

강우시 광산폐기물 적치사면의 침투 및 안정성에 대한 수치해석

송 영 석*

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

Numerical Analysis of the Seepage from and Stability of a Mine Waste-dump Slope during Rainfall

Young-Suk Song*

Geologic Environment Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Received 3 February 2015; received in revised form 25 February 2015; accepted 27 February 2015

부산 임기광산의 광산폐기물 적치사면을 대상으로 강우에 따른 사면의 침투해석과 안정해석을 연계하여 수행하였다. 광산폐기물 적치사면의 경사는 40-45°로써 비교적 급한 편이고, 암반층 상부의 광산폐기물은 약 7-8 m의 두께로 존재하며, 지하수위는 지표면으로부터 약 6.6 m 깊이에 위치하고 있다. 현장에서 채취한 시료를 대상으로 각종 실내시험을 수행하여 강우 시 침투거동 및 사면안정해석을 위한 입력자료를 선정하였다. SEEP/W를 이용하여 다양한 강우강도 조건에서 침투해석을 수행한 결과 강우지속시간이 길어짐에 따라 습윤전선은 하강함을 알 수 있다. 강우강도가 50 mm/hr 이상이고 강우지속시간이 24시간 이상인 경우 침윤전선은 사면의 하단부에서 지하수위와 만나게 되므로 토층 전체가 포화됨을 알 수 있다. 침투해석결과를 연동하여 SLOPE/W를 이용하여 사면안정해석을 수행한 결과 강우침투로 인한 침윤전선이 하강함에 따라 사면안전율은 낮아짐을 알 수 있다. 강우가 5-6시간 지속적으로 발생된 이후 사면안전율은 급격하게 낮아지며, 이후 사면안전율은 미소하게 회복되다가 수렴한다. 사면안전율이 급격하게 낮아지는 이유는 강우로 인한 임계활동면과 침윤전선의 깊이가 유사하여 해당깊이까지 간극수압이 증가되고 모관흡수력이 감소되었기 때문이다.

주요어: 폐기물 적치사면, 강우, 침투해석, 사면안정해석, 습윤전선

A numerical analysis was performed of the seepage from and stability of a mine waste-dump slope in Imgi, Busan, considering rainfall intensity. The 40-45° slope angle of the waste dump is relatively steep, and the depth of the waste dump down to bedrock is 7-8 m. The groundwater level was 6.6 m below the surface. Various laboratory tests on samples obtained from the waste dump were performed to determine the input data for seepage and stability analyses of the waste-dump slope during rainfall. The results of seepage analysis for various rainfall intensities using the SEEP/W program show that the wetting front moved down with increasing rainfall duration. When the rainfall intensity was > 50 mm/hour and the duration was > 24 hours, the waste dump became fully saturated because the wetting front reached the groundwater level. The results of slope stability analysis coupled with seepage analysis using the SLOPE/W program show that the safety factor of the slope decreased as the wetting front moved down due to rainfall infiltration. After continuous rainfall for 5-6 hours, the safety factor of the slope suddenly decreased but then recovered and converged. The sudden decrease was induced by an increase in pore-water pressure and a decrease in matric suction down to a certain depth as the wetting front approached the potential sliding surface.

Key words: waste-dump slope, rainfall, seepage analysis, slope stability analysis, wetting front

*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

© 2015, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

광산폐기물 적치장은 적절한 보수와 유지관리가 이루어지지 않을 경우 적치장의 범면 일부의 광미가 유실되고 표면침식 등의 문제가 발생할 수 있다(Blight and Amponash-Da Costa, 2004). 이와 같이 폐석적치장 사면의 구조적인 결함이 발생되면서 사면안정성에 대한 우려가 부각되고 있다(Kang et al., 2005; Alonso and Gens, 2006; Cho and Song, 2014). 실제로 집중강우로 인한 적치장의 일부 범면이 유실되거나 적치장 사면의 변형이 발생되고 있으며, 폐석적치장의 하중으로 인하여 적치장 하부에 존재하는 사면의 변형이 발생되고 있다(Cho and Song, 2014). 따라서 폐광산지역에 대한 환경공학측면에서의 안정성과 더불어 지반공학측면에서의 안정성을 확보할 수 있는 연구가 요구되고 있다.

Kim et al. (2007)에 의하면 국내에서 발생된 산사태의 발생유형은 대부분 활동 깊이가 2 m 이내인 얇은 평면파괴 형태이다. 강우로 인한 산사태의 경우 지하수위 상승으로 인하여 사면 내에서 간극수압이 증가하고 유효응력이 감소되어 산사태가 발생하는 것으로 알려져 있다. 그러나 최근 연구결과(Kim et al., 2004; Lu and Godt, 2008; Song et al., 2012a)에 의하면 자연사면에서의 산사태는 지하수위의 상승에 의한 영향보다는 강우침투로 인한 침윤전선의 하강의 영향으로 얇은 파괴가 주로 발생하는 것으로 나타났다. 강우침투가 발생하게 되면 지하수위 상부의 위치하는 불포화 지반의 포화도는 증가하게 되며, 이때 불포화 지반의 부 간극수압도 감소하게 된다. 불포화 지반의 부 간극수압의 변화로 인하여 지반 내 흡입응력(suction stress)의 변화가 발생되며 유효응력이 감소하게 된다. 이러한 현상은 자연사면의 안정성에 매우 중요한 영향을 미치게 된다(Ng and Shi, 1998; Lu and Godt, 2008).

기존 지반공학적인 문제를 해결을 위하여 적용된 지반에 대한 포화도의 가정은 많은 문제점을 가지고 있으며, 적용 시 이에 대한 주의가 요구되었다. 이를 극복하기 위하여 사면안정해석 시 지하수위 상부 지반에서의 부 간극수압을 정확하게 산정하려는 연구가 진행되었다. 그러나 최근까지도 대부분의 사면안정해석에서 Terzaghi에 의해 제안된 포화도의 침투이론을 적용하고 있다. 앞서 설명한 바와 같이 국내 자연사면의 경우 강우침투로 인한 얇은 깊이의 무한사면파괴가 주로 발생하고 있다. 즉 강우 시 지하수위 상부의 토층에서 체적함수비 증가로 인하여 얇은 사면파괴가 발생되므로 지하수위 상부

의 토층에 대한 불포화 특성을 반드시 반영하여야 한다(Wolle and Hachich, 1989; de Campos et al., 1991; Godt et al., 2006; Song, 2013).

본 연구에서는 연구대상 현장인 부산 임기광산의 광산폐기물 적치사면을 대상으로 강우에 따른 침투 및 사면안정성 변화를 고찰하고자 한다. 이를 위하여 사면의 침투해석과 안정해석을 연계하여 수행할 수 있는 GEO STUDIO ver 7의 SEEP/W (GEO-SLOPE International Ltd., 2008a)와 SLOPE/W (GEO-SLOPE International Ltd., 2008b)를 이용하였다. 즉 강우에 따른 사면내 침투 거동을 해석하기 위하여 SEEP/W를 활용하고 이 결과를 토대로 사면 내 침투깊이를 고려한 사면안정해석을 위하여 SLOPE/W를 활용하고자 한다. 해석 시 입력인자를 선정하기 위하여 광산폐기물 적치사면에서 채취된 시료의 물리역학적 특성 및 불포화 특성시험결과를 적용하였다. 또한 강우에 따른 침투 및 사면안정성 변화를 살펴보기 위하여 강우강도 조건을 다양하게 적용하여 해석을 수행하였다. 위의 해석결과를 이용하여 강우에 따른 대상지역의 광산폐기물 적치사면의 침투거동과 사면안정성의 변화를 분석 및 고찰하고자 한다.

해석단면 및 지반정수

해석단면 선정

연구대상현장은 부산광역시 기장군 철마면 임기리에 위치한 임기광산의 광산폐기물 적치사면으로서, 1992년에 폐광된 이후 특별한 광해방지대책 없이 현재까지 방치되고 있다. 폐광이후 장기간 노출로 인하여 사면의 표면에 세굴로 인한 유실이 발생한 상태이며, 사면의 표면에 세굴로 인한 유실을 줄이기 위하여 현재 방수천으로 덮어놓은 상태이다. Fig. 1은 임기광산의 광산폐기물 적



Fig. 1. Location of waste-dump slope for numerical analysis.

Table 1. Physical properties of soil sample obtained from the waste dump.

Contents	Symbol	Unit	Measured value
Specific gravity	G_s	-	2.73
Natural moisture content	w	(%)	6.87
Wet unit weight	γ_t	(t/m^3)	1.70
Dry unit weight	γ_d	(t/m^3)	1.59
Effective grain size	D_{10}	(mm)	0.0064
Coefficient of uniformity	c_u	-	406.30
Coefficient of curvature	c_g	-	10.80
Liquid limit	LL	(%)	24.49
Plastic limit	PL	(%)	N.P.
Unified soil classification system (USCS)			SM

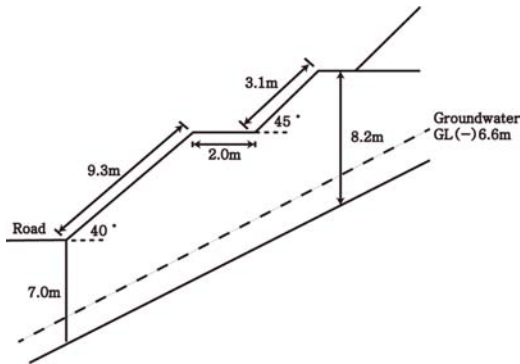


Fig. 2. Determination of cross-section for numerical analysis.

치사면을 대상으로 강우 시 침투거동 및 안정해석을 위한 단면을 선정한 것이다.

한편, Fig. 2는 광산폐기물 적치사면의 침투거동 및 사면안정해석을 위한 해석단면을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 선정된 위치에 대하여 측량 및 시추조사를 토대로 해석단면을 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 대상 사면의 경사는 40-45°로써 비교적 급한 편이며, 중간에 약 2m폭의 2개의 소단이 위치하고 있다. 시추조사결과를 토대로 암반층 상부에 위치하는 광산폐기물은 약 7-8m의 두께로 존재함을 알 수 있으며, 지하수위는 지표면으로부터 약 6.6m 위치에 존재함을 알 수 있다. 이와 같이 선정된 해석단면을 토대로 강우시 광산폐기물 적치사면의 침투 및 사면안정성에 대한 수치해석을 수행하고자 한다.

지반정수 선정

광산폐기물 적치사면의 침투거동 및 사면안정해석을 위한 입력자료를 선정하기 위하여 연구대상 사면에서 시

료를 채취하여 각종 토질시험을 수행하였다. 먼저 대상 시료의 물리적 특성을 알아보기 위하여 단위중량, 비중, 입도분석, 액소성한계, 다짐시험 등을 수행하였다. Table 1은 광산폐기물 적치사면에서 채취된 시료의 물리적 특성을 측정된 결과이다. 시험결과에 따르면 대상 시료는 통일분류법(USCS) 상에서 실트질 모래(SM)에 해당하며, 현장건조단위중량은 1.594 t/m^3 으로 조사되었다.

한편 대상 시료의 불포화 특성을 조사하기 위하여 자동 흡·함수특성곡선(SWCC) 시험장치를 활용하였다(Song et al., 2012b). 본 시험에서는 모관흡수력의 재하 및 재하 시 단계별 간극수의 유출 및 유입량을 측정하고, 측정결과를 이용하여 모관흡수력과 체적함수비의 상관관계를 도시한다. 이를 토대로 van Genuchten (1980)방법을 적용하여 흡·함수특성곡선(SWCC)을 예측할 수 있다.

van Genuchten (1980)은 Mualem (1976)의 제안식을 적용하여 유효포화도(S_e)와 압력수두(h)의 관계로부터 흡·함수특성곡선 h (SWCC)을 제안하였다. 식 (1)은 van Genuchten (1980)이 제안한 흡·함수특성곡선(SWCC) 산정식을 나타낸 것이다.

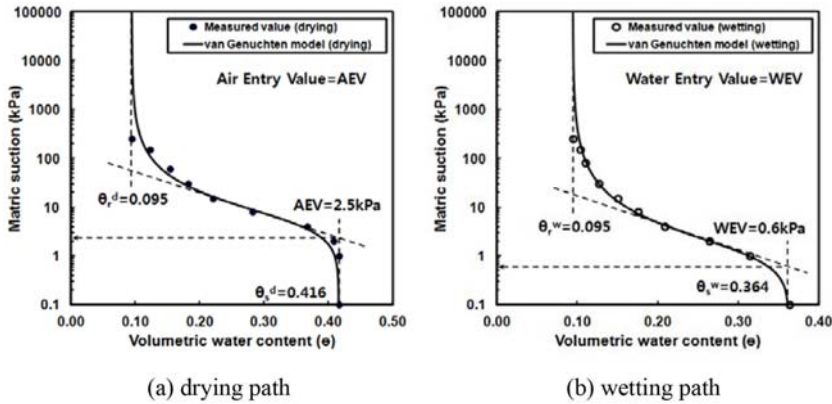
$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + [\alpha(u_a - u_w)]^n} \right]^m \tag{1}$$

여기서, α 는 공기유입값과 관계된 계수, n 은 변곡점의 경사에 관계된 계수, 그리고 m 은 잔류함수비에 관련된 계수이다.

비선형 최소제곱법(nonlinear least squares analysis)을 적용하여 측정된 모관흡수력 및 체적함수비의 상관관계로부터 van Genuchten (1980) 방법의 불포화 관련계수인 α , n 및 m 을 산정하였다. Table 2는 건조 및 습윤 과정의 광산폐기물 폐석미분 시료에 대한 불포화 관련

Table 1. Physical properties of soil sample obtained from the waste dump.

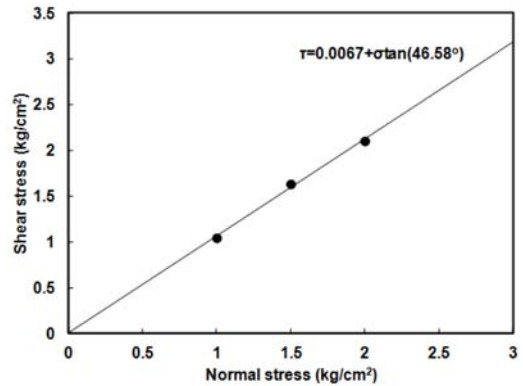
Condition	α (kPa ⁻¹)	n	m	AEV/WEV (kPa)	R^2
Drying	0.180	1.811	0.448	2.5	0.994
Wetting	0.787	1.670	0.401	0.6	0.998

**Fig. 3.** Estimation of residual volumetric water contents, AEV, and WEV.

계수를 나타낸 것이다. 표에서 보는 바와 같이 공기유입 값과 관련된 계수 α 는 습윤과정에서 더 큰 값을 나타내며, 변곡점의 경사에 관계된 계수 n 및 잔류함수비에 관계된 계수 m 은 건조과정에서 더 큰 값을 나타냈다. 표에 나타낸 불포화 관련계수와 식 (1)을 이용하여 광산폐기물 폐석미분에 대한 건조 및 습윤과정의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 산정할 수 있다.

Fig. 3은 van Genuchten (1980)방법을 적용하여 산정한 불포화 관련계수를 이용하여 건조 및 습윤과정의 흡-함수특성곡선(SWCC)을 각각 나타낸 것이다. 건조과정에서의 공기함입치(Air Entry Value, AEV) 및 잔류체적함수비(θ_r^d)와 습윤과정에서의 수분함입치(Water Entry Value, WEV) 및 잔류체적함수비(θ_r^w)를 구하기 위하여 Fig. 3의 건조 및 습윤과정의 흡-함수특성곡선(SWCC) 상에서 도해적인 방법을 적용하였다. 건조과정에서 공기함입치(AEV)는 2.5 kPa이며, 포화체적함수비(θ_s^d)는 0.416, 잔류체적함수비(θ_r^d)는 0.095이며, 습윤과정에서 수분함입치(WEV)는 0.6 kPa이며, 포화체적함수비(θ_s^w)는 0.364, 잔류체적함수비(θ_r^w)는 0.095로 산정할 수 있다.

그리고 대상 시료의 전단강도를 측정하기 위하여 일련의 연속배수 직접전단시험(KSF 2343)을 수행하였다. 이때 폐석미분 시료는 현장에서의 건조단위중량으로 성형하여 시험을 수행하였다. 연직응력은 1 kgf, 1.5 kgf 및 2 kgf으로 변화시켜가며 시험을 수행하였으며, 전단시 전단속도는 0.3 mm/min으로 하였다.

**Fig. 4.** Relationship between normal stress and maximum shear stress.

각각의 연직응력 하에서 전단응력과 변형률의 관계를 측정하고 이를 토대로 각각의 연직응력 하에서의 최대 전단응력을 측정할 수 있다. 이와 같이 측정된 연직응력과 최대전단응력의 관계를 토대로 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 적용하여 대상 시료의 전단강도 정수를 산정할 수 있다.

Fig. 4는 각각의 연직응력과 최대전단응력의 상관관계를 도시한 것이다. 본 연구에서는 연직응력과 전단응력의 상관관계를 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 적용하여 분석하였다. 그림에서 보는 바와 같이 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 적용하여 분석한 결과 점착력 c 는 0.0067 kg/cm²이며, 내부마찰각은 46.58°인 것으로 나타났다.

Table 3. Input data for numerical analyses of seepage and slope stability.

Parameter	Mechanical property			Unsaturated soil property			
	c' (t/m ²)	ϕ' (°)	k_{sat} (cm/sec)	α (kPa ⁻¹)	n	m	WEV (kPa)
Measured value	0.0067	46.58	1.71×10^{-3}	0.787	1.670	0.401	0.6

한편 시료에 대한 포화투수계수를 산정하기 위하여 삼축투수시험을 수행하였다. 삼축투수시험은 삼축압축시험장치를 이용한 강제투수방식으로 ASTM-D5084 시험법에 따라 수행하였다. 먼저 시료를 성형하고 포화시킨 후 시료 내부에 일정한 압력을 가하여 배출되는 유량과 시간을 측정하였다. 측정결과 포화투수계수(k_s)는 1.71×10^{-3} cm/sec의 값을 나타내었다.

이와 같이 측정된 대상 시료의 공학적 특성 및 불포화 특성을 토대로 광산폐기물 적치사면의 침투거동 및 사면안정해석을 위한 SEEP/W 및 SLOPE/W 프로그램의 입력자료를 선정하였다. 특히 불포화 특성을 나타내는 입력자료는 습윤과정 시 흡·함수특성곡선(SWCC)으로부터 산정된 결과를 적용하였다. 그리고 직접전단시험은 완속배수조건이므로 측정된 전단강도정수는 유효전단강도정수라고 할 수 있다. Table 3은 본 연구의 수치해석에 적용된 입력자료를 정리한 것이다.

강우침투해석 및 분석

SEEP/W프로그램을 이용하여 강우 시 광산폐기물 적치사면의 침투거동을 해석하기 위한 유한요소해석 단면 및 메쉬를 생성하였다. Fig. 5는 침투해석을 위하여 모델링한 단면과 메쉬를 나타낸 것이다. 침투해석을 위한 모델링 단면의 4,561개의 노드와 4,442개의 요소로 구성되어 있으며, 삼각형 및 사각형 요소를 혼합하여 사용하였다. 그리고 강우침투는 비정상 침투로 가정하였으며, 지하수위는 시추조사 시에서 측정된 위치로 선정하였다.

본 침투해석에서 적용된 강우조건은 강우강도 10 mm/hr, 30 mm/hr, 50 mm/hr, 70 mm/hr 및 100 mm/hr이며, 매 시간당 침투해석을 수행하고 최대 24시간동안 강우가 내리는 것으로 가정하였다. Fig. 6은 강우강도가 50 mm/hr의 조건일 경우 시간에 따른 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서는 강우 발생 1시간, 6시간, 12시간 및 24시간 동안 강우가 발생된 경우 해석결과를 나타낸 것으로 지표면 상부로부터 형성되는 하늘색 층이 침윤전선(wetting front)을 나타내는 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 1시간 경과 후 지표면에서 강우의 침투로 인한 포화대 즉, 침윤전선이 생성된 것을 볼 수 있으며,

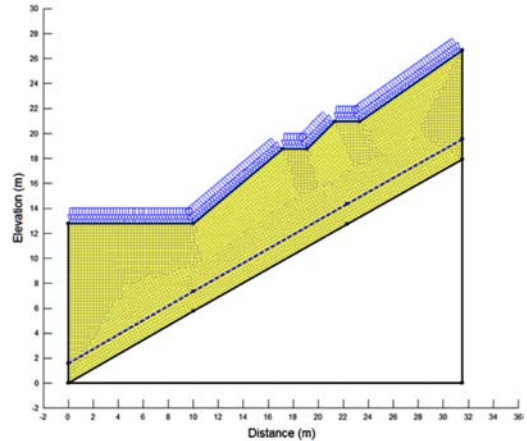


Fig. 5. Numerical model for seepage analysis.

12시간 경과 후 지표면으로부터 약 1 m 깊이의 침윤전선이 형성된 것으로 나타났다. 그리고 이후 계속적으로 침윤전선이 하강하며 24시간 경과 후 특정위치에서 침윤전선과 지하수위가 만나는 것으로 나타났다. 이는 토층 전체가 포화됨을 의미하는 것이다.

Fig. 7은 시간에 따라 깊이별 간극수압 혹은 체적함수비의 변화양상을 나타내기 위하여 특정위치를 결정한 것이다. 그리고 Fig. 8은 강우강도가 10 mm/hr, 30 mm/hr, 50 mm/hr, 70 mm/hr 및 100 mm/hr의 조건일 경우 시간에 따른 깊이별 간극수압의 변화양상을 나타낸 것이다. 해석단면에서 강우 발생 전 지하수위는 GL -6.6 m에 위치하고 있으므로 지반 내 간극수압은 GL -6.6 m 이하의 깊이에서는 양의 값을 가지며, GL -6.6 m 이상의 깊이에서는 음의 값을 갖는 것으로 나타났다. 그리고 국내 불포화 사면에서 측정된 모관흡수력의 범위는 -10 kPa 내외인 것으로 조사되었다(Lee et al., 2003). 따라서 본 해석에서도 지하수위 상부의 불포화 구간에 대한 초기값을 -10 kPa로 가정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 각각의 강우강도 조건하에서 강우지속시간이 길어짐에 따라 강우의 침투깊이는 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 강우지속시간이 24시간 경과 후 침윤전선의 깊이는 강우강도가 10 mm/hr인 경우 GL -1.6 m, 30 mm/hr인 경우 GL -3.9 m, 50 mm/hr인 경우 GL -5.3 m, 70 mm/hr인 경우 GL -5.3 m, 100 mm/hr인 경우 GL

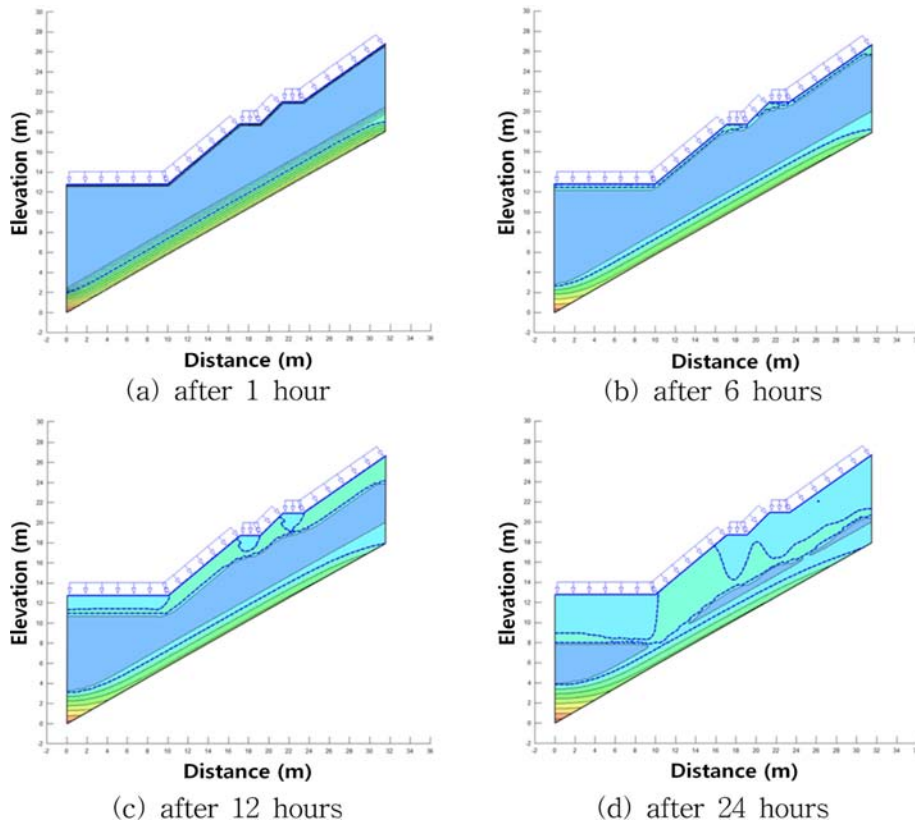


Fig. 6. Results of seepage analysis for various rainfall durations (rainfall intensity = 50 mm/hr).

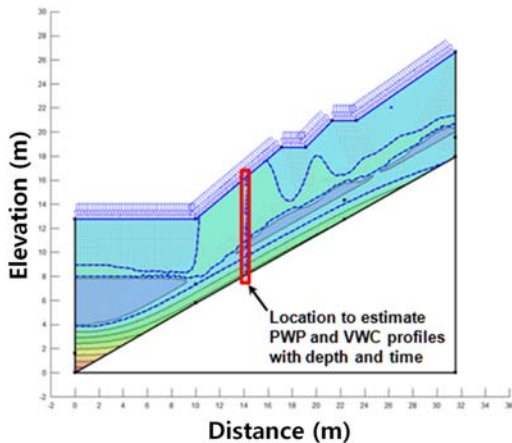


Fig. 7. Location for the analysis of the profile with depth.

-5.3 m인 것으로 나타났다. 즉 강우지속시간이 24시간이고 강우강도가 50 mm/hr 이상인 경우 침윤전선의 최대 깊이는 GL -5.3 m이며, 강우강도가 증가하더라도 침윤전선의 최대 깊이는 증가하지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 강우강도가 10 mm/hr, 30 mm/hr, 50 mm/hr, 70 mm/hr 및 100 mm/hr의 조건일 경우 시간에 따른 깊이별 체적함수비의 변화양상을 나타낸 것이다. 해석단면에서 강우 발생 전 지하수위는 GL -6.6 m에 위치하고 있으므로 해당깊이 아래의 체적함수비는 흡-함수특성곡선(SWCC)의 습윤체적함수비인 0.36을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 각각의 강우강도 조건하에서 강우지속시간이 길어짐에 따라 강우의 침투깊이는 증가하며, 강우침투로 인하여 지반이 포화되는 경우 체적함수비는 습윤체적함수비인 0.36을 나타내었다. 그리고 강우지속시간이 24시간 경과 후 침윤전선의 깊이는 강우강도가 10 mm/hr인 경우 GL -1.6 m, 30 mm/hr인 경우 GL -3.9 m, 50 mm/hr인 경우 GL -5.3 m, 70 mm/hr인 경우 GL -5.3 m, 100 mm/hr인 경우 GL -5.3 m인 것으로 나타났다. 그리고 강우지속시간이 24시간이고 강우강도가 50 mm/hr 이상인 경우 침윤전선의 최대 깊이는 GL -5.3 m이며, 강우강도가 증가하더라도 침윤전선의 최대 깊이는 증가하지 않는 것으로 나타났다.

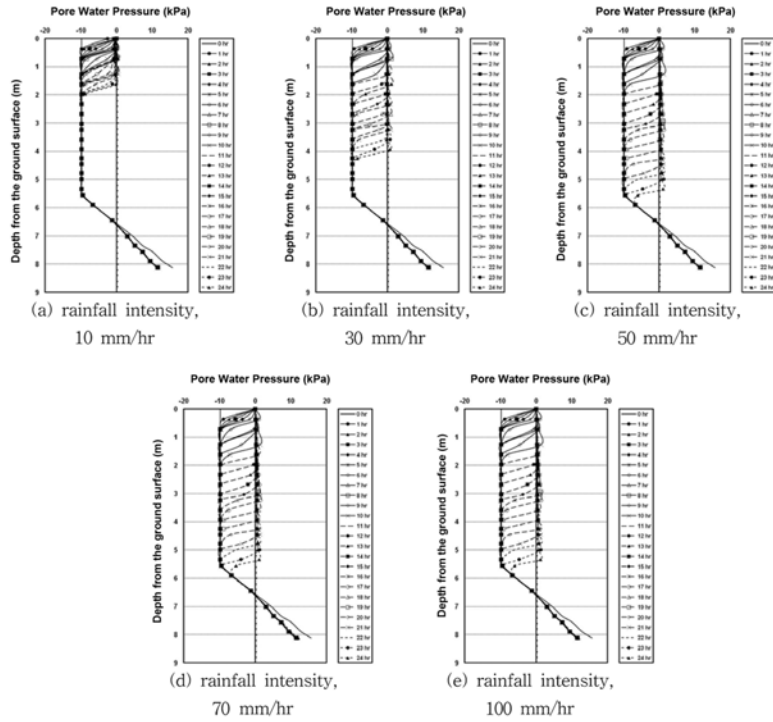


Fig. 8. Profiles of pore-water pressure with time for various rainfall intensities.

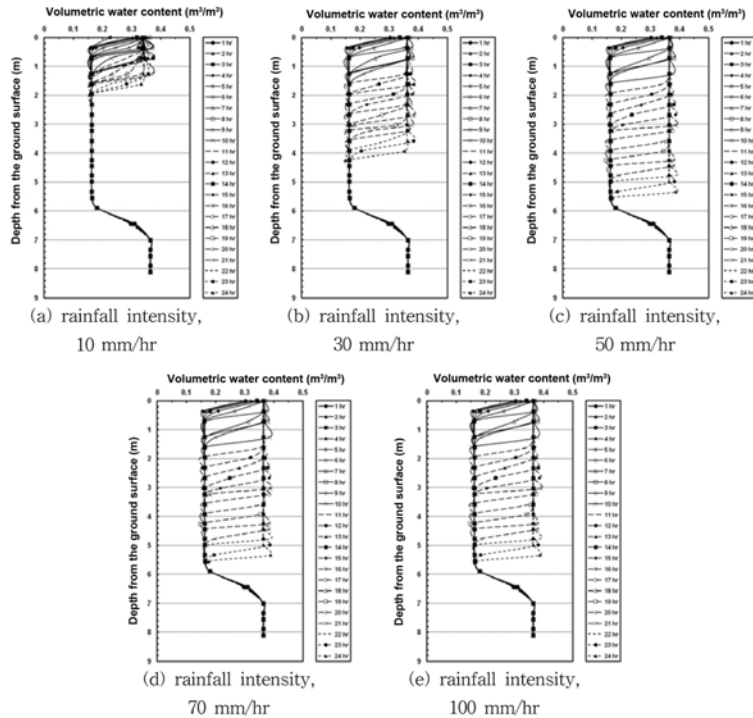


Fig. 9. Profiles of volumetric water content with time for various rainfall intensities.

사면안정해석 및 분석

SLOPE/W프로그램을 이용하여 강우 시 광산폐기물 적치사면 내 침투깊이를 고려한 사면안정해석을 수행하였다. Fig. 10은 침투깊이를 고려한 사면안정해석을 위

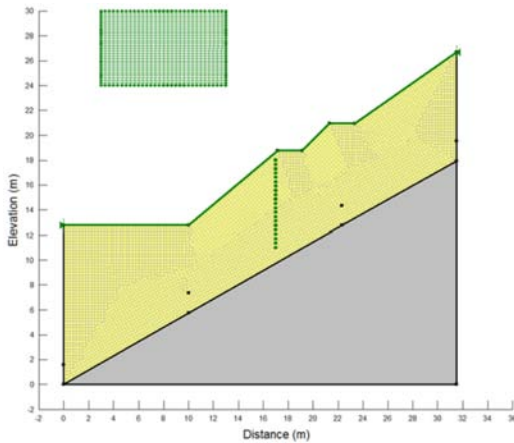


Fig. 10. Numerical model for slope stability analysis.

한 단면을 나타낸 것이다. 사면안정해석법은 일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 Bishop간편법(Bishop, 1959)을 적용하였으며, 활동면은 원호활동으로 가정하였다. 그리고 SEEP/W프로그램으로 구한 시간에 따른 침투해석결과와 연동하여 사면안정해석을 수행하였으며, 지하수위는 시추조사 시에서 측정된 위치로 선정하였다.

사면안정해석에서는 강우강도 10 mm/hr, 30 mm/hr, 50 mm/hr, 70 mm/hr 및 100 mm/hr의 조건에서 매 시간당 수행된 SEEP/W프로그램의 침투해석결과를 토대로 수행되었다. Fig. 11은 강우강도가 50 mm/hr의 조건일 경우 침투해석결과를 토대로 시간에 따른 사면안정해석결과를 나타낸 것이다. 즉 1시간, 3시간, 6시간, 9시간, 12시간, 18시간 및 24시간동안 강우가 지속적으로 발생된 경우의 침투해석결과를 토대로 사면안정해석을 수행한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 시간이 경과됨에 따라 침투전선의 깊이는 증가하게 되며 이로 인하여 사면안전율은 낮아지는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 그리고 지표면으로부터 활동면의 깊이는 3시간 강우 시까지는 약 2m로 나타났으나 6시간 강우 시 이후 약 1m로 감소되었으며, 사면활동면의 크기도 작아지는

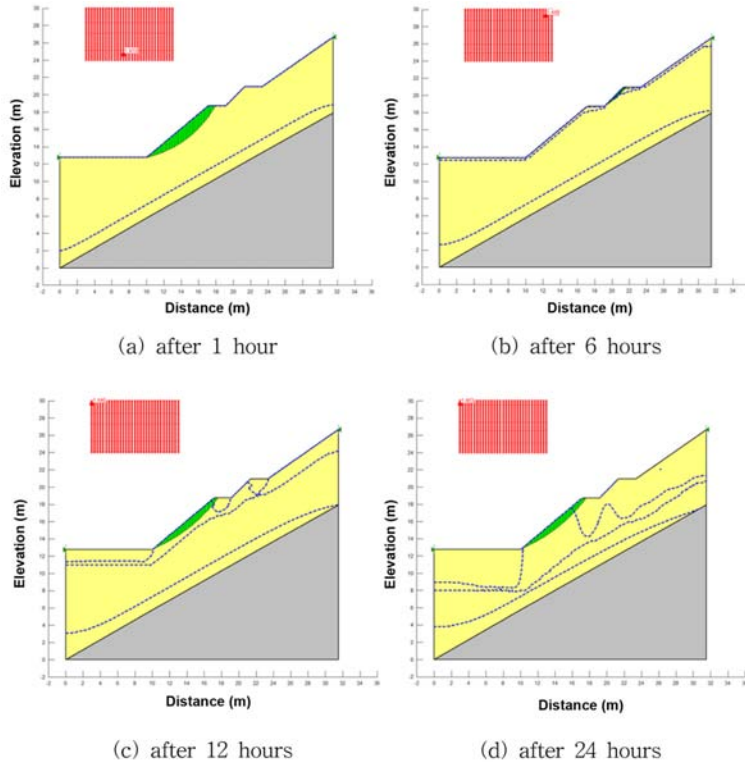


Fig. 11. Results of slope stability analysis for various duration times (rainfall intensity = 50 mm/hr).

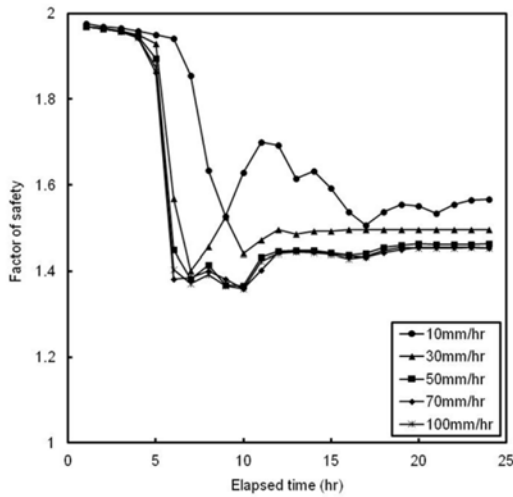


Fig. 12. Minimum safety factor of the slope over time for various rainfall intensities.

것으로 나타났다.

한편, Fig. 12는 강우강도가 10 mm/hr, 30 mm/hr, 50 mm/hr, 70 mm/hr 및 100 mm/hr의 조건일 경우 시간에 따른 사면안전율의 변화양상을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 시간이 경과함에 따라 사면안전율은 낮아지는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 특히 강우가 5-6시간 지속적으로 발생된 이후 사면안전율은 급격하게 떨어지는 것으로 나타났으며, 이후 사면안전율이 미소하게 회복되다가 수렴하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 강우가 지속됨에 따라 물이 침투되면서 침윤전선은 하강하게 되고 강도의 증분으로 작용하던 모관흡수력은 작아지면서 그에 따른 사면안전율도 낮아지면서 발생하는 것이다. 그리고 사면안전율이 급격하게 감소되는 이유는 강우로 인해 임계활동면과 인접한 깊이까지 침윤전선이 하강함으로써 해당깊이에서 간극수압이 증가되어 모관흡수력이 감소되었기 때문이다.

또한 강우강도가 30 mm/hr 이하인 경우 50 mm/hr 이상인 경우에 비해 시간에 따른 변화가 크게 나타났는데 이는 시간에 따른 침윤전선 깊이의 차이에 의한 것으로 판단된다. 즉 강우강도가 10 mm/hr 및 30 mm/hr 인 경우 24시간 경과 후 침윤전선의 깊이는 각각 1.6 m 및 3.9 m이나 50 mm/hr 이상인 경우 24시간 경과 후 침윤전선의 깊이는 5.3 m이다. 따라서 각각의 강우조건에서 시간에 따른 침윤전선의 깊이가 상이하므로 최소 사면안전율이 발생하는 활동면의 위치, 형상 및 깊이가 다르게 발생하게 된다.

결론

본 연구에서는 연구대상 현장인 부산 임기광산의 광산폐기물 적치사면을 대상으로 강우에 따른 사면의 침투해석과 안정해석을 연계하여 수행하였다. 강우에 따른 사면 내 침투거동을 해석하기 위하여 SEEP/W를 활용하고 사면 내 침투깊이를 고려한 사면안정해석을 위하여 SLOPE/W를 활용하였다. 해석결과를 이용하여 강우에 따른 대상지역의 광산폐기물 적치사면의 침투거동과 사면안정성의 변화를 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 광산폐기물 적치사면의 경사는 40-45°로써 비교적 급한 편이고, 암반층 상부의 광산폐기물은 약 7-8 m의 두께로 존재하며, 지하수위는 지표면으로부터 약 6.6 m 위치에 존재하고 있다.

2. 해당 적치사면에서 채취한 시료를 대상으로 각종 실내시험을 수행하여 강우시 침투거동 및 사면안정해석을 위한 입력자료를 선정하였다. 습윤과정 시 흡-함수특성곡선(SWCC)으로부터 산정된 불포화 계수는 $\alpha = 0.787 \text{ kPa}^{-1}$, $n = 1.670$, $m = 0.401$ 및 $\text{WEV} = 0.6 \text{ kPa}$ 이다. 그리고 직접전단시험을 통하여 산정한 지반강도정수는 $c' = 0.0067 \text{ t/m}^2$, $\phi' = 46.58^\circ$ 이며, 삼축투수시험을 통하여 산정한 포화투수계수 $k_{sat} = 1.71 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 이다.

3. 해당 적치사면을 대상으로 SEEP/W를 이용하여 다양한 강우강도 조건에서 침투해석을 수행한 결과 강우 지속시간이 길어짐에 따라 강우의 침투깊이 즉, 습윤전선은 하강함을 알 수 있다. 특히, 강우강도가 50 mm/hr 이상이고 강우지속시간이 24시간 이상인 경우 침윤전선은 사면의 하단부에서 지하수위와 만나게 되므로 토층 전체가 포화됨을 알 수 있다.

4. 다양한 강우조건에 대한 침투해석결과를 연동하여 SLOPE/W를 이용하여 사면안정해석을 수행한 결과 강우침투로 인한 침윤전선이 하강함에 따라 사면안전율은 낮아짐을 알 수 있다. 특히 강우가 5-6시간 지속적으로 발생된 이후 사면안전율은 급격하게 낮아지며, 이후 사면안전율이 미소하게 회복되다가 수렴한다. 사면안전율이 급격하게 낮아지는 이유는 강우로 인한 임계활동면과 침윤전선의 깊이가 유사하여 해당깊이까지 간극수압이 증가되고 모관흡수력이 감소되었기 때문이다.

사사

본 연구는 한국지질자원연구원 주요사업인 “실시간 모니터링 기반의 산사태 신속탐지기술 개발 (15-3413)”

과제의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Alonso, E. E. and Gens, A., 2006, Aznalcollar dam failure. Part 1: Field observations and material properties, *Geotechnique*, 56(3), 165-183.
- Bishop, A. W., 1959, The principle of effective stress, *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknikk*, 106(39), 859-863.
- Blight, G. E. and Amponash-Da Costa, F., 2004, Towards the 1000-year erosion-free tailings dam slope - A study in South Africa, *Proc., Ground and Water Bioengineering for Erosion Control and Slope Stabilization*, New Hampshire, U.S.A. 365-376.
- Cho, Y. C. and Song, Y. S., 2014, Deformation measurements and a stability analysis of the slope at a coal mine waste dump, *Ecological Engineering*, 68, 189-199.
- de Campos, T. M. P., Andrade, M. H. N., and Vargas, E. A. Jr., 1991, Unsaturated colluvium over rock slide in a forested site in Rio de Janeiro, Brazil, *Proc. 6th Int. Symp. on landslides*, Christchurch, New Zealand, 2, 1357-1364.
- GEO-SLOPE International Ltd., 2008a, Stability modelling with SLOPE/W 2007, 4th Ed., 355p.
- GEO-SLOPE International Ltd., 2008b, Seepage modelling with SEEP/W 2007, 4th Ed., 307p.
- Godt, J. W., Baum, R. L., and Chleborad, A. F., 2006, Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA, *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(1), 97-110.
- Kang, G. C., Ahn, N. K., Oh, J. I., and Kim, T. H., 2005, Stability investigation of the large size heap of coal associated wastes, *The Journal of Engineering Geology*, 15(2), 133-144 (in Korean with English abstract).
- 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(3-4), 251-262.
- Kim, K. S., Song, Y. S., Chae, B. G., Cho, Y. C., and Lee, C. O., 2007, Geometric characteristics of landslides on natural terrain according to the geological condition, *The Journal of Engineering Geology*, 17(1), 75-87 (in Korean with English abstract).
- Lee, I. M., Cho, W. S., Kim, Y. U., and Sung, S. G., 2003, In-situ monitoring of matric suctions in a weathered soil slope, *The Journal of Korean Geotechnical Society*, 19(1), 41-49 (in Korean with English abstract).
- Lu, N. and Godt, J., 2008, Infinite-slope stability under steady unsaturated seepage conditions, *Water Resources Research*, 44(11), 1-13.
- Mualem, Y., 1976, A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12(3), 513-522.
- Ng, C. W. W. and Shi, Q., 1998, A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage, *Computers and Geotechnics*, 22(1), 1-28.
- Song, Y. S., 2013, Stability analysis of the unsaturated infinite slope considering suction stress under steady infiltration condition, *The Journal of Korean Geotechnical Society*, 29(9), 5-15 (in Korean with English Abstract).
- Song, Y. S., Hong, W. P., and Woo, K. S., 2012a, Behavior and analysis of stabilizing piles installed in a cut slope during heavy rainfall, *Engineering Geology*, 129-130, 56-67.
- Song, Y. S., Hwang, W. K., Jung, S. J., and Kim, T. H., 2012b, A comparative study of suction stress between sand and silt under unsaturated conditions, *Engineering Geology*, 124, 90-97.
- van Genuchten, M. T., 1980, A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892-898.
- Wolle, C. M. and Hachich, W., 1989, Rain-induced landslides in southeastern Brazil, *Proc. of the 12th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rio de Janeiro, 1639-1644.

송영석

한국지질자원연구원 지구환경연구본부

대전광역시 유성구 과학로 124

Tel: 042-868-3035

E-mail: yssong@kigam.re.kr