토석류에 의한 건물의 물리적 취약함수 특성

Physical Vulnerability Function of Buildings Impacted by Debris Flow

강효섭* · 김윤태**

Kang, Hyo-sub* and Kim, Yun-tae**

Abstract

The physical characteristics of debris flows were analyzed from a total of 8 cases of debris flow disasters occurred in between July and August, 2011. 15 buildings damaged in these events were also investigated in detail to study the characteristics and patterns of building damages by debris flows. Physical vulnerability was obtained from the relationship of the degree of building damage and the physical characteristics of debris flow. Three different empirical vulnerability curves were obtained, which were functions of debris flow height, flow velocity and impact pressure, respectively. Furthermore, the vulnerability function was characterized according to the structural types of the building. In the case of non-concrete building, a complete destruction occurred at the impact pressure of more than 30 kPa, an extensive damage at the impact pressure between 15 and 30 kPa, a slight damage at the impact pressure below 15 kPa. In the case of reinforced-concrete buildings, an extensive damage occurred at the impact pressure of more than 100 kPa, a moderate damage at the impact pressure between 35 and 100 kPa, a slight damage at the impact pressure below 35 kPa. The impact pressure of debris flow corresponding to a slight damage to the reinforced-concrete building produced a complete damage for the case of non-concrete building. Nonlinear regression analysis was performed according to the physical characteristics of debris flow and the building structural type. The proposed physical vulnerability curves could be used as a quantitative assessment of the structural resistance of buildings affected by a debris flow event.

Key words : Building damage, Flow velocity, Vulnerability function, Impact pressure, Debris flow

요 지

2011년 7월과 8월 사이에 발생한 총 8개 토석류 재해 지역에 대한 재해이력 사례를 분석하여 각 재해지역의 토석류 물리적 특성을 파악하였다. 또한 각 재해지역에서 피해를 입은 15개 건물에 대한 손상 특성 분석을 수행하였다. 토석류의 물리적 특성과 건물 손상정도를 바탕으로 토석류의 높이, 속도 및 충격압력으로 구성된 취약함수를 구하였다. 또한 보강 콘크리트 구조와 비 콘크리트 구조와 같은 건물의 구조 형식에 따른 취약함수를 각각 산출하였다. 비 콘크리트 건물의 경우 토석류 충격압이 30 kPa 이상일 때 완전 파괴, 15~30 kPa일 때 심각한 손상, 0~15 kPa일 때 경미한 손상이 발생하는 것으로 분석되었다. 이에 비해 보강 콘크리트 건물의 경우 100 kPa 이상에서 심각한 손상, 35~100 kPa일 때 보통 손상, 0~35 kPa일 때 경미한 손상을 입는 것으로 파악되었다. 콘크리트 건물의 경미한 손상에 대응하는 토석류 충격압은 비 콘크리트 건물에서는 완전 파괴에 해당되는 손상을 가져다 줄 수 있음을 의미한다. 건물 구조형식과 토석류 물리적 특성에 따른 취약곡선을 비선형 회귀분석을 수행하여 함수형태로 나타내었다. 이러한 토석류 취약함수는 토석류 재해로 피해가 발생할 가능성이 있는 지역의 건물손상 정도를 정량적으로 평가하는 방법으로 이용할 수 있다.

핵심용어 : 건물손상, 속도, 취약함수, 충격압력, 토석류

1. 서 론

최근 도시 확장에 따른 무분별한 산지 개발과 기후 변화 등의 다양한 원인으로 인해 산사태, 토석류와 같은 토사재해에

의한 인명과 재산피해가 증가하고 있다. 그 규모도 대형화됨에 따라 토사재해에 대한 잠재적인 위험성은 계속적으로 증가하는 추세이다(Quan Luna *et al.*, 2011). 토사재해의 여러 유형중 토석류는 많은 토사량과 발생된 토사가 이동함으로써

*정회원, 부경대학교 해양공학과 박사과정(E-mail: monk1e0@hanamail.net)
Ph.D Candidate, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University

**교신저자, 정회원, 부경대학교 해양공학과 교수(Tel: +82-51-629-6587, Fax: +82-51-629-6580, E-mail: yuntkim@pknu.ac.kr)
Corresponding Author: Member, Professor, Department of Ocean Engineering, Pukyong National University

피해를 더 가중시킨다. You *et al.*(2006)은 영동고속도로의 토사재해 유형별 붕괴규모 및 피해분석에서 표층파괴 발생빈도(62개소)가 토석류 발생빈도(22개소)에 비해 월등히 높았으나, 토석류에 의한 총 붕괴량은 표층파괴에 비해 약 20배 정도 크게 나타나고 있음을 조사한 바 있다. 또한 Lee and Kim(2013)은 2011년에 발생한 국내 토사재해 유형별 사망자수 비교에서 산사태로 인한 사망자수 비율은 25%인데 반해 토석류로 인한 사망자 수는 75%로 3배 높은 결과를 나타내었다. 이와 같이 다른 유형의 산사태 보다 토석류는 많은 재산과 인명피해를 동반한다.

토석류 위험에 노출되는 구조물로는 고속도로, 철도, 교량 등과 같은 토목 구조물이 있다. 뿐만 아니라 산지와 인접된 주거지역의 건물이 포함된다. 구조적으로 강한 토목 구조물에 비해 구조적으로 약한 일반 건물은 더 쉽게 토석류에 의해 손상될 수 있다(Hu *et al.*, 2012). 이러한 이유로 토석류 재해 유발인자와 구조물 구조형식에 따른 손상관계에 대한 정량적 분석은 필수적이다. 정량적 평가는 위험 요소, 크기, 구조물의 취약점과 예상되는 손실을 포함해야 한다(Uzielli *et al.*, 2008).

정량적 위험 평가에서, 구조물의 물리적 취약성은 일반적으로 위험 영역내의 손실 또는 손상정도로서 표현된다. 물리적 취약성은 예상되는 손상수준을 의미하며, 0에서 1사이의 정량화된 값으로 표현된다(Fell *et al.*, 2005). 0은 손실이 없음(no loss)을 의미하며, 1은 완전 손실이 발생한 경우(total loss)를 의미한다. 따라서 물리적 취약성 평가는 토석류의 물리적 특성과 위험에 노출된 요소 사이의 상호작용에 대한 이해를 바탕으로 한다. 이러한 상호작용은 취약곡선으로 표현할 수 있다(Quan Luna *et al.*, 2011).

토사재해에 따른 구조물 취약성에 대한 연구는 주로 국외에서 수행되었다(Fuchs *et al.*, 2007; Haugen and kaynia, 2008; Quan Luna *et al.*, 2011; Jakob *et al.*, 2012). Fuchs *et al.*(2007)은 1997년 8월 16일 오스트리아의 알프스에서 발생한 토석류 자료로부터 경험적 강도와 취약성 관계를 산출했다. Haugen and Kaynia(2008)은 HAZUS 손상 상태 확률을 이용하여 토석류의 충격에 대한 구조 취약성을 평가하기 위한 모델을 제안하고, 1998년 5월 Sarno 지역에서 발생한 토석류에 대해 적용하였다. Quan Luna *et al.*(2011)은 이탈리아 북부 Valtellina Valley 중앙부분에서 발생한 토석류에 대한 물리적 손상 조사 결과와 수치 해석을 수행하여 토석류의 높이, 충격압력 및 점도와 같은 세가지 함수로 구성된 경험적인 취약곡선을 산출하였다. Jakob *et al.*(2012)은 토석류의 충격력으로부터 얻어진 강도 지수와 건물 손상정도를 침수에서 완전 파괴까지 총 4단계로 구분하여 상관관계를 분석하였다.

이들 연구의 대부분은 단일지역의 토석류 재해에 대한 토석류 강도와 건물 손상에 대한 관계에 초점을 맞추고 있다. 결과적으로 제안된 취약함수를 다양한 건물의 구조적인 특성이

나 지역적 특성에 따른 토석류의 강도특성을 고려하지 못한다. 이로 인해 외국에서 개발된 취약함수를 건물구조 형태가 다른 국내에 적용하기에는 무리가 있다. 토사재해 발생 시 건물과 구조물 피해규모를 예측하는 것은 토사재해 취약지역 관리 뿐만 아니라 국가 방재정책의 우선순위를 수립함과 동시에 향후 도시 계획에 대한 유용한 정보를 제공할 수 있음에도 불구하고 국내 토사재해에 따른 구조물 취약성에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 2011년 7월과 8월 사이에 발생한 총 8개 토석류 재해 지역에 대한 재해이력 사례를 분석하여 각 재해지역의 토석류 물리적 특성을 파악하였다. 또한 각 재해지역에서 피해를 입은 15개 건물에 대한 손상 특성을 분석하였다. 이를 통해 토석류의 물리적 특성과 건물 손상정도를 토석류의 높이, 속도 및 충격압력과 같은 세가지 함수로 구분하여 취약함수로 표현하였다. 또한 보강 콘크리트 구조와 비 콘크리트 구조로 구성된 건물의 구조 형식에 따른 취약함수를 산출하였다.

2. 토석류 재해이력 사례 분석

2.1 연구지역

대부분의 토사재해는 6월에서 9월의 태풍 및 집중호우로 인해 발생한다. 2011년 역시 7월~8월에 게릴라성 집중호우로 인해 집중호우로 인해 전국적으로 토사재해가 다수 발생했다. 특히, 서울, 경기도 지역 등의 도심지 주변에서 다수 발생하여 많은 인명과 재산 손실을 입혔다. 본 연구에서는 2011년에 발

Fig. 1. The study area and AWS observation point.

Fig. 2. Distribution of average monthly rainfall in 2011.

생된 토석류 재해 지역의 사례 분석을 위해 재산과 인명피해를 야기한 지역을 중심으로 그림 1과 같이 정읍시 입암면 지선리(A), 용인시 처인구 모현면 능원리(B), 포천시 일동면 기산리(C), 포천시 신북면 심곡리(D), 동두천시 하봉암동(E), 동두천시 상봉암동(F), 과천시 과천동(G) 및 서울특별시 서초구 우면산(H)을 포함한 총 8개 토석류 재해 지역을 선정하였다.

또한 기상청에서 운영하는 AWS 관측소의 강우자료를 이용하여 본 연구에서 선정한 토석류 재해 지역의 2011년 월별 총 강우량을 분석하였다(그림 2). 전체적으로 6, 7, 8월에 연강우량의 79%가 집중되어 있는 것으로 분석되었다. 정읍지역을 제외한 7개 연구지역은 7월에 가장 많은 강우량을 기록하였으며, 연강우량의 47%가 7월에 집중되는 것으로 나타났다. 이와 같은 집중호우가 발생할 때 토사재해가 유발됨에 따라 집중호우는 토사재해를 유발하는 중요 인자임을 알 수 있다.

2.2 재해이력 사례

토석류의 물리적 특성을 파악하기 위해 총 8개 지역에 대해 재해이력 사례를 분석하였다. 이를 위해 현장 조사보고서, 수치지도, 위성사진을 이용하여 토석류 발생 지역에 대한 분석을 수행하였다. 현장 조사보고서는 소방방재청 국립방재연구소의 2011년 7, 8월 급경사지 재해지역 현장조사 보고서 자료와 우면산 산사태 원인조사 및 복구대책수립 용역 최종보고서를 참조하였다. 토석류 재해 발생지와 피해범위는 재해 발생 후 위성사진과 현장조사 보고서 자료를 토대로 산정하였다. 또한 수치지도상의 등고선을 이용하여 토석류 발생부와 퇴적부에 대한 고도, 이동범위, 사면경사 및 유역면적을 산정하였다. 토석류 재해로 인한 건물 손상은 현장 조사보고서, 피해건물 현장사진 및 문헌을 종합적으로 분석하여 평가하였다. 그림 3은 본 연구지역인 정읍시 입암면 지선리(A), 용인시 처인구 모현면 능원리(B), 포천시 일동면 기산리(C), 포천시 신북면 심곡리(D), 동두천시 하봉암동(E), 동두천시 상봉암동(F), 과천시 과천동(G) 및 서울특별시 서초구 우면산(H)의 토

석류 재해지역에 대한 분석결과를 나타낸다. 각 토석류 발생 지역의 건물손상 정도를 완전 파괴(complete destruction), 심각한 손상(extensive damage), 보통 손상(moderate damage), 경미한 손상(slight damage)과 같이 4가지로 분류하여 그림 3에 나타내었다.

3. 토석류 재해 유발인자에 대한 물리적 특성

3.1 토석류의 흐름 특성

Iverson(1997)은 이동하는 토석류의 중력중심 진행 흐름에 대한 능력을 나타내기 위해 $L/\Delta H$ 의 개념을 이용하였다. ΔH 는 토석류 발생지와 퇴적지간의 수직 고도를 나타낸다. L 은 토석류 발생지와 퇴적지간의 수평 거리를 나타낸다. $L/\Delta H$ 값이 클수록 토석류의 이동성이 큼을 의미한다. 표 1은 총 8개 토석류 재해지역에서 구한 $L/\Delta H$ 값을 나타낸다. 표 1과 같이 8개 토석류 재해지역의 $L/\Delta H$ 는 3.1~6.4의 범위로 분포한다. 이러한 분포는 Iverson(1997)의 연구에서 산사태에 기원한 소규모 토석류의 범위인 2.0~6.0과 유사한 이동특성을 나타낸다. 또한 Zanchetta *et al.* (2004)의 연구에서 Sarno 지역의 화산쇄설물 토석류에 대한 $L/\Delta H$ 값의 범위는 2.5~4.0로 분포하고 있음을 나타내었다. 이를 종합해 볼 때 본 연구지역의 토석류는 소규모 토석류, 즉 사면형 토석류의 이동 특성을 나타낸다.

3.2 유역면적과 토석류 규모

토석류 규모에 영향을 미치는 인자는 유역면적, 강우, 이동거리 및 사면경사 등과 같다(Jang, 2013). 토석류 규모는 이와 같은 다양한 요인들에 의해 복합적으로 영향을 받기 때문에 정확하게 산정하기 어렵다. 본 연구에서는 현장조사 보고서, 수치지도와 위성사진을 이용하여 토석류 발생 지역에 대해 유역면적과 토석류 규모를 산정하였다. 표 1은 총 8개 토석류 재해지역에서 산정한 유역면적 결과와 토석류 규모를 나타낸다. 각 토석류 재해지역에서 산정된 토석류 규모에 대한 신뢰성을 검토하기 위해 유역면적과 토석류 규모와의 관계를 비교·검토하였다.

그림 4는 토석류 규모와 유역면적간의 관계를 나타내며, Kim(2008)과 Jang(2014)의 연구 자료와 함께 표현하였다. Kim(2008)의 자료는 2002년부터 2006년까지 5년간 고속도로에 피해를 준 총 28개 토석류에 대한 규모와 유역면적을 나타낸다. Jang(2014)은 2008~2013년까지 집중호우로 발생한 48개소의 토석류 피해사례에 대한 규모와 유역면적 자료를 분석하였다. 총 76개의 토석류 규모와 유역면적 자료를 회귀분석을 수행하여 거듭제곱 형태의 상관식으로 나타내었다. 전체적으로 자료가 분산된 형태를 나타내고 있으나, 유역면적이 증가함에 따라 토석류 규모는 증가하는 뚜렷한 경향을 나타내고 있다. 이는 토석류 발생 예상지역의 유역면적 정보를 통

Fig. 3. Case studies of debris flow disaster analysis: (A) Jeongeup, (B) Yongin, (C) Pocheon ilnongmyeon, (D) Pocheon sinbukmyeon, (E) Dongducheon habongamdong, (F) Dongducheon sangbongamdong, (G) Gwacheon, (H) Seoul.

Fig. 4. Relationship between catchment area and volume of debris flow.

해 토석류 규모를 예측할 수 있음을 의미한다. 본 연구에서 산정된 토석류 규모와 유역면적 관계는 기존 문헌 값을 통해 얻어진 회귀선 보다 다소 높은 위치에 분포하고 있음을 알 수 있다. 즉, 기존 문헌 값을 통해 얻어진 유역면적에 비해 토석류 규모가 큼을 알 수 있다. 이런 경향은 토석류의 발생 형태의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 일반적으로 토석류는 사면형 토석류와 계곡형 토석류로 분류되며, 사면형 토석류는 산사면에서 발생하여, 인공 절토사면의 붕괴와 유사한 형태를 나타낸다. 또한 계곡형 토석류에 비해 규모가 작고 이동거리가 짧은 반면, 이동속도가 빠른 특징을 보인다. 계곡형 토석류는 계곡주변의 산사면이 유실된 후 사태물질이 계곡부로 유입되어 2차적으로 계곡부의 벽과 바닥을 침식시키면서 계곡을 따라 이동하는 토석류로 정의된다. 사면형 토석류에 비해 규모가 크고 이동거리가 최대 수십 km로 긴 반면, 이동속도가 다소 느린 특징을 보인다(Choi, 2013; Winter *et al.*, 2005). 이와 같이 계곡형 토석류의 경우 계곡부를 따라 긴 거리를 이동하기 때문에 사면형 토석류보다 많은 유역면적을 포함하고 있다. 이처럼 발생 형태의 차이로 인해 사면형 토석류가 계곡형 토석류에 비해 유역면적당 많은 토사를 유발하는 것으로 판단된다. 현재 기존 국내 토석류 연구에서는 발생 형태에 따른 토석류 분류기준이나, 개념 정립이 명확하지 않은 실정이다. 그림 4의 기존 문헌을 인용한 토석류 자료 또한 토석류 발생 형태에 따른 분류 없이 혼용된 상태의 자료를 나타낸다. 본 연구에서 선정된 토사재해지역의 토석류는 3.1절의 흐름특성 결과에서 나타난 바와 같이 사면형 토석류로 분류할 수 있다. 이러한 토석류 발생 형태의 차이로 인해 본 연구의 토석류는 유역면적에 비해 토석류 규모가 큰 특징을 나타내었다고 판단된다.

3.3 최대 침투유량

토석류 침투유량은 토석류 제어 구조물, 사방댐 설계시 중

요 인자로 활용되며, 토석류 최대 단면적에 최대 흐름이 발생하는 시간동안의 속도와 곱으로 정의된다. 토석류 침투유량은 측정하기 어렵기 때문에 직접 측정하는 경우는 거의 없다(Jakob and Hungr, 2005). 대부분 경험적 관계를 통해 산출되며, 토석류 최대 침투유량은 토석류 규모와의 경험적인 관계를 통해 산출할 수 있다(Hungr *et al.*, 1984; Mizuyama *et al.*, 1992; Rickenmann, 1999). 본 연구에서는 Rickenmann(1999)에 의해 제안된 식 1을 이용하여 토석류의 최대 침투유량(Q_p , m^3/s)을 산출하였다. 본 식은 관측된 데이터를 토대로 각각의 인자에 따른 상관관계분석을 통해 얻어진 경험식이며, 쉽게 얻을 수 있는 인자들로 구성되어 있어 많은 연구자들에 의해 인용되고 있다.

$$Q_p = 0.1M^{0.833} \quad (1)$$

여기서 $M(m^3)$ 은 토석류 규모를 나타낸다. 식 (1)을 통해 계산된 최대 침투유량은 표 1에 나타내었다. 대부분 연구지역에서 침투유량은 $15.6 \sim 107.0 m^3/s$ 의 분포를 나타낸다. 대규모 토석류 재해가 발생한 우면산 지역(H)에서는 매우 큰 침투유량 $759.3 m^3/s$ 이 나타났다. Jakob(2005)는 침투유량에 따라 토석류 규모를 등급별로 분류하였다. 본 연구지역은 3등급에 해당된다. Jakob(2005)의 연구에 의하면 3등급에 해당되는 토석류의 예상 피해는 큰 건물 파괴, 콘크리트 교각 및 블록의 손상, 고속도로와 파이프라인의 손상을 가져다 줄 수 있다.

3.4 토석류 이동속도

토석류의 이동속도와 관련된 경험식 중 가장 많이 인용되는 식은 Rickenmann(1999)이 제안한 식 (2)와 같다.

$$v = 2.1Q_p^{0.33}S^{0.33} \quad (2)$$

여기서 Q_p 는 침투유량, S 는 사면경사비이다. 이 경험식은 전 세계 여러 나라의 관측치를 토대로 토석류의 전체체적(M)에 따른 침투유량(Q_p)과 발생지와 퇴적지 사이의 경사비(S) 관계를 통해 토석류의 이동속도를 경험적으로 산정하였다. 이를 통해 본 연구에서는 총 8개 토석류 발생지역의 침투유량(Q_p)과 발생지와 퇴적지 사이의 경사비를(S) 산정하여 각각의 재해 지역의 토석류 이동속도를 산정하였다. 표 1은 침투 유량, 사면경사비 및 최대 이동속도를 나타내고 있다. 평균 사면경사비는 $0.22 \sim 0.41$ 의 범위로 나타났다. 토석류 발생지(사면부)와 퇴적지(퇴적부)의 사면경사비는 각각 $0.32 \sim 0.51$ 과 $0.1 \sim 0.20$ 의 범위로 분포하는 것으로 나타났다. 우면산 토석류의 최대 이동속도는 $14.9 m/s$ 로 가장 큰 값을 나타내었다. 우면산 토석류를 제외하곤 대부분 $3.8 \sim 7.4 m/s$ 의 최대 이동속도를 나타내고 있다. 이렇게 산정된 최대 이동속도 값을 선행연구 결과와 비교 검토를 수행하였다. 그림 5는 최대 침투유량과 최대

Table 1. Physical characteristics of debris flow

Region	L/ΔH	Catchment area (m ²)	Volume (m ³)	Peak discharge (Q, m ³ s ⁻¹)	Slope ratio (S)	Maximum flow velocity (v, m/s)
A	6.4	2.98×10 ⁴	2.34×10 ³	64.1	0.22	6.7
B	3.4	2.53×10 ³	4.31×10 ²	15.6	0.26	3.8
C	5.0	9.51×10 ³	4.33×10 ³	107.0	0.31	8.4
D	3.2	1.27×10 ⁴	4.76×10 ²	17.0	0.37	4.5
E	5.7	2.76×10 ⁴	2.10×10 ³	65.8	0.24	5.9
F	3.1	3.27×10 ⁴	2.62×10 ³	70.3	0.41	7.4
G	4.4	9.64×10 ⁴	3.32×10 ³	85.7	0.30	7.4
H	4.4	8.55×10 ⁴	4.55×10 ⁴	759.3	0.29	14.9

Fig. 5. Relationship between peak discharge and maximum flow velocity of debris flow.

이동속도와와의 관계를 나타낸다. Scheidl and Rickenmann (2011), Suwa *et al.*(2003), Cui *et al.*(1999)의 선행연구에서 제시한 최대 침투유량과 최대 이동속도와와의 관계 범위와 본

연구에서 산정된 8개 지역의 최대 침투유량과 최대 이동속도와와의 관계를 함께 나타내었다. Scheidl and Rickenmann (2011)는 침투유량이 56~824 m³/s로 분포함에 따라 이동속도는 5.8~17.1 m/s로 분포하는 것으로 나타났으며, Suwa *et al.*(2003)와 Cui *et al.*(1999)는 각각의 침투유량이 22.9~123 m³/s과 1341.6~2913.9 m³/s로 분포할 때 토석류의 이동속도는 4.0~5.2 m/s와 11.1~16.7 m/s로 분포하는 것으로 나타났다. 전체적으로 침투유량이 증가함에 따라 이동속도는 또한 증가하는 경향을 나타내며, 본 연구의 침투유량과 최대이동속도와와의 관계는 선행연구 결과와 유사한 분포 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

4. 토석류의 충격압과 건물 손상과의 관계

4.1 토석류 충격압

토석류 충격압은 토석류의 최대 유량, 속도, 부피, 체적농도와 입도특성에 주로 의존한다(Zanchetta *et al.*, 2004). 토석류 충격압은 동적압력과 정적압력의 합으로 정의되며, 식 (3)과

Table 2. Description of damage to buildings and physical characteristics of debris flow

Building No.	Description	Label of HAZUS	Damage scale	Flow height (h, m)	Flow velocity (v, m/s)	Impact pressure (P, kPa)
a-1	Brick masonry	URML	Complete	0.71	3.2	27.3
b-1	Brick masonry	URML	Complete	2.70	3.5	51.5
b-2	Brick masonry	URML	Extensive	0.52	2.4	16.6
c-1	Reinforced-Concrete frame	C2L	Extensive	3.89	6.0	110.1
c-2	Reinforced-Concrete frame	C3L	Slight	1.09	2.4	22.6
d-1	Wood	W1	Complete	2.71	3.6	53.1
d-2	Wood	W1	Slight	0.40	2.3	14.3
e-1	Reinforced-Concrete frame	C3L	Moderate	0.84	3.5	32.6
f-1	Reinforced-Concrete frame	C3L	Extensive	2.88	6.0	100.4
f-2	Steel light frame	S3	Moderate	0.83	2.9	24.6
g-1	Reinforced-Concrete frame	C2L	Extensive	5.84	4.5	98.4
g-2	Reinforced-Concrete frame	C3L	Moderate	1.57	4.7	59.6
g-3	Reinforced-Concrete frame	C3L	Slight	0.59	3.8	35.2
h-1	Reinforced-Concrete frame	C2H	Extensive	5.80	8.5	201.5
h-2	Reinforced-Concrete frame	C2H	Slight	1.54	3.7	43.0

같이 표현된다(Zanchetta *et al.*, 2004; Hu *et al.*, 2012).

$$P_i = \frac{1}{2} \rho_{df} g h + \rho_{df} v^2 \quad (3)$$

여기서 $(1/2) \rho_{df} g h$ 는 평균 정적압력을 나타내며, $\rho_{df} v^2$ 은 동적 압력을 나타낸다. ρ_{df} 는 토석류의 평균 밀도, v 는 토석류의 속도, h 는 토석류의 높이를 나타낸다. h 는 토석류 총 부피와 피해지역 면적과의 관계를 통해 산정하였다.

선행연구에 의하면, 대부분 토석류 밀도(ρ_{df})는 2000~2200 kg/m³의 범위로 분포한다(Curry, 1966; Pierson, 1981, 1985; Okuda *et al.*, 1980; Li and Luo, 1997). Hu *et al.*(2012)는 토석류 발생 지역의 퇴적부에서 채취한 시료를 통해 토석류 밀도는 2000 kg/m³로 분석하였다. 이와 같은 선행연구를 바탕으로 본 연구에서 토석류 밀도는 2000 kg/m³로 가정하였다. 또한 선행 재해이력 사례에서 피해 건물 위치에서 토석류 속도와 높이를 이용하여 토석류의 충격압력을 계산하였다. 표 2는 8개 토석류 재해 지역에서 관측된 15개 건물에 대한 구조물 종류 및 손상 정도와 토석류 높이, 속도, 충격압과 같은 토석류 물리적 특성을 나타내고 있다. 구조물의 종류와 손상 특성은 4.2절에서 서술하였다.

4.2 건물손상 특성

그림 6은 8개 토석류 재해지역의 건물피해에 대한 현장사진을 나타낸다. 그림 6(A)는 전북 정읍 입압면에서 발생한 토석류 피해로 인해 손상된 건물을 나타낸다. 이로 인해 조적식 벽돌로 지어진 가옥(a-1) 1동이 완파되었다. 그림 6(B)는 경기도 용인시 처인구 모현면 능원리에서 발생한 토석류 피해 사례를 나타낸다. 건물 b-1은 완파되어 기초바닥만 남겨져 있으며, b-2 건물은 일부가 파손되었다. b-1과 b-2 건물의 구조 형식은 조적식 벽돌 구조로 조사되었다. 이와 같이 조적식 벽돌로 지어진 건물은 수평하중에 취약하기 때문에 토석류로 인해 대부분의 건물은 완파나 심각한 손상과 같은 큰 피해를 야기하는 것으로 나타났다. 그림 6(C)는 경기도 포천시 일동면 기산리에서 발생한 토석류 피해 사례를 나타낸다. c-1 건물은 보강 콘크리트 구조로 이루어진 3층 빌라 건물로 1층이 토사에 의해 매몰되었다. 건물 외벽의 토석류 흔적을 통해 토석류 높이가 2층까지 영향을 준 것으로 파악되었다. 또한 그림 6(C)의 건물 내부 사진에 보여주듯이 건물 외벽에 비해 취약한 창문을 통해 다량의 토사가 건물 내부에 유입되어 심각한 피해를 입었다. 이와 같이 토석류 진행 방향에 구조적으로 취약한 창문이 배치될 경우 심각한 피해를 야기할 수 있음을 보여준다. 그림 6(D)는 경기도 포천시 신북면 심곡리에서 발생한 토석류 피해 사례를 나타낸다. d-1 건물은 목구조로 이루어진 상업용 펜션으로 토석류에 의해 완파되었다. 그림 6(E)는 경기도 동두천시 하봉암동에서 발생한 토석류 피해 사례로 공장 건물 일부가 매몰 및 손상되었다. 그림 6(F)는 동두천시

Fig. 6. Damage to the buildings by debris flow: (A) Jeongeup, (B) Yongin, (C) Pocheon ilnongmyeon, (D) Pocheon sinbukmyeon, (E) Dongducheon habongamdong, (F) Dongducheon sangbongamdong, (G) Gwacheon, (H) Seoul.

상봉암동에서 발생한 토석류로 인해 손상된 f-1 건물을 나타낸다. 보강 콘크리트 구조와 조적식 벽을 가진 건물로 1층이 토사에 의해 일부 매몰되었으며, 건물 일부 및 벽체가 파손되었다. 그림 6(G)는 경기도 과천시 과천동에서 발생한 토석류 피해 사례를 나타낸다. g-1 건물은 보강 콘크리트 구조물로 토석류 진행 구간 한가운데 위치하여, 건물 일부 파손 및 내부가 토사로 인해 매몰되었다. 그림 6(H)는 우면산 토석류 재해로 인해 고층 아파트에 피해를 준 사례로 대규모 토사가 빠른 속도로 유입되어 건물 5층까지 피해를 주었다. 또한 건물 내부에 많은 양의 토사가 유입되어 심각한 재산과 인명피해를 입었다.

본 연구에서는 현장조사보고서, 피해 건물 현장사진, 문헌 등을 종합적으로 분석하여 건물의 손상 정도를 파악하였다. 건물 손상 정도는 완전 파괴, 심각한 손상, 보통 손상, 경미한 손상과 같이 4가지로 구분하였다. 이를 통해 총 8개 토석류 발

생지역의 15개 피해건물에 대한 손상정도를 분석하여 표 2에 나타내었다. 또한 건물 구조형식에 따른 손상정도를 파악하기 위해 피해건물의 구조형식에 대해 조사하였다. 이를 위해 HAZUS에서 제시한 구조형태 별 건축구조분류표를 참고하였다. HAZUS에서는 건물의 구조와 재료 별 높이에 따라 36개의 항목으로 나뉜다. 이를 통해 분류된 총 15개 피해건물의 구조형식을 표 2에 나타내었다. 15개의 피해건물은 조적식 벽돌구조, 목구조, 경량빔 구조, 보강 콘크리트 구조로 크게 4가지 형태로 분류된다.

4.3 토석류의 충격압과 건물 손상과의 관계

토석류 충격압과 건물 구조형식에 따라 건물의 손상정도는 차이를 보인다. 따라서 토석류 충격압과 건물 구조형식에 따른 건물 손상관계에 대한 정량적 지표를 제시하고자 한다. 이를 위해 표 2에서 분석된 8개 토석류 발생지역 15개 피해건물에 대한 토석류 충격압과 건물 손상등급 자료를 이용하여 재분류하였다. 더불어 각 건물 구조형식에 따른 건물 손상정도를 파악하기 위해 표 2에서 분류된 내용을 바탕으로 비 콘크리트 구조와 보강 콘크리트 구조로 간단히 두 부분으로 나누어 분석하였다. 여기서 비 콘크리트 구조는 조적식 벽돌구조, 목구조, 경량빔 구조를 포함한다. 이와 같이 표 3은 표 2에서 분석된 데이터를 이용하여 건물 손상 정도와 충격압과의 관계, 건물 구조형식에 따른 손상등급을 재분류하여 나타내었다.

표 3의 건물 손상에 대한 설명 및 건물 손상등급과 취약지수 관계는 Hu *et al.* (2012)와 Leone *et al.* (2011)의 연구내용을 참고하여 본 연구 현황에 맞게 수정하여 나타내었다. 총 15개 피해건물의 손상 등급은 4단계로 구분하였다. 비 콘크리트 건물의 경우 토석류 충격압이 30 kPa 이상일 때 완전 파괴,

15~30 kPa일 때 심각한 손상, 0~15 kPa일 때 경미한 손상이 발생하는 것으로 분석되었다. 이에 비해 보강 콘크리트 건물의 경우 100 kPa 이상에서 심각한 손상, 35~100 kPa일 때 보통 손상, 0~35 kPa일 때 경미한 손상을 입는 것으로 파악되었다. 이와 같이 콘크리트 건물의 경미한 손상에 대응하는 토석류 충격압은 비 콘크리트 건물에서는 완전 파괴의 손상을 가져다 줄 수 있음을 나타낸다. 또한 표 3에서는 Hu *et al.* (2012)와 Zanchetta *et al.* (2004)가 제시한 건물 손상과 토석류 충격압 관계를 본 연구와 비교하여 나타내었다. 본 연구결과와 선행연구자의 연구결과와 비교해 볼 때 손상등급이 높은 완전 파괴(complete destruction), 심각한 손상(extensive damage) 등급에서는 본 연구에서 분석된 토석류 충격압은 선행 연구 결과보다 큰 값을 나타내고 있다. 그러나 보통손상과 경미한 손상 등급에서는 본 연구결과와 유사한 패턴을 가지는 것으로 나타났다.

5. 구조물 취약함수 개발

토사재해로 인한 건물손상의 취약성 평가는 토사재해 유발 인자에 대한 물리적 특성(높이, 속도, 충격압)과 건물손상 정도에 대한 정보를 담고 있는 취약함수를 통해 평가할 수 있다. 건물에 대한 취약성은 건물손상 정도를 의미하며, 각각의 건물손상 정도에 따라 0~1사이의 값을 갖는다. 본 연구에서는 총 8개 지역의 토석류 재해이력 사례 분석을 통해 얻어진 토석류의 물리적 특성과 건물손상 정도에 대한 분석을 통해 얻어진 건물 취약지수를 결합하여 취약곡선을 생성하였다. 또한 보강 콘크리트 구조와 비 콘크리트 구조(벽돌 조적식 구조, 목구조, 경량빔 구조)로 이루어진 건물을 구분하여 취약곡선

Table 3. Classification of damage to building by debris flow

Damage classs	Damage description	Vulnerability (0-1.0)	Impact pressure(kPa)				
			Non-concrete frame (Brick masonry/ wood/Steel light frame)	Reinforced- concrete frame	Brick- concrete	Reinforced- concrete frame	Zanchetta <i>et al.</i> (2004)
					Hu <i>et al.</i> (2012)		
Complete	Partly or totally destructed, evacuation necessary, complete reconstruction	0.9-1.0	> 30	-	> 18	> 110	> 90
Extensive	Partly destructed, loss of parts of external and internal walls, evacuation necessary, reconstruction of destructed parts	0.7-0.8	15-30	> 100	-	-	35-90
Moderate	Cracks in the wall, stability not affected, reparation not urgent, flooding of the internal rooms and damage to the furnishing	0.4-0.6		35-100	6-18	35-110	< 35
Slight	Slight non-structural damage, stability not affected, furnishing or fitting damaged	0.1-0.3	0-15	0-35	0-6	0-35

(a) Vulnerability curves of flow height

(b) Vulnerability curves of flow velocity

(c) Vulnerability curves of impact pressure

Fig. 7. Debris flow vulnerability curves.

을 생성하였다. 그림 7의 (a), (b) 및 (c)는 건물 구조형식과 토석류의 높이, 속도 및 충격압과 같은 물리적 특성에 따른 건물의 취약곡선을 각각 나타낸다. 토석류의 물리적 특성인 높이, 속도 및 충격압 값이 커짐에 따라 구조물의 취약성은 비

Table 4. Vulnerability function of building structure type and physical characteristics of debris flow

Influence factor	Vulnerability function	
	Non-concrete frame (1)	Reinforced-concrete frame (2)
Flow velocity	$V = 1 - e^{(-0.018 \times v^{4.075})}$	$V = 1 - e^{(-0.064 \times v^{1.625})}$
Flow height	$V = 1 - e^{(-2.152 \times h^{1.429})}$	$V = 1 - e^{(-0.440 \times h^{0.725})}$
Impact pressure	$V = 1 - e^{(-0.004 \times p^{1.812})}$	$V = 1 - e^{(-0.0167 \times p^{0.917})}$

V : Vulnerability

v : flow velocity(m/s), h : flow height(m), p : Impact pressure(kPa)

Fig. 8. Comparison of the vulnerability curve proposed by Quan Luna *et al.* (2011) and the vulnerability curve calculated from this research.

선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 그림 7과 같이 보강 콘크리트 구조에 비해 비 콘크리트 구조물의 취약곡선은 매우 가파르게 증가하는 형태의 패턴을 갖는다. 이것으로부터 비 콘크리트 구조로 이루어진 구조물은 보강 콘크리트 구조물 보다 토석류에 취약함을 알 수 있다. 즉 건물 구조형식에 따라 구조물 취약곡선은 차이가 나고 있음을 알 수 있다. 이는 비교적 작은 규모의 토석류 재해에도 조적식 벽돌구조나 목구조 형태 건물에 큰 손상을 가져다 줄 수 있음을 의미한다. 건물 구조형식과 토석류 물리적 특성에 따른 취약곡선을 비선형 회귀분석을 수행하여 표 4와 같이 함수형태로 나타내었다. 이러한 토석류 취약함수는 토석류 재해로 피해가 발생할 가능성이 있는 지역의 건물손상 정도를 추정하는 방법으로 이용할 수 있다.

그림 8에는 토석류 충격압과 조적식 벽돌 건물에 대한 취약곡선을 선형 연구결과와 비교하여 나타내었다. Quan Luna *et al.* (2011)는 토석류 발생 지역에 대한 역해석을 수행하여 얻어진 토석류의 물리적 특성과 토석류 재해로 피해 입은 13개 건물의 손상 분석을 통해 취약곡선을 생성하였다. 대상 건물

구조형식은 조적식 벽돌 구조이다. 본 연구의 비 콘크리트 구조 형식의 취약곡선과 유사한 패턴을 나타내고 있음을 알 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 2011년 7월과 8월 사이에 발생한 총 8개 토석류 재해 지역에 대한 재해이력 사례를 분석하여 각 재해지역의 토석류 물리적 특성을 파악하였다. 또한 각 재해지역에서 피해를 입은 15개 건물에 대한 손상 특성 분석을 수행하였다. 토석류의 물리적 특성과 건물 손상정도를 바탕으로 구조물의 취약정도를 토석류의 높이, 속도 및 충격압력으로 구성된 취약함수를 표현하였다. 또한 보강 콘크리트 구조와 비 콘크리트 구조로 건물의 구조 형식에 따른 취약함수를 각각 산출하였으며, 연구결론은 다음과 같다.

- 1) 총 8개 토석류 재해 지역의 토석류 이동특성을 나타내는 $L/\Delta H$ 는 3.1~6.4의 범위로 분포한다. 선행 연구결과와 비교한 결과 소규모 토석류, 즉 사면형 토석류의 이동 특성을 나타낸다. 최대 침두유량은 토석류 규모를 이용한 경험식을 이용하여 산출하였으며, 본 연구지역에서 침두유량은 15.6~759.3 m^3/s 의 분포를 나타내었다.
- 2) 토석류 재해지역의 평균 사면경사비는 0.22~0.41의 범위로 나타났다. 토석류의 이동속도는 침두유량과 사면경사비 관계를 통한 경험식을 이용하여 구한 결과 대부분 3.8~7.4 m/s 의 최대 이동속도를 나타내고 있다.
- 3) 토석류의 충격압과 건물 손상과의 관계는 비 콘크리트 건물의 경우 토석류 충격압이 30 kPa 이상일 때 완전 파괴, 15~30 kPa일 때 심각한 손상, 0~15 kPa일 때 경미한 손상이 발생하는 것으로 분석되었다. 보강 콘크리트 건물의 경우 100 kPa 이상에서 심각한 손상, 35~100 kPa일 때 보통 손상, 0~35 kPa일 때 경미한 손상을 입는 것으로 나타났다.
- 4) 토석류의 물리적 특성인 높이, 속도 및 충격압 값이 커짐에 따라 구조물의 취약성은 비선형적으로 증가한다는 것을 알 수 있다. 또한 비 콘크리트 구조로 이루어진 구조물은 보강 콘크리트 구조물 보다 토석류에 취약함을 알 수 있다. 즉 건물 구조형식에 따라 구조물 취약곡선은 차이가 나고 있음을 알 수 있다. 산정된 취약곡선을 비선형 회귀분석을 수행하여 함수형태로 나타내었다. 이러한 취약함수는 토석류 재해로 피해가 발생할 가능성이 있는 지역의 건물손상 정도를 추정하는 방법으로 이용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연

구사업의 연구비지원(13건설연구S04) 및 2012년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단-공공복지안전사업의 지원을 받아 수행된 연구(No. 2012M3A2A1050977)이며, 이에 감사드립니다.

References

- Curry, R.R. (1966) Observation of Alpine Mudflows in the Ten-mile Range. *Central Colorado. Geol. Soc. Am. Bull.*, 77, pp. 771-776.
- Cui, P., Wei, F.Q., and Li, Y. (1999) Sediment Transported by Debris Flow to the Lower Jiansha River. *International Journal of Sediment Research*, Vol. 14, No. 4, pp. 67-71.
- Choi, W.I. (2013) *A Study on Development of Vulnerability Functions Based on Characteristics of Debris flow and Structure in Korea*, Ph.D. dissertation, University of Seoul, Korea, pp. 9-13.
- Fell, R., Ho, K.K.S., Lacasse, S., and Leroi, E. (2005) A Framework for Landslide Risk Assessment and Management. in: *Landslide Risk Management*, Edited by: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., and Eberhardt, E., Taylor & Francis, London, pp. 533-541.
- Fuchs, S., Heiss, K., and Hubl, J. (2007) Towards an Empirical Vulnerability Function for Use in Debris Flow Risk Assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7, pp. 495-506.
- Haugen, E.D. and Kaynia, A.M. (2008) Vulnerability of Structures Impacted by Debris Flow. in: *Landslides and Engineered Slopes*, Edited by: Chen, Z., Zhang, J.M., Ho, K., Wu, F.Q., and Li, Z.K., Taylor & Francis, London, pp. 381-387.
- Hungr, O., Morgan, G.C., and Kellerhals, R. (1984) Quantitative Analysis of Debris Torrent Hazard for Design of Remedial Measures. *Can. Geotech. J.*, 21, pp. 663-677.
- Hu, K.H., Cui, P., and Zhang, J.Q. (2012) Characteristics of Damage to Buildings by Debris Flows on 7 August 2010 in Zhouqu, Western China. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, pp. 2209-2217.
- Iverson, R.M. (1997) The Physics of Debris Flows. *Rev. Geophys.*, 35, pp. 254-296.
- Jakob, M., Stein, D., and Ulmi, M. (2012) Vulnerability of Buildings to Debris Flow Impact. *Nat. Hazards*, 60, pp. 241-261.
- Jakob, M. and Hungr, O. (2005) *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer, Berlin, 424-434.
- Jakob, M. and Weatherly, H. (2005) Debris Flow Hazard and Risk Assessment. in: *Landslide Risk Management*, Edited by: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., and Eberhardt, E., Taylor & Francis, London, pp. 533-541.
- Jang C.B. (2014) *A Study on Behavior Characteristics and Scale of Debris Flow in Korea*, Master's Thesis, Kangwon National University, Korea, pp. 54-65.
- Kim, K.S. (2008) Characteristics of Basin Topography and Rainfall Triggering Debris flow. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 5C, pp. 263-271.
- Li, J. and Luo, D. (1981) The Formation and Characteristics of Mudflow and Flood in the Mountain Area of the Dachao River and its Prevention. *Z. Geomorphol. N.F.*, 25, pp. 470-484.
- Li, J., Yuan, J., Bi, C., and Luo, D. (1983) The Main Features of the Mud Flow in Jiang-Jia Ravine. *Z. Geomorphol. N.F.*, 27,

- pp. 325-341.
- Leone, F., Aste, J.P., and Leroi, E. (1996) Vulnerability Assessment of Elements Exposed to Mass-movement: Working Toward a Better Risk Perception. *A.A. Balkema In: Senneset K (ed) Landslides*, Vol. 1, pp. 263-269.
- Lee M.G., and Kim Y.T. (2013) Movement and Deposition Characteristics of Debris Flow According to Rheological Factors. *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 29, No. 5, pp. 19-27.
- Mizuyama, T., Kobashi, S., and Ou, G. (1992) Prediction of Debris Flow Peak Discharge. in: *International Symposium Interpraevent*, Bern, pp. 99-108.
- Okuda, S., Okunishi, K., and Suwa, H. (1980) Observation of Debris Flow at Kamikamihori Valley of Mt. Yakedake. In: *Okuda, S., Suzuki, T., Hirano, K., Okunishi, M., Suwa, H. (Eds.), Third Meeting of IGU Commission on Field Experiments in Geomorphology*, Japan, pp. 116-139.
- Scheidl, C. and Rickenmann, D. (2011) TopFlowDF - A Simple GIS Based Model to Simulate Debris-Flow Runout on the Fan. *5th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction and Assessment*, Padua, Italy, 14-17 June 2011, pp. 253-262.
- Suwa, H., Akamatsu, J., and Nagai, Y. (2003) Energy Radiation by Elastic Waves from Debris Flows. *Proc. 3rd Inter. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, Edited by: D. Rickenmann & G. Wieczorek, Balkema, pp. 895-904.
- Pierson, T.C. (1981) Dominant Particle Support Mechanisms in Debris Flows at Mt. Thomas, New Zealand, and Implication for Flow Mobility. *Sedimentology*, 28, pp. 49-60.
- Pierson, T.C. (1985) Initiation and Flow Behavior of the 1980 Pine Creek and Muddy River lahars, Mt. St. Helens. *Washington. Geol. Soc. Am. Bull.*, 96, pp. 1056-1069.
- Quan Luna, B., Blahut, J., van Westen, C.J., Sterlacchini, S., van Asch, T.W.J., and Akbas, S.O. (2011) The Application of Numerical Debris Flow Modelling for the Generation of Physical Vulnerability Curves. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, pp. 2047-2060.
- Rickenmann, D. (1999) Empirical Relationships for Debris Flows. *Nat. Hazards*, Vol. 19, No. 1, pp. 47-77.
- Uzielli, M., Nadim, F., Lacasse, S., and Kaynia, A.M. (2008) A Conceptual Framework for Quantitative Estimation of Physical Vulnerability to Landslides. *Eng. Geol.*, 102(3-4), pp. 251-256.
- You, B.O., Chang, B.S., Choi, S.I., and Choi, Y.K. (2006) Debris flows Remediation along the Highway in 2006. *Korean Geo-Environmental Conference 2006*, September 22, 2006, pp. 115-127.
- Winter, M.G., Macgregor, F., and Shackman, L. (2005) Scottish road network Landslides study: Debris flow Types and Mechanisms. *Scottish Executive*, pp. 45-67.
- Zhang, S. (1993) A Comprehensive Approach to the Observation and Prevention of Debris Flows in China. *Nat. Haz.*, 7, pp. 1-23.
- Zanchetta, G., Sulpizio, R., Pareschi, M.T., Leoni, F.M., and Santacroce, R. (2004) Characteristics of May 5-6, 1998 Volcaniclastic Debris-flows in the Sarno Area of Campania, Southern Italy: Relationships to Structural Damage and Hazard Zonation. *J. Volcanol. Geoth. Res.*, 133, pp. 377-393.

Received	July 25, 2014
Revised	July 28, 2014
Accepted	September 1, 2014