

토석류 피해지의 지형 변화와 Morpho2DH 모형 결과의 비교 분석

이종서¹ · 이광연¹ · 윤석희¹ · 김동현¹ · 이상호¹ · 오세욱² · 김동근^{3*}

¹한국치산기술협회, ²경북대학교 건설방재공학과, ³경북대학교 산림생태보호학과

Comparison of Terrain Changes in Debris Flow-Damaged Area and Morpho2DH Model Results

Jong-Seo Lee¹, Kwang-Youn Lee¹, Suk-Hee Yoon¹, Dong-Hyun Kim¹,
Sang Ho Lee¹, Se-Wook Oh² and Dong-Geun Kim^{3*}

¹Korea Association of Forest Enviro-conservation Technology, Cheongju 28165, Korea

²Department of Construction and Disaster Prevention Engineering,
Kyungpook National University, Sangju 37224, Korea

³Department of Forest Ecology and Protection, Kyungpook National University, Sangju 37224, Korea

요약: 토석류는 대표적인 산지토사재해의 일종으로 넓은 범위에 걸쳐 인명 및 재산 피해를 초래할 수 있으며 이를 예방하기 위해서는 거동 특성에 대한 이해가 필요하다. 본 연구에서는 2023년 토석류가 발생한 경상북도 영주시 봉현면 두산리 일원에 대해 피해 이전과 이후의 LiDAR 자료를 통해 실제 토석류 피해에 의한 피해 면적과 지형 변화량을 계산하였으며, 현장조사 및 실내조사 자료를 토대로 토석류 수치해석모형인 Morpho2DH에 따른 피해 면적과 지형 변화량을 실제 값과 비교하고자 하였다. 또한, 각 결과에 대해 피해 범위를 기준으로 횡단 표고 분석을 실시하고 비교하여 모형의 적합성을 확인하였다. 그 결과, Morpho2DH 모형 기반의 토석류 피해 면적과 지형 변화량은 LiDAR 기반 결과에 비해 각각 약 152%, 약 178% 이상 높게 측정되었다. 횡단 표고 변화 결과에 대한 Pearson 상관관계 분석에서는 최소 0.65 이상의 Pearson 상관계수로 양의 상관관계가 존재하는 것으로 확인되었다.

Abstract: Debris flow is a typical type of mountainous sediment disaster that can cause widespread damage to both lives and property, making it essential to understand its behavioral characteristics for effective prevention. In this study, pre- and post-event Light Detection And Ranging(LiDAR) data from the Dosan-ri area in Bonghyeon-myeon, Yeongju-si, Gyeongsangbuk-do, Republic of Korea where debris flows occurred in 2023, were used to calculate the actual affected area and terrain change volume caused by the debris flow. These calculated values were then compared with those derived from the numeric simulation model, Morpho2DH, based on field surveys and laboratory investigation data. Additionally, the model's applicability was assessed by conducting cross-sectional elevation analyses based on the extent of the affected area and comparisons of the results. The findings indicate that the debris flow affected area and terrain change volume estimated by the Morpho2DH model were approximately 152% and 178% higher, respectively, compared to the LiDAR-based results. Pearson correlation analysis of the cross-sectional elevation changes showed a positive correlation, with Pearson Correlation Coefficients(PCC) of at least 0.65

Key words: debris flow, Morpho2DH, LiDAR, simulation, forest sediment disasters

서론


토석류는 국내에서 발생하는 대표적인 산지토사재해의

일종으로 산사태, 사면붕괴 등으로 유출된 토사 또는 계상에 퇴적된 토사가 유목 등과 함께 비탈면을 따라 빠르게 흐르는 현상을 말한다. 이러한 토석류는 유동적 흐름 특성을 보유하여 이동성을 가져 소규모 발생에도 넓은 범위에 걸쳐 인명 및 재산 피해를 초래할 수 있다. 따라서, 최근 사회적으로 이슈화되고 있다(Eu and Im, 2017; Lee et al., 2020).

* Corresponding author

E-mail: dgkim96@knu.ac.kr

ORCID

DongGeun Kim  https://orcid.org/0000-0002-9841-1187

이와 같은 토석류를 효율적으로 예방하고 대응하기 위해서는 토석류의 거동 특성에 대한 사전 모의가 필요하다. 재해 발생을 사전에 예측하는 것은 제한적으로 토석류 발생 이전, 대상지의 정밀 지형과 지반의 물리적·역학적 성질을 나타내는 지반정수의 획득하는 것은 어렵다(Singh et al., 2010; Woo et al., 2011; Jung et al., 2020). 이러한 조건에서 현재 토석류의 거동 특성을 정량적으로 분석하기 위해서 모형실험 방법, 현장조사 방법 그리고 수치해석 방법 등이 이용된다(Dai et al., 2021; Ryou et al., 2021; Lapillonne et al., 2023). 특히, 모형실험 방법과 현장조사 방법을 통한 토석류의 거동 특성 해석은 정밀한 토석류의 역학적 특성 확인이 가능하나 결과 해석의 어려움이 존재하며 분석 편의성이 떨어지는 등의 이유로 국내·외에서는 수치해석 방법을 이용한 토석류 거동 특성 해석 연구가 다수 수행되고 있는 실정이다(Kim et al., 2008; Lee et al., 2010; Lim et al., 2017; Nikooei and Manzari., 2020; Hürlimann et al., 2023; Tang et al., 2023). 수치해석 방법은 토석류 거동특성과 관련된 지배방정식을 컴퓨터 등을 통해 근사하는 것으로 결과의 정확성과 분석의 편의성이 입증된 Morpho2DH, Flo-2D, Flow-R, Hyper Kanako 및 Kanako2D 등의 수치해석 모형을 많이 사용한다(O'Brien et al., 1993; Nakatani et al., 2008; Horiuchi et al., 2012; Horton et al., 2013; Kasim et al., 2021; Rosli et al., 2021). 본 연구에서는 토석류 수치해석 모형 중 Morpho2DH를 활용하였다. 해당 모형은 토석류 및 이류에 의한 지형의 변화 및 거동 특성을 2차원적으로 해석하기 위한 오픈소스 기반의 토석류 수치해석 모형으로 피해 구간별 매개변수를 별도 적용할 수 있으며 퇴적심, 침식심 및 유하속도 등의 자료 획득이 가능하다. 또한, 연행 작용을 고려한 토석류의 침식 및 퇴적 현상의 분석이 가능하며, 사방댐 등의 사방시설을 통한 토석류 저감효과 등을 평가할 수 있어, 수치해석 영역을 선택적으로 설정 가능해 타 수치해석모형에 비해 분석의 편의성을 보유하는 등의 장점을 가진다(Takebayashi, 2017). Onaka et al.(2019)은 Morpho2DH 모형을 이용해 토석류 피해 특성과 토석류 피해에 따른 하천 범람 피해 등을 해석하였으

며, Harsanto et al.(2021)은 하상 지형 변화 분석을 그리고 Eguchi et al.(2022)은 철도변 인근의 재해 위험성 및 취약성을 평가한 바 있다. 또한 Franck and Kobiyama(2023)는 일본 히로시마현에서 발생한 토석류 피해에 대해 Morpho2DH와 Hyper KANAKO 모형의 토석류 수치해석 결과를 비교한 바 있다.

이와 같은 측면에서 본 연구는 토석류 피해 이전과 이후의 LiDAR 자료를 수집하여 토석류 피해에 따라 발생하는 침식과 퇴적과 같은 실제 지형 변화의 관측을 통하여 토석류 피해에 따른 실제 지형 변화와 Morpho2DH 모형에 따른 지형 변화를 분석하고자 하였다.

재료 및 방법

1 연구대상지

본 연구는 경상북도 영주시 봉현면 두산리 일원에서 2023년 7월 18일 발생한 토석류 피해를 대상으로 하였다. 대상지는 자작나무, 소나무, 기타 활엽수 등으로 이뤄진 혼효림이며 2023년 6월 슬릿트 사방댐 설치사업과 바닥막이 및 기슭막이 등의 계류보전사업이 진행된 곳에 해당한다(Figure 1a). 대상지의 토석류 발생원은 2개(Source 1, 2)로 유하 과정 중 계류의 병목 구간에서 합류된 특성을 보유하고 있다.

대상지의 지형 분석은 Woo(1986)의 분류에 따라 상부 사면 기여면적을 3ha로 한 유역을 기준으로 하였다. 이에 따라 대상지를 포함하는 유역의 면적은 약 13 ha이다. 토석류 피해 발생 이전, 유역의 평균 표고는 약 703 m이며 경사는 약 25°이다(Table 1). 토석류 피해 당시, 대상지의 강우 상황은 피해를 기준으로 인접한 기상청의 방재기상관측정보(Automatic Weather Station, AWS)에 대해 무강우기간(Inter Event Time Definition, IETD) 24시간을 기준으로 최초 강우 관측일인 7월 9일부터 피해 발생일인 7월 18일간 누적 강우량은 약 397.5 mm이고, 최대시우량은 약 27 mm로 확인되었다(Figure 1b).

Table 1. Status of research site.

Class	Value			Notes
	Max	Min	Mean	
Elevation (m)	759.4	625.2	703.4	Within catchment
Slope (°)	65.3	0.8	24.9	
Observed tree species	<i>Betula platyphylla</i> , <i>Pinus densiflora</i> , etc.			

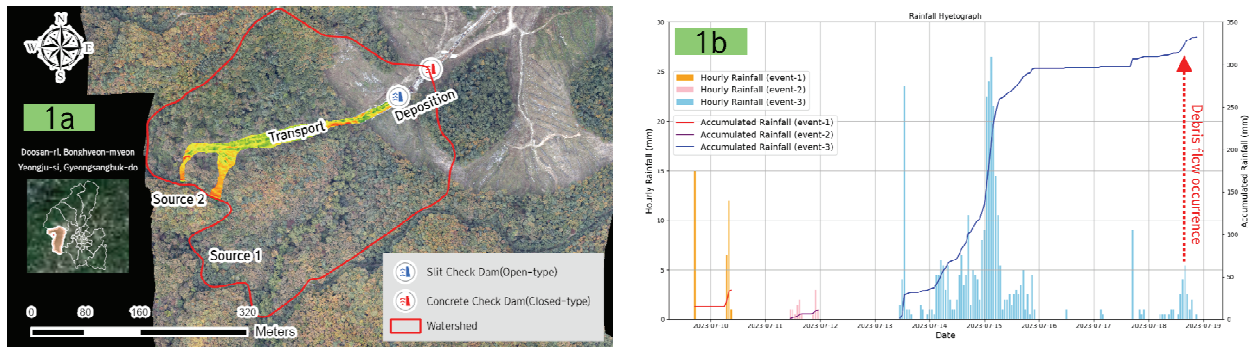


Figure 1. Research site (1a: Location of research site, 1b: Rainfall hietograph based AWS No.837).

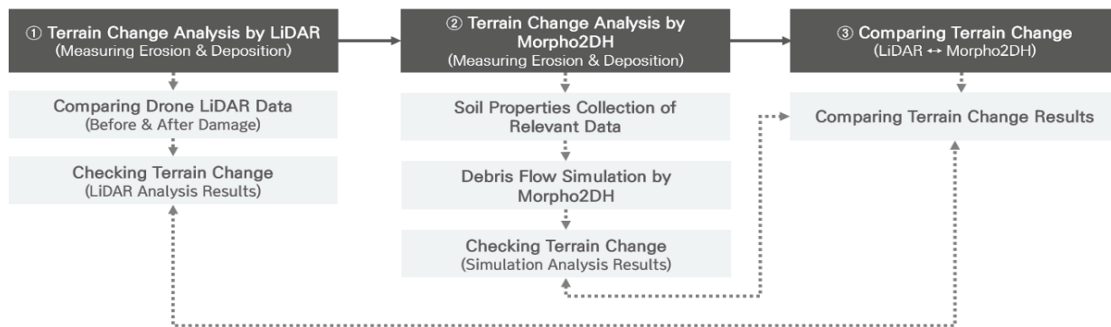


Figure 2. Flow chart of research process.

2 연구방법

본 연구의 절차는 3단계로 구분하여 토석류 피해지의 지형 변화와 Morpho2DH 수치해석모형의 지형 변화를 비교하였다(Figure 2). 첫 번째 단계에서는 ArcMap(Ver 10.8.2., ESRI, California, U.S.A.)을 이용해 대상지의 토석류 피해 전·후 LiDAR 자료를 통해 토석류 피해에 따른 침식 및 퇴적 등의 지형 변화를 확인하였다. 두 번째 단계에서는 Morpho2DH 모형을 이용하여 모의 토석류 피해에 따른 지형 변화를 확인하였다. 마지막 단계에서는 LiDAR 기반 지형 변화와 Morpho2DH 기반 지형 변화를 중첩분석하여 피해영역과 지형 변화량을 비교하고 Pearson 상관분석 하였다.

1) LiDAR 기반 지형 변화 분석

토석류 피해에 따른 지형 변화 분석을 위해 활용된 LiDAR 센서는 YellowScan사의 Mapper Plus 센서이며 토석류 피해 이전의 자료는 2023년 1월에, 토석류 피해 이후의 자료는 2023년 10월에 수집하였다(Table 2).

Table 2. Specifications of LiDAR sensor.

Technical specification			
Precision	Accuracy	Points	Echoes
3.5 cm	4.0 cm	240,000 pts/s	3

획득된 점군자료는 1×1m의 공간해상도를 보유한 수치 표고모형(Digital Elevation Model, DEM)으로 제작하였다(Figure 3). 이후, 토석류 피해 이후 DEM을 기준으로 피해 이전 DEM을 감하여 토석류 피해에 따른 지형 변화를 확인하였다. 즉, DEM을 감한 결과가 양수인 경우는 퇴적으로, 음수인 경우는 침식으로 하였다.

2) Morpho2DH 기반 지형 변화 분석

Morpho2DH 모형은 Egashira and Itoh(2004)에 따라 토석류를 단상 연속체로 가정하고 피해 경계를 기준하여 곡선격자를 생성하고 식 1을 이용하여 좌표로 변환한다.

$$J = \frac{1}{\left(\frac{\partial x}{\partial \zeta} \frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \frac{\partial y}{\partial \zeta} \right)} \quad (1)$$

좌표 변환식은 곡선격자를 야코비 행렬을 통해 데카르트 좌표계로 치환하는 것으로, ζ와 η는 곡선 좌표계의 종단 및 횡단 좌표이고 x와 y는 데카르트 좌표계의 종단 및 횡단 좌표이다.

이어서, 토석 혼합유체를 단상 연속체로 가정한 질량 보존식은 식 2~4와 같으며 운동량 보존식은 식 5와 같다.

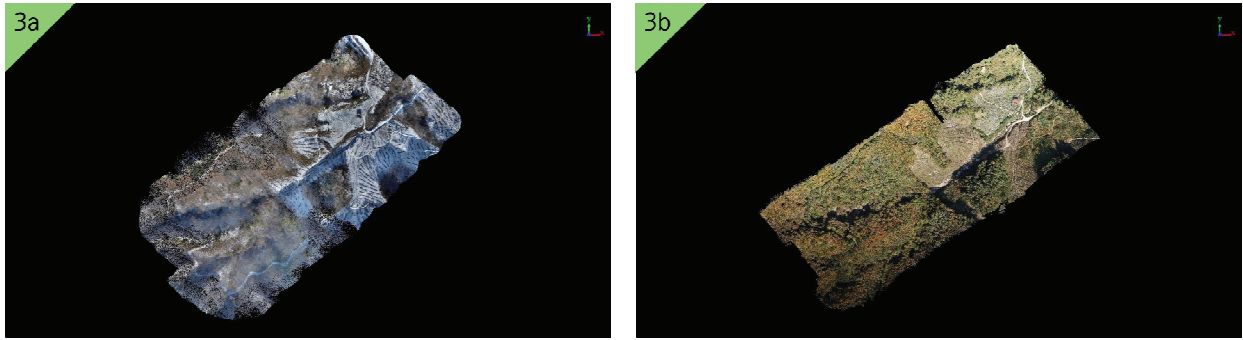


Figure 3. Drone LiDAR acquisition results (3a: Before debris flow, 3b: After debris flow).

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{hU}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left(\frac{hV}{H} \right) = \frac{E}{c_* J} \quad (2)$$

$$U = \frac{\partial \zeta}{\partial x} u + \frac{\partial \zeta}{\partial y} v \quad (3)$$

$$V = \frac{\partial \eta}{\partial x} u + \frac{\partial \eta}{\partial y} v \quad (4)$$

질량 보존식에서, t 는 시간(s), h 는 유동심(m), U 는 침식 깊이의 반변량도, V 는 평균 유동속도(m/s), E 는 기반층의 침식률, c_* 는 토석류 농도, u 는 침식 깊이(m), v 는 유동속도(m/s)이다.

$$-gh \left(\frac{1}{J} \left(\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial z_b}{\partial \zeta} + \frac{1}{J} \left(\frac{\partial \zeta \partial \eta}{\partial x \partial x} + \frac{\partial \zeta \partial \eta}{\partial y \partial y} \right) \frac{\partial z_b}{\partial \eta} \right) \dots$$

$$- \frac{1}{\rho_m} \left(\frac{1}{J} \left(\left(\frac{\partial \zeta}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \zeta}{\partial y} \right)^2 \right) \frac{\partial P}{\partial \zeta} + \frac{1}{J} \left(\frac{\partial \zeta \partial \eta}{\partial x \partial x} + \frac{\partial \zeta \partial \eta}{\partial y \partial y} \right) \frac{\partial P}{\partial \eta} \right) - \frac{\tau_{bc}}{\rho_m J} \quad (5)$$

운동량 보존식에서, gh 는 중력 가속도($g=9.81\text{m/s}^2$), P 는 정압, z 는 수직 좌표, ρ_m 은 토석류 용적농도, τ_{bc} 와 $\tau_{b\eta}$ 는 각각 ζ 및 η 에 대한 반변량 전단응력, τ_{bx} 및 τ_{by} 는 x , y 에 대한 전단응력, τ_{ys} 는 전단강도, f_b 는 저항계수이다. 모형 구동에 필요한 인자는 물의 단위중량, 흙의 비중, 토석류 용적농도, 내부마찰각 그리고 투수계수 등이며 발생원, 유하부, 퇴적부에 대해 불교란 시료 값을 각각 적용하였다. 해당 인자는 현장조사와 실내조사를 통해 획득한 지반 정수값을 적용하였으나 산정이 어려운 2차 흐름계수, 평형유사량 비율, 하상 변형 비율 및 층류 깊이 등의 매개변수는 Takebayashi(2023)에 따라 매뉴얼값을 사용하였다 (Table 3).

3) LiDAR 및 Morpho2DH기반 지형 변화 비교 분석
LiDAR 및 Morpho2DH 기반 지형 변화 비교는 Schilirò et al.(2015)과 Reid et al.(2016)에 따라 토석류 피해 범위에

Table 3. Application items and values by manual.

Parameter	Value
Secondary flow coefficient	7.0
Ratio of sediment discharge to equilibrium sediment discharge	1.0
Ratio of bed deformation DT to flow DT	1.0
Laminar flow depth ratio	0.4



Figure 4. Cross sectional analysis.

대한 횡단선을 설정하였다. 다만, 분석의 공간적 범위는 LiDAR와 Morpho2DH를 통해 산출되는 토석류 피해 중첩 범위로 제한하였으며 각 횡단선에 대해 1m 간격의 점 데이터를 생성하여 LiDAR와 Morpho2DH 모형의 침식과 퇴적과 같은 지형 변화를 비교하였다(Figure 4).

결과 및 고찰

1. LiDAR 기반 지형 변화

토석류 피해 이전과 이후의 DEM을 기반한 피해 범위 분석 결과, 피해 면적은 약 7,421 m^2 이며 도달거리는 약 340 m이고 피해 폭은 평균 약 14.8 m이다. 피해 이후에 표고는 피해 이전에 비해 평균 약 0.4 m 하락하였으나 최소값은 약 2.9 m 상승하였다. 이는 토석류 피해로 인한

지면 침식으로 전체적인 표고의 값은 하락하였으나 최소 표고는 상승하는 것으로 나타났다. 이는 사면 하부, 경사가 완화되며 토석과 토사가 퇴적되고 슬릿트 사방담에 의해 저지되어 나타나는 결과로 판단된다. 경사의 경우, 피해 이후 평균 경사가 피해 이전에 비해 약 1.2° 높았다. 최소 값은 약 0.5° 하락하였으며 최대 값은 약 8.9° 상승하였다 (Table 4). 이는 피해 범위 내 침식과 퇴적으로 지형의 복잡성이 증가하여 전체적인 경사가 상승한 것으로 판단된다. 또한, 최대 침식이 발생한 구간은 Source 1 부근으로 현장 조사 시에도 지반의 붕괴 정도가 가장 높게 나타난 구역에 해당한다(Figure 5a). 최대 퇴적이 발생한 구간은 두 발생원에서 유출된 토사가 합류되는 지점으로 Source 2에서 유출된 토사의 유하 방향이 변경되는 구간과 같다. 이는 Source 1과 Source 2에서 발생한 토석류 피해가 합류 과정에서 충돌하여 토석류의 유동이 불안정해짐에 따라 유속이 저하되고 일부 운동 에너지가 저하되어 퇴적이 강하게 발휘된 것으로 판단된다.

토석류 피해 범위 내 지형 변화 유형 분류 결과, 총 피해면적 약 7,421 m²에 대해 침식영역은 4,274 m²(57.6%), 퇴적영역은 3,147 m²(42.4%)로 확인되었다. 침식 및 퇴적량은 약 8,618 m³이었으며, 이 중, 침식량이 약 5,592 m³(64.9%), 퇴적량이 약 3,026 m³(25.1%)이었다(Table 5).

전체적인 침식과 퇴적 확인 시, 침식은 발생원과 계류의 양안을 따라 활발한 양상이 나타나며 퇴적은 토석류의 유

Table 5. LiDAR based erosion and desposition.

Class	Value	
	Area(m ²)	Volume(m ³)
Damaged Area	7,421	8,618
Erosion	4,724	5,592
Deposition	3,147	3,026

하 방향이 변화하는 지점으로부터 시작되어 계류를 따라 분포하였으며 경사가 완만해지는 구간에서 지배적으로 퇴적이 진행된 것으로 판단된다(Figure 5b).

2. Morpho2DH 기반 지형 변화

본 연구에서는 Morpho2DH 모형의 구동에 필요한 매개 변수 중 물의 단위중량은 0.98k N/m³으로 설정하였고, 토석류의 용적토사농도는 Adebisi and Hu(2021)에 따라 0.6으로 설정하였다. 지반정수 분석을 위해 채취된 토양시료는 세립분과 자갈이 포함된 모래가 우세하였으며, 유하부의 불교란시료를 제외한 모든 시료에서 비소성 실트 성분이 다량 포함된 것으로 나타났다(Table 6). 비소성 실트는 반복전단응력이 가해질 경우, 유효응력의 저하가 발생하며 과잉간극수압이 발생하기 쉬워지는 특성이 있다(Yang and Song, 2011). 즉, 비소성 실트는 동적하중이 가해질 때, 빠른 변형 발생시키며, 변형 시간이 다른 지반구성물질 등에 비해 짧으며 액상화가 발생할 가능성이 존재한다

Table 4. LiDAR based terrain change.

Class		Before the damage	After the damage	Change
Elevation(m)	Average	675.8	675.4	▼0.4
	Maximum	738.6	738.4	▼0.2
	Minimum	612.1	615.0	▲2.9
Slope(°)	Average	25.1	26.3	▲1.2
	Maximum	65.3	74.2	▲8.9
	Minimum	0.8	0.3	▼0.5

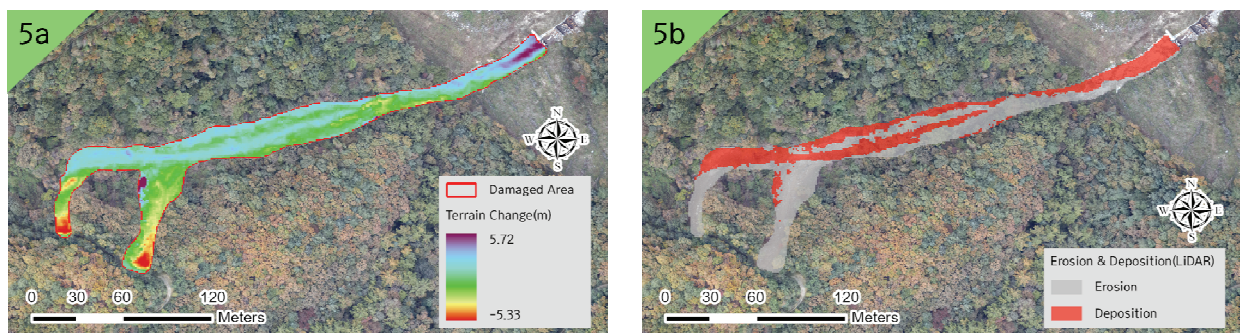


Figure 5. LiDAR based terrain changed result (5a: terrain change, 5b: erosion and deposition).

Table 6. Soil properties analysis results.

Class		U.S.C.S	Gs(kN/m ³)	c(kN/m ²)	∅(°)	γ _t (kN/m ³)	k(cm/s)
Non Disturbance	Source 1	SW	2.68	0.9	28	14.5	4.15e-3
	Transport	SM	2.66	2.3	27	16.8	8.94e-4
	Deposition	SW-SM	2.68	2.0	26	15.4	4.78e-3
Disturbance	Source 1	SW	2.66	0.6	32	12.0	6.25e-3
	Transport	SP	2.66	2.5	25	12.0	5.27e-3
	Deposition	SP-SM	2.67	2.3	31	16.0	6.04e-3

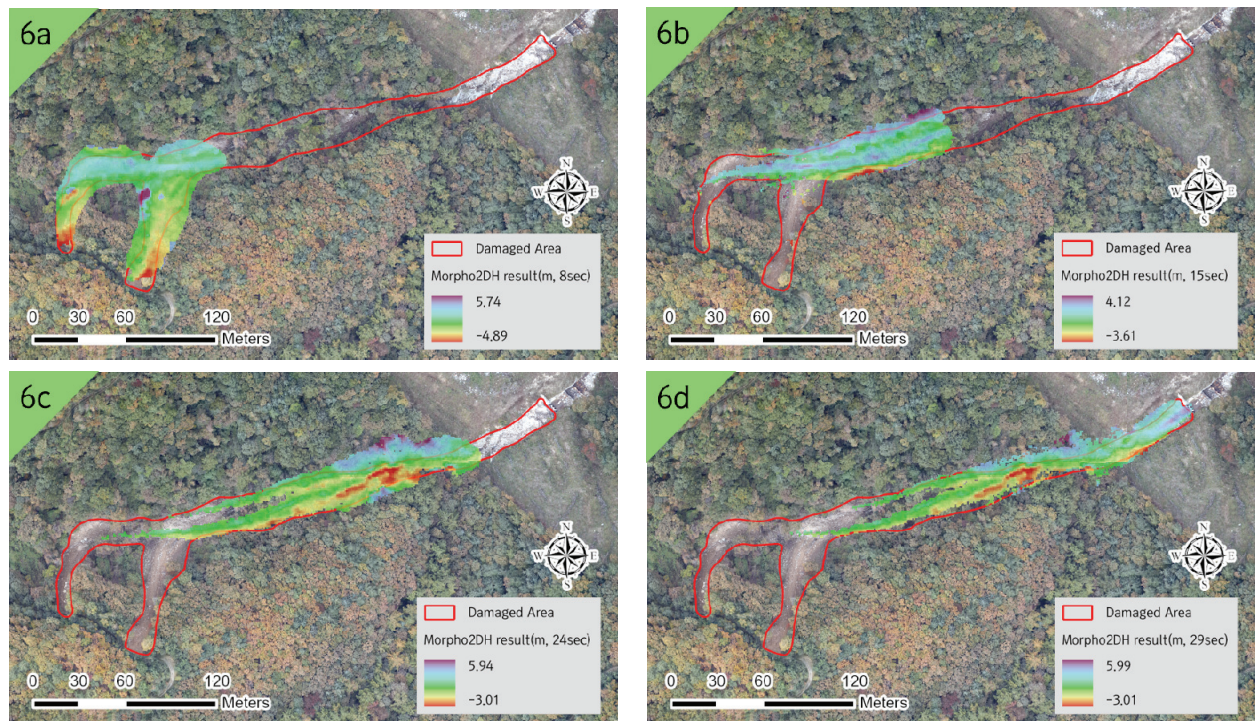


Figure 6. Debris flow behavioral result by Morpho2DH (6a: 8 seconds after, 6b: 15 seconds after, 6c: 24 seconds after, 6d: 28 seconds after damage occurred).

(Song, 2003; Song et al., 2004). 이러한 특성은 토석류의 유하 과정에서 유동성과 위력을 증가시키는 것으로 알려져 있다(Huang and Wang, 2024). 따라서, 초기 사면의 붕괴로 인한 동적하중의 증가와 더불어 비소성 실트의 특성으로 인해 피해가 촉진되고 유동성이 증가하여 계류를 따라 토석이 이동하였을 것으로 판단된다. 또한, 대상지는 Source 1의 교란 시료를 기준으로 내부마찰각은 32°수준으로 대상지 내 최대 경사를 보유하는 Source 1에 대해 이미 기반재해에 취약한 내부적 요인에 더해 집중호우 등의 외부적 요인이 작용하여 사면의 안정성이 저하되고 토석류 피해가 발생한 것으로 판단된다.

Morpho2DH 기반 토석류 모의 피해 실험 결과, 피해 발생 8초 이후, 두 발생원으로부터 유출된 토사는 합류하며

유속이 저하되는 경향을 보였으며 Source 1에서 유출된 토사는 유하 방향의 변경과 함께 일부 토사가 퇴적되는 양상이 확인되었다(Figure 6a). Source 1과 Source 2에서 발생한 토사는 토석류 피해 발생으로부터 15초가 경과하였을 때, 하부의 계류를 따라 토석류 피해가 진행되었으며 점진적으로 유속이 증가하였다(Figure 6b). 피해 발생 24초 이후, 약 25.9 m/s의 순간 최대 유사 전달 속도가 확인되었으나 경사가 완화되며 감속과 함께 퇴적이 활발히 이뤄졌다(Figure 6c). 마지막으로 29초 경과 이후, 토석류 피해는 하부의 슬릿트 사방댐에 의해 저지되며 피해가 종료되었으며 도달거리의 약 340 m로 실제 피해와 유사하게 나타났다(Figure 6d). 도달거리가 유사하게 나타난 것은 슬릿트 사방댐에 의해 피해가 저지된 결과로 판단된다.

Table 7. Morpho2DH based erosion and deposition.

Class	Value	
	Area(m ²)	Volume(m ³)
Damaged Area	11,308	15,421
Erosion	5,682	7,800
Deposition	5,626	7,621

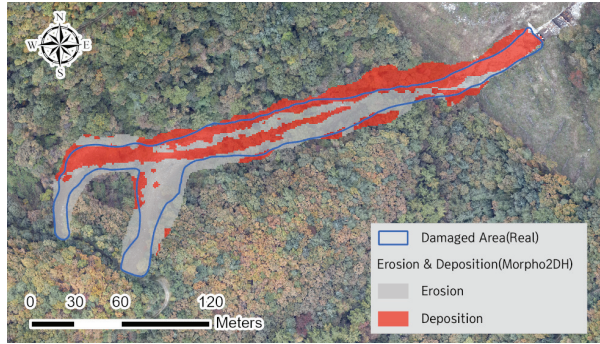


Figure 7. Morpho2DH based erosion and deposition distribute.

Morpho2DH에 따른 모의 토석류 피해 면적은 약 11,308 m²이며 지형 변화 유형 분류 시, 침식영역은 약 5,682 m² (50.2%), 퇴적영역은 약 5,626 m² (49.8%)이었으며, 침식 및 퇴적량은 약 15,421 m³로 침식량이 약 7,800 m³ (50.5%), 퇴적량이 약 7,621 m³ (49.5%)이었다(Table 7).

Morpho2DH를 기반한 모의 토석류 피해에 따른 지형 변화 분류 시, LiDAR 기반 분석 결과와 같이 침식은 발생

원과 계류의 양안을 따라 나타났으며 퇴적도 유하 방향이 변경하는 지점으로부터 계류를 따라 분포하며 경사가 완만해지는 구간에서 높은 퇴적이 확인되었다(Figure 7).

3. LiDAR 및 Morpho2DH 기반 지형 변화 비교

LiDAR와 Morpho2DH 기반 지형 변화 비교 결과, 피해 면적은 Morpho2DH에 따른 모의 피해 면적이 LiDAR에 따른 실제 피해 면적보다 약 152%(3,887 m²) 높게 나타났다. 모의 피해에 대해 실제 피해 면적과 중첩되는 영역의 지형 변화 유형 분류 시, 침식영역은 약 14%(651 m²) 낮았고, 퇴적영역은 약 4%(146 m²) 높게 나타났다. 침식 및 퇴적량 비교 시, 모의 피해에 따른 침식 및 퇴적량은 실제 피해보다 약 178%(6,803 m³) 높았고 침식량과 퇴적량은 각각 약 139%(2,208 m³), 약 251%(4,595 m³) 높았다(Table 8). 모의 피해에 대해 실제 피해 면적과 중첩되는 영역의 침식 및 퇴적량 분석 시, 침식량은 약 5%(300 m³) 낮았고 퇴적량은 약 4%(131 m³) 높았다.

다만, 모의 토석류 피해는 사방댐에 의한 피해 저지만을 고려하였으며 임목 등에 의한 피해 저지와 토석류 피해가 발생하기 전 수행된 계류보전사업에 의한 지형 변화 자료를 이용하지 못한 결과로 추가적인 연구의 필요성이 존재한다.

지형 변화량에 대한 Pearson 상관 분석 결과, 발생원 구간에 대해서는 높은 상관계수(PCC≥0.99)를 보유하며 강한 양적 선형관계가 확인되었다(Figure 8a, Figure 8b).

Table 8. Morpho2DH based erosion and deposition distribute results.

Class	Damaged area(m ²)			Damaged volume(m ³)		
	Total	Erosion	Deposition	Total	Erosion	Deposition
LiDAR based Debris flow	7,421 (100.0%)	4,724 (57.6%)	3,147 (42.4%)	8,618 (100.0%)	5,592 (64.9%)	3,026 (35.1%)
Morpho2DH based Debris flow	11,308 (100.0)	5,682 (50.2%)	5,626 (49.8%)	15,421 (100.0%)	7,800 (50.6%)	7,621 (49.4%)

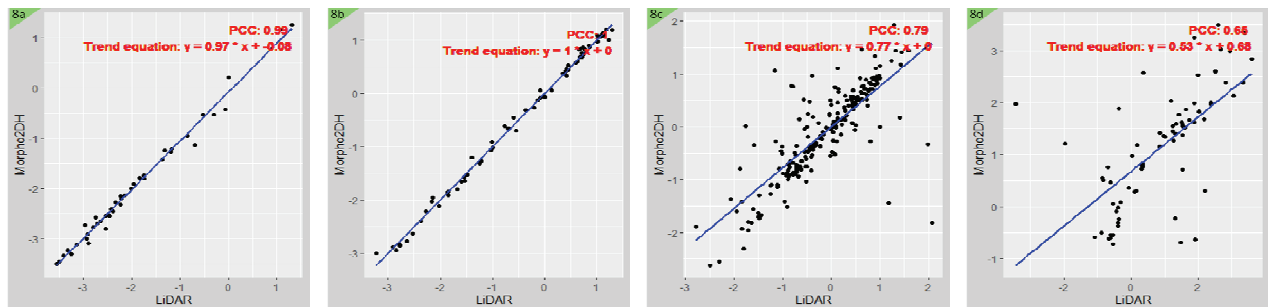


Figure 8. Profile elevation change graph and simple linear regression analysis results (8a: Statistic result of source 1, 8b: statistic result of source 2, 8c: statistic result of transportation, 8d: statistic results of deposition).

Pearson 상관 계수는 두 변수 간의 선형 관계의 강도를 나타내며 발생원 구간의 PCC 값이 0.99 이상으로 확인된 것은 수치해석 모형의 구동을 위해 토석류 피해 발생원이 입력자료로 사용된 결과로, 값의 차이가 미비하기 때문에 발생한 것으로 보인다. 따라서, 발생원에 대한 통계 결과는 모형의 과적합 가능성으로 발생원에 대한 통계 결과를 모형의 정확성으로 해석하는 것에는 일부 어려움이 있다. 유하부는 0.79의 상관계수로 뚜렷한 양적 선형관계를 보이나, 발생원에 비해 낮은 값을 보인다(Figure 8c). 이는 유하부에서 유동 특성이 변화하여 유속이 증가하며, 계류를 따라 지형의 복잡성이 상대적으로 증대되는 등의 복합적 요인으로 인해 모형의 예측 정확도가 저하된 결과로 판단된다. 퇴적부는 0.65의 상관계수로 유하부와 같이 뚜렷한 양적 선형관계로 나타났으며 발생원과 유하부에 비해 낮은 값이 확인되었다(Figure 8d). 이는 유하부와 같이, 복합적 요인에 의한 예측 정확도의 저하에 따른 것으로 판단할 수 있겠으나, 유하부와 달리 유속이 감소하고 유송 잡물이 퇴적됨에 따라 유동 특성이 다시 변화함으로써 불규칙성이 증대되어 발생한 복합적 결과로 판단된다. 모의 지형 변화는 실제 지형 변화에 대해 토석류 피해 구간별로 모두 양의 상관관계를 보유하고 변화량의 비율이 유사함에 따라 높은 활용성을 보유한 것으로 판단된다.

한편, 본 연구에서 모의 토석류 피해에 따른 피해 구간별 상관계수는 발생원으로부터 멀어질수록 하락하는 경향이 나타났으며 이는 Schilirò(2015)가 보고한 선행연구의 결과와 유사하게 나타났다. 이는 경사의 변화와 역변화가 토석류 거동 특성 분석 결과에 중요한 영향을 미친다는 것으로 본 연구에서 모의 피해 면적이 실제 피해에 비해 다소 높게 나타난 결과에 대한 추가적인 설명이 될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서, 고해상도의 지형 자료를 사용함으로써 나타나는 수치해석 모형 결과의 과대 해석을 최소화하기 위한 최적 해상도 도출이 필요할 것으로 판단된다(Kim and Jun, 2023). 다만, 퇴적 영역에서 모의 피해 면적이 실제 피해 면적에 비해 낮음에도 지형 변화량이 높게 산출된 것은 수치적 확산(Numerical diffusion)에 따른 결과로 판단된다. 수치적 확산은 수치해석 과정에서 발생하는 인위적 확산 현상으로, 물리적 확산과 상이한 양상으로 인해 특정 지점에서 유체의 흐름이 집중되거나 확산된다(Arattano and Franzi, 2010). Morpho2DH는 이러한 수치적 확산을 저감시키기 위해 TVD-MacCormack 유한 차분 기법을 적용하여 최소화하고자 하였으나, Takebayashi and Okabe(2016)는 곡선 격자의 크기, 공간 해상도 및 실제 물리적 특성을 대표하지 못하는 매개변수의 설정 등의 복합적 요인으로 인해 수치적 확산이 발생할 수 있음을 지적하였다.

결론

본 연구에서는 토석류 피해 전·후에 수집된 드론 LiDAR 자료에 대해 LiDAR 기반 지형 변화 결과와 Morpho2DH 토석류 수치해석 모형을 사용하여 획득된 지형 변화 결과를 비교·분석하였으며, 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) Morpho2DH 모형은 국내 토석류 피해에 따른 지형 변화 및 거동특성 모의를 수행하는 것에 높은 활용성이 존재하는 것으로 판단된다. 다만, 수치해석에 따른 모의 피해 범위와 침식 및 퇴적량이 실제 토석류 피해에 비해 높게 측정되는 경향이 존재함에 따라 매개변수의 설정의 보수적 접근과 분석 간 사용되는 지형 정보의 최적 해상도 산출이 필요하다.
- (2) Morpho2DH에 따른 지형 변화 결과는 LiDAR 기반 지형 변화 결과에 대해 통계적으로 유의미한 것으로 확인되었으나 일부 토석류 피해 구간은 과적합의 가능성이 높다. 특히, Morpho2DH의 구동을 위한 지형 참조 자료는 설정 면적과 과적합이 양의 상관관계일 것으로 판단됨에 따라 지형 참조 자료의 설정 방법에 대해서 고려할 필요가 존재한다.
- (3) 선행연구에서 지적인 바와 같이 경사의 변화와 역변화는 토석류 수치해석 결과에 영향을 주는 것으로 확인되었다. 이에 따라, 경사 변화 지점에 대한 추가적인 해석의 필요성이 존재하며 경사의 변화가 잦은 경우에 대한 처리 방안 마련이 필요할 것으로 판단된다.
- (4) Morpho2DH 모델을 통한 토석류 수치해석 시 표고의 변화, 속도 및 퇴적 두께 등과 같은 정보의 획득이 가능하며, 사방댐과 같은 토석류 제어시설을 고려할 수 있어 추후 사방댐의 적정 위치선정, 이동 토사량과 충격력 산정 등을 통한 구조물 설계 등의 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2022학년도 경북대학교 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었습니다.

References

- Adebiyi, A.A. and Hu, P. 2021. A numerical study on impacts of sediment erosion/deposition on debris flow propagation. *Water* 13(12): 1698.

- Arattano, M. and Franzi, L. 2010. On the application of kinematic models to simulate the diffusive processes of debris flows. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10(8): 1689-1695.
- Dai, Z., Xu, K., Wang, F., Yang, H. and Qin, S. 2021. Numerical investigation on the kinetic characteristics of the Yigong debris flow in Tibet, China. *Water* 13(8): 1076.
- Egashira, S. and Itoh, T. 2004. Numerical simulation of debris flow. *The Japan Society of Fluid Mechanics*: 33-43.
- Eguchi, S., Onaka, N. and Akamatsu, Y. 2022. Risk assessment of complex disaster caused by debris flow. *Journal of Japan Society of Civil Engineers. Engineering* 78(2): 131-136.
- Eu, S. and Im, S.J. 2017. Examining Velocity Estimation Equations of Debris Flow Using Small-scaled Flume Experiments. *Journal of Korean Forest Society* 106(4): 424-430.
- Franck, A.G. and Kobiyama, M. 2023. Comparison of two numerical models by using a case study of 2014 debris flow disaster in Hiroshima. *Encontro Nacional de Desastres* 3: 1-4.
- Harsanto, P., Septiandy, D.D., Kamiel, B.P. and Nursetiawan. 2021, July. Small debris flow simulation using MORPHO2DH. In *International Conference on Rehabilitation and Maintenance in Civil Engineering*: 601-607.
- Horiuchi, S., Iwanami, E., Nakatani, K., Satofuka, Y. and Mizuyama, T. 2012. Development of "Hyper KANAKO", a debris flow simulation system using with laser profiler data. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering* 64(6): 25-31.
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B.E.A. and Zimmermann, M. 2013. Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13(4): 869-885.
- Huang, C. and Wang, G. 2024. Assessing the influence of non-plastic fines on rainfall-induced landslide initiation and propagation: Flume test findings. *Geomorphology* 445: 108960.
- Hürlimann, M., Rickenmann, D. and Graf, C. 2003. Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal* 40(1): 161-175.
- Jung, H.J., Yoo, H.J. and Lee, S.O. 2020. Simulation of the Debris Flow Using FLO-2D According to Curve-shape Changes in Bed Slopes. *Journal of Korean Society of Disaster and Security* 13(3): 45-58.
- Kasim, N., Taib, K.A., Maturidi, A.M.A.M., Azahar, W.W. and Masjuki, S.A. 2021, February. Debris flow numerical simulation model comparison with field events in Kuala Kubu Baru and Lentang, Malaysia. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1051(1): 012048.
- Kim, K.H., Lee, D.H., Kim, D.H. and Lee, S.H. 2008. A Study on Model Tests for Debris Flow Characteristics. *Journal of Korean Geo-Environmental Society* 9(5): 83-89.
- Kim, N.G. and Jun, B.H. 2023. Comparative Analysis of Debris Flow Numerical Simulation Based on the Difference between the Resolution of Topographic Information and Grid Size. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 23(2): 41-50.
- Lapillonne, S., Fontaine, F., Liebault, F., Richefeu, V. and Piton, G. 2023. Debris-flow surges of a very active alpine torrent: a field database. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 23(4): 1241-1256.
- Lee, I.J., Lee, D.H. and Suh, Y.C. 2010. GIS-Based Analysis of the Debris Flow Occurrence Possibility Using an Airborne LiDAR DEM around Pyeongchang-Gun, Kangwon-Do. *The Korean Association of Geographic Information Studies* 13(4): 50-66.
- Lee, S.J., Lim, H.T., Lim M.J., Lee, E.B., Lee, K.I. and Kim, Y.S. 2020. Numerical Analysis of Debris Flow Using Drone Images and NFLOW. *Journal of Korean Geosynthetics Society* 19(3): 1-8.
- Lim, Y.H. 2017. A Study on the Application of Numerical Simulation to Erosion Control Facility Using KANAKO 2D. Chuncheon. Kangwon National University.
- Nakatani, K., Wada, T., Satofuka, Y. and Mizuyama, T. 2008. Development of "Kanakano 2D (Ver. 2.00)," a user-friendly one-and two-dimensional debris flow simulator equipped with a graphical user interface. *International Journal of Erosion Control Engineering* 1(2): 62-72.
- Nikooei, M. and Manzari, M.T. 2020. Studying effect of entrainment on dynamics of debris flows using numerical simulation. *Computers & Geosciences* 134: 104337.
- O'Brien, J.S., Julien, P.Y. and Fullerton, W.T. 1993. Two-dimensional water flood and mudflow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering* 119(2): 244-261.
- Onaka, N., Akamatsu, Y., Kono, T. and Yamaguchi, K. 2019. Investigation of complex disaster of debris flow and flood in Higashi River, Shimata River System by the heavy rain in July 2018. *Journal of Japan Society of Civil Engineers* 75(1): 260-269.
- Reid, M.E., Coe, J.A. and Brien, D.L. 2016. Forecasting inundation from debris flows that grow volumetrically during travel, with application to the Oregon Coast Range,

- USA. *Geomorphology* 273: 396-411.
- Rosli, M.I., Che Ros, F., Razak, K.A., Ambran, S., Kamaruddin, S.A., Nor Anuar, A., Marto, A., Tobita, T. and Ono, Y. 2021. Modelling debris flow runoff: a case study on the Mesilau Watershed, Kundasang, Sabah. *Water* 13(19): 2667.
- Ryou, K.H., Chang, H.J. and Lee, H.J. 2021. A Study on the Flow Characteristics of Debris Flow Using Small-scaled Laboratory Test. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 22(4): 235-245.
- Schilirò, L., De Blasio, F.V., Esposito, C. and Scarascia Mugnozza, G. 2015. Reconstruction of a destructive debris-flow event via numerical modeling: the role of valley geometry on flow dynamics. *Earth Surface Processes and Landforms* 40(14): 1847-1861.
- Singh, T.N., Verma, A.K. and Sarkar, K. 2010. Static and dynamic analysis of a landslide. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 1(4): 323-338.
- Song, B.W. 2003. The influence of initial static shear stress on post-cyclic degradation of non-plastic silt. *Lowland Technology International* 5(1): 14-24.
- Song, B.W., Yasuhara, K., Murakami, S. and Komine, H. 2004. An evaluation for cyclic softening of non-plastic silt using the concept of volume decrease potential. *Doboku Gakkai Ronbunshu* 2004(764): 11-24.
- Takebayashi, H. 2017. Modelling braided channels under unsteady flow and the effect of spatiotemporal change of vegetation on bed and channel geometry. pp. 671-702. In: Tsutsumi, D. and Laronne, J.B. (Eds.). *Gravel-Bed Rivers: Processes and Disasters*. John Wiley & Sons, New Jersey, U.S.A.
- Takebayashi, H. 2023. Morpho2DH ver.2 Solver Manual – Debris/Mud flow. <https://i-ric.org/en/solvers/morpho2dh>. (2023.06.).
- Takebayashi, H. and Okabe, T. 2009, June. Numerical modeling of braided streams in unsteady flow. In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management* 162(3): 189-198.
- Tang, J., Cui, P., Wang, H. and Li, Y. 2023. A numerical model of debris flows with the Voellmy model over a real terrain. *Landslides* 20(4): 719-734.
- Woo, B.M. 1986. *Erosion control engineering*. Hyangmum publishing company. Seoul, Republic of Korea. Pp. 65.
- Woo, C.S., Youn, H.J., Lee, C.W. and Lee, K.S. 2011. Development of the Topography Restoration Method for Debris Flow Area Using Airborne LiDAR Data. *The Korean Association of Geographic Information Studies* 14(3): 174-187.
- Yang, T.S. and Song, B.W. 2011. Prediction for liquefaction and lateral flow on non-plastic silt. *Journal of the Korean GEO-environmental Society* 12(11): 65-70.

Manuscript Received : July 2, 2024

First Revision : August 22, 2024

Second Revision : September 19, 2024

Accepted : September 19, 2024