

## 흙사면의 체적함수비 계측을 통한 사면파괴 예측기법 개발

김만일<sup>1\*</sup> · Makoto Nishigaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>안동대학교 지구환경과학과

<sup>2</sup>Okayama 대학교 토목공학과

### Slope Failure Predicting Method Using the Monitoring of Volumetric Water Content in Soil Slope

Man-Il Kim<sup>1\*</sup> and Makoto Nishigaki<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Earth and Environmental Sciences, Andong National University

<sup>2</sup>Dept. of Environmental and Civil Design, Okayama University, Japan

---

강우에 의한 사면파괴의 초기단계 및 과정을 규명하기 위하여 실내 사면모델 시험결과를 분석하였다. 이 파괴 초기단계와 관련된 수리학적 상호관계를 파악하기 위해 인공강우 실험동안 사면모델 내 체적함수비 변화를 측정하는데 목적을 두었다. 사면파괴의 과정은 인공강우동안 사면 하단부의 유출면 발달에 의해 파괴를 발생시키는 요인으로 작용하였다. 따라서 국부적인 사면파괴를 예측하기 위해서는 강우에 의해 발생된 침투수의 침투특성에 대한 장기적인 계측이 매우 중요하다. 사면 내에서 강우에 의한 침윤선의 침투 및 지하수위 상승과 밀접한 연관성을 갖는 체적함수비 변화를 3가지의 침투변화(phase I, phase II, phase III)로 나누어 사면파괴를 계측할 수 있는 수리학적 측면으로 접근하였다. 따라서 체적함수비가 급격히 증가하는 phase III 단계부터는 사면파괴 발생 가능성이 매우 증가함을 파악하였다. 그러므로 사면 내 체적함수비 변화를 연속적으로 계측함으로써 강우에 의한 사면파괴의 발생을 효율적이고 실질적으로 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

**주요어** : 강우유도, 체적함수비, 사면파괴 예측기법

This study presents the results of a series of laboratory scale slope failure experiments aimed at clarifying the process and the condition leading to the initiation of rainfall-induced slope failures. For the evaluation of hydrologic response of the model slopes in relation the process of failure initiation, measurements were focused on the changes in volumetric water content during the initiation process. The process leading to failure initiation commences by the development of a seepage face. It appears reasonable to conclude that slope failures are a consequence of the instability of seepage area formed at the slope surface during rainfall period. Therefore, this demonstrates the importance of monitoring the development seepage area for useful prediction about the timing of a particular failure event. The hydrologic response of soil slopes leading to failure initiation is characterized by three phases (phase I, II and III) of significant increase in volumetric water content in association with the ingress of wetting front and the rise of groundwater level within the slope. The period of phase III increase in volumetric water content can be used to initiate advance warning towards a failure initiation event. Therefore, for the concept outlined above, direct and continuous monitoring of the change in volumetric water content is likely to provide the possibility for the development of a reliable and effective means of predicting the occurrence of rainfall-induced slope failures.

**Key words** : rainfall-induced, volumetric water content, slope failure monitoring concept

---

\*Corresponding author: mikim@andong.ac.kr

## 서 론

강우에 기인하는 산사태는 많은 나라에서 중요한 재해로 인식되고 있다. 이러한 사면파괴의 발생은 매년 수많은 인명피해와 생활터전을 위협하고 있는 현실에 직면해 있다. 자연사면과 인공사면에 대한 산사태 등의 사면파괴 메카니즘을 파악하기 위한 수많은 연구들은 강우 조건에 의한 사면파괴의 거동을 이해하기 위한 공학적인 연구들이 수행되었다(Johnson and Sitar, 1990; Anderson and Sitar, 1995; Rahardjo *et al.*, 1998). 강우 강도에 기인하는 산사태의 원인은 주로 지하수위 상승 및 간극수압의 증가와 밀접한 관계를 가지고 있는 것으로써 이는 사면파괴 유형에 있어 가장 밀접한 원인 요소로 작용한다. 또한, 강우에 의한 침투수의 침투거동 파악과 불포화 지반매질 내에서의 이들의 영향은 사면 안정성 평가에 매우 중요하다. 따라서 이들을 평가하기 위해서는 사면 현장에서 강우에 의한 침투수의 영향을 민감하게 받는 지하수위의 측정이 반드시 필요하지만 현장 여건상 지하수 측정이 불리할 경우에는 강우에 의해 발생되는 침투수의 침윤선 거동 측정을 통하여 사면 안정성 평가와 사면 설계에 있어 중요한 설계 인자로서 반영할 수 있다(Sun *et al.*, 1998).

우리나라의 주요 자연재해 발생 요인으로 작용하는 태풍, 호우 및 폭풍우를 비교하면 폭풍은 연중 비교적 고르게 발생하고 있으나 태풍과 호우는 거의 6월에서 9월 사이에 집중적으로 발생하여 전체 88.8% 정도를 차지한다. 또한 지형적으로 국토의 2/3 이상이 산악지형으로 이루어져 호우에 의한 유출물이 대단히 크기 때문에 이로 인한 산사태 등의 재해가 많이 발생하는 실정이다. 태풍과 집중호우가 집중되는 시기에 전국적으로 자연사면과 인공절취사면 등지에서 산사태로 인하여 다수의 인명피해가 발생하고 있다. 또한 산사태 발생빈도를 행정구역으로 구분해 보면 경기도와 강원도가 전체 산사태의 50% 이상을 차지하고 있으며 평균 일강우량이 210 mm 이상에서 산사태가 발생하는 것으로 나타났다(행정자치부·국립방재연구소, 1999).

사면파괴 예측에 있어 경험적·통계적 방법이 널리 이용되고 있으나 수리지질학적 특성에 대한 계층자료 등이 충분하지 않아 이들 물성치에 대한 체계적인 자료 수집이 반드시 병행되어야 할 것이다. 이를 보완하기 위해 누적 강우량과 강우 강도에 대한 통계적 자료처리를 통해 사면파괴를 예측하는 다양한 연구들이 수행되었다(Kim *et al.*, 2004; Elsen *et al.*, 2003). 일반적으로 토

층 및 지반의 변형 매개체를 대상으로 강우의 침투는 지반 내 간극수압의 상승, 침투수로 인한 지반의 함수량 증가로 흙의 전단강도 저하, 표면유수 침투로 인한 표층부의 침식 및 파이핑(piping) 현상에 의한 국부파괴 등이 발생하여 사면이 분포하는 전반적인 원지반의 평형 상태를 붕괴시킨다. 특히 사면파괴에 있어 전단강도 감소 내지 전단응력 증가에 의해 크게 지배 받는 것으로 알려져 있다(Abramson *et al.*, 1996). 강우조건에 의한 사면파괴 초기과정을 인지하기 위해서는 파괴과정의 정량적인 분석 수행과 파괴 발생에 대한 물리적 기반의 예측 시스템의 개발이 필요하다. 따라서 이러한 일련의 과정들을 통해 사면의 초기 파괴 과정을 설명할 수 있는 중요한 정보를 획득할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 강우 조건에 따른 사면 초기 파괴 형상 및 과정을 파악하기 위하여 실내시험을 수행하였다. 파괴 초기의 과정들을 사면파괴 양상과 수리적 관계를 평가하기 위해 실내 모델사면에 대한 시험방법은 강우 초기 과정 중에 사면 내 함수비 변화량과 사면 하단부(toe part) 유출발생 지점 주변 사면거동 변화를 지속적으로 측정하였다. 특히 사면모델의 수리적 반응, 파괴 초기 과정, 파괴 초기에 발생하는 함수비 측정 및 파괴 초기의 메카니즘의 분석에 중점을 두었다. 또한 강우에 의해 발생된 침투수 거동이 사면모델 내 함수비 변화에 미치는 영향을 분석하여 강우에 의한 사면파괴 예측기법에 대해서도 함께 검토하였다.

## 시험장치 및 방법

### 시험장치

사면파괴 모형조의 크기는 200×100×150 cm로써 두께 2 cm의 아크릴판으로 이루어진 전면부를 제외하고는 전체적으로 0.4 cm 두께의 철판으로 제작되었다. 전면부를 아크릴판으로 제작한 것은 강우 강도에 따른 사면의 파괴 형상, 수위 및 침투수의 변화를 원활히 파악하기 위함이다. 또한 전면부 우측면에 25 cm 높이에 배수 아크릴판(drainage acrylic board)을 설치하여 모델 사면 내 수위 분포를 일정하게 유지할 수 있도록 고안하였다(Fig. 1).

Fig. 2는 사면모델에 각기 다른 위치에 설치된 측정장치 및 인공강우 장치 설치 개요도를 나타낸 것이다. 인공강우에 의해 발생된 침투수의 거동을 흙매질 내 체적함수비 변화로부터 측정하기 위한 장치인 Amplitude Domain Reflectometry (ADR) 측정센서는 사면 표층에

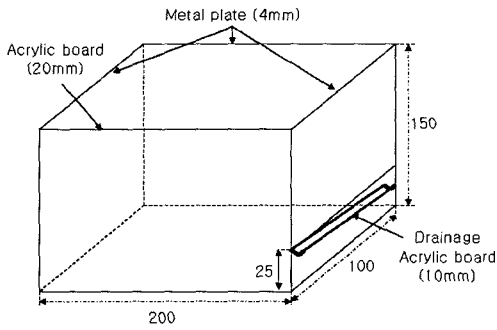


Fig. 1. Outline of slope failure tank (unit: cm).

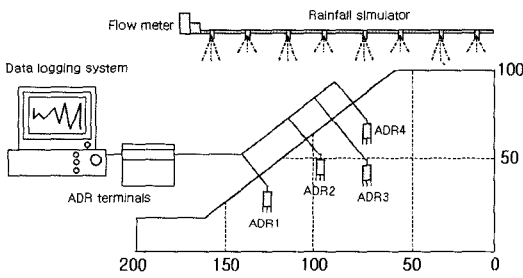


Fig. 2. Configuration of Amplitude Domain Reflectometry sensors in slope model experiment (unit: cm).

서 수직방향으로 15 cm(ADR 1, 2, 4)와 45 cm(ADR 3) 깊이에 각각 매설하였다. 이와 같이 사면모델에서 측정센서의 설치심도를 일정하게 설정한 것은 인공강우에 의해 사면 표층 유출과 사면 내 침투수의 관계를 상호 비교하기 위해 3개의 ADR 측정센서를 사면 표층과 수직방향으로 동일한 심도에 설치하였으며, 나머지 1개의 측정센서는 침투수에 의해 수위 변화를 파악하기 위함이다. Fig. 3은 ADR 측정센서의 모식도로써 매질의 체적함수비 계측은 매질이 가지는 전자기적 특성인 유전율 반응을 이용해 측정된다. 본 ADR 측정센서의 측정부는 직경 3 mm의 측정로드(shield rod와 signal rod)의

선단부에서 이루어진다. 이 측정센서는 사용이 간편하고 정확한 체적함수비 측정이 가능한 ADR 측정센서 형태로써 ThetaProbe ML1(Delta Device model)을 사면모델 내에 직접 매설하여 운영하였다. 이 ADR 측정센서는 0.5sec 이하의 측정 시간으로 0에서 약 0.5 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>(교정시 최소 ±0.02 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>의 허용 오차 범위를 가짐)의 범위 내에서 체적함수비 측정이 가능한 장점을 가지고 있다. 반면에 센서 운영에 있어 흙매질 내 염분 내지 측정 로드부 주변에 공기가 존재할 경우에는 이들에 의해 측정치에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Miller and Gaskin, 1997).

측정센서의 직경이 4 cm이기 때문에 사면모델을 제작한 후 직경 4.5 cm인 핸드오거(hand auger)를 이용하여 일정 깊이까지 천공하여 측정센서를 매설하였다. 이때 측정센서 선단부 로드의 견고한 접촉 상태를 형성하기 위하여 측정센서 둘레에 실리콘 그리스(silicon grease)를 발라 사면의 천공 주변부와 측정센서를 최대한 밀착되도록 설치하였다. 또한 매설이 끝난 후 천공된 구멍은 흙으로 덮어 원래 사면모델 상태로 복구하였다. 각 측정센서의 측정시간 간격은 1분으로 고정하여 인공강우에 의한 사면 내 침투수의 변화를 직접적으로 측정할 수 있도록 하였다.

또한 인공강우 장치는 유량을 측정할 수 있는 유량계와 농약살포용 노즐을 20 cm 간격으로 8개를 설치한 후 정수위 물탱크에 직접 연결하여 인공강우량을 조절할 수 있도록 하였다. 인공강우 살포장치는 사면모델 상단부 25 cm 높이에 설치하였다. 이 정수위 물탱크는 전동식으로 작동되면 최대 약 8 mm/hour의 인공강우를 발생시킬 수 있다. 본 시험에서는 인공강우량을 7.5 mm/hour로 고정하여 사면모델 전구간에 대해 사면이 파괴될 때까지 지속적으로 인공강우를 발생시켜 시험을 수행하였다.

사면모델에 측정센서를 설치하기 전에 화강풍화토와 강모래에 대한 임의의 체적함수비에 대한 측정센서의 교

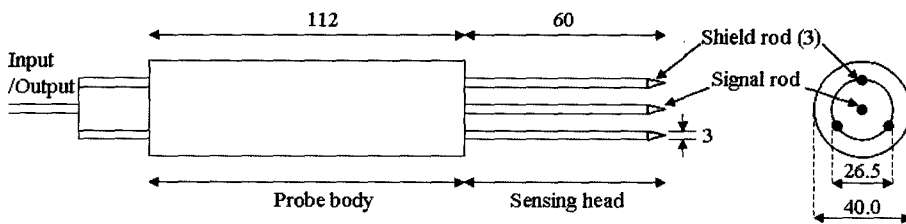


Fig. 3. Schematic diagram of Amplitude Domain Reflectometry sensor; ThetaProbe ML1 [unit: mm].

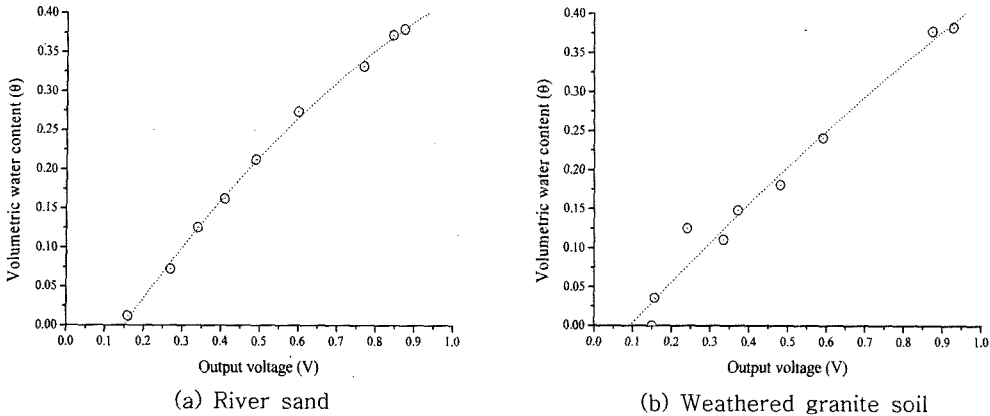


Fig. 4. Calibration curves for Amplitude Domain Reflectometry (ADR) sensor.

정(calibration)작업을 수행하였다. Fig. 4는 체적함수비와 측정전압과의 관계를 보여주고 있다. 이들의 상관관계로부터 교정방정식(calibration formula)을 유도하여 측정센서에서 측정된 측정전압으로부터 체적함수비는 다음의 관계를 이용하여 산정할 수 있다.

강모래:

$$\theta_{RS} = -0.2423V^2 + 0.7704V - 0.11 \quad [R^2 = 0.998] \quad (1)$$

화강풍화토:

$$\theta_{WGS} = -0.0882V^2 + 0.5529V - 0.0511 \quad [R^2 = 0.974] \quad (2)$$

여기서  $V$ 는 측정센서에서 측정된 전압(voltage)이며  $\theta$ 는 체적함수비(volumetric water content)를 의미한다. 각 흙시료에서 유도된 교정방정식을 이용하여 측정센서에서 측정된 측정치를 적용하여 대상 흙시료에 대한 체적함수비를 정량적이고 신속하게 파악할 수 있다.

### 흙시료 물리적 특성

본 연구에 사용된 흙시료인 강모래(river sand)와 화강풍화토(weathered granite soil)의 기본 물성치를 파악하기 위하여 체분석(sieve test), 전단강도시험(shear strength test), 정수두 투수시험(constant head permeability test) 등을 수행하였다. 이들 각 시험들은 일본표준시험법(Japan Industrial Standard, JIS)에 근거하여 각기 실시하였다.

체분석시험에서 강모래의 유효입경(effective particle size,  $D_{10}$ )과 균등계수(uniformity coefficient,  $D_{60}/D_{10}$ )는 0.175 mm와 7.14, 화강풍화토는 0.157 mm와 4.63으로 각기 측정되었다. 비중시험(JIS A 1202-1990)에서는

두 흙시료 모두 2.60의 값으로 나타났다. 최대건조밀도 측정시험(JIS A 1210-1990)에서는 강모래가 14.5%의 최적함수비(optimum water content)일 때  $1.80 \text{ mg/m}^3$ , 화강풍화토가 11.8%의 최적함수비에서  $2.01 \text{ mg/m}^3$ 으로 산정되었다. 등압밀배수 삼축압축시험(isotropic consolidated drained triaxial compression test)에 의한 흙의 전단강도시험에서 강모래는 내부마찰각이  $50^\circ$ 로써 결합력이 0 kPa로 산정되었으며, 화강풍화토의 경우에는 내부마찰각  $37.2^\circ$ 로 결합력이 0.04kPa로 측정되었다. 정수두 투수시험(JIS A 1218-1990)을 통해 포화된 흙시료에 대한 수리전도도(hydraulic conductivity,  $k_s$ )는 강모래가 공극률 0.45에서  $6.4 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$ , 화강풍화토는 공극률 0.34에서  $7.2 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 로 각기 산정되었다.

### 사면모델 제작

사면모델은 화강풍화토와 강모래로 제작되었으며, 실험 조건은 일반적으로 알려진 흙의 불균질 특성 및 수리전도도 등은 고려하지 않고 단지 균질한 사면으로만 실험 조건을 고려하였다. Fig. 5는 각 사면모델의 초기 제작 조건으로써 사면모델 높이는 사면의 선단부로부터 75 cm 높이를 가지며 사면 폭은 100 cm로 일정하게 제작하였다. 또한 두 사면모델에서 사면 경사각의 차이에 따라 사면 상단부의 길이가 약 20 cm의 차이를 갖도록 하였다.

사면 선단부는 지하수위를 고려하여 25 cm 높이로 제작하였으며, 사면모델 실험 시 지하수위는 항상 사면 선단부 이상을 넘지 않도록 고안하였다. 각 사면의 경사각은 모래 사면이  $45^\circ$ , 화강풍화토 사면이  $35^\circ$ 가 되도록 하였으며, 이는 비교적 낮은 사면에서 파괴가 발생하는

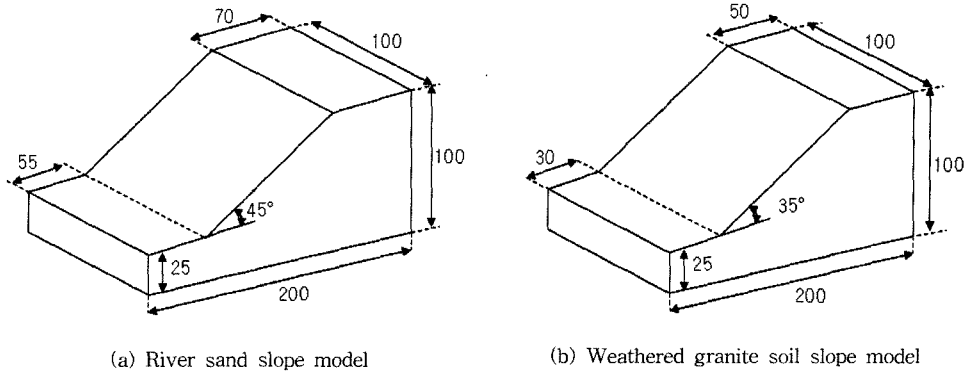


Fig. 5. Profiles of each soil slope model.

자연 흙사면의 경사를 대표하는 것을 알려져 있기 때문에 실험 조건으로 적용하였다(Campbell, 1975). 또한 사용된 흙시료에 대한 물성치는 각기 실내시험을 통해 Table 1과 같이 산정되었다.

### 결과 및 토의

#### 사면모델의 수리적 반응

인공강우에 의한 수리적 반응 해석은 흙사면 내에서의 체적함수비 측정과 가시적인 사면모델 표층부의 파괴 거동으로 파악할 수 있다. 모든 시험에서 관찰된 것과 같이 인공강우의 침투거동은 사면 내에서의 수위 상승과 사면 하단부에서 침투된 강우의 표면 유출 발생 및 유출량이 증가하는 것으로 나타났다. 본 시험에서 측정된 각 흙시료 사면에 대한 사면 하단부 포화 및 파괴의 양상을 인공강우 살포 시간과 수위 변동폭의 관계로 정리하여 Table 2와 같이 나타내었다.

#### 사면모델 파괴형상

사면파괴 과정은 흙사면의 수리적 반응과 연관시켜 분석할 필요가 있을 뿐만 아니라 각기 다른 형태의 파괴 형상을 보여주고 있다. 각 시험에 대한 3차원적 파괴형상을 Fig. 6에 도시하였다. 강모래에 대한 시험(Fig.

Table 2. Salient features at toe saturation and failure.

Soil type	River sand	Weathered granite soil
Time for toe saturation (min)	54	420
Water level at toe saturation* (cm)	34.0	27.5
Time to failure** (min)	36	10 hours

\*Under the slope crest.

\*\*After the first toe saturation.

6(a)에서는 인공강우 45분이 경과한 후부터 사면모델의 상단부(crest part)에서 인장균열(tension crack)과 미세한 초기 슬라이딩(sliding)이 발생하기 시작하였다. 사면모델 하단부(toe part)에서부터 사면을 통해 침투한 강우 유출이 개시됨과 동시에 Stage 1과 같이 하단부 파괴가 진행되었다. 그 후 이 하단부 파괴는 유출부가 점진적으로 상단부 진전되어 사면모델 전체적으로 약 15 cm 두께의 활동면(sliding face)을 형성시키며 인장균열이 발달하면서 최종적으로 사면의 파괴를 발생시켰다(Stage 2).

화강풍화토에 대한 시험(Fig. 6(b))에서는 대표적인 인장균열이 발달한 2시간 후에 사면모델의 두 지점에서 얇은 활동면이 발달하였다. 첫 번째 활동면인 Stage 1에서는 사면 하단부 약 15 cm 윗부분에 나타났으며, 이는 주변 사면에 분포하는 흡입자 사이에서 마찰력(friction)

Table 1. Properties of experimental slopes.

Test No	Soil used	a (deg.)	$\rho_d$ (kg/m <sup>3</sup> )	$D_r$ (%)	e	Average $\theta_{mit}$		$\theta_{sat}$ *
						Base	Middle	
1	RS	45	1.48	60.81	0.82	0.08	0.08	0.45
2	WGS	35	1.78	61.59	0.52	0.27	0.20	0.34

where a is slope model angle, and  $\theta_{mit}$  and  $\theta_{sat}$  are  $\theta_{initial}$  and saturated volumetric water content.

\*calculated from void ratio.

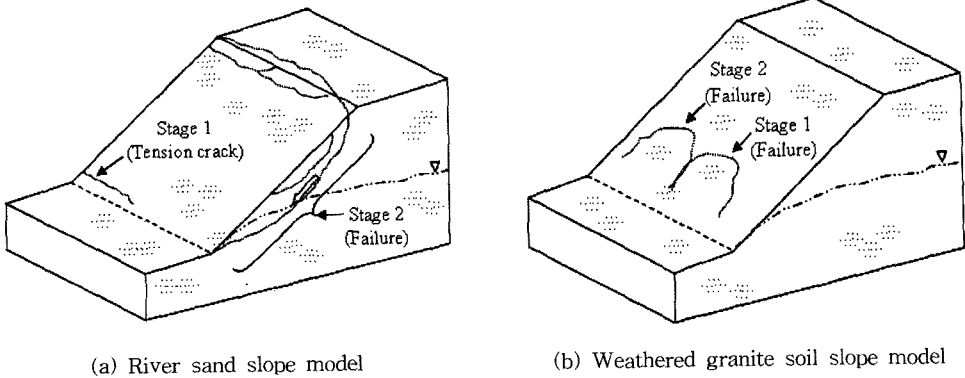


Fig. 6. Overall failure sequences with the traces of failure line.

과 겉보기 흡착력(apparent cohesion)에 의해 국부적 파괴가 진행된 것으로 판단된다. 이러한 원인으로서는 인공강우에 의한 유출부가 Stage 1의 파괴 초기에 사면 하단부 15 cm 윗부분에서 이미 발달되어 있었기 때문이다. 그리고 Stage 1이 발생되고 약 7시간이 경과한 후에 Stage 2가 발생되었다. 이와 같이 사면파괴 초기와 파괴 발생 사이에서 시간적 큰 차이를 보이는 것은 겉보기 흡착력에 기인하는 것으로써 이것은 흙사면의 국부적 안정성에 매우 중요한 요소로 작용함을 의미한다.

시험 결과에서 사면모델의 파괴 양상은 전체적인 사면 표층(강모래 사면) 내지 사면 표층 부근에서 국부적인 흩체(화강풍화토 사면) 주변에서 최대 15 cm 깊이 내외로 비원호 활동파괴(non-circular sliding failure)를 보였다. 이러한 일반적인 사면파괴 형태는 자연 내지 인위적으로 형성된 사면에서 강우에 기인하는 파괴 형상을 가지는 특징들을 가지고 있다(Baum and Chleborad, 1999).

강모래로 형성된 사면모델에서 사면 하단부의 바로 윗부분에서 인장균열의 성장으로 인해 비원호 파괴가 발

생되었으나 화강풍화토 사면모델의 경우에는 비교적 낮은 깊이를 갖는 원호 파괴 형태를 보였다. 본 연구에서 주목할 만한 사면파괴 양상은 사면 하단부가 불포화 조건을 가지고 있기 때문에 하단부에서의 파괴 형태는 나타나지 않았다. 이러한 파괴 양상으로 볼 때 사면의 포화된 지점보다는 사면 하단부 주변에서 항상 파괴 거동이 발생되지는 않는다는 것으로 해석된다.

**체적함수비 변화에 따른 사면파괴**

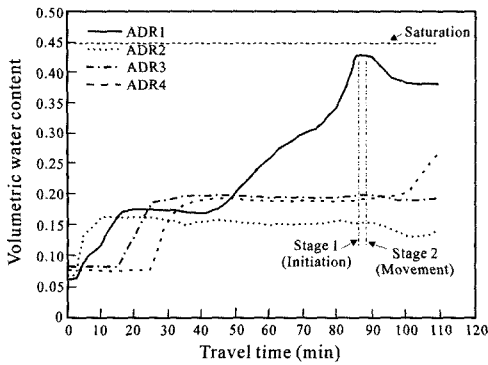
인공강우에 의한 사면모델의 체적함수비 변화를 4지점에 설치된 측정센서를 통하여 관측하고 이를 사면파괴 초기단계의 특성을 함께 비교 검토하였다. Table 3은 인공강우를 살포하기 전 단계, 파괴 초기 단계, 그리고 실험을 종료하기 직전의 체적함수비 변화와 포화도의 관계를 나타낸 것이다.

시험이 종료된 시점에서의 포화도 측정치가 앞서 수행된 물성시험에서의 포화도 측정치보다 다소 낮게 측정되었다. 이렇게 포화도 차이를 보이는 것은 불포화상태에서 포화상태로 변화하면서 공극의 분포가 기하학적

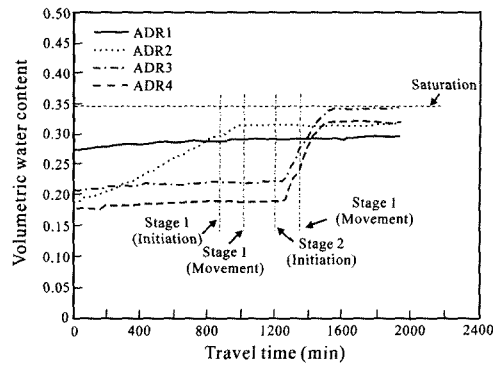
Table 3. Summary of volumetric water content records and the corresponding degree of saturation.

Exp. stages	Exp. No	Measured volumetric water content				Corresponding degree of saturation*			
		ADR1	ADR2	ADR3	ADR4	ADR1	ADR2	ADR3	ADR4
Start of experiment	RS	0.062	0.067	0.081	0.075	13.78	14.09	18.00	16.67
	WGS	0.270	0.190	0.214	0.193	79.48	55.91	62.94	56.65
First failure initiation	RS	0.433	0.157	0.203	0.195	96.22	34.89	45.11	43.33
	WGS	0.284	0.283	0.222	0.189	83.38	83.24	65.41	55.61
At first failure	RS	0.432	0.157	0.204	0.198	96.00	34.89	45.33	44.00
	WGS	0.284	0.302	0.222	0.189	83.66	88.75	65.41	55.61
At end of experiment	RS	0.388	0.146	0.200	0.274	86.22	32.44	44.44	60.89
	WGS	0.288	0.303	0.331	0.307	84.78	89.18	97.06	90.04

\*Calculated values



(a) River sand slope model



(b) Weathered granite soil slope model

Fig. 7. Changes of volumetric water content at different stages of failure initiation in each slope model experiment.

인 변화 내지 공극 내 분포하는 공기가 침투수와 공간적 치환이 이루어지지 않고 공극 내 그대로 공기가 머물러 있기 때문인 것으로 판단된다. 이처럼 측정센서의 로드부에 공기와 접해 있을 경우에는 측정치가 다소 낮게 나타나는 단점을 갖고 있는 것으로 판단된다.

사면모델에 설치 운영된 4개의 측정센서에서 측정된 체적함수비 변화를 Fig. 7에 도시하였다. 각 측정 지점에서 나타난 것과 같이 지속적인 인공강우 발생에 따라 모델사면으로의 침투수 거동을 체적함수비 변화로 충분히 확인할 수 있으며, 또한 체적함수비가 증가할수록 두 사면모델에서 사면파괴가 발생함을 인지할 수 있다. 특히 측정센서의 설치심도가 사면 하단부로 갈수록 체적함수비 증가폭이 사면 상단부보다 월등히 빨리 진행된 것을 두 사면모델을 통해 확인하였다. 이러한 경향은 인공강우 살포를 시작함과 동시에 사면 표층부를 따라 표류수가 사면 하단부로 급격히 집중됨에 따라 상단부보다 상대적으로 높은 측정치를 보이는 것으로 사료된다. 따라서 ADR 3과 4의 경우 인공강우의 침투수에 의해 서면 영향을 받는 것을 알 수 있다.

**사면파괴 초기단계에서의 포화도 양상**

흙매질의 공극 내 분포하는 공극수의 정확한 계측 결과는 사면파괴가 발생할 수 있는 가능성을 명료하게 지시하는 가장 중요한 물성치이다. 사면 하단부의 체적함수비는 파괴 초기단계에서 거의 포화상태에 도달함과 동시에 파괴가 발생된다. 점착력이 작은 흙사면에서 파괴 초기단계로 진전하기 위해서는 약 95% 이상의 포화도 범위를 초과해야만 사면파괴가 발생하는 것은 아니다. 반면, 점착력을 가진 흙사면에서 파괴 발생은 포화도가

점진적으로 상승할수록 인장균열의 성장으로 인해 사면 하단부에서 서서히 사면파괴가 진행된다.

Fig. 8은 강우가 표층부를 통해 지반 내로 침투되는 동안 체적함수비 변화 양상을 도시한 것으로써 강우가 침투하는 동안 침윤선(wetting front)의 침투 양상에 따라 흙매질의 체적함수비가 증가하는 형태를 phase I, phase II, phase III과 같이 3가지 형태로 구분하여 나타내었다(김만일 등, 2005). 여기서 phase I은 표층부에서 측정센서 선단부까지 침투수의 침투 심도 내지 시간을 의미하며, phase II는 측정센서 선단부에서 불포화층까지의 심도 내지 시간 영역을 의미하다. Phase I과 II 범위는 모두 불포화된 다공질매질로써 강우에 의해 충분히 물의 침투 이동이 가능한 영역이다. 또한 phase III는 침윤선이 불포화층까지 도달하여 사면파괴 발생 가능성을 포함하고 있는 영역이다.

따라서 침윤선 거동 특성을 토대로 흙사면의 사면파괴 예측 및 경보 시스템을 구축할 경우에는 측정센서 설치 심도까지 침윤선이 도달(phase I,  $t_0 \sim t_1$ )하였을 때부터 불포화층 내지 기반암까지의 침윤선 침투 심도 내지 시간인 phase II ( $t_1 \sim t_2$ )가 사면파괴 경보 시점이 된다. 최종적으로 침윤선이 기반암과 접촉하였을 때(phase III,  $t_2 \sim t_{\infty}$ )부터는 사면파괴가 발생할 확률이 매우 높아지는 시점으로써 이에 대한 적극적인 대처가 반드시 필요하다. 이러한 예측 경보 시스템 구축을 위해서는 사면파괴 초기단계를 효과적으로 예측하기 위한 체적함수비 측정 장치의 최적 설치 심도를 결정하는 것이 가장 중요할 뿐만 아니라 대상지역의 매질에 대한 체적함수비 등과 같은 수리학적 물성치를 반드시 산정할 필요가 있다.

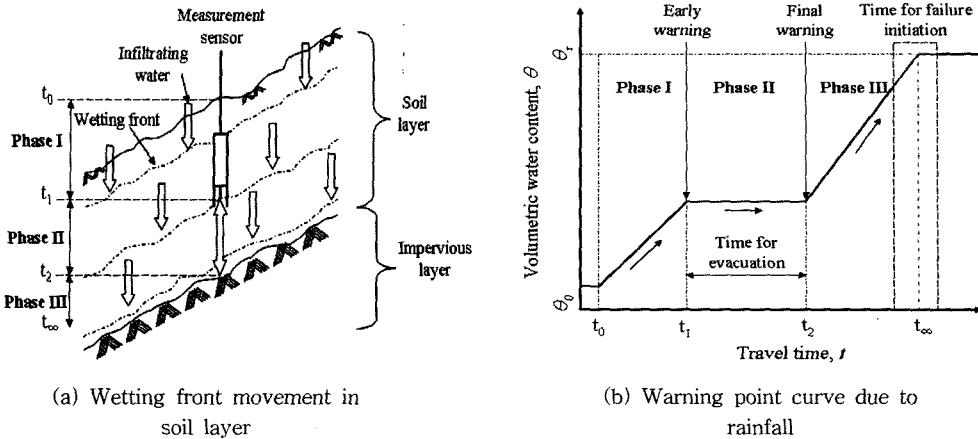


Fig. 8. Schematic change of volumetric water content in response to rainfall infiltration prior to failure initiation.

### 결론

본 연구에서는 인공강우에 의해 사면파괴의 원인이 되는 사면모델 내 인공강우에 따른 체적함수비 변화 양상을 유전을 측정센서인 ADR 측정장치를 이용하여 계측하였다. 사면모델의 사면 경사각은 35°와 45°로 각기 달리하여 강모래와 화강풍화토에 대해 실내시험을 수행하였다.

이 두 사면모델에서 인공강우의 지속시간이 길어짐에 따라 사면 하단부에서 침투수·유출이 최초 관찰됨과 함께 사면 하단부 부근에서 원호파괴 내지 인장균열의 발생이 관찰되었다. 특히 강모래 사면모델에서는 사면 하단부에서 침투수 유출과 동시에 인장균열이 발생되었으며 이와 연결된 사면 상단부에서 전 사면에 걸쳐 원호파괴 유형을 보였다. 반면, 화강풍화토 사면모델에서의 파괴 유형은 사면 하단부 부근에서 국부적으로 원호파괴 유형만이 나타났다. 이와 같이 서로 다른 매질의 흙시료 내에서 사면파괴 형상이 달리하여 나타나는 것은 시료를 구성하는 흙입자의 내부마찰각과 흙매질을 구성하는 입자크기가 서로 다르기 때문이며, 또한 이들이 가질 수 있는 최대 체적함수비의 함양 능력의 차이를 보이기 때문이다.

인공강우에 의한 사면모델 내 체적함수비 변화 양상을 토대로 사면파괴 발생을 유도하는 흙사면의 수리학적 반응에 근거하여 침투수에 의해 형성된 침윤선 거동을 총 3가지 형태로 나누어 사면파괴 예측 모델을 제시하였다. 본 시험을 통해 인공강우 조건에 따라 사면모델 내 체적함수비 변화를 측정센서에서 충분히 파악할 수

있으며, 체적함수비 증가 정도에 따라 사면모델에서 사면파괴 시점을 충분히 확인할 수 있었다. 따라서 사면파괴 예측모델에서 침윤선의 거동이 측정센서 설치 지점까지인 phase I 까지는 사면파괴로부터 안정적인 시점으로 간주되나 phase II부터는 사면파괴 예비 경계 시점으로 분류되어 이에 대한 대처가 필요하다. 결국 phase III 지점인 불투수성의 기반암 영역까지 침윤선이 도달하였을 때는 사면파괴가 발생할 확률이 매우 높아진다. 그러므로 사면 내 체적함수비 변화의 지속적 계측을 통해 강우에 기인하여 발생하는 사면파괴의 효율적인 예측 관리가 가능할 것이다. 이를 보다 체계적으로 적용하기 위해서는 다양한 흙시료에 대한 수리학적 특성을 파악함은 물론 측정센서에 대한 측정 정밀도를 높이기 위한 측정시스템의 교정작업이 선행되어야 할 것이다.

### 사사

본 연구 수행에 학문적 충고와 실험에 도움을 준 일본 Okayama 대학 토목공학과 Misturu Komatsu 박사과 일본 Taisei Kiso Sekkei 기술연구소 Syuuij Daimaru에게 감사를 드린다.

### 참고 문헌

김만일, 채병곤, 정교철, 2005, 흙사면 절개지 불포화토의 침투거동 특성에 관한 연구, 지질공학, 15(4), pp.487-494.  
 행정자치부, 국립방재연구소, 1999, 사면 위험지대 평가 방법 연구 - 경북지역 현장사례를 중심으로, NIDP-99-



- 08, 국립방재연구소, 368p.
- Abramson, L., Lee, T., Sharma, S. and Boyce G., 1996, Slope stability and stabilization methods, John Wiley & Sons, 629p.
- Anderson, S. A. and Sitar, N., 1995, Analysis of rainfall-induced debris flows, J. Geotech. Engrg., ASCE, 121(7), pp.544-552.
- Baum, R. L. and Chleborad, A. F., 1999, Landslides triggered by Pacific Northwest storms, November and December 1998, Information Reports, USGS, Washington D.C.
- Campbell, R. H., 1975, Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, Southern California, U.S. Geol. Surv. Prof. Pap., 851, 51p.
- Elsen, E. V. D., Xie, Y., Liu, B., Stolte, J., Wu, Y., Trouwborst, K. and Ritsema, C. J., 2003, Intensive water content and discharge measurement system in a hill slope gully in China, Catena, 54, pp.93-115.
- Johnson, K. A. and Sitar, N., 1990, Hydrologic conditions leading to debris flow initiation, Can. Geotech. J., 27(6), pp.789-801.
- Kim, J. -H., Jeong, S. -S., Park, S. -W. and Sharma, J., 2004, Influence of rainfall-induced wetting on the stability of slopes in weathered soils, Engineering Geology, 75, pp.251-262.
- Miller, J. D. and Gaskin, G. J., 1997, The development and application of the ThetaProbe soil water sensor, MLURI Technical Note, Macaulay Land Use Research Institute, Aberdeen.
- Rahardjo, H., Leong, E. C., Gasmu, G. M. and Tang, S. K., 1998, Assessment of rainfall effect on stability of residual soil slopes, Proc., 2nd Int. Conf. Unsaturated Soils, International Academic Publisher. Vol. 1. pp.280-285.
- Sun, H. W., Wong, H. N. and Ho, K. K. S., 1998, Analysis of infiltration in unsaturated ground, Proceedings of the annual seminar on slope engineering in Hong Kong, Ed., Li, Kay & Ho, Balkema, Rotterdam, Netherlands, pp.101-109.
- 
- 2006년 4월 21일 원고접수, 2006년 6월 2일 게재승인
- 김만일**  
 안동대학교 자연과학대학 지구환경과학과  
 760-749 경북 안동시 송천동 388번지  
 Tel: 054-820-5185  
 Fax: 054-823-1627  
 e-mail: mikim@andong.ac.kr
- Makoto Nishigaki**  
 Dept. of Environmental & Civil Design, Okayama University  
 3-1-1 Tsushimanaka, Okayama, Japan 700-8530  
 Tel: +81-86-251-8164  
 Fax: +81-86-251-8164  
 e-mail: n\_makoto@cc.okayama-u.ac.jp