게 증가하지 않은 반면, 대책구조물이 설치된 경우에는 에너지 저감효과가 증가하였고, 대책구조물의 높이를 증가시키면 에너지 저감효과가 더욱 증가하는 것으로 나타났다. 해석결과들을 이용하여 원통형 대책구조물의 하류부 에너지 저감효과 비율을 정리하여 Table 3에 나타내었다. 먼저 대책구조물 설치하지 않는 경우에는 하류부로 토석류가 이동하면서 마찰 등으로 29% 정도 흐름에너지가 저감되는 것으로 나타났지만, 높이 1 m인 대책구조물을 설치함에 따라 하류부 흐름에너지 감소율은 66%까지 증가하는 것으로 나타났다. 이후 대책구조물의 높이가 1 m (H1_R2_NA)에서 2 m (H2_R2_NA)로 높아짐에 따라 12%의 에너지가 추가적으로 감소되었으며, 대책구조물의 설치 높이가 3 m (H3_R2_NA)까지 증가함에 따라서는 4%의 추가 에너지 저감효과를 보였다. 따라서, 대책구조물의 설치하는 하류부 흐름에너지를 크게 감소시키지만, 대책구조물의 높이 증가에 따라서는 에너지 저감효과가 점차 감소하면서 수렴하는 것으로 나타났다.

이는 높은 대책구조물이 흐름에 대한 더 큰 저항력(flow impedance)을 유발하고, 잠재적인 월류(overflow)를 제어하여 에너지 손실효과를 증가시켰기 때문이다. 하지만, Fig. 10과 Table 3에서 볼 수 있듯이, 대책구조물의 높이 3 m (H3_R2_NA) 부터는 토석류의 에너지 저감효과가 크지 않고 대책구조물 높이 2 m인 경우와 유사한 것으로 나타났다. 이처럼 대책구조물을 설치할 때에는 현장조건 등을 고려하여 적절한 높이의 구조물 배치가 필요할 것으로 보여진다. 앞선 토석류의 속도 및 에너지 저감효과 결과를 정리하여 보면, 대책구조물의 설치하는 토석류의 속도를 감소시키고 잠재적인 에너지 손실을 유도하여, 하류부의 토석류 흐름에너지를

감소시킨다. 또한, 대책구조물의 높이를 증가시키면 추가적인 에너지 손실에 의해 토석류의 흐름에너지 저감효과가 더 크게 발휘되는 것으로 나타났다. 따라서 이러한 연구결과를 바탕으로 토석류 재해 위험지역에 원통형 대책구조물을 적절하게 설치할 경우 토석류의 흐름에너지를 충분히 저감시킬 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 원통형 대책구조물의 토석류 에너지 저감효과를 분석하기 위해, 원통형 대책구조물이 설치된 실제 규모의 계곡부를 수치적으로 모사하고, 대책구조물의 설치 높이를 변화시켜가면서 수치해석을 수행하였다. 이를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.


- (1) 대변형 해석기법인 입자완화 유체동역학(Smooth Particle Hydrodynamics, SPH) 기법을 이용하여 기존의 토석류 실험규모 실험결과에 대한 해석적 검증은 수행한 결과, 해석 및 실험결과는 서로 유사한 흐름특성을 보였다.
- (2) 앞선 결과를 토대로, 대책구조물의 설치 높이를 변화시켜가면서 수치해석을 수행한 결과, 원통형 대책구조물을 설치하면 토석류의 속도가 크게 줄어들었으며, 대책구조물로 유입되기 전의 상류부 흐름과 비교하면 토석류의 선단부 속도가 평균 50% 감소하는 것으로 나타났다. 대책구조물의 높이를 1 m (H1_R2_NA)에서 3 m (H3_R2_NA)로 높이면 하류부의 선단부 속도가 최대 30%까지 줄어드는 것으로 나타났다.
- (3) 대책구조물이 설치되지 않는 경우에는 하류부 토석류의 에너지 감소는 29%로 크지 않은 반면, 높이 1 m인 대책구조물을 설치함에 따라 토석류의 에너지 저감효과는 66%까지 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 대책구조물의 높이가 1 m에서 2 m 및 3 m로 높아짐에 따라 12% 및 4%의 추가 에너지 저감효과를 보여, 대책구조물의 설치하는 하류부 흐름에너지를 크게 감소시키지만, 대책구조물의 높이 증가에 따른 에너지 저감효과 증가는 크지 않은 것으로 나타났다.
- (4) 대책구조물을 높이면 더 큰 흐름 저항력을 유발하고, 잠재적인 월류를 제어하여 토석류의 에너지 손실효과를 더욱 증가시키는 것으로 나타났다. 그러나 대책구조물 설치 높이가 3 m 부터는 토석류의 에너지 저감효과가 크지 않고 대책구조물 높이 2 m인 경우와 유사한 것으로 나타나, 대책구조물을 설치할 때에는 현장 조건 등을 고려하여 적절한 높이의 구조물 배치가 필요할 것으로 보여진다.
- (5) 앞선 결과들을 토대로, 본 연구에서 사용된 대변형 해석기법인 입자완화 유체동역학기법은 토석류와 대책구조물의 크기 효과에 따른 흐름-구조물 간 상호작용의 적절한 모사가 가능

한 것으로 판단된다. 실험이 대형화될수록 오랜 준비기간과 큰 실험 비용에 대한 문제가 있다는 점을 감안한다면, 본 연구에서 다루어진 토석류 수치해석기법을 통하여 실제 현장 대책구조물의 적절한 크기와 배치조건을 결정하는데 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서는 지반 침식 및 연행작용을 고려하지 않고, 수치해석을 단순화하여 토석류의 에너지 저감 특성을 분석하였으므로 보다 정확한 해석 결과를 도출하기 위해서는 추후에 지반 침식 및 연행작용을 고려한 수치해석 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 2021년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업(2021R1A6A1A03044326, 2021 R1A6A3A01086753)의 지원을 받았습니다. 이에 감사드립니다. 본 논문은 2022 CONVENTION 논문을 수정·보완하여 작성되었습니다.

ORCID

Chan-Young Yune  <https://orcid.org/0000-0003-0477-2625>

References

- Choi, C. E., Ng, C. W. W., Song, D., Kwan, J. H. S., Shiu, H. Y. K., Ho, K. K. S. and Koo, R. C. H. (2014). "Flume investigation of landslide debris-resisting baffles." *Canadian Geotechnical Journal*, CGS, Vol. 51, No. 5, pp. 540-553, <https://doi.org/10.1139/cgj-2013-0115>.
- Fei, J., Jie, Y., Sun, X. and Chen, X. (2020). "Experimental investigation on granular flow past baffle piles and numerical simulation using a $\mu(I)$ -rheology-based approach." *Powder Technology*, Elsevier, Vol. 359, pp. 36-46, <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.069>.
- Hu, H., Zhou, G. G. D., Song, D., Cui, K. F. E., Huang, Y., Choi, C. E. and Chen, H. (2020). "Effect of slit size on the impact load against debris flow mitigation dams." *Engineering Geology*, Elsevier, Vol. 274, 105764, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105764>.
- Hunger, O. and Morgenstern, N. R. (1984). "High velocity rings shear tests on sand." *Geotechnique*, ICE, Vol. 34 No. 3, pp. 415-421, <https://doi.org/10.1680/geot.1984.34.3.415>.
- Jakob, M. (2005). "A size classification for debris flows." *Engineering Geology*, Elsevier, Vol. 79, Nos. 3-4, pp. 151-161, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2005.01.006>.
- Jun, K. J., Lee, S. D., Kim, G. H., Lee, S. W. and Yune, C. Y. (2015). "Verification of countermeasures by velocity estimation of real scale debris flow test." *Proceedings of the 6th International Conference on Debris flow Hazard Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment (DFHM6)*, Tsukuba, Japan, 22-25 June.
- Kim, B. J. (2021). *Experimental and numerical study on effect of cylindrical baffles on debris flow behavior*, Ph.D. Dissertation, Gangneung-Wonju National University, Korea (in Korean).
- Kim, B. J., Han, K. D., Choi, C. E. and Yune, C. Y. (2019). "An experimental study on cylindrical countermeasures for dissipation of debris flow energy." *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, KGES, Vol. 20, No. 1, pp. 57-65, <https://doi.org/10.14481/jkges.2019.20.1.57> (in Korean).
- Kim, B. J. and Yune, C. Y. (2022). "Flume investigation of cylindrical baffles on landslide debris energy dissipation." *Landslides*, Springer, Vol. 19, pp. 3043-3060, <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01945-0>.
- Lee, K. W., Kim, Y. M., Ko, J. Y. and Jeong, S. S. (2019). "A study on the debris flow-induced impact force on check dam with-and without-entrainment." *Computers and Geotechnics*, Elsevier, Vol. 113, 103104, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103104>.
- Lee, K. W., Park, H. D. and Jeong, S. S. (2016). "A proposed analytical model for the debris flow with erosion and entrainment of soil layer." *Journal of the Korean Geotechnical Society*, KGS, Vol. 32, No. 10, pp. 17-29, <https://doi.org/10.7843/kgs.2016.32.10.17> (in Korean).
- Leonardi, A., Goodwin, S. R. and Pirulli, M. (2019). "The force exerted by granular flows on slit-dams." *Acta Geotechnica*, Springer, Vol. 14, No. 6, pp. 1949-1963, <https://doi.org/10.1007/s11440-019-00842-6>.
- Li, S., Peng, C., Wu, W., Wang, S., Chen, X., Chen, J., Zhou, G. G. D. and Chitneedi, B. K. (2020). "Role of baffle shape on debris flow impact in step-pool channel: an SPH study." *Landslides*, Springer, Vol. 17, No. 21, pp. 2099-2011, <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01410-w>.
- Ng, C. W. W., Choi, C. E., Song, D., Kwan, J. S. H., Koo, R. C. H., Shiu, H. Y. K. and Ho, K. K. S. (2015). "Physical modelling of baffles influence on landslide debris mobility." *Landslides*, Springer, Vol. 12, No. 1, pp. 627, <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0476-y>.
- Song, D., Choi, C. E., Ng, C. W. W., Zhou, G. G. D., Kwan, J. S. H., Sze, H. Y. and Zheng, Y. (2019). "Load-attenuation mechanisms of flexible barrier subjected to bouldery debris flow impact." *Landslides*, Springer, Vol. 16, No. 12, pp. 2321-2334, <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01243-2>.
- Wang, F., Chen, X. and Chen, J. (2017a). "Experimental study on the energy dissipation characteristics of debris flow deceleration baffles." *Journal of Mountain Science*, Springer, Vol. 14, No. 10, pp. 1951-1960, <https://doi.org/10.1007/s11629-016-3868-8>.
- Wang, F., Chen, X., Chen, J. and You, Y. (2017b). "Experimental study on a debris-flow drainage channel with different types of energy dissipation baffles." *The Journal of Engineering Geology*, Elsevier, Vol. 220, pp. 43-51, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.01.014>.

Wang, Y., Liu, X., Yao, C. and Li, Y. (2019). "Debris-flow impact on pier with different cross-sectional shapes." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 146, No. 1, 04019045, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001656](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001656).
Yang, E, Bui, H. H., Nguyen, G. D., Choi, C. E., Ng, C. W. W.,

Sterck, H. D. and Bouazza, A. (2021). "Numerical investigation of the mechanism of granular flow impact on rigid control structures." *Acta Geotechnica*, Springer, Vol. 16, No. 8, pp. 2505-2527, <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01162-4>.