

# 토사재해 위험지역의 구조적 대안 설정을 위한 사태물질 초기 질량분포 및 방어시설물 형상의 영향 분석

성주현·오승명\*·정영훈\*\*·변요셉·송창근\*\*

한국시설안전공단 시설안전연구소·\*인천대학교 안전공학과·\*\*K-water 연구원 수자원 연구소  
(2016. 1. 6. 접수 / 2016. 2. 22. 수정 / 2016. 3. 2. 채택)

## Analysis of Initial Mass Distribution and Facility Shape to Determine Structural Alternative for Hazardous Zone Vulnerable to Debris Flow Disaster

Joo-Hyun Seong · Seung Myeong Oh\* · Younghun Jung\*\* · Yoseph Byun · Chang Geun Song\*\*

Institute of Infrastructure Safety, Korea Infrastructure Safety Corporation

\*Department of Safety Engineering, Incheon National University

\*\*Water Resources Research Center, K-water Institute

(Received January 6, 2016 / Revised February 22, 2016 / Accepted March 2, 2016)

**Abstract :** A 2-D hydrodynamic model for predicting the movement of debris flow was developed. The developed model was validated against a dam break flow problem conducted in EU CADAM project, and the performance of the model was shown to be satisfactory. In order to suggest structural alternative for hazardous zone vulnerable to debris flow disaster, two types of initial mass distribution and two shapes of defensive structure were considered. It was found that 1) the collapse of debris mass initiated with square pyramid shape induced more damage compared with that of cubic shape; and 2) a defensive structure with semi-circular shape was vulnerable to debris flow disaster in terms of debris control or primary defense compared with that of rectangular-shaped structure.

**Key Words :** debris flow disaster, structural alternative, hydrodynamic model, initial debris distribution, defensive structure

### 1. 서론

산지가 많은 우리나라는 토심이 얇고 경사가 급하여 집중호우 시 토압이 급상승하고 토사의 응집력이 저하되어 산사태 및 토석류 발생 빈도가 높아지고 있다. 도시화·산업화로 인하여 주거지 및 산업단지가 급경사지에 인접하게 되어 도심지 토사재해 피해가 급속히 증가하고 있다. 따라서 도심지 인구 밀도가 높은 우리나라의 토사재해는 발생기작과 발달경로가 외국과 달라 국내 여건에 적합한 해석기술 개발이 필수적이다.

토석류에 관한 최근 국내 연구동향을 살펴보면 다음과 같다. Choi et al.<sup>1)</sup>은 도심지 토사재해 위험도를 평가하기 위해 FEMA의 토사재해 평가 인벤토리를 분석하여 국내에 적용 가능한 정밀평가지표를 도출하였다.

Lee et al.<sup>2)</sup>은 토석류에 의한 구조물의 취약성을 평가하고 지형에 따른 토석류 거동의 특징을 분석하였다. Lee et al.<sup>3)</sup>은 FLO-2D 모형을 이용하여 전파면의 경사를 변화시켜 토석류의 흐름을 모의하였고, 토석류에 의한 구조물의 취약성 계산을 통해 토석류가 도심지에 미치는 영향을 분석하였다. Kang and Kim<sup>4)</sup>은 FLO-2D 모형을 적용하여 토석류 발생 지역의 재해 유발 인자(토석류 두께, 속도 및 충격압)를 산정하고 조적식 건물에 대한 취약함수를 도출하였다. Song and Lee<sup>5)</sup>는 토석류의 초기두께 및 흐름 저항응력에 따른 토석류 이동 특성을 분석하였다. 이상의 연구동향을 분석해 보면 토석류 해석에 관한 연구는 기존의 통계적 접근법이나 집중형 모형에서 최근에는 복잡한 토석류 발생 및 유동 기작을 수학적 모형에 반영하여 수치적으로 해석하

\* Corresponding Author : Chang Geun Song, Tel : +82-32-835-8291, E-mail : baybreeze119@inu.ac.kr  
Department of Safety Engineering, Incheon National University, 119, Academy-ro, Yeonsu-gu, Incheon 22012, Korea

는 고정확도의 물리기반 모형으로 진행되고 있는 추세이다. 토석류 거동은 시간에 따라 변화하면서, 공간적으로도 2차원 이상의 분포 변화를 나타내므로, 거동 해석 모형 역시 시간에 따른 변화를 해석할 수 있는 부정류 모형이어야 하며, 중형방향 운동범위를 제시할 수 있는 2차원 모형의 접근이 필요하다.

본 연구에서는 수평 2차원 동수역학 방정식을 Petrov-Galerkin 안정화 기법으로 이산화하여 토석류 유동해석을 위한 수치모형을 개발하였다. 토사재해 위험지역의 구조적 대안 설정을 위하여 사태물질의 초기 분포 형상에 따른 방어시설물의 유입 특성을 분석하고, 시설물의 적정높이를 결정하는 방법을 제시하였다. 또한 시설물의 형상에 따른 작용 힘을 분석하여, 사태물질의 제어나 1차 방어에 유리한 방어시설의 형상을 제시하였다.

## 2. 토석류 해석 모형

기존 연구자들로부터 제안된 바와 같이 천수방정식은 토석류 거동 해석을 위한 기본방정식으로 활용되고 있다. 천수방정식은 수평 2차원 평면 내에서 유체의 수심평균된 중형방향 유속과 수심을 계산하는 수학적 모형으로 식 (1)의 질량보존방정식과 식 (2)의 운동량보존방정식으로 구성된다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} + h \frac{\partial v}{\partial y} + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = i \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \nu_i \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + S_{gx} - S_{fx} \quad (2a)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = \nu_i \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + S_{gy} - S_{fy} \quad (2b)$$

여기서,  $h$ 는 수심,  $t$ 는 시간,  $x, y$ 는 중형방향 직교좌표,  $u, v$ 는 수심평균된 중형방향 유속,  $\nu_i$ 는 유효난류계수,  $S_g$ 는 중력과 지형표고차에 의해 발생하는 외력,  $S_f$ 는 바닥마찰경사력을 의미하며,  $i$ 는 강우에 의해 유입된 생성 혹은 지하침투에 의해 감소된 소멸을 나타낸다. 위 식에서 운동량방정식의 우변은 외력에 해당하는 항으로 유체에 작용하는 유효난류응력, 압력, 전단응력 및 중력을 포함하며, 우변의 첫 번째 항은 Navier-Stokes 방정식을 시간평균하는 과정에서 생성된 Reynolds 응력을 점성계수 개념을 도입하여 처리함에 의해 발생하는 항으로 유효난류계수( $\nu_i$ )는 유체의 특성이 아닌 유동의 특성을 반영하게 된다. 압력과 중력은 수심적분 과정에

서 Boussinesq 가정과 정수압 가정에 의해 다음과 같이 지형고( $H$ ) 경사와 수심( $h$ )경사로 표현된다.

$$S_{gx} = -g \left( \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) \quad (3a)$$

$$S_{gy} = -g \left( \frac{\partial H}{\partial y} + g \frac{\partial h}{\partial y} \right) \quad (3b)$$

$S_{fi}$  항은 유체에 작용하는 전단응력으로 Newtonian 유체의 경우 전단응력이 전단변형률에 비례하여 비례상수를 점성계수로 표현하지만, 토석류의 경우 구성물질에 유기물과 무기물이 포함되어 있어 유동의 흐름이 바뀌는 점소성 Non-Newtonian 유체로 해석한다. 토석류는 구성물질의 함유비율에 따라 유동을 멈추게 유도하는 정지기작이 달라지게 되며, 이를  $S_f$  항으로 조절할 수 있다. 일반적으로 흐름저항력  $\tau_{bi} (= \rho gh S_{fi})$ 은 난류응력, 분산응력, 항복응력, 점성응력 및 Coulomb형 마찰 응력의 성분으로 구성되나, 본 연구에서는 사태물질의 초기 분포 형상에 따른 토석류의 방어 구조물 유입 특성을 분석하기 위해 거칠기계수  $n$ 을 포함한 다음의  $\tau_{ti}$  만을 고려하였다.

$$\tau_{ti} = \rho g n^2 \frac{\sqrt{u^2 + v^2}}{h^{1/3}} u_i \quad (4)$$

지배방정식을 이산화하기 위해 식 (1)은 Galerkin법을, 식 (2)는 순간적인 질량붕괴에 의한 경사면 상의 흐름을 안정적으로 모의할 수 있는 SU/PG 기법을 적용하였다. 비선형항인 이송가속도항을 처리하기 위해 뉴턴-랩슨법을 적용하였으며, 완전음해법에 의한 시간차분법을 사용하여 해의 안정성을 높였다. 지배방정식의 구성, 수치모형의 유도과정과 수치기법 등은 Song et al.<sup>6)</sup>과 Seo et al.<sup>7)</sup>에 상술되어 있다.

## 3. 수치모형의 검증

본 연구에서 개발된 수치모형의 적용성 및 모의 결과의 정확성을 검증하기 위해 EU CADAM project<sup>8)</sup>의 수리실험 조건과 동일한 지형을 제작하여 수치모의를 수행하고 실험값과 모의값을 비교하였다. Fig. 1과 같이 초기 수심 0.75 m인 물이 수문 개방에 의해 순간적으로 방류되어 하류부에 위치해 있는 삼각형 둔턱을 통과하는 흐름을 모의하였으며, 평탄부 G1, 상승부 G2, 정점부 G3 지점에서 시간에 따른 두께 분포를 수리실험값과 비교하였다. 조도계수  $n$ 을 0.009, 0.0125, 0.016

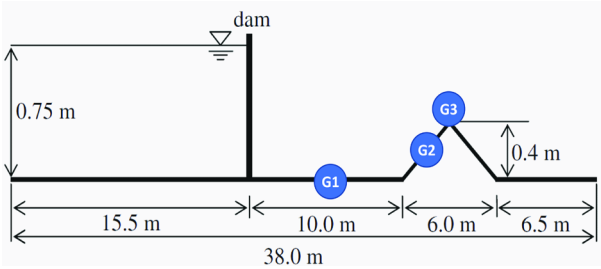
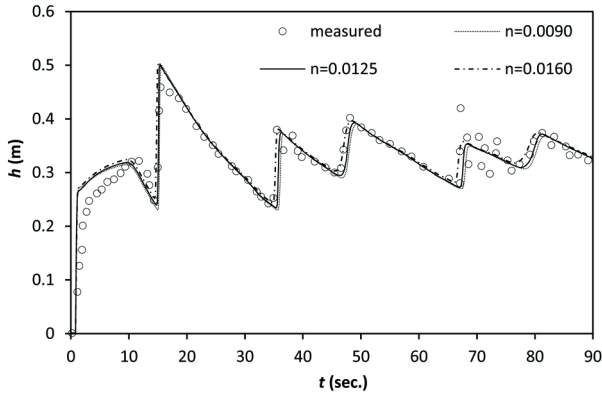
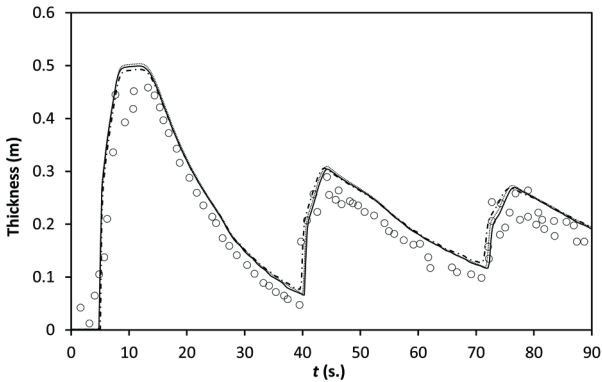


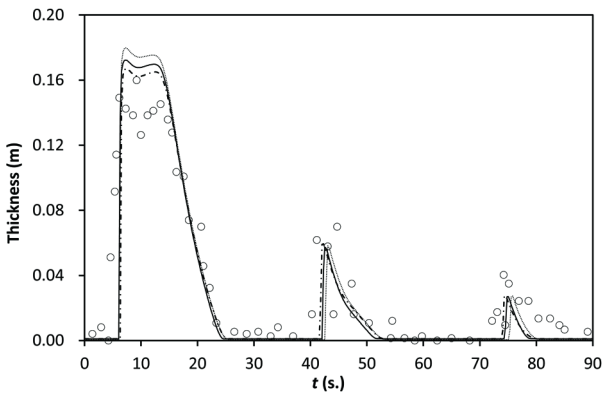
Fig. 1. Laboratory experiment by EU CADAM project.



(a) G1



(b) G2



(c) G3

Fig. 2. Thickness comparisons by varying roughness coeff.

으로 입력하여 수치모의한 후 G1, G2, G3 세 지점에서 시간에 따른 두께를 Fig. 2에 도시하였다. 이 그림에서 수치모의에 의한 두께의 증감 양상이 실측값과 유사하였으며, 특히 조도계수가 0.016인 경우 실험값에 근사하였다. 따라서 댐 붕괴류 형태의 토석류 전파 거동 수치모의에 본 연구에서 개발한 2차원 수치모형이 적합한 것으로 판단되며, 다음 장에서 사태물질의 초기 질량분포 및 방어시설의 형상에 따른 토석류의 이동특성을 분석하였다.

#### 4. 초기 질량분포 및 방어시설 영향 분석

##### 4.1 모의조건 및 입력자료 구축



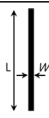

토석류 발생 모의영역의 지형자료를 구축하기 위해 Ryu et al.<sup>9)</sup>의 연구를 참고하였다. 이 연구에서는 국내 사면붕괴 및 토사재해가 발생한 106개소의 사례를 분석하여, 토사재해 발생지역의 강우 요인, 사면 횡단형상, 지질분포, 붕괴부 면적 및 경사도, 토층심도, 토석류 발생 계류형상 등의 토사재해 발생 유형을 구분하였다. 조사 결과 토석류는 붕괴 면적 200 - 300 m<sup>2</sup>, 사면경사 21 - 30°, 사면길이 100 m 이하의 조건에서 가장 많이 발생하였으므로, 이를 근거로 본 연구에서는 붕괴 면적 225 m<sup>2</sup>, 경사도 25°, 경사 길이 100 m로 입력하여 사면 지형을 구축하였다.

또한 사태물질의 초기 질량분포에 따른 흐름거동과 방어시설의 형상에 따른 작용힘을 분석하기 위해 Table 1과 같은 4가지 모의케이스를 구성하였다. 길이 15 m, 폭 15.3 m, 높이 3 m의 직육면체 형상(R)과 길이 15 m 폭 15 m 중심높이 6.12 m의 부피를 갖는 사각뿔형상(T) 등 두 가지 초기 형상을 고려하였으며, 사태방어시설의 경우 길이 25 m, 폭 1 m의 직육면체 형상(R)과 내경 12.5 m, 외경 14.5 m, 폭 1 m를 가지며 경사면을 향해 열려있는 반원형상(C)을 포함하여 총 4가지 경우를 수치 모의하였다.

##### 4.2 초기 질량분포에 따른 방어시설로의 유입 특성

RR의 경우 사태물질이 13.7 s에 사태방어시설에 최초로 도달하였고, 14.5 s에 시설물 전면에 도달하였다. 시설물이 받는 힘을 계산하여 도시한 Fig. 3과 같이 사태물질이 시설물에 도달한 후 작용 힘이 급격히 상승하여 15.5 s에 31.75 ρ N으로 최대가 되었고, 이후 완만하게 감소하였다. Fig. 4는 최대 힘이 발생한 시점인 15.5 s. 및 그 전후 0.5 s., 1 s에서 시설물 전면의 토석류 횡방향(γ) 두께 분포를 나타낸 것이다. 최대 힘 발생 이후 16.0 s까지 사태물질의 두께가 계속 상승하고 이

Table 1. Simulation cases

Classification		Initial shape of debris	
		Cube 15.3(L) × 15.0(W) × 3.0(H) m 	Square pyramid 15.0(L) × 15.0(W) × 6.12(H) m 
Type of defensive structure	Rectangular 25.0(L) × 1.0(W) m 	RR	TR
	Semi-circle 12.5(ID) × 1.0(W) m 	RC	TC

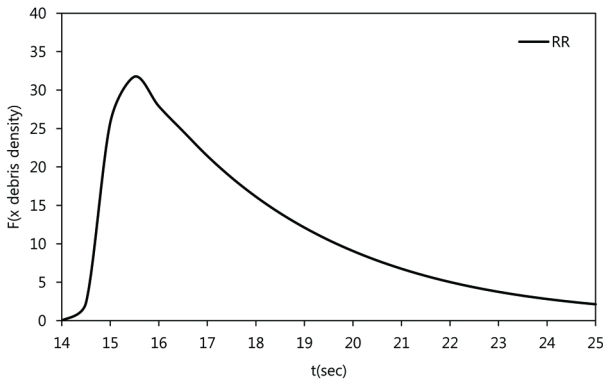


Fig. 3. Force distribution by RR.

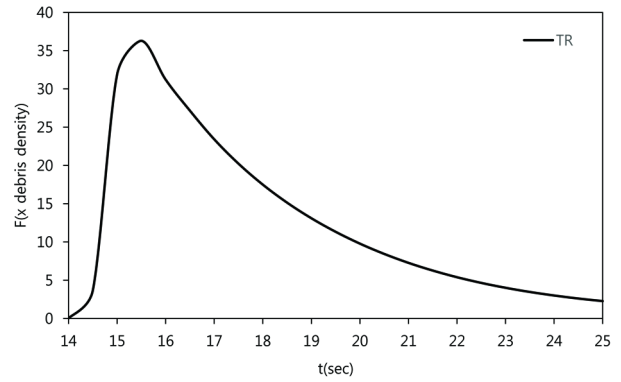


Fig. 5. Force distribution by TR.

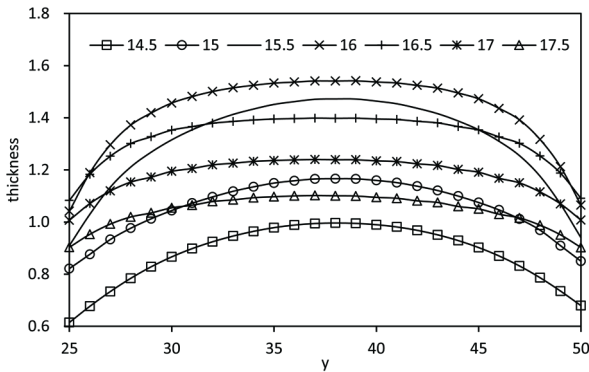


Fig. 4. Transverse thickness distribution of RR with time.

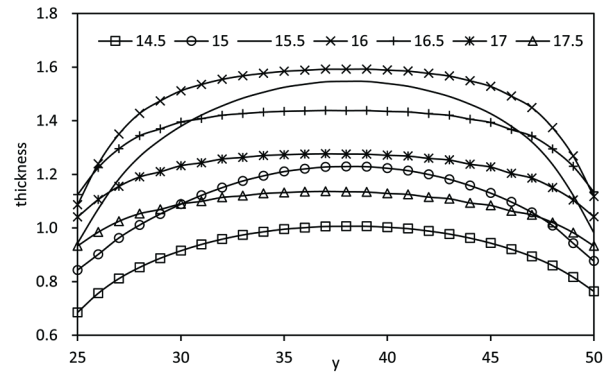


Fig. 6. Transverse thickness distribution of TR with time.

후 벽면과 충돌에 의한 후퇴기작으로 두께가 서서히 낮아졌으며, 이 그림을 통해 시설물의 높이를 1.6 m 이상으로 건설해야 하는 함을 알 수 있다.

TR의 경우 사태물질이 14.1 s에 사태방어시설에 최초로 도달하였고 14.5 s에 시설물 전면에 도달하였다. 시설물이 받는 힘을 계산하여 도시한 Fig. 5와 같이 사태물질이 시설물에 도달한 후 작용 힘이 급격히 상승하여 15.5 s에 36.28ρ N으로 최대가 되었고, 이후 완만하게 감소하였다. Fig. 6은 최대 힘이 발생한 시점인 15.5 s 및 그 전후 0.5 s, 1 s에서 시설물 전면의 토석

류 횡방향(y) 두께 분포를 나타낸 것이다. 시간에 따른 두께분포 양상이 RR의 경우와 유사하나 모든 시간에서 0.1 m 정도 두께가 얇게 나타났다. 이는 TR의 경우 사각뿔 형상의 초기 분포 조건을 가지므로 사태물질의 질량이 시간차를 두고 구조물에 도달하기 때문이며, 17.5 s에서는 RR과 TR의 두께가 동일하였다.

RC의 경우 13.6 s에 사태물질이 시설물에 최초로 도달하였고 17.2 s에 전면에 도달하였다. Fig. 7은 사태물질이 시설물에 도달한 이후 시설물이 받는 힘을 도시한 것으로 17.0 s에 66.22ρ N의 가장 큰 힘이 나타

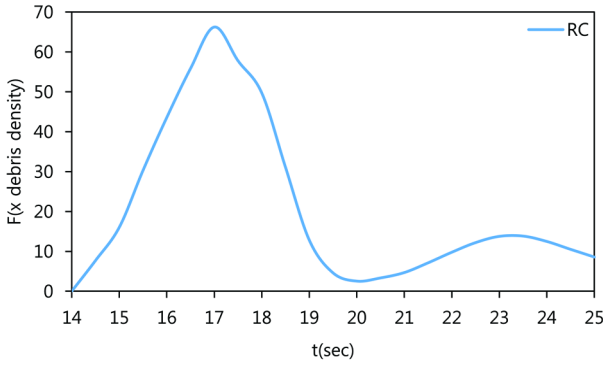


Fig. 7. Force distribution by RC.

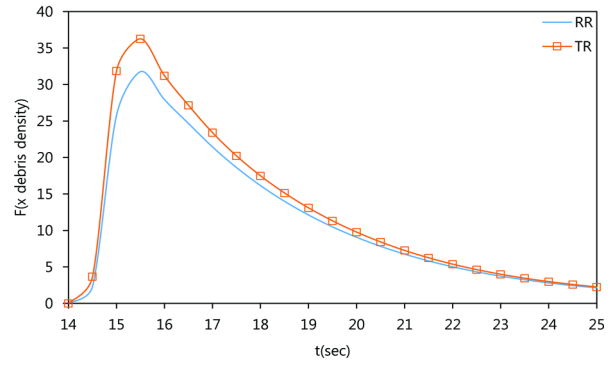


Fig. 9. Force comparison between RR and TR.

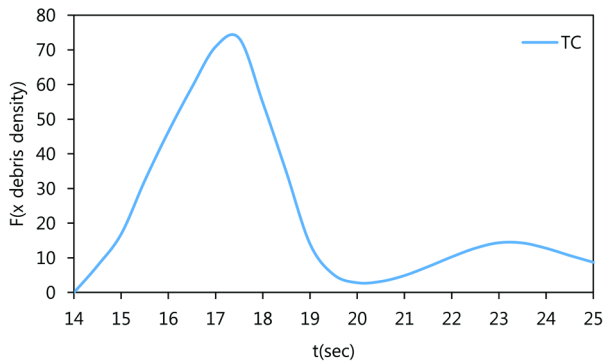


Fig. 8. Force distribution by TC.

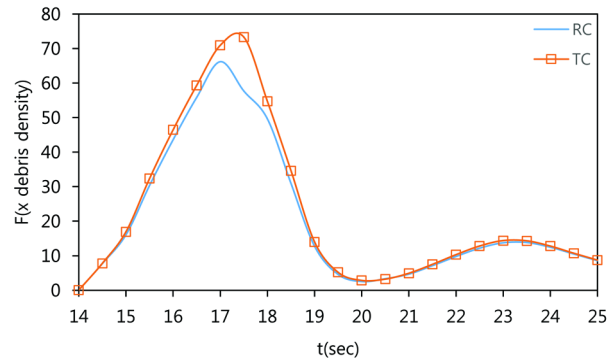


Fig. 10. Force comparison between RC and TC.

났다. 그러나 RR 및 TR과는 달리 힘이 감소하다가 다시 상승, 감소하는 경향을 보였다. 이는 반원 모양의 구조물 특성에 의해 사태물질이 시설물 전면에 도달한 뒤 가운데로 휩쓸려 유입되는 사태물질과 뒤늦게 합류하는 사태물질이 합쳐져 토석류의 두께가 증가하고, 이에 따라 힘이 다시 증가하기 때문이다.

마지막으로 TC의 경우 사태물질이 14 s.에 시설물에 최초로 도달하였고 17.3 s.에 전면에 도달하였다. Fig. 8은 사태물질이 시설물에 도달한 후 시설물이 받는 힘을 도시한 것으로 17.5 s.에  $73.28\rho$  N의 가장 큰 힘이 나타났다. 이는 사태물질이 시설물 전면에 도달한 뒤 구조물 형상에 의해 중앙부로 밀려나오는 사태물질과 후반부에 흘러 내려오던 사태물질이 합쳐져 힘이 다시 상승하였기 때문이다.

### 4.3 작용력 비교

본 절에서 분석하고자 하는 비교 대상은 사태방어시설의 형상은 동일하나 사태물질의 초기 분포가 상이한 경우(RR 대 TR; RC 대 TC)와 사태물질의 초기 분포는 동일하나 시설물의 형상이 다른 경우(RR 대 RC; TR 대 TC)이다 (Table 1 참조). RR과 TR의 경우 RR의 사태물질이 TR의 사태물질보다 시설물에 도달한 시간이

0.4 s. 빨랐으며 (RR: 13.7 s., TR: 14.1 s.) 시설물 전면에 도달한 시간은 14.5 s.로 동일하였다. Fig. 9는 RR과 TR에 의해 사태방어시설에 작용하는 힘을 비교한 것으로 최대 힘은 TR이 RR보다 14% 더 크게 나타났다 (TR:  $36.28\rho$  N, RR:  $31.75\rho$  N). 따라서 동일한 부피의 토석류 붕괴가 발생할 때 사각뿔 형상의 사태물질이 전파되는 경우가 직육면체 형상의 사태물질이 이동하는 경우에 비해 보다 큰 피해를 야기할 수 있음을 알 수 있다.

RC와 TC의 경우 RC의 사태물질이 TC의 사태물질보다 시설물에 도달한 시간이 빨랐으며 (RC: 13.6 s., TC: 14.0 s.) 시설물 전면에 도달한 시간 또한 RC가 TC보다 0.1 s. 빨랐다 (RC: 17.2 s., TC: 17.3 s.). Fig. 10은 사태방어시설이 받는 힘을 비교한 것으로 그래프 형상이 거의 일치하는 모습을 보이거나 16 s.부터 19 s. 구간에서 작용하는 힘의 차이가 발생하고, 최대 힘은 TC가 RC보다 11% 큰 것을 알 수 있다 (TC:  $73.28\rho$  N, RC:  $66.22\rho$  N). TC의 경우 사각뿔 형상의 초기 분포 조건을 가지며, 사태물질의 질량이 시간차를 두고 구조물에 도달하기 때문에 시설물과 충돌하는 유속이 RC에 비해 빨랐다.

다음으로 사태물질의 초기 분포는 동일하나 시설물

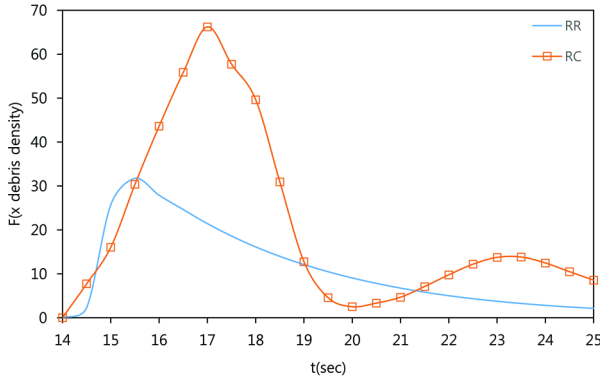


Fig. 11. Force comparison between RR and RC.

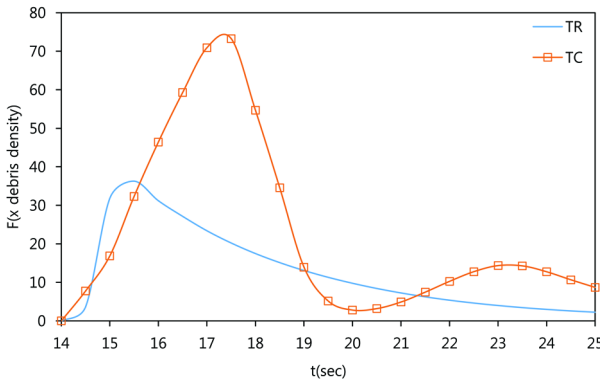


Fig. 12. Force comparison between TR and TC.

의 형상이 다른 경우(RR 대 RC; TR 대 TC)의 작용 힘을 비교하였다. RR에 비해 RC의 사태물질이 0.1 s. 빨리 시설물에 도달하였지만 (RC: 13.6 s., RR: 13.7 s.) 시설물이 받는 힘은 Fig. 11과 같이 큰 차이를 보였다. RR의 경우 RC에 비해 최대 힘이 발생하는 시간은 빨랐으나 그 크기는 RC가 RR보다 109% 크게 나타났다 (RC:  $66.22\rho$  N, RR:  $31.75\rho$  N). 따라서 반원 형태의 사태물질방어시설이 직사각형 형상에 비해 사태물질의 제어나 1차 방어에 불리한 것으로 나타났다.

TR과 TC의 경우 TC가 TR보다 0.1 s. 빨리 사태물질이 시설물에 도달하였고 (TC: 14 s., TR: 14.1 s.), RR 및 RC와 유사하게 시설물이 받는 힘이 큰 차이를 보였다. 최대 힘이 나타나는 시간은 TR이 TC보다 빨랐으나 그 값은 TC가 TR보다 102% 더 크게 나타났다 (TC:  $73.28\rho$  N, TR:  $36.28\rho$  N).

### 5. 요약 및 결론

본 연구에서는 수평 2차원 동수역학 방정식을 Petrov-Galerkin 안정화 기법으로 이산화하여 토석류 유동해석을 위한 수치모형을 개발하고, 사태물질의 초기 분포

포 형상에 따른 사태방어시설로의 유입 특성과 시설물의 형상에 따른 작용 힘을 분석하였다. 개발된 모형을 검증하기 위해 EU CADAM project의 수리실험 실측 자료와 비교한 결과 수치모의에 의한 두께 증감 양상이 실험값과 유사하게 나타나 댐 붕괴류 형태의 토석류 전파 거동 모의에 관한 적용성을 확인하였다. 본 연구에서 분석한 주요 연구 내용은 다음과 같다.

(1) 국내 사면붕괴 및 토사재해가 발생한 106개소의 사례를 분석한 기존 문헌을 참고하여 토사재해가 빈발하는 대표 붕괴면적, 사면경사 및 사면길이를 결정하고, 사태물질의 초기 질량분포(직육면체와 사각뿔)에 따른 흐름거동과 시설물의 형상(직사각형과 반원형)에 따른 작용 힘을 분석하였다.

(2) 최대 힘이 발생하는 시점 전후의 구조물 전면 횡단 두께 분석 결과를 통해 시설물의 높이를 결정하는 방법론을 제시하였다.

(3) 사태물질의 초기 분포 조건이 사각뿔 형상인 경우 토석류가 시간차를 두고 구조물에 도달하기 때문에 직육면체 형상에 비해 시설물과 충돌하는 유속이 빨랐다.

(4) 동일한 부피의 사태물질이 붕괴될 때 사각뿔 형상의 사태물질이 전파되는 경우가 직육면체 형상의 사태물질이 이동하는 경우에 비해 보다 큰 피해를 야기하였다.

(5) 반원 형태의 사태방어시설이 직사각형 형상에 비해 사태물질의 제어나 1차 방어에 불리한 것으로 나타났다.

본 연구는 토사재해 위험지역의 구조적 대안을 설정하거나 토석류 피해 저감을 위한 사태물질방어시설을 설계할 때 유용한 지침을 제공할 수 있을 것으로 판단된다. 향후에는 비정형화된 형상의 사태물질 초기 질량분포를 고려하고, 실제 급경사지 지형에 모형을 적용하여 물리적인 조건에 보다 근접한 연구를 수행할 예정이다.

**감사의 글:** 본 연구는 국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업-도시특성을 고려한 도심지 토사재해 예측·평가 및 통합 관리기술 개발(15SCIP-BO69989-03)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

### References

1) J. R. Choi, G. W. Kim, Y. K. Jee and I. C. Park “Development and Application of Precise Debris Flow Risk Assessment Index in Urban Area”, Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 15, No. 3, pp. 107-113, 2015.

- 2) J. S. Lee, C. G. Song, H. T. Kim and S. O. Lee “Risk Analysis Considering the Topography Characteristics of Debris Flow Occurrence Area”, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 3, pp. 75-82, 2015.
- 3) J. S. Lee, C. G. Song, H. T. Kim and S. O. Lee “Effect of Land Slope on Propagation due to Debris Flow Behavior”, *Journal of Korean Society of Safety*, Vol. 30, No. 3, pp. 52-58, 2015.
- 4) H. S. Kang and Y. T. Kim “Study on Physical Vulnerability Curves of Buildings by Numerical Simulation of Debris Flow”, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 5, pp. 155-167, 2015.
- 5) C. G. Song and S. O. Lee “Hydraulic Characteristics of Dam Break Flow by Flow Resistance Stresses and Initial Depths,” *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 11, pp. 1077-1086.
- 6) C. G. Song, I. W. Seo and Y. D. Kim “Analysis of Secondary Current Effect in the Modeling of Shallow Flow in Open Channels”, *Advances in Water Resources*, Vol. 41, pp. 29-48, 2012.
- 7) I. W. Seo, Y. D. Kim and C. G. Song “Validation of Depth-averaged Flow Model using Flat-bottomed Benchmark Problems,” *The Scientific World Journal*, Vol. 2014, Article ID 197539, 2014.
- 8) M. Morris, “CADAM-EU Concerted Action on Dam break Modeling.”, Report No. SR 571, HR Wallingford UK.
- 9) J. H. Ryu, H. J. Sung and Y. Kim “A Study on the Major Factors Causing the Sediment Disasters by Case Analysis.”, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 14, No. 6, pp. 151-157, 2014.