연구논문

모니터링과 연계한 광물찌꺼기 적치장 사면의 안정성 해석

김세진¹ · 민기복^{2*} · 최용근³ · 김지혜⁴ · 박관인⁵ · 백승한⁶¹서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정, ²서울대학교 에너지자원공학과 교수, ³지오제니컨설팅트 전문,⁴한국광해광업공단 기술연구원 과장, ⁵한국광해광업공단 기술연구원 팀장, ⁶한국광해광업공단 기술연구원 원장

Slope Stability Analysis of Tailings Storage Facility Associated with Monitoring

Sejin Kim¹, Ki-Bok Min^{2*}, Yongkun Choi³, Jihye Kim⁴, Gwan-in Bak⁵ and Seung-han Baek⁶¹Master's Degree, Department of Energy Systems Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea²Professor, Department of Energy Resource Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea³Executive Director, Resource Department, Geogeny Consultants Group Inc., Seoul, Korea⁴Senior Manager, Technology Research & Development Institute, Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corporation, Wonju, Korea⁵Team Leader, Research Technology Research & Development Institute, Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corporation, Wonju, Korea⁶Head, Technology Research & Development Institute, Korea Mine Rehabilitation and Mineral Resources Corporation, Wonju, Korea***Corresponding Author.** Ki-Bok Min, kbmin@snu.ac.kr, Professor, Energy Resource Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

Received

8 October 2021

Final version Received

8 November 2021

Accepted

27 December 2021

Abstract

A tailings storage facility is a dam composed of byproducts after extracting useful minerals. Recently, cases of tailings storage facility failures have been reported overseas, and there is an increasing importance of maintenance and management of domestic tailings storage facilities. In this research, numerical analysis of rainfall infiltration and slope stability was carried out using a two-dimensional (2D) finite difference code for the Jiknaegol tailings facility of the Yeonhwa II Mine, Samcheok, Kangwon Province. A 2D cross-section was selected from a 3D reconstructed tailings storage facility, and model layers were decided considering the stacking method. Sensitivity analyses with respect to rainfall infiltration for permeabilities, rainfall intensities, and groundwater levels were performed predicting pore water pressure and slope stability of this tailings storage facility. Currently, piezometer, water level meter, inclinometer, and extensometer are installed on the slope of the Jiknaegol tailings storage facility for constant monitoring. The findings of this study are expected to be beneficial in establishing risk analysis criteria.

Key words : Tailings storage facility, Rainfall infiltration, Slope stability

요약

광물찌꺼기 적치장은 유용광물을 추출한 후 남은 부산물들로 구성된 댐이다. 최근 해외에서 광물찌꺼기 적치장 파괴 사례가 보고되고 있어 국내 적치장에 대한 유지관리에 대한 중요성이 증가하고 있다. 본 연구에서는 강원도 삼척 제2연화광산 직내골 광물찌꺼기 적치사면에 대한 강우별 사면의 침투 및 안정해석을 위하여 2차원 유한차분법 기반 수치해석을 수행하였다. 3차원으로 복원된 광물찌꺼기 적치장으로부터 2차원 단면을 선정하였고, 직내골 광물찌꺼기 적치장의 적치방식을 고려하여 모델 구성층을 산정하였다. 본 연구는 투수계수별 침투해석, 강우강도별 지하수위별 민감도해석을 실시하여 적치장 내 간극수압의 예측과 적치장 사면의 안정성을 산출하였다. 현재 직내골 광물찌꺼기 적치장 사면에는 간극수압계, 지하수위계 및 변위계가 설치되어 모니터링을 지속적으로 실시하고 있으며, 이 결과는 광물찌꺼기 적치장 위험도 분석기준 제언시 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 광물찌꺼기 적치장, 강우침투, 사면안정성

서 론

광물찌꺼기는 유용광물을 추출한 후 파쇄 및 분쇄과정을 거쳐 만들어진 미립자 형태를 가지며 이러한 광물찌꺼기들을 댐 형태로 적치해둔 시설이 광물찌꺼기 적치장이다. 2014년 캐나다 폴리(Polley) 광물찌꺼기 적치장 붕괴, 2015년 브라질 사마르코(Samarco) 광물찌꺼기 적치장 붕괴, 2019년 브라질 브루마딩요(Brumadinho) 광물찌꺼기 적치장 붕괴 등 최근 국제적으로 인명·재산·환경피해를 동반한 광물찌꺼기 적치장 파괴 사례가 보고되고 있다(The Government of British Columbia, 2015; BHP Billiton and Vale S.A., 2016; Vale, 2019; Kim *et al.*, 2020). 이러한 파괴 사례들은 국제적으로 광물찌꺼기 적치장의 안전한 관리에 대한 관심을 증가시켰으며, 현재 우리나라 또한 국내 적치장의 유지관리에 대한 연구가 진행된 바 있다(Cornwall, 2020; Oh *et al.*, 2017; Jung *et al.*, 2018).

광물찌꺼기 적치장의 붕괴원인은 사면불안정, 누수, 기초, 물넘김, 구조파괴, 지진, 침하, 침식 등으로 분류되며 근본적으로 집중호우, 배수 문제, 지진 등에 기인한다(Kim *et al.*, 2020). 즉, 적치장의 안전한 관리를 위하여 물 관리 및 적치장 제체의 변형 등과 관련된 모니터링이 지속적으로 필요하며, 미연에 사고를 방지하기 위하여 모니터링 계측 결과가 나타내는 적치장의 안정성을 평가할 필요가 있다.

국내에서 수행된 광물찌꺼기 적치사면 강우침투연구 및 안정성연구로는 부산 임기광산의 광물찌꺼기 적치사면을 대상으로 한 연구가 있고(Song *et al.*, 2016), 불포화토 사면에 적용된 강우침투연구 사례가 몇 건 존재한다(Oh *et al.*, 2008; Song, 2015; Cho, 2016). 위의 연구들은 모두 사면지반내 강우침투시 모관흡수력의 감소와 이로 인한 전단강도의 감소를 언급하고 있다. 본 연구에서 다루는 직내골 광물찌꺼기 적치장은 국내 최대규모중 하나이며, 적치가 종료된지 40년 이상 지난 적치장으로 침출수 누출 그리고 강우 및 지하수위에 대한 안정성 여부를 평가하여 지속적으로 유지·관리를 해야 한다.

본 연구에서는 강원도 삼척 제2연화광산 광물찌꺼기 적치장(직내골, 댐골) 중 직내골 광물찌꺼기 적치사면에 대한 모니터링 시스템과 수치해석 결과를 소개하고자 한다. 강우에 따른 사면의 침투 및 안정해석을 실시하였으며, 이를 위하여 2차원 유한차분법 기반 수치해석 프로그램 FLAC 2D를 이용하여 수행하였다(Itasca, 2019). 직내골 광물찌꺼기 적치장 강우침투해석 및 사면안정해석을 실시하였고, 투수계수별, 강우강도별, 지하수위별 민감도해석을 실시하여 적치장 사면의 안정성을 산출하였다. 이러한 해석결과는 추후 광물찌꺼기 적치장 위험도 분석기준 제언시 활용될 수 있다.

연구지역

강원도 삼척 제2연화광산 직내골 광물찌꺼기 적치장은 행정구역상 강원도 삼척시 가곡면 풍곡리에 위치한다. Fig. 1에 위성지도상 직내골 적치장의 위치를 표시하였다. 일반 저수용 댐과 달리 광물찌꺼기 적치장은 광산이 가해지는 동안 시공단계별로 댐체의 건설과 광물찌꺼기 적치가 동시에

Fig. 1. Location of Jiknaegol tailings storage facility, Google Earth, 2021

Fig. 2. Construction designs for tailings storage facility, (a) Downstream method (b) Centerline method (Globaltailings-review, 2021), (c) Construction design for Jiknaegol tailings storage facility(MIRECO, 2007).

진행되며, 적치장의 적치완료시기는 제2회화광산의 폐광 시기인 1987년과 일치한다. 직내골 광물찌꺼기 적치장의 적치방식은 하류축조형(Downstream)과 중심선축조형(Centerline)의 혼합방식이며, 하류축조형-중심선축조형 순으로 적치되었다. Fig. 2는 하류축조형과 중심선축조형 적치방식의 모식도를 보여준다.

직내골 적치장 기반암은 조선누층군의 일부인 캄브리아기 모봉층과 백악기에 조선누층군을 관입한 화강반암으로 이루어진다(KORES, 1981). 광물찌꺼기는 통일분류법(USCS)에 따라 실트질 모래(SM), 실트(ML) 그리고 일부 분의 점토질 실트(CL)로 분류된다.

모니터링 시스템

직내골 광물찌꺼기 적치장이 1987년 가동이 종료된 이후 약 40년이 경과한 상황이다. 그에 따라 적치장 제체의 안정성에 영향을 끼칠 수 있는 지하수위에 간극수압의 변화 및 내적 또는 외적 요인에 의한 제체의 변형을 모니터링할 수 있도록 간극수압계, 지하수위계, 지중침하계, 지중경사계를 계측항목으로 선정하고, CCTV를 설치하였다. 또한 외부 전력의 공급이 어려운 현지 조건을 고려하여 태양광 발전을 이용한 독립망 형태로 CCTV에 전력을 공급하는 방식을 선정하였다. 마지막으로 강우량 측정을 위하여 적

Fig. 3. 2D map and location of each monitoring sensor.

Table 1. Monitoring sensors and locations

Borehole number	Measuring instrument type	Installation depth	Installation quantity
B-1	Water Level Meter	GL -60 m	1(EA)
B-2	Extensometer	GL -66 m	1(EA) (Anchored in bedrock)
B-3	Inclinometer	GL -2 ~ -6 m GL -14 ~ -46 m	20(EA), (Every 2m)
B-4	Water Level Meter	GL -66 m	1(EA)
B-5	Piezometer	GL -28 m GL -39 m	1(EA) 1(EA)

치장 광물찌꺼기 매립 부분에 위치한 CCTV 근처에 강우량계를 설치하여 강우량을 측정하였다.

계측기의 설치위치는 직내골 적치장의 3차원 모델과 개략적인 사면안정해석을 통해 얻어진 예상 활동파괴면에 기초하여 선정되었고, 지하수위계 2개소, 간극수압계 1개소, 지중침하계 1개소, 지중경사계 1개소를 설치하였으며, 적치장 상부와 제체에 각각 1대씩의 CCTV를 설치하였다. Table 1과 Fig. 3에 모니터링 센서 종류, 위치, 개수 등을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 강우침투해석시 모니터링 시스템 인자들 중 간극수압계에서 나타날 간극수압의 변화에 초점을 맞추었다. 강우침투조건일 때 적치장 내의 간극수압 변화는 사면의 안정성과 직접적으로 연관되므로 모니터링 위치에서 시간에 따른 간극수압의 변화, 깊이로 따른 간극수압의 변화 등은 적치장 유지 및 관리에 있어 매우 중요한 부분이다.

수치해석 단면 및 지반정수

3차원으로 복원된 직내골 적치장 모델에 따르면, 적치장의 총 부피는 적치장 내 0.5 m 두께의 복토층 포함 총 3,397 천 m^3 으로 추정되며, 댐 제체가 약 1,153 천 m^3 , 적치물이 2,206 천 m^3 인 것으로 추정된다. 3차원으로 복원된 광물찌꺼기 적치장 형상으로부터 2차원 단면을 선정하였고, 직내골 광물찌꺼기 적치장의 적치방식이 하류축조형(Downstream)과 중심선축조형(Centerline)의 혼합방식임을 고려하여 모델 구성층을 산정하였다. 하류축조형-중심선축조형 순으로 적치가 이루어졌으나, 구체적인 설계도면이나 적치과

정에 대한 정보가 부족하므로, 비교적 단순한 단면으로 적치장 제체와 적치장 내부 광물찌꺼기를 구분하였다. Fig. 4에 모델 구조를 도시하였다. 적치장의 경사는 19~23° 사이인 완경사이고, 2차원 단면의 규모는 높이 130 m, 가로 924 m이다.

적치장의 구성층은 표준관입시험, 입도시험 등으로 결정되었고, 현장시험 및 실내토질시험, 문헌 조사를 통한 경험식 모두 활용하여 구성층의 물성을 산정하였다. Table 2에 물성치 요약하였다. 기반암의 경우 화강암 중 풍화암~연암 사이 물성을 문헌조사를 토대로 적용시켰고, 적치장 제체 부분은 탄성계수가 지반의 수직응력 혹은 구속압과의 상관관계를 가지므로 비선형탄성을 고려하였다(Duncan and Chang, 1970; Potts *et al.*, 2002; Shin and Kim, 2009; BHP Billiton and Vale S.A, 2016; Naeini and Akhtarpour, 2018). 포아송비의 경우 동적포아송비와 정적포아송비가 같다고 가정하였고, 측압계수는 일반화된 훅(Hooke)의 법칙에 따라 적용하였다(Pegah and Liu, 2020).

강우 침투 해석을 위해서는 불포화대 수리적 특성을 고려해야 한다. 불포화지반에서 물의 지배방정식은 비선형 편미분방정식 형태의 Richards 식으로 표현된다(Richards, 1931). 그러나 흙-수분보유곡선(soil-water retention curve), 투수계수함수(hydraulic conductivity function)의 비선형성은 Richards 식의 해를 풀어냄에 있어 큰 어려움을 야기한다(Cho, 2016). 따라서, 이러한 비선형성을 해결하고자 실험에 근거한 경험적 곡선이 발견되어 왔고 이 중 현재 가장 널리 쓰이고 있는 반 게누텐(Van Genuchten, 1980) 식을 이용하였다. 반 게누텐 식은 유효포화도와 수리수두의

Fig. 4. (a) 3D constructed model, (b) 2D map, (c) 2D constructed model.

Table 2. Engineering properties of tailings

Type	Silty Sand (and Gravel)	Sandy Silt	Silt	Clayey Silt	Bedrock (Granite)	References	
Unit weight (kg/m³), bulk/dry	1900/1632	1900/1632	1900/1581	1900/1581	2600	Grain Size Test, Density Logging	
Internal Friction Angle (°)	37.5	29.6	28.3	20	38	Direct Shear Test (KS F 2343), Borehole Shear Test, SPT and Correlation (Seo <i>et al.</i> , 2016; Kim <i>et al.</i> , 2001)	
Cohesion (kPa)	23.3	23.3	11.7	6.1	300		
Shear modulus (MPa)	$24.94\left(\frac{\sigma_v'}{P_a}\right)^{0.5}$	$24.94\left(\frac{\sigma_v'}{P_a}\right)^{0.5}$	39.80	17.99	2.08(GPa)	P-S Logging, SPT and Correlation (Sun <i>et al.</i> , 2013; Kirar <i>et al.</i> , 2016; Maheswari <i>et al.</i> , 2010; Seo <i>et al.</i> , 2016; Kim <i>et al.</i> , 2001)	
Bulk modulus (MPa)	$295.8\left(\frac{\sigma_v'}{P_a}\right)^{0.5}$	$295.8\left(\frac{\sigma_v'}{P_a}\right)^{0.5}$	132.67	59.97	1.39(GPa)		
Elastic Modulus (MPa)	$70.99\left(\frac{\sigma_v'}{P_a}\right)^{0.5}$	$70.99\left(\frac{\sigma_v'}{P_a}\right)^{0.5}$	115.42	52.17	5.2(GPa)		
Poisson's ratio	0.46	0.46	0.45	0.45	0.25		
Porosity	0.39	0.39	0.4	0.4	0.5	Consolidation test (KS F 2306), Seo <i>et al.</i> , 2016; Kim <i>et al.</i> , 2001	
Permeability (m/s), Ksat	2007	6.92E-06	6.92E-06	1.10E-06	1.10E-06	2.9E-07	Falling head test, Lugeon test
	2020	6.67E-07	6.67E-07	3.48E-07	3.48E-07	-	Slug test
Permeability anisotropy ratio (Kh/Kv)	1.25	1.25	10	10	1	Naeini and Akhtarpor, 2018; Vale, 2019	
Main Discontinuities	-	-	-	-	65/309, 31.9 (Joint friction angle)	BIPS, Kim <i>et al.</i> , 2001	

Table 3. Input parameters for two-phase flow analysis

Parameter	Sandy Silt
Saturated Permeability, k_s (m/s)	6.92E-06
Initial Saturation, S_w	0.64
Residual Saturation, S_r	0
Capillary strength constant, P_0 (Pa)	4649
Van Genuchten constant, a	0.3032
Van Genuchten constant, b	0.5
Viscosity ratio, μ_w/μ_a	56
Bulk modulus of water, K_w (Pa)	2E9
Bulk modulus of air, K_a (Pa)	1E5
Air density, ρ_a (kg/m^3)	1.25
Water density, ρ_w (kg/m^3)	1000

관계를 바탕으로 만들어진 실험식이다. 이 식을 이용하기 위해서는 실험을 통한 곡선피팅 및 모관흡수력 측정 등을 이용하나 본 연구에서는 불포화도 실험결과 대신, 반 계누텐이 개발한 RETC(RETention Curve) 코드를 이용하여 산정하였다(Van Genuchten, 1991). RETC 코드는 불포화대 수리적 특성을 입도분포, 체적밀도, 흙의 종류 등에 따라 산출해낼 수 있고, 문헌들을 통해 실제 실험값과 일치하는 비율이 높다고 알려져 있다(Van Genuchten, 1991; Bourazanis *et al.*, 2016; Londra and Kargas, 2018). 또한 광물찌꺼기 적치장이 시공단계별로 적치되는 특성을 고려하여, 투수계수의 이방성 또한 일부 고려하였다(Sarsby, 2013). 본 연구에서는 모델 해석의 단순화 및 적치장 사면안정성에 초점을 맞추기 위하여, 불포화대 수리특성은 적치장 사면상부에 위치한 모래질 실트 입도로 통일하였다. 또한, 2007년에 측정된 투수계수와 2020년 측정된 투수계수는 약 10배 정도의 차이가 나므로, 강우침투해석시 투수계수별 민감

도해석을 통하여 두 종류의 투수계수 모두 고려하고자 하였다. Table 3에 적치장 불포화대 수리적 특성을 요약하였다.

수치해석 방법

광물찌꺼기 적치장 불포화대 강우침투 시뮬레이션을 하기 위하여 물과 공기의 이상유동흐름(two-phase flow)을 FLAC 2D를 이용하여 적용하였다(Itasca, 2019). FLAC에서 불포화도 해석을 위하여 반 계누텐 모델을 사용하는데, 반 계누텐 모델은 불포화도 분야에서 가장 널리 쓰이는 모델로, 많은 논문에서 이 모델을 다룬 바 있다(Van Genuchten, 1980; Song *et al.*, 2016; Cho, 2016). 기본적으로 다공성 매체내 공극이 섞이지 않는 두 가지 유체로 완전히 채워져 있다고 가정하며, 물은 습윤유체(wetting fluid(w)), 공기는 비습윤유체(non-wetting fluid(a))로 취급된다. 달시의 법칙(Darcy's law)에 의해 물과 공기의 이동은 식 (1)과 (2)로 표현될 수 있다.

$$q_i^w = -k_{ij}^w k_r^w \frac{\partial}{\partial x_j} (P_w - \rho_w g_k x_k) \quad (1)$$

$$q_i^a = -k_{ij}^a \frac{\mu_w}{\mu_a} \frac{\partial}{\partial x_j} (P_a - \rho_a g_k x_k) \quad (2)$$

k_{ij} 는 포화 이동 계수(saturated mobility coefficient, $= k_s / (g \rho_w)$), k_r 은 유체의 상대투수성이며, 물 포화도의 함수로 표현된다. μ 는 동점성, ρ_w 는 물의 밀도, ρ_a 공기 밀도, P_w 는 간극수압, P_a 는 공기압, μ_w / μ_a 는 점성계수비를 나타낸다.

물의 상대투수계수는 포화도의 함수로 간주되고, 반 계누텐 경험식에 의하면 물과 공기의 상대투수계수는 각각 (3)와 (4)으로 표현할 수 있다(Van Genuchten, 1980).

$$k_r^w = S_e^b [1 - (1 - S_e^{1/a})^a]^2 \quad (3)$$

$$k_r^a = (1 - S_e)^{1/2} [1 - S_e^{1/a}]^{2a} \quad (4)$$

a, b는 상수, S_e 는 유효포화도이다. 유효포화도는 물의 포화도와 잔류포화도의 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$S_e = \frac{S_w - S_r}{1 - S_r} = \frac{1}{\left[1 + (\psi / P_0)^{\frac{1}{1-a}}\right]^a} \quad (5)$$

S_r 는 잔류포화도, ψ (Pa)는 모세관압(matric suction), P_0

(Pa)는 공기함입치(air-entry value)에 의해 결정되어지는 변수이다. 모세관압은 공기압과 간극수압의 차이로 표현된다. 모세관압은 (6)으로 표현 가능하다.

$$\psi = P_a - P_w = P_0 [S_e^{-1/a} - 1]^{1-a} \quad (6)$$

또한, 물의 불포화투수계수는 물의 상대투수계수와 포화 투수계수의 곱(식 (7))으로 표현가능하다.

$$k(S_e) = k_s k_r^w = k_s S_e^b [1 - (1 - S_e^{1/a})^a]^2 \quad (7)$$

수리-역학 복합거동을 수치해석으로 재현하기 위한 지배방정식은 물과 공기의 유체 균형식과 유체 구성방정식을 적용하여 정리한 식 (8)과 (9)으로 나타낼 수 있다.

$$n \left[\frac{S_w}{K_w} \frac{\partial P_w}{\partial t} + \frac{\partial S_w}{\partial t} \right] = - \left[\frac{\partial q_i^w}{\partial x_i} + S_w \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right] \quad (8)$$

$$n \left[\frac{S_a}{K_a} \frac{\partial P_a}{\partial t} + \frac{\partial S_a}{\partial t} \right] = - \left[\frac{\partial q_i^a}{\partial x_i} + S_a \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \right] \quad (9)$$

K_w , K_a 는 각각 물과 공기의 체적탄성계수, n은 공극률, ϵ 은 체적변형률, $S_a (= 1 - S_w)$ 는 공기의 포화도, t는 시간이다.

그 외 추가적으로 필요한 식들은 모멘트 평형식(10)과 체적 밀도식(11)이 있다.

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i = \rho \frac{du_i}{dt} \quad (10)$$

$$\rho = \rho_d + n(S_w \rho_w + S_a \rho_a) \quad (11)$$

본 연구에서 사면안정해석을 수행하기 위하여 FLAC 내 전단강도감소법(Shear Strength Reduction, SSR)을 적용하였다. 음의 간극수압을 고려하기 위하여, 비숍(Bishop)의 유효응력식과 모어-쿨롱(Mohr-Coulomb) 구성방정식 적용되어 불포화대 내의 파괴를 고려할 수 있도록 하였다(Bishop, 1959).

모어-쿨롱 구성방정식은 식 (12)와 같고, 비숍의 유효응력식은 식 (13)로 표현할 수 있다.

$$\tau_{max} = \sigma_b \tan \phi' + c' \quad (12)$$

$$\sigma_b = (\sigma - P_a) + \chi(P_a - P_w) \quad (13)$$

$\tau_{\max}$, σ_b , ϕ' , c' 는 각각 전단강도, 유효응력, 내부마찰각, 점착력이며 χ 는 포화도 관련 계수로, 0~1 사이 값을 지닌다. χ 대신 물의 포화도를 대입하면($\chi = S_w$), 식(14)로 정리된다.

$$\sigma_b = \sigma - (S_w P_w + S_a P_a) \quad (14)$$

최종적으로 전단강도식은 식(15)으로 정리된다.

$$\tau_{\max} = (\sigma - P_a) \tan \phi' + S_w (P_a - P_w) \tan \phi' + c' \quad (15)$$

위의 식에서 흙이 완전히 건조하거나 포화되었을 경우 전단강도식은 전통적인 모어-쿨롱식(식(12))과 완전히 같아지며, 불포화 조건일 경우 식(15)의 형태로 걸보기점착력이 표현된다.

사면안정해석에 있어서 전단강도감소법(SSR)은, 전통적으로 가장 많이 쓰인 한계평형법(Limit Equilibrium Method, LEM)과 달리 파괴면의 가정 없이 자동으로 파괴면을 특정할 수 있고, 사면토체의 절편가정 또한 없으므로 절편 내 힘을 고려하지 않아도 되는 장점이 있다. 강도감소법은 점진적으로 전단강도를 감소시켜 한계평형상태에 이르도록 하는 방식을 채택하고 있다. 즉, 구간법과 이분법을 통한 시행착오법을 활용하며, 시행안전율 F^{trial} 이 속한 구간 간격이 일정한 숫자(기본값 1E-4)보다 작아질 때 수렴하게 된다. 강도감소법을 수식으로 표현하면 식(16), (17)와 같다.

$$c^{trial} = \frac{1}{F^{trial}} c \quad (16)$$

$$\phi^{trial} = \arctan\left(\frac{1}{F^{trial}} \tan \phi\right) \quad (17)$$

Fig. 5. Main drainage pictures and locations (blue line) in 2D Map.

수치해석 결과

강우침투해석

강우침투해석을 하기 전에, 경계 조건(Boundary condition)을 확립하여야 한다. Fig. 5에 직내골 적치장에 설치되어 있는 주배수로의 위치와 현황을 도시하였다. 현재 배수에 문제가 없고, 적치장 내 우수유입으로 인한 유량증가는 없다고 가정하고, 강우조건을 모델의 상단부에 적용하였고, Fig. 6에 경계 조건을 표시하였다. 적치장 불포화대 초기 수리학적 조건은 2020년 12월 측정된 지하수위와, 강원도 삼척 기후변화 상해 분석보고서(KMA, 2015), 강원도 기후변화 전망보고서(KMA, 2017)에 근거하여 강우량이 월당 84mm일 때의 포화도(0.64), 초기 모관흡입력(-10.75 kPa)으로 가정하였다(Itasca, 2019).

이 때 강우강도가 광물찌꺼기의 침투능보다 큰 경우 적치장 사면 표면에서 물 고임(Ponding)이 발생한다. 이 경우 사면의 표면에서 양의 간극수압이 발생하고 이는 물리적으로 비현실적이므로 사면 표면을 따라 강우의 유출(Runoff)가 일어난다 가정하여 양의 간극수압이 발생하지 않는 조건(Seepage boundary)을 적용하였다(Cho, 2016). 흙의 침투능은 일반적으로 포화투수계수와 같고, 이는 강우강도로 환산시 시간당 약 25 mm에 해당하므로, 시간당 25 mm 이상의 강우강도는 사면표면에 물 고임이 발생하지 않는 조건을 적용하였다. 이는 사면 표면부의 간극수압이 0보다 커지는 것을 방지한다.

본 연구에서는 시간에 따른 간극수압 변화를 보기 위하여 포화투수계수의 3배인 시간당 75 mm의 강우강도로 48 시간(3600 mm)동안 적용시켰다. 그 후 투수계수별(현 투수계수의 10배, 현 투수계수의 0.1배)로 동일 강우강도를 적용시켜 간극수압 변화의 차이를 파악하였다. 간극수압은 Fig. 6에 나와있듯이 모니터링선에 해당하는 Pp선에서 모니터링 위치(-28 m, -39 m)와 얇은 깊이(-3.8 m, -6.3 m)에서의 시간에 따른 변화를 나타내고자 하였다. 또한, Pp선 깊이에 따른 간극수압을 24시간, 36시간, 48시간으로 나누어 표시하였다. 깊이에 따른 간극수압으로 습윤전선의 하강을 간접적으로 확인할 수 있다. Table 5에 결과들을 요약하였다. 그 결과 기존 투수계수의 경우 48시간동안 얇은 깊이에서의 간극수압 변화는 잘 나타났으나, 모니터링 깊이에는 변화가 없는 것을 알 수 있다. 48시간동안 간극수압의

Fig. 6. Model section under rainfall boundary condition.

Table 4. Time series of pore water pressures along monitoring line, Pp (75 mm/h, 48 h)

변화는 표면으로부터 약 11 m까지 나타났다. 기존 투수율의 10배인 경우 48시간동안 모니터링 깊이까지의 간극수압 변화가 관측이 잘 되는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 기존 투수계수보다 10배 작은 경우 기존 투수계수와 마찬가지로 48시간동안 간극수압의 변화는 얇은 깊이에서 집중되고, 표면으로부터 약 6 m까지 나타나는 것을 알 수 있다. 깊이별 간극수압에서 간극수압이 0보다 큰 부분이 나타나는 이유는 본 연구에서 불포화대 내 공기압을 고려하였고, 이 공기압이 증가하였기 때문이다. 이전 연구(Cho, 2016)에서도 관찰되었으며, Table 4로 미루어보아 실제 강우시 간극수압 변화를 모니터링 위치에서 관측하려면 시간의 지연이 일어날 수 있고, 투수계수의 크기가 이를 좌우한다는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 해석은 모니터링과 연계하였을시 현장투수계수를 간접적으로 추정할 수 있는데 기여를 할 수 있다.

사면안정해석

현재 사면안정해석시 직내골 적치장의 안전율은 1.34로 안정한 상태이고, 강우강도별(시간당 5 mm 단위, 24시간 적용시) 그리고 기존투수율과 기존투수율보다 10배 작을 때를 비교하여 안전율 변화를 확인해보면 거의 변화가 없고, 안전율 감소값이 최대 0.01로 나타났다. 이는 Fig. 7에

Fig. 7. Factor of safety values per rainfall intensity (24h), related to permeabilities. **Fig. 8.** Factor of safety values per rainfall intensity (24h), related to groundwater levels.

Table 5. Saturation and shear strain contour according to rainfall (25 mm/h, 24 h) and GWL

Fig. 9. Time series of factor of safety values per amount of rainfall(25mm/h).

서 확인할 수 있다. Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 모니터링공 (B-1, B-2)에 해당하는 조건별 지하수위(B-1 : -52m, -25m, -20m, -15m, B-4 : -63m, -25m, -20m, -15m)와 연계한 강우강도별 사면안정해석 결과를 보면 동일지하수위일 경우 안전율의 감소값이 최대 0.02로, 강우강도가 적치장의 안정성에 큰 영향을 끼치지 않는 것을 알 수 있다. 이렇게 나타난 이유는 강우강도가 광물찌꺼기의 침투능보다 커질 경우 표면유출이 일어나므로 실제 강우가 침투되는 양의 차이가 거의 없기 때문이다. 결국 지하수위가 적치장 안정성에 큰 영향요인임을 확인할 수 있다. Fig. 9에서는 포화 투수계수와 같은 강우강도인 25 mm/h로 72시간동안(총

1,800 mm) 경계조건을 적용하였을 때 안전율 결과를 도시하였다. 삼척의 연간 최대 강수량이 1,500 mm 미만이므로 (KMA, 2017), 1,800 mm 강수량은 극한조건이며 이 때 안전율의 감소값이 최대 0.025로 나타난다. 즉, Fig. 8과 Fig. 9를 비교했을 때 강우강도보다는 강우가 내린 시간이 안전율에 영향을 더 끼칠 수 있음을 의미한다. 다만, 본 해석에 의한 안전율 변화는 단순화된 형상과 물성에 기인한 것일 수 있으므로 정밀한 해석을 통해 안전율 변화를 검토하여야 한다.

Table 5에 25 mm/h의 강우강도로 24시간(600 mm) 적용시켰을 때의 결과들을 시각화하였다. 포화도 그림을 보면 물의 흐름방향과 포화된 깊이를 알 수 있는데, 표면으로부터 최대 5 m 정도의 습윤전선의 깊이를 보인다. 최대전단변형이 나타나는 전단대는 현재 지하수위(2020년 기준, -63 m)에서 알게 나타나고 다른 지하수위(-25 m, -20 m, -15 m)에서는 전단대의 위치가 거의 유사하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 적치장 안정성 평가시 실제 변형이 크게 일어날 가능성이 있는 곳을 예측하는데 기여를 할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 제2연화광산 직내골 광물찌꺼기 적치장에 대한 간략한 소개와, 모니터링 시스템 구축, 수치해석 모델링을 통한 강우에 따른 사면의 침투 및 안정해석을 다루었다. 이를 위하여 유한차분 수치해석 프로그램 FLAC 2D를 이용하였으며, 해석결과는 다음과 같다.

1. 강우의 침투해석은 침투능과 강우강도에 따라 경계조건을 달리 적용하였다. 투수계수의 크기별(기존투수계수, 기존투수계수의 10배, 기존투수계수의 0.1배)로 일정 강우강도(75 mm/h, 48시간)를 적용하여 모니터링 위치에서의 간극수압 변화와 깊이에 따른 간극수압을 도시하여 습윤전선의 지연하강 및 실제 모니터링과의 연계 가능성을 검토하였다.
2. 강우 및 지하수위에 따른 사면안정해석을 통해서 강우강도가 광물찌꺼기의 침투능보다 클 경우 표면유출이 일어나므로 실제 강우가 침투되는 양의 차이가 거의 없기 때문에 일정 강우강도 이상에는 안전율에 미치는 영향이 크지 않다. 삼척에 내릴 수 있는 강우가 직내골 적치장의 안정성에 미치는 영향은 미미한 것으로 나타났으나 보다 정밀한 해석이 필요하다.
3. 강우강도보다는 강우가 내린 시간이 적치장 안전율에 영향을 더 끼칠 수 있고, 안전율 저하는 최대 0.025로 적치장의 안정성에 큰 영향을 끼치지 않는다. 직내골 적치장에서 지하수위가 안전율을 결정하는 중요한 인자이며, 지속적인 모니터링이 필요하다.

본 연구는 직내골 광물찌꺼기 적치장의 모니터링을 위하여 수치해석을 수행한 연구로, 이후 모니터링 계측 결과와 연동한 검증을 통하여 실제 직내골 적치장의 수리학적 거동과 안정성을 예측하며, 더불어 국내에서 적치장 위험도 분석기준 제안에 활용될 수 있을 것이라 생각한다.

사 사

이 논문은 2021년도 한국광해광업공단 광해방지기술개발사업(0456-20210001, ICT 기반 광물찌꺼기 적치장 모니터링기법 및 안전관리기술 개발) 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- BHP Billiton and Vale S.A., 2016. *Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam*, Melbourne and Rio de Janeiro, Australia and Brazil, p.1-76.
- Bishop, A.W., 1959. The principle of effective stress, *Teknisk ukeblad*, 39, p.859-863.
- Bourazanis, G., Londra, P., Kargas, G., Argyrokastritis, I., and Kerkides, P., 2016. Evaluation of porous medium hydraulic properties using experimental methods and RETC code, *Archives of Agronomy and Soil Science*, 62(8), p.1147-1157.
- Cho, S.E., 2016. Stability analysis of unsaturated soil slopes considering water-air flow caused by rainfall infiltration, *Engineering Geology*, 211, p.184-197.
- Cornwall, W., 2020. A dam big problem, *Science*, 369(6506), p.906-909.
- Duncan, J.M. and Chang, C.Y., 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils, *Journal of the soil mechanics and foundations division*, 96(5), p.1629-1653.
- Globaltailingsreview, 2021.10.05., <https://globaltailingsreview.org/about-tailings/>
- Google Earth, 2021.10.05, <https://earth.google.com/web/>.
- Itasca, 2019. *User's Manual, FLAC 8.1*. Itasca Consulting Group Inc., Minneapolis, Minnesota (USA).
- Jung, M.C., Kim, J.W., Hwang, I.H., Yang, I.J., Park, J.H., and Kim, T.Y., 2018. Proper monitoring methods for safety management of tailings, *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 55(6), p.576-587.
- Kim, D.B., Lee, S.K., and Lee, C.I., 2001. The engineering properties of shear strength of rock joints in Korea. *Journal of the Korean Geotechnical Society*, 17(4), p.301-315.
- Kim, S., Min, K.B., Choi, Y., Kim, J., and Lee, J., 2020. International Case Study of Tailings Dam Failure and

- Management Standards, *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 57(6), p.619-628.
- Kirar, B., Maheshwari, B.K., and Muley, P., 2016. Correlation between shear wave velocity (vs) and SPT resistance (N) for Roorkee region, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 2(1), p.9.
- Korea Meteorological administration (KMA), 2015. Detailed analysis report of climate change, Samcheok, Kangwon Province, p.64.
- Korea Meteorological administration (KMA), 2017. *Forecast report of climate change*, Kangwon Province, p.108.
- Korea Mine Reclamation corporation (MIRECO), 2007. *2007 Yeonhwa II Mine tailings storage loss prevention report*, Samcheok, p.18.
- Korea Resources Corporation (KORES), 1981. *Deposit of Korea*, 8, p.184-185.
- Londra, P. and Kargas, G., 2018. Evaluation of hydrodynamic characteristics of porous media from one-step outflow experiments using RETC code, *Journal of Hydroinformatics*, 20(3), p.699-707.
- Maheswari, R.U., Boominathan, A., and Dodagoudar, G.R., 2010. Use of surface waves in statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance of Chennai soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, 28(2), p.119-137.
- Naeini, M. and Akhtarpour, A., 2018. Numerical analysis of seismic stability of a high centerline tailings dam, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 107, p.179-194.
- Oh, S., Mun, J.H., Kim, T.K., and Kim, Y.K., 2008. A case study of rainfall-induced slope failures on the effect of unsaturated soil characteristics, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 28(3C), p.167-178.
- Oh, S.J., Kim, K.J., Song, J.Y., and Choi, U.K., 2017. A Study on Evaluation Method of the Tailings Dam by Standardization of Post-Management Methods, *Journal of The Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, 54(2), p.123-138.
- Pegah, E. and Liu, H., 2020. Evaluation of hyperbolic stress-strain and bulk-modulus model parameters in granular soil mass using seismic surveying, *Engineering Geology*, 266, 105456.
- Potts, D., Axelsson, K., Grande, L., Schweiger, H., and Long, M., 2002. *Guidelines for the use of advanced numerical analysis*, Thomas Telford Publishing, 180p.
- Richards, L. A., 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums, *Physics*, 1(5), p.318-333.
- Sarsby, R.W., 2013. *Environmental geotechnics*, Thomas Telford Publishing, 496p.
- Seo, Y.S., Yun, H.S., Kim, D.G., and Kwon, O.I., 2016. Analysis on physical and mechanical properties of rock mass in Korea, *The Journal of Engineering Geology*, 26(4), p.593-600.
- Shin, D.H. and Kim, J.H. 2009. An Overview on Technology and Research of Dam and Levee in Korea, *Proceedings of the Korean Geotechnical Society Conference*, Korean Geotechnical Society, pp. p.319-334.
- Song, Y.S., 2015. Numerical Analysis of the Seepage from and Stability of a Mine Waste-dump Slope during Rainfall, *The Journal of Engineering Geology*, 25(1), 57-66.
- Song, Y.S., Chae, B.G., and Lee, J., 2016. A method for evaluating the stability of an unsaturated slope in natural terrain during rainfall, *Engineering Geology*, 210, p.84-92.
- Sun, C.G., Cho, C.S., Son, M., and Shin, J.S., 2013. Correlations between shear wave velocity and in-situ penetration test results for Korean soil deposits, *Pure and Applied Geophysics*, 170(3), p.271-281.
- The Government of British Columbia, 2015. *Report on Mount Polley Tailings Storage Facility Breach*, British Columbia, Canada, p.1-147.
- Vale S.A., 2019. *Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Brumadinho Dam I*, Rio de Janeiro, Brazil, p.1-71.
- 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), p.892-898.
- Van Genuchten, M.V., Leij, F.J., and Yates, S.R., 1991. *The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils*, USDA, Riverside, California.

김 세 진

현재 서울대학교 에너지시스템공학부 석사과정
(本學會誌 第57券 第6号 参照)

최 용 근

1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사

1996년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사

2005년 서울대학교 대학원 지구환경시
스템공학부 공학박사

현재 지오제니 컨설턴트 자원사업부 전무
(E-mail; ykchoi@geogeny.biz)

박 관 인

현재 한국광해광업공단 기술연구원 팀장
(本學會誌 第58券 第4号 参照)

민 기 복

현재 서울대학교 에너지시스템공학부 교수
(本學會誌 第57券 第6号 参照)

김 지 혜

현재 한국광해광업공단 기술연구원 과장
(本學會誌 第57券 第6号 参照)

백 승 한

현재 한국광해광업공단 기술연구원 원장
(本學會誌 第58券 第4号 参照)