

감쇠 구조물에 의한 토석류 토사체적 농도 변화에 관한 실험적 연구

최영도¹ · 김성덕² · 이호진^{3*}

¹충북대학교 토목공학부 대학원생, ²충북대학교 토목공학부 강사, ³충북대학교 토목공학부 교수

The Experimental Study for Variance of Sediment Volume Concentration of Debris Flow due to Damped Structures

Youngdo Choi¹, Sungduk Kim², and Hojin Lee^{3*}

¹Graduated Student, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

²Instructor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

³Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University

요약

본 연구의 목적은 급경사지 사면에서 토석류 재해가 발생했을 때, 토석류 저감 구조물의 효과를 조사한 실험연구이다. 제어 구조물로는 베플 형태를 취하였고, 베플의 설치 기수와 각 제원에 따라서 하류에서의 토석류에 의한 토사퇴적면적과 토사도달거리를 조사한 것이다. 수로의 경사가 급할수록 토사의 퇴적면적과 도달거리가 증가하였고, 토사체적농도가 감소할수록 토사퇴적면적과 토사의 도달거리가 증가하였다. 토사농도가 작은 경우($C_v = 0.5$)는 토석류의 액성이 크기 때문에 수로 경사에 따른 차이가 나타났고, 전반적으로 토사체적농도가 클수록 토사퇴적면적과 토사의 도달거리 감소율이 크게 나타났다. 베플의 수를 증가할수록 토사퇴적면적과 도달거리를 약 5~10% 이상 감소하는 것으로 나타남으로서 베플의 토석류 제어능력이 있음을 보여주고 있다. 본 연구의 결과는 급경사지에서 토사재해가 발생할 때 감쇠 또는 제어 구조물을 설치할 때 중요한 정보를 제공할 것이다.

핵심용어: 토석류, 베플, 저감구조물, 토사퇴적면적, 도달거리

ABSTRACT

The purpose of this study is an experimental research to investigate the effectiveness of debris flow reduction structures when a debris flow disaster occurs on a steep slope. The control structure for debris flow took the form of baffle, and the soil deposition area and soil runout distance due to debris flow from the downstream were investigated according to the installation number of baffle and each specification. As the slope of the channel became steeper, the sediment deposition area and runout distance increased, and as the sediment volume concentration decreased, the sediment deposition area and runout distance increased. When the sediment concentration was low, differences appeared depending on the slope of the channel because the debris flow had a high liquid content. Overall, the larger the sediment volume concentration, the greater the decrease in sediment deposition area and soil runout distance. As the number of baffles increases, the soil deposition area and runout decrease, showing that the baffles have the ability to control debris flows. The results of this research will provide good information when installing attenuation or control structures when sediment disasters occur in steep slopes.

Keywords: Debris flow, Baffles, Reduction structure, Deposition area, Runout distance

*Corresponding author: Hojin Lee, hojinlee@cbnu.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6771-5690>

Received: 5 December 2023, Revised: 19 December 2023, Accepted: 19 December 2023



1. 서론

기후변화로 인한 집중호우는 산악지형에서 다양한 토사재해를 야기한다(Kim, 2014). 이러한 토사재해의 발생빈도는 해마다 증가하고 있으며 토사재해의 위험성도 높아지고 있다(Lim et al., 2023).

강한 운동성 및 에너지를 갖는 토사-물 혼합물, 즉 토석류는 산악지대에서 하류 방향으로 빠르게 이동함으로써 토사의 퇴적량을 증가시키고 토사 체적 범위를 확산시킴으로 하류지역에 큰 피해를 야기한다(Crosta, 2001). 따라서, 토석류에 의한 토사재해를 제어하기 위해서는 토석류 메카니즘을 분석해야 하며(Kim, 2014), 주로 질량보존과 운동량 보존을 만족하는 지배방정식을 적용하는 수치모델을 이용한다. 수치모델은 시간 변화에 잘 대응할 수 있는 유한차분법을 사용하여 토석류의 운동성을 해석한다(Takahashi et al., 1992).

수치모델을 검증하기 위한 소규모 실험은 Fairfield(2011)가 수행하였고, 토사-물 혼합물의 적정비율의 변화에 따라서 수로 하류부근에서의 토사퇴적량을 조사하였다. 대규모 실험은 Iverson et al.(2011)이 실외에서 토석류의 특성에 따른 거동과 충격력 및 토사퇴적량과 확산범위 등을 연구하였다. 수치해석 모델과 토석류의 실내 및 실외 실험을 바탕으로 해서 토사재해를 저감시키기 위한 다양한 방법들이 연구되었으며, 투과형 사방댐, 불투과형 사방댐 또는 베리어 형태의 구조물적 대책으로 토석류 에너지를 저감시키는 연구들이 진행되었다(Miyazawa et al., 2003; Shrestha, 2004; Satofuka and Mizuyama, 2005; Gotoh et al., 2006). Kwon(2011)은 사방댐의 안정성을 해석하기 위하여 토사유출량을 신뢰함수로 설정하여 해석하였고, Lee et al.(2012)은 표면파 처리기법인 SASW를 이용하여 사방댐에 외력이 가해질 때의 안정성을 해석하였다.

본 연구는 토사재해 발생 가능성이 높은 산지에서 재해 저감을 위한 감쇠 구조물을 설치했을 때 하류에서 토석류의 퇴적특성과 범위를 측정하기 위한 실험연구이다. 감쇠 구조물로는 베플 형태를 취하였고, 베플 개수 및 제원에 따라서 하류에서의 토석류 특성을 분석하였다. 본 연구의 결과는 토사재해를 방어하기 위한 대책을 세우는 데 유용한 정보를 제공할 것이다.

2. 토석류 실험

2.1 실험장치 및 실험조건

본 연구에서 적용된 토석류의 토사퇴적 수로 실험 장치는 Fig. 1에 나타냈다. Fig. 1은 수로에 소단을 설치한 경우 전면이며 수로의 재질은 강철로 제작되었다. 이 때 수로 하단에는 베플을 설치한다. 토사퇴적 특성을 위한 실험장치의 총 길이는 230 cm이며, 상판과 하판은 각각 77 cm의 길이를 갖고 소단은 60 cm의 길이를 갖는다. 수로 폭은 15 cm의 길이로서 일정하



Fig. 1. The experimental channel installed by baffles

게 폭으로 구성된다. 실험장치 수로의 경사는 소단은 평행하며 상류단 20도와 하류단 20도, 상류단 30도와 하류단 30로 구분하여 변화 가능하도록 설정하였다.

본 연구에서 사용된 베플의 단면은 토석류의 평균속도의 감소에 가장 효과적인 사다리꼴 단면(Wang et al.(2017)을 채용하였고, 밑변은 2 cm, 윗변은 1 cm로 설정하였다(Fig. 2(a)). 베플은 신도리코사의 3DWOX 2X모형을 사용하여 3D로 제작되었다(Choi, 2022).

수로 하단에 설치된 베플은 총 4행으로 구성되며, 한 행당 폭이 2 cm인 2개의 베플(B22), 폭이 2 cm인 3개의 베플(B23), 폭이 2 cm인 4개의 베플(B24)로 구성된다(Fig. 2(b)~(d)).

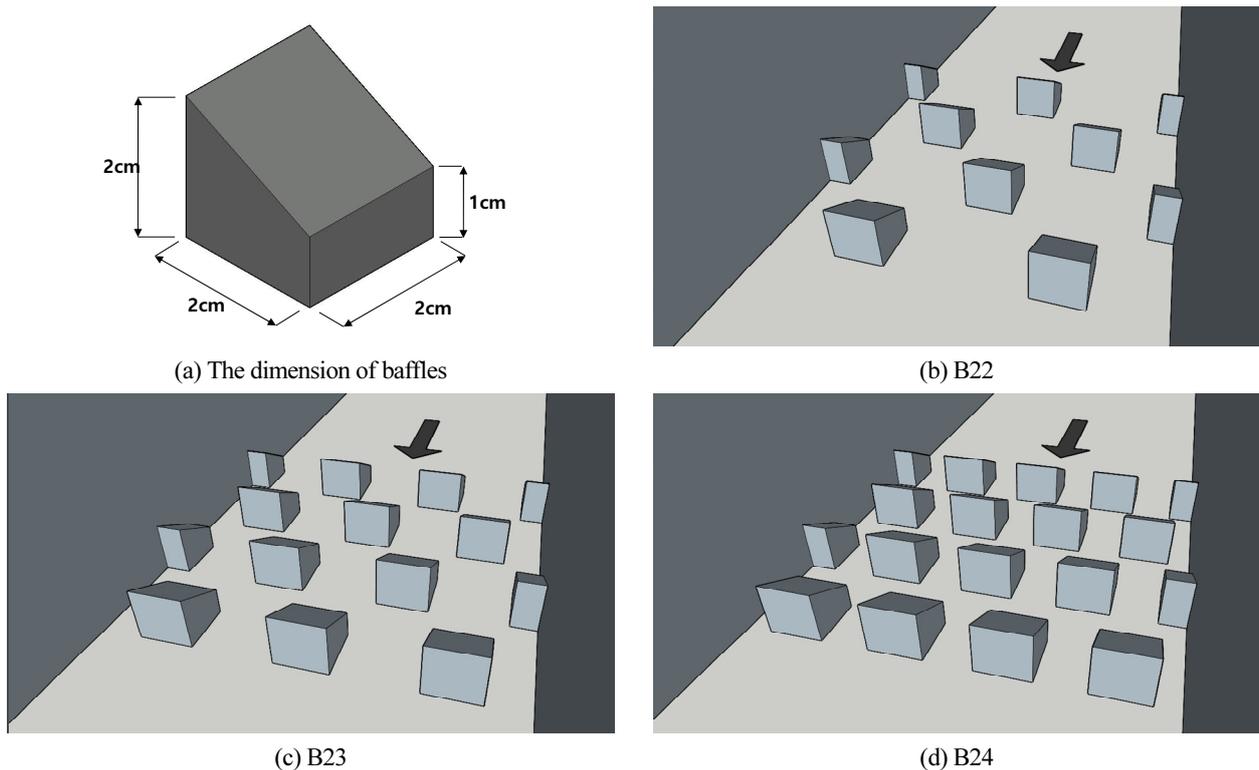


Fig. 2. The specification of baffles (a) with variance of number of baffles ((b)~(d))

3. 실험결과 분석

3.1 4열 베플 2기 설치(B22)에 따른 퇴적 변화

강력한 운동성을 갖는 토석류가 산지에서 발달되어 하류로 유하할 때 토석류의 토사는 제어장치가 없는 하류에 큰 피해를 야기한다. 따라서, 본 연구는 토석류 재해를 제어하기 위한 감쇠 구조물 설치를 위하여 토석류에 포함된 토사체적 농도의 변화와 소단을 갖는 수로에서 상판과 하판 수로의 경사 변화에 따라서 토석류에 의한 토사의 퇴적면적과 토사의 도달거리를 조사한 것이다. 이 때 토석류의 토사체적농도는 0.5, 0.55, 0.6의 세 가지로 설정하였고, 수로경사는 급경사지에 해당하는 20°와 30°설정하였다(Choi et al., 2022). 토석류 제어 또는 감쇠를 위한 구조물로 사용된 베플은 폭이 2 cm이고 한 열에 2개 배치인 경우(Fig. 3), 베플은 폭이 2 cm이고 한 열에 3개 배치인 경우(Fig. 4), 베플은 폭이 2 cm이고 한 열에 4개 배치인 경우(Fig. 4)로 나타냈다. Figs. 3 and 4의 좌측 세로축은 토사의 퇴적면적을 나타내고, 우측은 토사의 도달거리를 나타내며 하단부 가로축은 토사체적농도를 나타낸다. 사각형 기호는 토사퇴적농도를 나타내고 원 기호는 토사의 도달거리를 나타낸다.

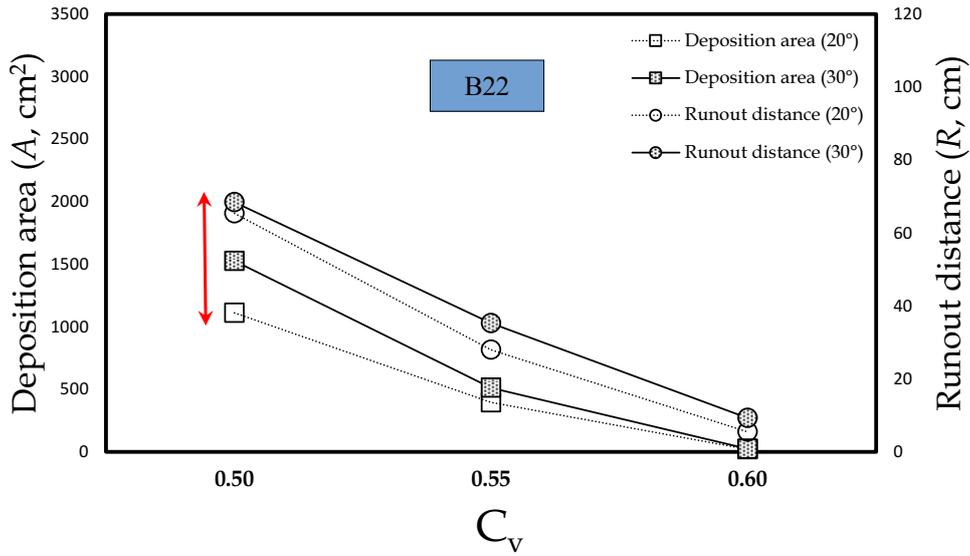


Fig. 3. The deposition area and runout distance for B22

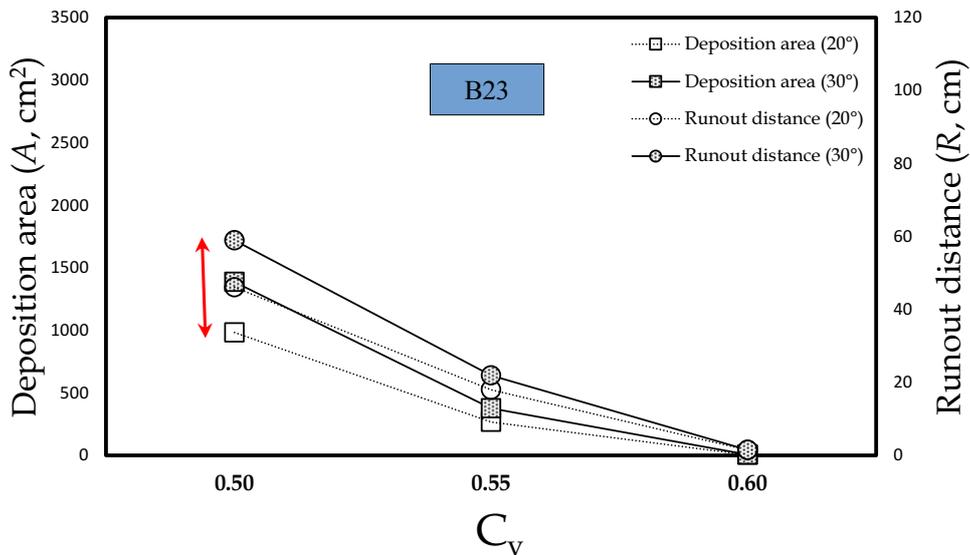


Fig. 4. The deposition area and runout distance for B23

Fig. 3에서 보면, 수로의 경사가 20°인 경우 C_v (토사체적농도)가 0.5에서 0.55로 증가할 때, 토사의 도달거리는 57.18%, 토사의 퇴적면적은 63.95% 감소하였고, C_v (토사체적농도)가 0.55에서 0.6으로 증가할 때, 도달거리는 80.53%, 퇴적면적은 94.92% 감소하였다. 수로 경사가 30°인 경우 C_v (토사체적농도 = 0.5 → 0.55)가 증가할 때, 토사의 도달거리는 48.49%, 토사의 퇴적면적은 66.46% 감소하였고, C_v (토사체적농도)가 0.55에서 0.6으로 증가할 때, 도달거리는 73.78%, 퇴적면적은 95.53% 감소하였다. C_v 가 0.5인 경우를 제외하고 토사 퇴적면적과 토사의 도달거리 감소율은 수로경사가 20도인 경우 다소 감소의 경향을 나타내지만, 퇴적면적과 도달거리 모두 수로 경사에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 2 경우(20도와 30도 경사) 모두 토석류 위험범위(15도)를 넘어선 각도이고, 급경사지에 해당하기 때문으로 판단된다. 토사농도가 작은 $C_v = 0.5$ 인 경우는 토석류의 액성이 크기 때문에 수로 경사에 따른 차이가 나타났고(크기의 차이: 밴드폭의 차이가 크게 나타남 - 화살표), 전반적으로 C_v (토사체적농도)가 클수록 토사퇴적면적과 토사의 도달거리 감소율이 크게 나타났다.

3.2 4열 베플 3기 설치(B23)에 따른 퇴적 변화

Fig. 4에서 보면, 수로의 경사가 20°인 경우 C_v (토사체적농도: 0.5 → 0.55로 증가)가 증가할 때 토사의 도달거리는 60.89%, 토사의 퇴적면적은 72.89% 감소하였고, C_v (토사체적농도)가 0.55에서 0.6으로 증가할 때, 도달거리는 92.22%, 퇴적면적은 98.76% 감소하였다. 수로 경사가 30°인 경우 C_v (토사체적농도)가 0.5에서 0.55로 증가할 때, 토사의 도달거리는 62.83%, 토사의 퇴적면적은 72.86% 감소하였고, C_v (토사체적농도)가 0.55에서 0.6으로 증가할 때, 도달거리는 93.15%, 퇴적면적은 98.43% 감소하였다. C_v 가 0.5인 경우에 토사의 퇴적면적과 토사의 도달거리가 수로 경사도가 낮을수록 감소율이 높았고, C_v 가 클수록 경사도의 영향은 크지 않았다. 4열의 베플을 1기 더 추가하여 3개를 배치함으로써 토사퇴적면적과 도달거리를 약 5~10% 이상 감소하는 것으로 나타남으로써 베플의 토석류 제어능력이 있음을 보여주고 있다. Fig. 4의 경우 $C_v = 0.5$ 에서 경사각도가 더 클수록 밴드폭(화살표)이 크게 나타났다.

3.3 4열 베플 4기 설치(B24)에 따른 퇴적 변화

Fig. 5에서 보면, 수로의 경사가 20°와 30°인 경우에 C_v (토사체적농도)에 따라서 토사의 도달거리와 토사의 퇴적면적 모두 베플 수가 적은 경우보다 감소하였고, 이는 베플 수의 증가가 토석류 재해를 감소시키는 역할을 하는 것으로 판단된다.

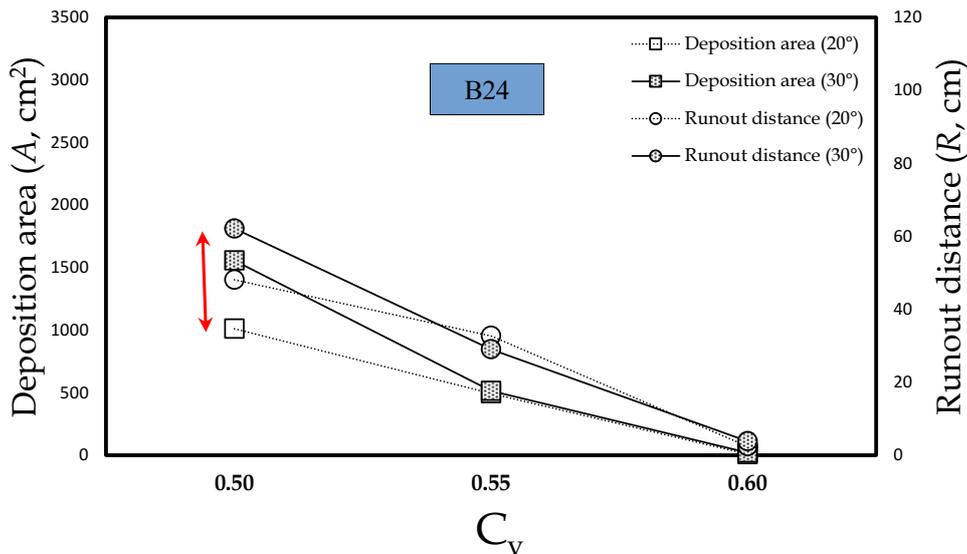


Fig. 5. The deposition area and runout distance for B24

Table 1은 소단이 설치된 수로에서 베플의 설치 기수, 토사체적농도 그리고 수로의 경사에 따른 토사퇴적면과 토석류의 도달거리를 측정된 것이다.

Table 1. The deposition area and runout distance for various conditions

Channel condition	Sediment volume concentration	Channel slope (20°)		Channel slope (30°)	
		Deposition area (m ²)	Runout distance (cm)	Deposition area (m ²)	Runout distance (cm)
B22	0.5	1,109.8	65.37	1,524.86	68.44
	0.55	394.94	27.99	511.4	35.26
	0.6	20.05	5.45	22.87	9.25

Table 1. The deposition area and runout distance for various conditions (Continued)

Channel condition	Sediment volume concentration	Channel slope (20°)		Channel slope (30°)	
		Deposition area (m ²)	Runout distance (cm)	Deposition area (m ²)	Runout distance (cm)
B23	0.5	982.55	46.03	1,386.27	58.91
	0.55	266.4	18.00	376.20	21.90
	0.6	3.3	1.4	5.9	1.5
B24	0.5	980.00	44.10	1,376.90	56.10
	0.55	254.20	17.40	364.20	20.92
	0.6	2.8	1.3	5.1	1.2

4. 결론

본 연구는 토사재해의 발생 가능성이 아주 높은 산악지형에서 토석류 재해 저감을 위한 제어 구조물을 설치했을 때 산지 하류에서 토석류의 퇴적특성과 범위를 측정하기 위한 실험연구이다. 제어 구조물로는 베플 형태를 취하였고, 베플 설치 수와 각 제어원에 따라서 하류에서의 토석류의 퇴적 특성을 분석하였다.

수로의 경사가 급할수록 토사의 퇴적면적과 도달거리가 증가하였고, 토사체적농도가 감소할수록 토사퇴적면적과 토사의 도달거리가 증가하였다. 반면에 토사체적농도가 가장 큰 $C_v = 0.6$ 에서는 토사퇴적면적과 토사의 도달거리가 상당히 축소되었다.

C_v 가 0.5인 경우를 제외하고 토사 퇴적면적과 토사의 도달거리 감소율은 수로경사가 20도인 경우 다소 감소의 경향을 나타내지만, 퇴적면적과 도달거리 모두 수로 경사에 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 토사농도가 작은 $C_v = 0.5$ 인 경우는 토석류의 액성이 크기 때문에 수로 경사에 따른 차이가 나타났고(크기의 차이: 밴드폭의 차이가 크게 나타남 - 화살표), 전반적으로 C_v (토사체적농도)가 클수록 토사퇴적면적과 토사의 도달거리 감소율이 크게 나타났다.

4열의 베플 1기를 더 추가할 경우는 토사퇴적면적과 도달거리를 약 5~10% 이상 감소하는 것으로 나타남으로서 베플의 토석류 제어능력이 있음을 보여주고 있다.

본 연구의 결과는 급경사지에서 토사재해가 발생할 때 재해를 저감하거나 방어대책을 세울 때 중요한 정보를 제공할 것이며, 방어대책의 일환으로 감쇠 또는 제어 구조물을 설치할 때 중요한 정보를 제공할 것이다.

Acknowledgments

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (No. 2021R111A3054408).

References

- Choi, Youngdo, Sungduk Kim, and Hojin Lee. (2022). The Experimental Study for Variance of Deposition due to Sediment Volume Concentration of Debris Flow. *Journal of Korean Society of Disaster and Security*. 15(3): 15-21.
- Choi, Youngdo. (2022). Effect of Berms and Baffles on Deposition Characteristics of Debris Flow. Master Thesis. Chungbuk National University. 18-27.
- Crosta, G. B. (2001). Failure and Flow Development of a Complex Slide: The 1993 Sesa Landslide. *Engineering Geology*. 53: 173-199.
- Fairfield, G. (2011). Assessing the Dynamic Influences of Slope Angle and Sediment Composition on Debris Flow Beha-

- viour: An Experimental Approach. Masters Thesis. Durham University. 23-32.
- Gotoh, H., E. Harada, T. Sakai, and K. Goda. (2006). Numerical Simulation of Blocking Process of Grid-Type Dam by Debris Flow. *Proceedings of Hydraulic Engineering*. 50: 739-744.
- Iverson, R. M., M. E. Reid, M. Logan, R. G. LaHusen, J. W. Godt, and J. P. Griswold. (2011). Positive Feedback and Momentum Growth during Debris-Flow Entrainment of Wet Bed Sediment. *Nature Geoscience*. 4(2): 116-121.
- Kim, Sungduk. (2014). The Study of Sediment Volume Concentration in Liquefied-Layer of Debris Flow. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*. 15(12): 109-115.
- Kwon, Hyuk-Jae. (2011). Safety Analysis of Check Dam according to Sediment Yield in Gangwon Mountain Region. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 11(5): 247-254.
- Lee, Chang-Woo, Sung-Ho Joh, Ki-hyung Park, Min-Sik Kim, Ho-Joong Yoon, and Raja Ahmad, Raja Hassanul. (2012). Quality Grading of Concrete Soil Erosion Control Dam in the Aspect of Unconfined Concrete Strength by Surface-Wave Technique. *Journal of Korean Society of Forest Science*. 101(3): 412-425.
- Lim, Joung Sung, Ho Jin Lee, Sung Duk Kim, and Sung Guen Cho. (2023). The Study for Sediment Disaster at the Vulnerable Area Using Debris Flow Estimating Model. *Crisisonomy*. 19(9): 55-63.
- Miyazawa, N., T. Tanishima, K. Sunada, and S. Oishi. (2003). Debris-Flow Capturing Effect of a Grid-Type Steel-Made Sabo Dam Using 3D Distinct Element Method. *Debris Flow Hazards Mitigation. Proceedings of the Third Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*. 527-538.
- Satofuka, Y. and T. Mizuyama. (2005). Numerical Simulation on a Debris Flow in a Mountainous River with a Sabo Dam. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*. 58(1): 14-19.
- Shrestha, B. B. (2004). Numerical Modeling on Debris Flows and Its Structural Counter Measure by Sabo Dam. Master's Thesis. Institute of Engineering, Tribhuvan University, Nepal. 22-28.
- Takahashi, T., H. Nakagawa, T. Harada, and Y. Yamashiki. (1992). Routing Debris Flows with Particle Segregation. *Journal of Hydraulic Engineering*. 118(11): 1490-1507.
- Wang, F., C. Xiaoqing, C. Jiangang, and Y. Yong. (2017). Experimental Study on a Debris-Flow Drainage Channel with Different Types of Energy Dissipation Baffles. *Engineering Geology*. 220(4): 43-51.

Korean References Translated from the English

- 권혁재 (2011). 강원 산간지역의 토사 유출에 따른 사방댐의 안전성 해석. *한국방재학회 논문집*. 11(5): 247-254.
- 김성덕 (2014). 토석류 유동층에서 토사체적 농도 특성에 관한 연구. *한국지반환경공학학회 논문집*. 15(12): 109-115.
- 이창우, 조성호, 박기형, 김민식, 윤호중, 하사눌 (2012). 표면파 기법에 의한 콘크리트 사방댐의 콘크리트 강도 등급 평가. *한국 산림과학회지*. 101(3): 412-425.
- 임종성, 이호진, 김성덕, 조성근 (2023). 토석류 예측 모델을 이용한 재해취약 지역에서의 토사재해에 관한 연구. *Crisisonomy*. 19(9): 55-63.
- 최영도 (2022). 소단과 배플이 토석류의 퇴적 특성에 미치는 영향. 석사학위 논문. 충북대학교. 18-27.
- 최영도, 김성덕, 이호진 (2022). 토석류의 토사체적농도에 따른 퇴적 특성 변화에 관한 실험 연구. *한국방재안전학회 논문집*. 15(3): 15-21.