

토석류 충격력 특성 평가를 위한 모형실험 연구

A Study on Model Experiment for Evaluation of Debris Flow's Impact Force Characteristics

김진환¹ Kim, Jinhwan
이용수² Lee, Yong-Soo
박근보³ Park, Keun-Bo

Abstract

Debris flow is defined as water mixture flow with wide range of large size soil particles such as rock, gravel and sand. Localized heavy rain, derived from abnormal weather, results in the debris flow which generally occurs in summer, especially during and after rainy season and typhoon. This study focuses on the characteristics of impact force of the debris flow with different gravels and gravel mixtures by model experiment. Based on measured experiment results, it is found that the impact force derived by debris flow is not proportional to the amount of dry material mixture, but depends on the particle size distribution of the debris flow.

요 지

산사태의 한 종류인 토석류(debris flow)는 물과 비교적 높은 농도로 섞인 암석, 자갈, 모래, 흙의 혼합물이 빠르게 흐르는 현상을 말한다. 토석류는 주로 장마철과 태풍이 지나가는 여름철에 집중적으로 발생하고 있으며, 최근에는 이상기후로 인한 국지성 집중호우로 인해 계절과 무관하게 토석류가 발생하고 있다. 본 연구에서는 토석류 발생시 나타나는 충격력의 특징을 파악하고자 2가지 자갈과 혼합시료를 이용하여 토석류 모형실험을 수행하였다. 토석류 모형실험 결과, 토석류에 의해 발생하는 충격력은 토석류 양에 비례하여 나타나지 않으며 토석류를 구성하는 입자의 크기에 따라 다양하게 나타나는 것으로 밝혀졌다.

Keywords : Debris flow, Model experiment, Impact force

1. 서 론

국내에서 발생되고 있는 산사태 중, 많은 비율을 차지하고 있는 토석류는 폭우나 장마로 인하여 포화된 흙과 암석 덩어리가 저면의 마찰력을 지탱하지 못하고 흘러내리는 현상을 말하며 주로 풍화를 심하게 받은 장소

에서 발생한다. 특히 토석류는 다양한 지역특성과 유발요인에 의하여 발생하며 발생된 토석류의 이동과 퇴적 과정에서 막대한 재산 및 인명 피해를 발생시킨다. 이러한 토석류에 의한 각종 피해를 예방하기 위해 토석류 발생 지역 예측, 발생원인, 피해 범위, 피해 규모, 토석류 흐름 해석, 토석류 차단 시설물 등 토석류 발생에

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원 (Member, Research Specialist, Geotechnical Engrg. & Tunnelling Research Div., KICT)

2 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원 (Member, Researcher Fellow, Geotechnical Engrg. & Tunnelling Research Div., KICT)

3 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원 (Member, Senior Researcher, Geotechnical Engrg. & Tunnelling Research Div., KICT, uscake@kict.re.kr 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

대한 다양한 분야에서 연구(채병곤 외, 2004; 김원형, 2001; 김상규 외, 1997; 황학 외, 1996; 김진홍, 1995)가 수행되고 있으나 토석류 파괴에서 중요한 요소인 충격력 특성에 관한 연구는 부족한 편이다. 특히 외국의 경우 토석류 설계시, 토석류 피해저감을 위한 대책구조물인 사방댐에 제체의 중량, 토압, 수압 및 토석류가 발생시키는 충격력을 고려하여 설계에 반영하고(Yamamoto A. 외, 1998) 있지만 국내의 경우, 사방댐이 가장 많이 시공되고 있음에도 설계시 제체의 중량, 토압, 수압만을 고려되고 있다(김재현, 2003, 산림청, 1998).

자연에서 발생하는 토석류는 규모가 매우 크기 때문에 실제 크기의 실험으로 모사하기는 쉽지 않다. 또한 토석류는 구성 입자의 종류 및 크기, 지형 조건, 강우량 등 매우 다양한 조건에 의해 영향을 받기 때문에 이를 모형 실험에 모두 반영하기란 현실적으로 어려움이 많다. 이런 이유로 최근 복잡한 조건을 단순화시켜 토석류 특징과 거동을 정량적으로 평가하기 위해 제한된 조건에서 토석류 모형실험에 대한 연구가 수행되고 있다. 토석류 발생 기작, 흐름 특성 및 충격력 산정 등을 정량적으로 평가하기 위해 연구자들에 의해 모형실험 연구가 수행되었다(김기환 외, 2008, Berzi D & Larcán E, 2007, Tiberghien D. 외 2007, Yamamoto A, 외, 1998).

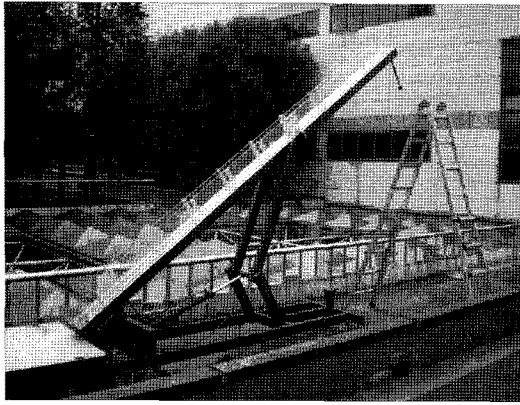
김기환 외(2008)는 산사태로 인한 피해 범위와 토석류 속도를 모형실험을 통해 재현하였다. 실험 결과, 함수비가 높을수록 확산 속도가 빠르고 길게 퍼지는 것으로 보고하였다. Berzi D & Larcán E(2007)도 토석류의 속도에 영향을 미치는 몇 가지 인자를 밝히는 실험을 하였는데, 시료의 포화도 조절, 모형실험장치의 경사 조절, 실험장치 바닥판의 거칠기를 조절하여 실험을 수행하였다. 실험결과 포화도가 높을수록 이동 속도가 늦어지고, 경사가 급하고 실험장치 바닥면의 거칠기가 매끄러울수록 이동 속도는 빠르게 나타났다. 김기환 외(2008)의 결과와 비교해보면 함수비에 따른 실험재료의 이동 양상이 반대로 나타나는 것을 알 수 있는데, 이는 모형실험에 사용한 시료의 차이 및 함수 조건을 조절하는 방법의 차이에서 발생하는 것으로 판단된다. 김기환 외(2008)의 실험에서는 모래시료를 사용하였으며 모형실험 장치 상부에 장착한 인공강우 형식의 노즐을 통해 물을 뿌리는 방식으로 실험을 하였다. 반면 Berzi D & Larcán E(2007)의 실험에서는 자갈을 사용하였으며 물과 자갈을 함께 시료상자에 보관하여 수문을 열어 실험 장치의 수로를 통해 하부로 흘러보내는 방식으로 실험

을 하였다. 이러한 점은 토석류를 구성하고 있는 재료의 종류 및 강우시와 강우 완료 후에 따라 토석류의 이동 양상이 다르게 나타날 수 있으므로 보다 많은 연구가 필요할 것으로 생각된다. Tiberghien D. 외(2007)는 유체흐름(flow)과 구조물과의 반응을 PIV(Particle Image Velocimetry)를 통해 관찰하고 구조물에는 하중계(Load cell)을 설치하여 구조물에 영향을 미치는 압력의 변화를 관찰하였다. 연구결과에 따르면, 프루드 수(Froude number, Fr) 1을 기준으로 구분되는 사류(supercritical flow, Fr>1)와 상류(subcritical flow, Fr<1)에 따라 구조물에 미치는 유체의 흐름, 동적압력(dynamic pressure)이 다르게 나타난다고 보고하였다. Yamamoto A, 외(1998)는 사방댐 형식 변화에 따른 토석류의 충격력 실험을 하였다. 투과형, 불투과형 사방댐 모형에 자갈시료를 이용하여 각각의 모형 구조물이 받는 충격력을 측정하였으며 그 결과를 개별요소법을 이용한 수치해석을 통해 검증한 결과를 발표하였다. 연구 결과 수치해석과 모형실험 결과는 비교적 잘 일치하는 것으로 보고한 바 있다.

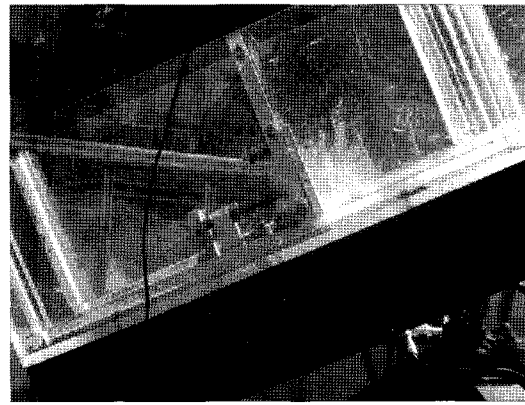
본 연구에서는 토석류 대책 구조물인 사방댐의 국내 설계시, 고려되고 있지 않은 토석류 충격력 특성을 평가하기 위해 시간의 변화에 따른 토압을 측정하는 토석류 모형실험을 수행하였다. 이를 위해, 동일한 토석류 발생 경사 조건에서 모형 실험 재료의 종류와 무게를 변화시켜 모형실험을 수행하였다. 특히 종류가 다른 두 실험 재료를 혼합한 뒤, 각 시료의 중량비에 변화를 주어 모형실험을 수행하여 주어진 조건에서 충격력 특성을 파악하고자 하였다. 기존 토석류 모형실험에서는 단일 종류의 시료를 사용하여 충격력 특성을 파악하였는데, 실제 자연에서는 다양한 크기의 입자들로 구성된 토석류 흐름이 발생한다. 본 실험에서는 이 같은 자연조건을 모사하고자 입자 크기가 다른 두 시료를 다양한 중량비로 혼합하여 모형실험을 수행하였다.

2. 토석류 모형실험

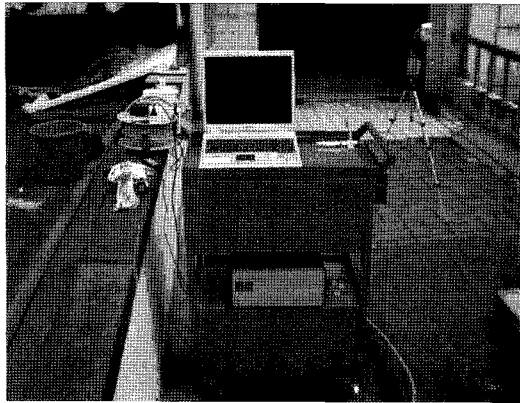
토석류 모형실험에 의한 충격력을 산정하기 위하여 그림 1(a)와 같이 모형실험 장치를 제작하였다. 수로(channel)는 경사 조절이 가능하고 실험 장치 최하단부에 토석류 재료의 토압을 측정할 수 있는 토압계를 그림 1(b)와 같이 부착하였다. 본 연구에서는 모형실험장치 경사를 35°로 유지하여 실험을 수행하였다. 모형실험 장치의 길이는 5m이며 수로 폭은 0.1m, 높이는 0.2m이



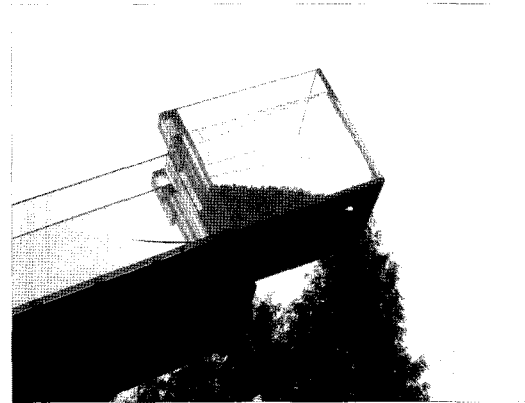
(a) 모형실험장치



(b) 토압계 및 반력판



(c) 데이터 로거



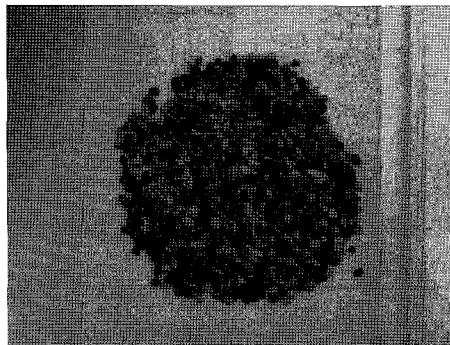
(d) 시료 낙하 상자

그림 1. 토석류 모형실험 장치

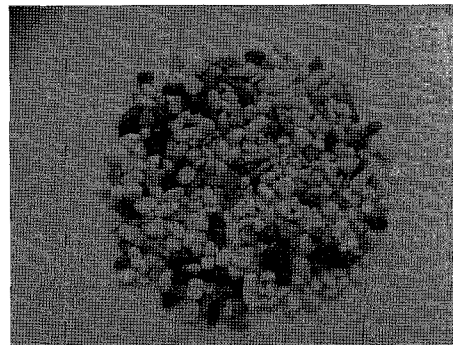
표 1. 실험 조건 및 시료 특징

	무게	작은 자갈 S	큰 자갈 L	혼합시료(작은 자갈 + 큰 자갈)		
				작은 자갈 30% 큰 자갈 70%	작은 자갈 50% 큰 자갈 50%	작은 자갈 70% 큰 자갈 30%
				M30	M50	M70
실험조건 및 시료기호	1 kg	S1	L1	-	-	-
	3 kg	S3	L3	M30-3	M50-3	M70-3
	5 kg	S5	L5	M30-5	M50-5	M70-5
	7 kg	S7	L7	M30-7	M50-7	M70-7

시료사진



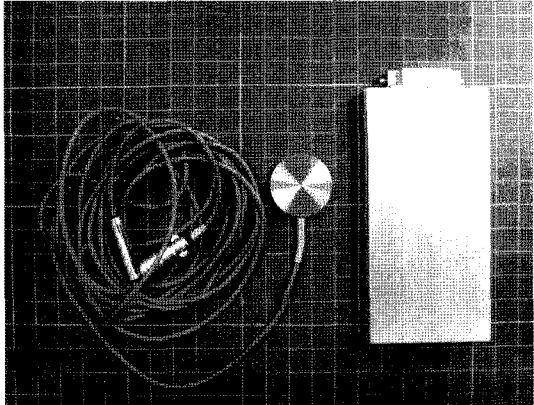
작은 자갈



큰 자갈

- 작은 자갈 평균 지름 : 0.3 mm
- 큰 자갈 평균 지름 : 0.7 mm

표 2. 토압계 제원

토압계 제원		토압계 및 고정용 지그 사진
명칭	P350S-2	
정격용량	2kg/cm ²	
센서지름	34mm	
출력전압	5mV/V	
센서질량	160g	

다. 토압계의 데이터 측정 감도를 높이기 위해 설치된 토압계 뒤쪽에는 반력판을 설치하였다. 실험을 통해 토압계로 측정된 값은 그림 1(c)와 같이 데이터 로거로 전달되며 데이터 로거와 연결된 컴퓨터로 데이터가 취합된다.

실험 방법은 실험장치 상단부 장착한 시료 낙하 상자(그림 1(d))에 큰 자갈, 작은 자갈, 중량비에 따른 혼합시료(큰 자갈+작은 자갈)를 측정하고자하는 무게만큼 담은 뒤, 그림 1(a)의 상단부에서 낙하시켜 실험장치 하부에 설치된 토압계 센서가 실험재료의 토압을 측정하도록 실험을 수행하였다. 하부로 낙하된 시료는 약 10초 정도면 모두 낙하되지만 하부에 퇴적된 시료가 일정 시간동안 토압계에 영향을 미칠 수 있는지를 확인하기 위하여 60초 정도까지 토압을 측정하였다. 실험에 사용한 시료 및 토압계의 사양을 표 1과 2에 나타내었다. 혼합시료 1kg의 경우, 실험에 사용되는 작은 자갈과 큰 자갈 시료의 섞임에 의한 효과가 크지 않아 생략하였다. 표 1에서 나타낸 작은 자갈과 큰 자갈의 평균 크기는 각각의 입자들의 평균 지름을 나타내고 있다.

3. 토석류 모형실험 결과

3.1 단일 시료 실험 결과

그림 2는 작은 자갈에 대한 시간에 따른 측정된 토압 분포를 나타내고 있다. 작은 자갈 1kg와 3kg의 경우 초기 약 2~5초 사이에 토압이 급격히 증가하며 첨두점을 나타낸 후 서서히 토압이 감소하고 있으나 5kg과 7kg의 경우 1, 3kg의 경우와 같이 토압이 급격히 증가하지만

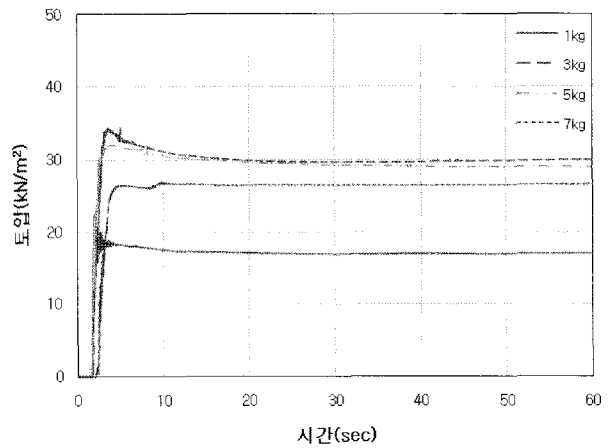


그림 2. 작은 자갈 시료 충격력 측정 결과

표 3. 작은 자갈 시료 모형실험 결과

시료무게 (kg)	최대 토압		최종 토압	
	측정값(kN/m ²)	측정시간(s)	측정값(kN/m ²)	측정시간(s)
1	22	2.4	16.9	60
3	34.4	3.6	30	60
5	32.2	3.7	29	60
7	27	4.5	26.6	60

정확한 침두점을 나타내지 않고 서서히 토압이 일정해지는 경향을 보이고 있다. 또한 작은 자갈의 경우 10초 정도의 시간이 지남에 따라 토압이 일정하게 유지된다. 작은 자갈 1kg을 사용하였을 경우 토압계에서 측정된 최대 토압은 22kN/m² 정도로 나타났으며 시간이 지남에 따라 16.9kN/m² 정도로 일정한 값이 나타났다. 작은 자갈 시료를 이용하였을 경우 최대 토압과 최종 토압을 표 3에 나타내었다.

작은 자갈의 경우, 사용 시료의 무게가 1kg에서 3kg 증가함에 따라 최대 토압과 최종 토압이 증가하는 경향을 보인다. 그러나 5kg과 7kg 시료를 사용하였을 경우, 1kg과 3kg의 시료를 사용하였을 경우 보다 측정값이 적게 나왔다. 이는 좁은 수로 폭을 흘러내려가는 다량의 작은 자갈 시료와의 수로 벽면 간의 마찰력에 의해 값이 작게 측정된 것으로 판단된다(그림 2). 그림 2에서 볼 수 있듯이 실험에 사용한 시료의 무게가 증가함에 따라 최대 토압 및 최종 토압이 증가하는 경향을 보이지만

시료의 무게에 비례하게 증가하지 않은 점으로 보아, 토압계 근처에 분포하고 있는 작은 자갈들만이 토압 발생에 영향을 주고 토압계와 떨어져 있는 자갈의 경우에는 토석류 모형실험장치 수로 옆면과 하부저판으로 분산되어 토압계에 영향을 미치지 않았을 것으로 판단된다.

큰 자갈 시료는 초기에 토압이 급격히 증가하다가 약 2~6초 사이에 정확한 침두점을 보인 후 급격히 감소하는 경향이 나타났다. 1kg 큰 자갈의 경우 초기 충격에 의한 최대 토압이 31.2kN/m²로 측정되었으나 시간이 지나면서 최종 토압은 17.1kN/m²로 일정하게 낮아졌다. 그러나 3, 5, 7kg의 큰 자갈은 최대 토압이 작용한 후 급격히 감소하다가 어느 시간 이후에 점차 계속 증가하는 거동을 나타내었다(표 4와 그림 4). 큰 자갈 시료의 경우 전반적으로 빠른 낙하 속도에 의한 충격에 의해 초기 최대 토압 값이 크게 측정되는 경향을 보여 작은 자갈과 달리 최대 토압 값과 최종 토압 값의 차이가 약간 크게 나타난다. 큰 자갈의 경우도 작은 자갈의 경우

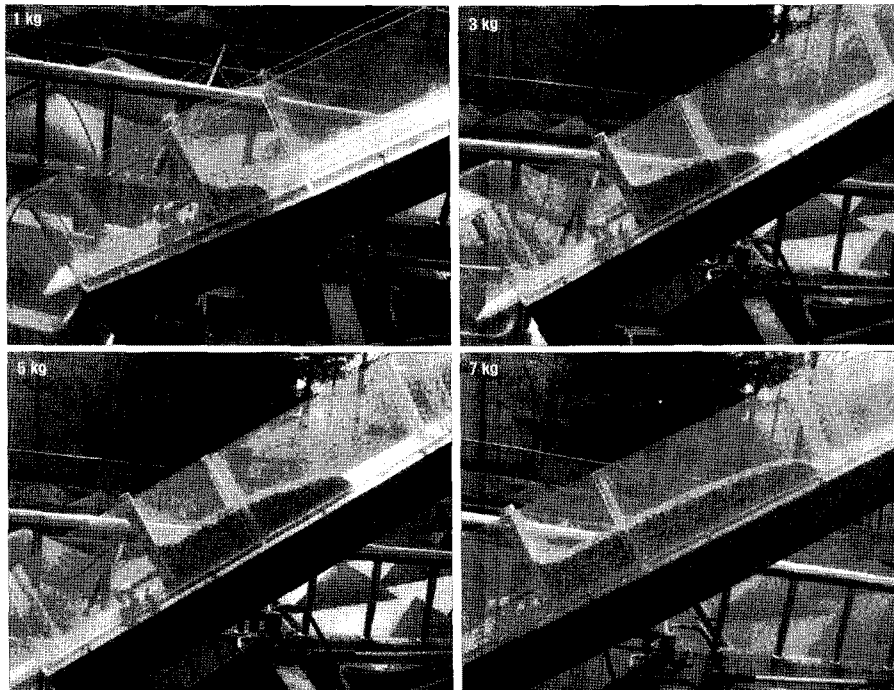


그림 3. 작은 자갈 시료 최종 퇴적 형태

표 4. 큰 자갈 시료 모형실험 결과

시료무게 (kg)	최대 토압		최종 토압	
	측정값(kN/m ²)	측정시간(s)	측정값(kN/m ²)	측정시간(s)
1	31.2	2.5	17.1	60
3	49.8	4.3	42.9	60
5	56.6	6.2	52.3	60
7	58.9	5.3	45.3	60

와 마찬가지로 시료의 무게 증가와 비례하게 토압이 증가하는 경향을 보이지는 않고 7kg 시료의 경우 최대 토압은 크게 작용하였으나 최종 토압은 5kg 시료에 비해 낮은 값으로 나타났다(그림 4 참조). 그림 4에 나타난 바와 같이 7kg의 시료를 실험하였을 경우 결과 값이, 5kg을 사용한 경우와 크게 다르지 않거나 오히려 값이 적은 경우를 관찰할 수 있는데, 이는 보다 많은 양의 시료가 일정한 모형실험장치 수로 폭을 통과할 때 입자 상호간의 간섭으로 인한 영향으로 7kg 시료의 최종 토압이 작게 산정된 것으로 판단된다.

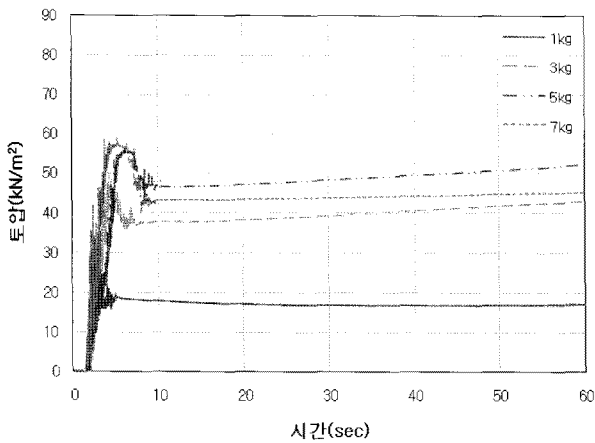


그림 4. 큰 자갈 시료 충격력 측정 결과

3.2 혼합 시료 실험 결과

실제 토석류 발생 현장에서 관찰되고 있는 토석류 구성 입장의 크기는 매우 다양하게 나타나고 있다. 아주 작은 흙 입자에서부터 매우 큰 암석까지 다양하게 구성되는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 서로 다른 입자 크기를 갖는 시료간의 물리적 반응에 의해 발생할 수 있는 충격력 변화 양상을 관찰해보기 위해 작은 자갈과 큰 자갈을 일정 중량비로 섞어 혼합시료를 만든 뒤 토석류 모형실험을 수행하였다. 혼합시료의 구성 조건은 표 1과 같다. 작은 자갈과 큰 자갈을 일정 중량비로 섞어 단일 시료 실험의 경우와 같은 무게로 맞춘 뒤에 토석류 모형실험을 수행하였다.

혼합시료 실험 결과를 그림 6, 7, 8에 나타내었다. 혼합시료의 경우는 초기에 토압이 급격히 증가하다가 정확한 침투점을 보인 후 급격히 감소하는 경향을 보이는 큰 자갈과 같은 형태의 토압분포 형상을 나타내고 있으나 일정 시간이후에는 일정한 토압을 유지하고 있어 최종 토압 부분에서는 작은 자갈과 같은 경향을 나타내고 있다. 특히 혼합시료의 최종 무게가 3kg의 경우, 혼합시료에서 차지하는 작은 자갈의 비율이 낮을수록 최대 토압 및 최종 토압이 높게 나타났다. 측정되는 토압 값은 시료의 비율별로 다르게 나타났지만, 충격력 형태를 보여주는 그래프는 세 경우가 매우 유사한 양상을 보인다.

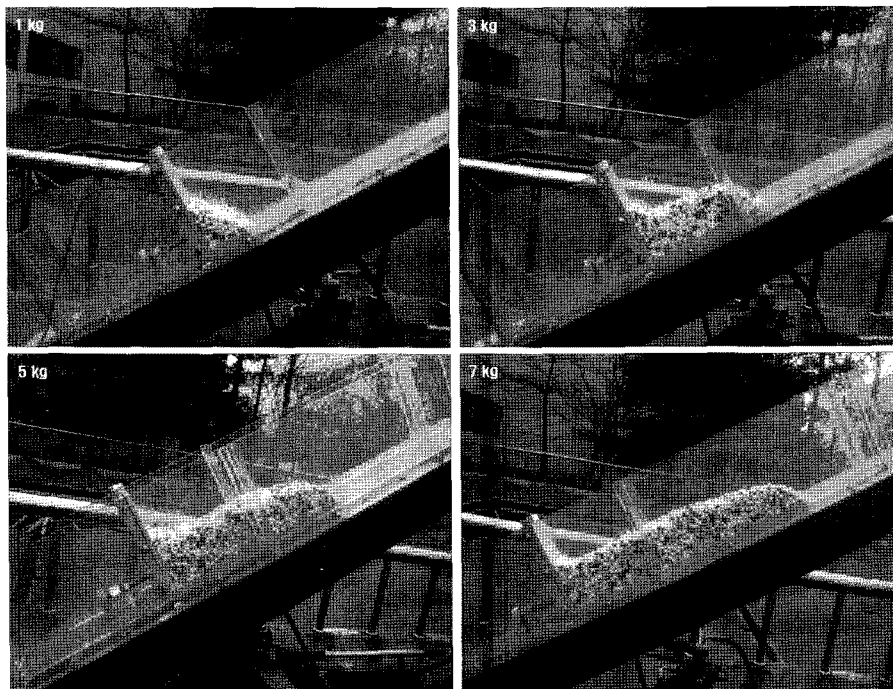


그림 5. 큰 자갈 시료 최종 퇴적 형태

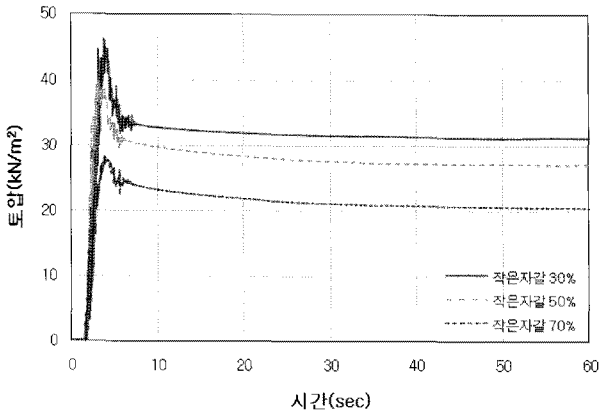


그림 6. 혼합시료 충격력 측정 결과(3kg)

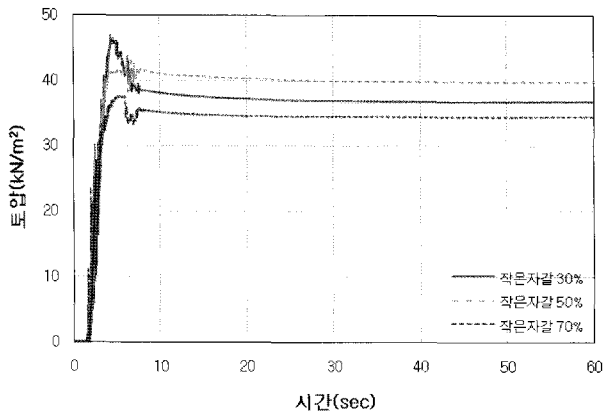


그림 7. 혼합시료 충격력 측정 결과(5kg)

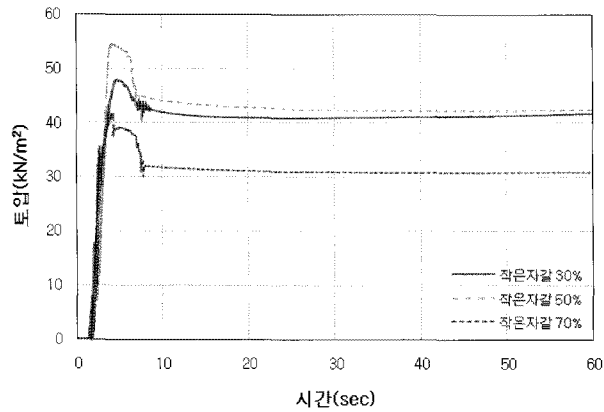


그림 8. 혼합시료 충격력 측정 결과(7kg)

혼합시료 5kg의 경우, 혼합시료 3kg과 마찬가지로 작은 자갈의 비율이 적을수록 최대 토압이 높게 측정되었는데 반해 최종토압의 경우에는 작은 자갈을 30% 포함한 경우가 50% 포함한 경우보다 낮게 측정되었다.

혼합시료 7kg의 경우, 작은 자갈의 비율이 30, 50%의 경우에 최종 토압이 비슷하게 측정되었으나 초기 최대 토압에서는 비교적 큰 차이를 보인다. 특히 작은 자갈 50%를 함유한 혼합시료가 30%를 포함한 혼합시료 보다 최대 토압 및 최종 토압이 높게 측정된 이유는 단일 시료 7kg 시료의 경우와 마찬가지로 다량의 시료가 수로를 이동하는 과정에서 발생하는 마찰력에 의해 발생한 현상으로 추정된다.

Yamamoto A 외(1998)의 경우, 수로판 하부 조건, 사용시료의 무게, 입자의 크기 등 실험 조건은 다르지만 본 실험과 비슷한 형식의 모형실험을 수행한 바 있다. 초기 실험조건이 달라 최종 측정 값은 다르지만, 충격력 패턴을 관찰할 수 있는 그래프가 유사하게 나타남을 알 수 있다. Yamamoto A 외는 토석류 모형실험에 의한 충격력 작용 패턴을 그림 12와 같이 분류하였다. 패턴 1의 경우, 충격력이 시간이 지남에 따라 점차 증가하는 경우로 토석류의 이동속도가 비교적 느린 경우에 해당하며, 패턴 2(시료 월류 미발생), 3(시료 월류 발생)의 경우에는 토석류가 하부에 단시간에 도달한 경우에 나타난다. 본 실험 결과의 경우, 충격력 작용 패턴 2, 3의 결과와 유사한 것을 볼 수 있다. 이는 본 실험에서 건조시료를 사용하고 모형실험장치 수로 바닥에 아무런 조건을 가하지 않아 비교적 빠른 속도로 시료가 이동하여 나타난 결과로 볼 수 있다. 다만, 시료의 무게가 증가한 경우(그림 7, 8)에는 수로폭의 영향과 시료간의 간섭효과에 의해 측정 토압이 천천히 감소되는 것으로 판단된다.

토석류의 이동 시간 특성을 파악해 보기 위하여 토석류 모형실험 결과로부터 각 시료의 토압계 최초 도달 시간과 최대 토압측정 시간을 측정하였다(표 5).

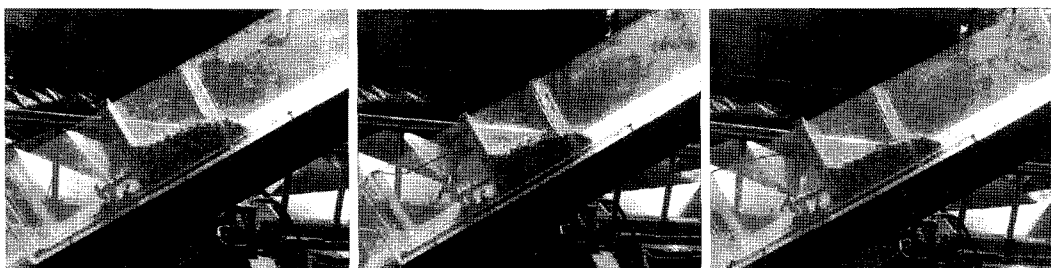


그림 9. 혼합시료 최종 퇴적 형태(3kg, 좌 : M30, 중 : M50, 우 : M70)

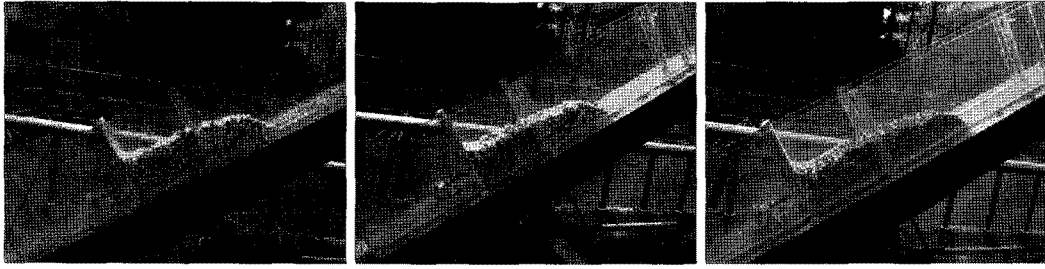


그림 10. 혼합시료 최종 퇴적 형태(5kg, 좌 : M30, 중 : M50, 우 : M70)

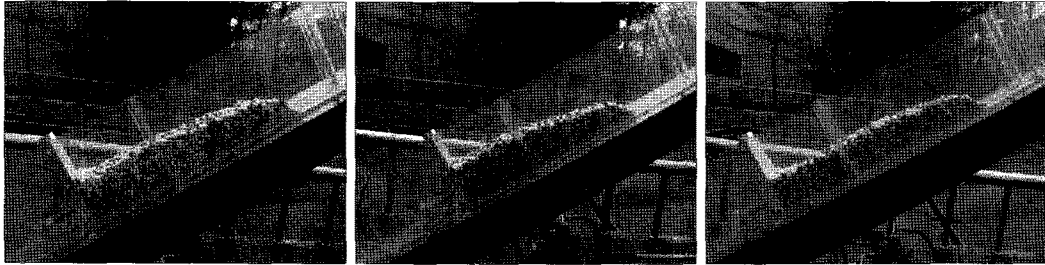


그림 11. 혼합시료 최종 퇴적 형태(7kg, 좌 : M30, 중 : M50, 우 : M70)

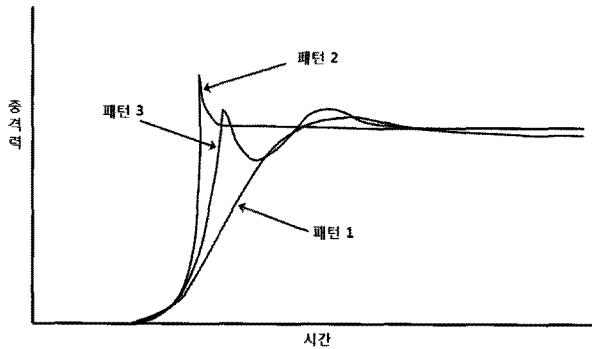


그림 12. 충격력의 작용 패턴(Yamamoto A 외, 1998)

표 5로부터 실험 시료의 구성비 별, 무게별 토압 측정 시간을 정리하였다(그림 13, 14, 15, 16). 각 실험 시료의 구성비 별 최초 도달 시간을 보면 시료 구성 비, 무게별로 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 다만, 7kg의 경우에 약간 늦게 도달되는 현상을 볼 수 있는데, 이는 무게별 토압 측정 경우와 같이 모형실험 수로의 영향으로 발생한 현상으로 판단된다(그림 13, 14). 모형실험 결과를 실제 토

석류 발생의 경우와 같다고 가정하면, 최초 토석류 발생 시 하부까지의 도달 시간은 토석류 발생 규모, 구성 입자의 크기에는 무관하게 일정한 시간에 도달한다고 볼 수 있다.

그림 15는 토석류 모형실험에서 최대 토압 측정시간을 보여준다. 최대 토압 측정시간은 불규칙한 양상을 보이나 대략적으로 입자의 크기가 작아질수록 측정되는 최대 토압의 시간이 짧아지는 경향을 볼 수 있다. 그림 16에서는 최대 토압 측정 시간의 경우, 3, 7kg의 경우 측정시간이 비교적 비슷하게 나타났으나, 5kg의 경우, 다양한 구간에서 최대 토압이 측정되는 것을 알 수 있다. 이 같은 결과는 모형실험 수로의 폭의 영향에 의해 7kg의 최대토압 측정시간이 5kg의 경우보다 빠르게 나타나 발생한 현상으로 판단된다. 그러나 다른 한편으로는 실제 토석류 발생 현장에서도 토석류가 이동하는 수로 혹은 계곡부의 폭이 본 연구의 실험 장치와 같이 좁은 형상이 지속되는 지형이 있다면 발생하는 토석류의

표 5. 모형실험 시료의 최초 토압계 도달 시간 및 최대 토압 측정 시간(단위 : 초)

무게 (kg)	3		5		7	
	최초	최대	최초	최대	최초	최대
L	1.8	4.3	1.4	6.2	1.2	5.3
M30	1.5	3.8	1.5	4.3	1.4	4.7
M50	1.4	3.1	1.5	4.5	1.6	4.3
M70	1.5	3.9	1.4	5.4	1.4	4.4
S	1.5	3.6	1.4	3.7	2.1	4.5

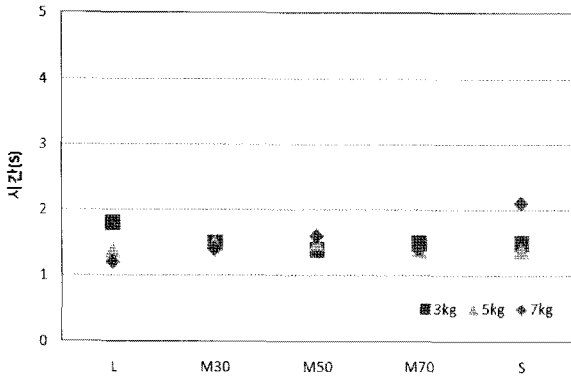


그림 13. 각 실험 재료 구성별 초초 토압계 도달 시간

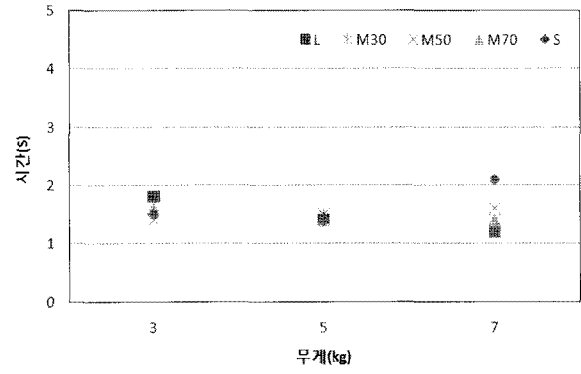


그림 14. 각 실험 재료 무게별 초초 토압계 도달 시간

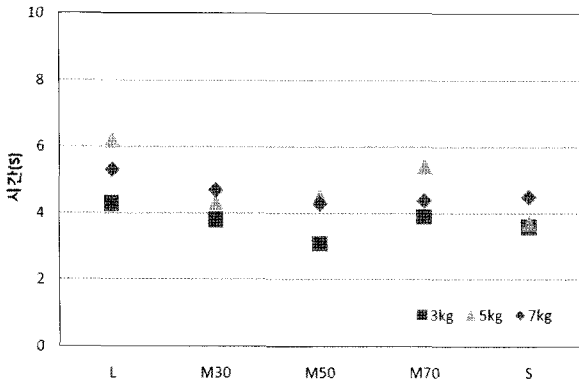


그림 15. 각 실험 재료 구성별 최대 토압 측정 시간

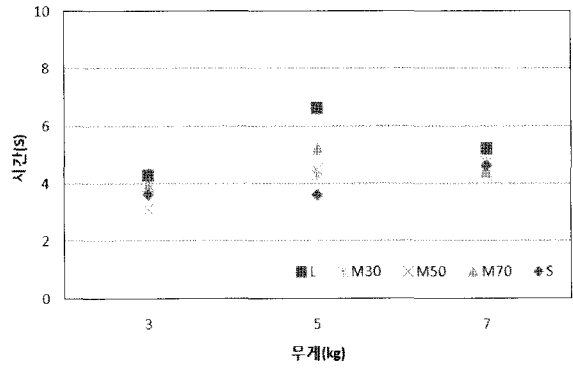


그림 16. 각 실험 재료 무게별 최대 토압 측정 시간

표 6. 토석류 모형실험 측정 결과(unit : kN/m²)

구분	1kg		3kg		5kg		7kg	
	최대	최종	최대	최종	최대	최종	최대	최종
L	31.2	17.1	49.8	42.9	56.6	52.3	58.9	45.3
M30	-	-	46.2	31.2	47	36.7	47.9	41.6
M50	-	-	39.7	27.1	43.2	39.9	54.7	42.4
M70	-	-	28.3	20.4	37.6	34.4	41.6	30.8
S	22	16.9	34.4	30	32.2	29	27	26.6

양에 비해 하부에서 측정되는 토압이 작게 나타날 수도 있음을 시사한다고 볼 수 있다.

토석류 모형실험을 통해 측정된 작은 자갈, 큰 자갈, 혼합시료 3, 5, 7 kg을 이용하여 측정된 토압을 표 6에 정리하였다. 표 6을 보면 큰 자갈의 토압이 전반적으로 크게 나타나며 혼합시료의 경우에는 작은 자갈의 비율이 낮을수록 토압이 크게 나타남을 알 수 있다.

표 6으로부터 각각의 실험 시료 구성 특성, 실험 시료 무게 별 토압 분포 특성을 분석하여 보았다. 각 그래프의 데이터에는 로그 방정식의 추세선을 추가하여 데이터 분포 현황을 파악하였다(그림 17, 18, 19, 20).

그림 17과 18을 보면 실험에 사용한 시료의 무게가 일정할 경우, 실험 시료의 구성 입자가 작아질수록 측정

된 최대, 최종 토압은 점차 줄어드는 경향을 볼 수 있다. 같은 크기의 구성비를 갖는 실험 시료의 경우, 무게가 클수록 측정되는 토압이 크게 나타나는 경향을 볼 수 있다. 일부 실험시료의 입자가 작음에도 불구하고 측정되는 토압이 크게 나타나는 경우를 볼 수 있는데, 이는 시료가 하부로 이동하는 과정에서 수로와 시료 입자간, 입자와 입자간 사이의 반응에 의해 발생하는 힘의 양상이 불규칙하게 일어나기 때문으로 판단된다.

그림 19와 20은 각 실험 시료 무게별 최대 토압 및 최종 토압 분포 현황을 나타내고 있다. 각각의 최대 및 최종 토압은 작은 자갈과 큰 자갈의 무게별 최대 및 최종 토압의 범위 안에 포함되어 있다. 따라서 입자의 평균 지름이 크면 토압이 증가되지만 큰 자갈에 혼합된

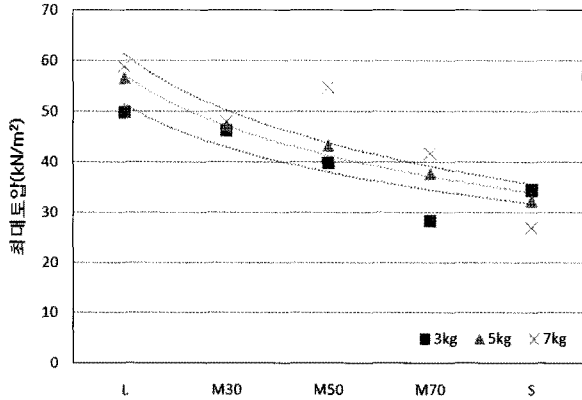


그림 17. 각 실험 시료 구성별 최대 토압 분포 현황

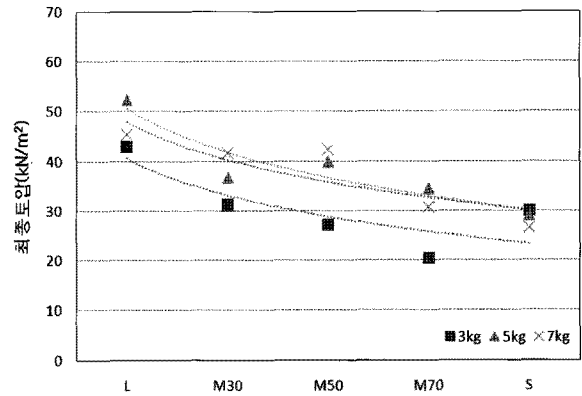


그림 18. 각 실험 시료 구성별 최종 토압 분포 현황

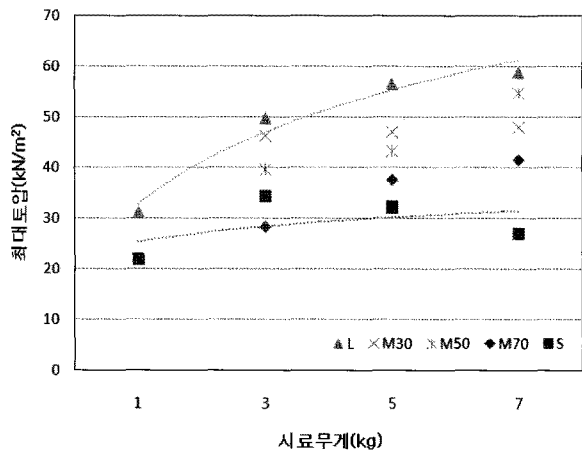


그림 19. 각 실험 시료 무게별 최대 토압 분포 현황

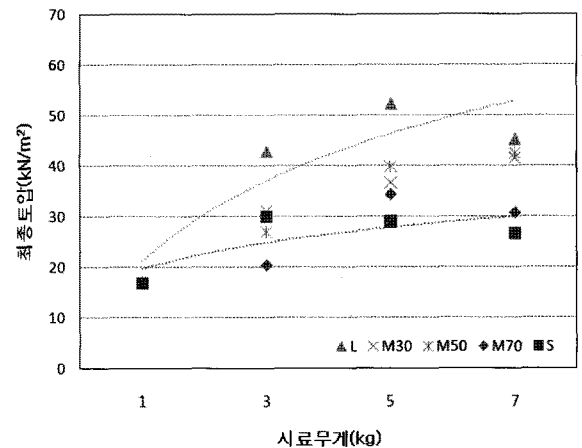


그림 20. 각 실험 시료 무게별 최종 토압 분포 현황

평균 지름이 작은 입자들이 존재하면 혼합된 입자들의 양에 따라 토압의 크기가 감소된다.

4. 결론

자연에서 발생하는 토석류 발생현상을 실내시험으로 단순화시켜 여러 가지 조건에 대하여 토석류가 발생하는 충격력을 이해하기 위해 토석류 모형실험을 수행하였다. 특히 작은 자갈과 큰 자갈을 이용한 토석류 모형 실험을 통해, 단일 시료와 혼합시료가 발생하는 토압을 시간에 따라 측정하여 토석류에 대한 충격력을 실험적으로 산정하였다.

토석류 모형실험결과, 토석류 흐름 초기에는 각 시료가 발생하는 토압이 평균 입자의 지름이 증가함에 따라 증가하는 경향을 나타낸다. 작은 자갈의 경우 최대 토압과 최종 토압 모두에서 시료의 양에 비례하지 않음을 알 수 있었다. 그러나 큰 자갈의 경우 최대 토압은 시료의 무게가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보이지만 최

종 토압의 경우 실험 시료의 양에 비례하게 증가하지 않음을 알 수 있다. 이는 모형실험 시료가 발생시키는 토압이 모형실험장치 수로 바닥면과 옆면에 분산되기 때문에 발생한 현상으로 판단된다. 토석류가 발생하는 자연지형에서도 상기 기술한 현상이 동일하게 나타날 수 있는 현상인 점을 고려해 볼 때, 토석류의 영향 범위는 토석류가 퇴적된 전구간에 해당하지 않고 일정 범위에 퇴적된 토석들만이 영향을 줄 수 있음을 시사한다고 볼 수 있다. 또한, 혼합시료를 이용하여 실험한 결과의 경우, 혼합시료를 구성하고 있는 작은 자갈의 비율이 높을수록 측정되는 토압이 작게 나타났으며 입자의 평균 지름이 크면 토압이 증가되지만 큰 자갈에 혼합된 평균 지름이 작은 입자들이 존재하면 혼합된 입자들의 양에 따라 토압의 크기가 감소한다. 이러한 결과는 토석류를 구성하고 있는 입자 크기에 따라 발생하는 토압이 다양하게 나타난다고 볼 수 있다. 토석류 발생시 나타나는 충격력이 토석류의 양에 비례하게 증가하지 않으며 토석류를 구성하고 있는 입자 크기의 구성비에 따라 충격

력의 양상이 다양하게 나타난다면 이런 점을 고려하여 토석류 대책구조물을 설계하는 방법을 개발해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 지역기술혁신사업의 연구비 지원('08지역기술혁신 B01-01, 산지하천도로 호우피해 방지를 위한 수충부 및 토석류 방재설계 선진화 기술개발-토석류 대책구조물 설계를 위한 모형실험)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. 김기환, 이동혁, 김대희, 이승호 (2008), 토석류 흐름 상태 특성 파악을 위한 모형실험 연구, *한국지반환경공학회 논문집*, 제9권 제5호, pp.83-89.
2. 김상규, 서홍석 (1997), 레올로지 모델을 이용한 토석류 이동해석, *한국지반공학회지*, Vol.13, No.4, pp.133-143.
3. 김원형 (2001), 토석류 산사태의 발생원인과 예측, 방재연구, Vol.3, No.4, pp.4-14.
4. 김재현 (2003), 토석류 발생과 방재 기술, *산림* 7월호, pp.72-77.
5. 김진홍 (1995), 토석류의 해석과 적용분야, *토목*, Vol.43, No.9, pp.100-103.
6. 산림청, 1998, *사방기술교본*.
7. 이동우 외 13인 공역 (2007), *자연재해와 방재*. 시그마프레스, pp. 149-151.
8. 채병근, 김원영, 조용찬, 김경수, 이춘호, 최영섭 (2004), 토석류 산사태 예측을 위한 로지스틱 회귀모형 개발, *지질공학회지*, Vol.14, No.2, pp.211-222.
9. 황학, 고갑수 (1996), 토석류 거동을 위한 운동학적 모델, *대한토목학회논문집*, Vol.16, No.3, pp.287-294.
10. Berzi D., Larcán E. (2007), Laboratory investigation of dam-break flow of a mixture of water and granular mater, *Debris-flow hazards mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, Millpress, pp. 223-228.
11. Kramer, SL, and Mitchell, RA (2006), Ground Motion Intensity Measures for Liquefaction Hazard Evaluation, *Earthquake Spectra*, Vol.22, No.2, pp.413-438.
12. Tiberghien D., Laigle D., Naaim M., Thibert E., Ousset F. (2007), Experimental investigations of interaction between mudflow and an obstacle, *Debris-flow hazards mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, Millpress, pp.281-292.
13. Yamamoto A., Yamamoto S., Torihara M., Hiram K. (1998), Impact Load on Sabo Dam due to Debris Flow, *砂防學會誌*, Vol.51, No.2 pp.22-30. (Japanese)

(접수일자 2010. 3. 23, 심사완료일 2010. 11. 2)