

폐콘크리트 재생골재를 활용한 개량 폐광미 매립지의 사면안정해석

안남규 · 김태형* · 오제일[†] · 이주영**

중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 · *국립한국해양대학교 토목환경시스템공학부 · **중앙대학교 건설대학원 환경공학과

(2004년 9월 14일 접수, 2005년 2월 1일 채택)

Slope Stability Analysis of Improved Wasted Mine Tailing Landfill Using Fine Recycled-Concrete Aggregates

Nam-Kyu Ahn · Tae-Hyung Kim* · Je-ill Oh[†] · Ju-Young Lee**

Department of Civil & Environmental Eng., Chung-Ang University

*Division of Civil & Environmental System Engineering, Korea Maritime University

**Department of Environmental Engineering, Chung-Ang University

ABSTRACT : An extensive numerical analysis is carried out to investigate the slope stability of the wasted mine tailing landfill constructed by the utilization of fine recycled-concrete aggregates. To do this, first, the physical and mechanical properties of the fine recycled-concrete aggregates and the wasted mine tailing are investigated, and the settlement and the change of material property of the fine recycled-concrete aggregates resulted from reaction with water are also examined. The OH elution from the fine recycled-concrete aggregates reacted with water slightly causes the change of material properties such as porosity, permeability and waster absorption, but the settlement does not happen noticeably. The results of numerical analysis of the landfill slope built with wasted mine tailing and recycled-concrete aggregates in alternate layer indicate that slope stability increases with decreasing the slope ratio, with decreasing the groundwater level inside slope, and with increasing the depth of fine recycled-concrete aggregate layer. Based on this study, thus, engineers working in related to the wasted mine tailing landfill design and construction using the fine recycled-concrete aggregates should be considered the slope ratio, the groundwater level, the depth of fine recycled-concrete aggregate layer.

Key Words : Waste Mine Tailing, Acid Mine Drainage, Recycled-Concrete Aggregates, Slope Stability, Landfill

요약 : 본 연구에서는 폐콘크리트 재생골재를 활용한 친환경적 폐광미 매립지 사면에 대한 폭넓은 수치해석을 수행하였다. 이를 위해 먼저 콘크리트 재생골재와 폐광미의 물리·역학적 재료 특성을 조사하였고, 재생골재가 물(지하수/우수 가정)과 반응하여 알칼리 발생에 따른 지반침하발생 여부 및 재료적 특성 변화도 살펴본 후 이를 바탕으로 사면안정해석을 집중 수행하였다. 재생골재와 물의 반응 실험결과, 재생골재에서 OH의 용출로 인한 침하는 발생하지 않았고, 투수계수, 공극률, 흡수율에서도 미미한 차이만이 발생하였으므로 이를 사면해석시 고려하지 않았다. 폐광미와 재생골재를 층으로 다져서 매립하는 임의 사면에 대한 수치해석 수행 결과, 사면의 안전율은 사면경사가 완만할수록, 재생골재 층의 두께가 커질수록, 사면 내 수위가 낮을수록 증가하는 경향을 보였다. 그러므로 폐콘크리트 재생골재를 활용한 친환경적 폐광미 매립지 설계 및 시공시 매립지 사면의 경사, 재생골재 층의 두께, 사면 내 수위에 대한 고려를 반드시 하여야 한다.

주제어 : 폐광미, 산성광산배수, 폐콘크리트 재생골재, 사면안정, 재활용

1. 서론

폐광미란 선광 처리시 발생하는 부산물로 중금속(Cd, Cu, Pb, Zn 등)을 비롯한 여러 가지 유해물질을 포함하기 때문에 산업폐기물로 분류되며,¹⁾ 광산의 갱내수와 더불어 산성 광산배수(Acid Mine Drainage, 이하 AMD)의 발생원으로 알려져 있다. 광산갱구에서 발생하는 AMD의 경우 그 발생 원인이 명확(점오염원 특성)한 것에 반하여, 광산 주변에 적

치되어 있는 폐광미에 우수나 지하수 침투로 인하여 발생 되는 AMD는 발생 범위가 넓고 불분명(비점오염원 특성)하여 그 대응이 쉽지 않다. 게다가 대부분의 폐광미가 무분별하게 그대로 방치되어 있기 때문에 지반공학적 관점에서 볼 때 항상 붕괴위험이 상존하며, 특히 여름철 집중호우와 같은 우기에 사면붕괴 위험은 더욱 증가한다.

따라서 현재 환경부, 산업자원부, 농림부 등에서 실시하는 광해방지사업에 의해 일부 광산폐기물(폐광미 포함)을 적치장이나 침전지에 옹벽, 차수막 또는 폐기물저장시설(광재댐)로 매립하고 있지만, 일반적인 매립공법은 폐기물의 원천적인 처리방법이 아닌 수동적 차단이며 차수막이나 저류 등은 장기간 유지관리가 필요하므로 폐광미로 인한 침

[†] Corresponding author
E-mail: ohjeill@cau.ac.kr
Tel: 02-826-4528

Fax: 02-812-1834

출수의 발생을 제어하거나 AMD의 환경적 위해성 저감, 대응에는 미흡하다.²⁾ 이와 같은 이유로 다양한 폐광미의 처리 기법에 대한 추가적인 연구가 국·내외에서 진행되고 있으며,³⁻⁵⁾ 일부 논문(김종범 등, 1998)은⁶⁾ 폐콘크리트의 부산물인 재생잔골재가 지니는 알칼리 특성(OH⁻ 발생)을 이용하여 AMD의 산성을 중화시키고 각종 중금속 성분을 Metal hydroxides로 형성시켜 침전 제거하는 연구 결과를 발표하기도 하였다.

본 연구는 궁극적인 측면에서는 폐광미에서 발생하는 산성 침출수(AMD)의 처리 및 발생억제를 유도하는 체계적이고 종합적인 매립 시스템 구축에 대한 연구를 추구하고 있으며, 이러한 연구의 일환으로 우선적으로 폐콘크리트 재생잔골재를 활용한 친환경적 폐광미 매립 방안에 대한 지반공학 적 사면안정 해석을 실시하고자 한다. 이를 위해 콘크리트 재생잔골재와 폐광미의 물리·역학적 재료 특성 조사와 재생잔골재가 물(지하수/우수 가정)과 반응하여 알칼리 발생시 지반 침하발생 여부 및 재료적 특성 변화를 살펴본 후 이를 바탕으로 사면안정해석을 집중 수행하였다. 사면안정해석은 폐광미와 재생잔골재를 여러 개의 층으로 다져서 매립하는 임의 사면을 대상으로 매립지 설계기준을 바탕으로 실시하였으며, 사면의 경사, 사면 내 수위 및 재생잔골재층의 두께 등을 고려하여 사면안정에 미치는 영향을 검토하였다. 해석은 한계평형이론 가운데 가장 널리 사용되고 있는 Bishop의 간편법⁷⁾을 적용하였으며, 해석프로그램으로는 SLOPILE 프로그램⁸⁾을 사용하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

실험에 사용된 폐광미는 강원도 삼척에 위치한 폐광미 적치장(대한석탄공사 도계탄광)에서 채취하였으며, 모든 시료는 함수비 등의 교란영향을 최소화하기 위해 밀봉하여 실험실에 운반하였다. 폐콘크리트 재생잔골재는 폐광미의 AMD 발생을 억제한다는 목적으로 산성중화능이 높은 5 mm 미만의 재생잔골재를 선택하였으며, 인천에 위치한 C사에서 '1차 압축파쇄-자력선별-회전분류-송풍-골재세척-2차 압축파쇄-3차 파쇄-진동분류'의 생산공정을 거친 재생잔골재를 공급받아 실험에 사용하였다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 재료 특성 시험

사면안정해석 모델링에 필요한 재생잔골재와 폐광미의 공학적인 매개변수 산출을 위해서 재생잔골재와 폐광미의 물성시험(자연함수비, 비중, 입도분석, Atterberg한계)과 역학시험(다짐시험, 삼축압축시험, 직접전단시험)을 실시하였다(표 1 참고).⁹⁾ 각 시료는 대표성을 나타낼 수 있도록 KS 실험기준이 정한 범위 내에서 과학적 큰 입자나 불순물은 사전 제거한 후 사용하였다.

Table 1. The examination item of fine recycled aggregates and wasted mine tailing

Classification	Test Item	Method
Physical properties	Water content	KS F 2306
	Grain size analysis	KS F 2302, 2309
	Density	KS F 2308
	Liquid limit	KS F 2303
	Plastic limit	KS F 2304
Mechanical properties	Compaction test	KS F 2312
	Triaxial test	KS F 2314
	Direct shear test	KS F 2316

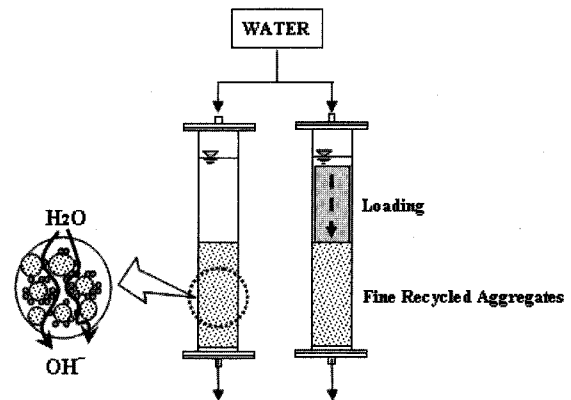


Fig. 1. The change of fine recycled aggregates characteristic by leaching of underground water and rainfall.

2.2.2. 지하수 및 강우에 의한 재생잔골재 침하 및 물성 변동 실험

재생잔골재는 입자 주변에 시멘트 모르타르성분이 부착되어 있는 특성을 가지기 때문에 강우수 또는 지하수 등의 H₂O와 재생골재의 시멘트모르타르 성분내 용해성 CaO가 수화, 가수분해 반응하여 OH⁻ 이온이 생성되게 된다.¹⁰⁾ 한편, 이러한 재생골재 표면의 CaO가 물에 녹을 때 재료의 특성 변화가 예상된다. 이러한 특성이 지반공학적인 침하에 끼치는 영향성을 살피기 위해서 Fig. 1과 같이 직경 7 cm, 높이 70 cm의 컬럼에 재생잔골재 1.5 kg을 KS F 2312의 방법에 따라 다져 넣었다. 그리고 하중재하에 의한 차이를 적용하기위해 실험장치의 최대 재하하중(0.4 kg/cm²)을 설정하고 하중이 없는 조건과 비교 실험하였다. 설치된 컬럼 장치에 증류수 500 mL를 80회 반복적으로 주입하여 10년간의 강우(=1,000 mm/yr)를 모사하였다. 총 40 L에 대한 용출을 완료한 후 전·후의 침하와 재료특성(흡수율, 투수계수, 공극률)의 변화를 분석하였다.

2.2.3. 사면안정해석

폐광미를 포함하는 광산폐기물의 친환경 안정화 방법이 있어 AMD의 중화/중금속 제거와 같은 환경공학 적 문제와 함께 사면 구조체의 안정성 확보와 같은 지반공학 적 문제 둘 다 중요한 요소라 할 수 있다. 본 연구에서는 폐콘크리

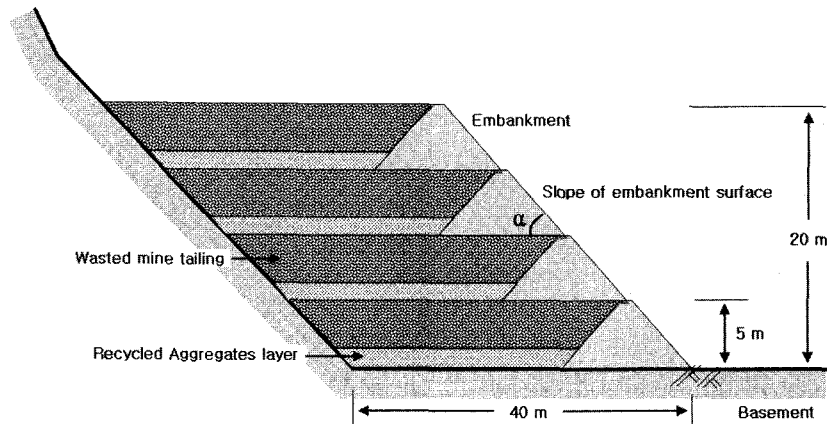


Fig. 2. The schematic diagram of analysis section.

트 재생잔골재와 폐광미를 여러 개의 층으로 다져서 매립되는 사면을 대상으로 사면의 경사, 사면내의 수위, 재생잔골재층의 두께에 따른 사면의 파괴형상 및 사면안전율의 영향을 전산모사 하였다. Fig. 2는 사면안정해석을 수행하기 위해 가정된 대표적인 단면을 나타낸 것이고 사면안정해석은 SLOPILE 프로그램을 사용하여 표 2와 같이 사면 경사, 수위, 재생잔골재 두께의 3가지 조건에서 수행하였다. 폐광미와 재생잔골재의 입력값은 실험에서 구해진 데이터를 사용하였으며, 특히 내부마찰각은 가장 나쁜 조건에서의 모사를 위해서 실험값 중 가장 낮은 수치를 선택하였다. 성토재와 기반암은 일반적인 값을 참고하였다.¹¹⁾

Table 2. Parameters and simulation conditions in this study

Basic parameter	Parameter	Specific gravity (Gs) (kg/cm ³)	Cohesion (c) (kg/cm ²)	Internal friction angle (°)
	Waste mine tailing	1.73	0	23.0
	Fine recycled aggregates (<5 mm)	1.89	0	32.0
	Embankment	1.90	1.50	25.0
	Basement	2.10	5.00	35.0
Simulation parameter	Parameter	Change range	Assumption condition	
	Slope of embankment surface	1: 1 ~ 1: 2	embankment : 4 layer thickness(recycled aggregates) : 50cm water level inside slope : neglect	
	Thickness of recycled aggregates layer	20 ~ 150 cm	embankment : 4 layer water level inside slope : neglect slope of embankment surface : 1:2	
	Location of water level inside slope	1 ~ 4 layer	embankment : 4 layer thickness(recycled aggregates) : 50cm slope of embankment surface : 1:2	

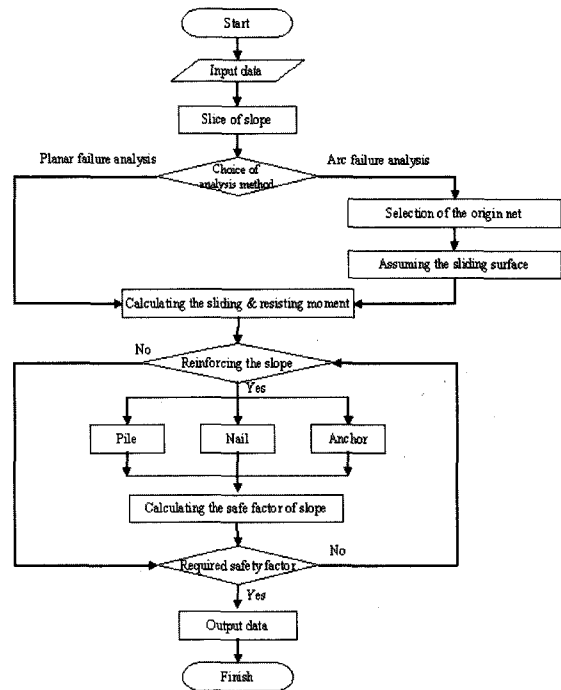


Fig. 3. SLOPILE program flowchart.

SLOPILE 프로그램은 활동역지시스템(예를 들면 억지말뚝, 쏘일네일링 혹은 앵커)으로 보강된 사면의 안정해석을 위해 개발된 것이나 본 연구에서는 활동역지시스템이 사용되지 않기 때문에 이 부분에 대한 해석은 고려를 하지 않았다. 프로그램의 해석 흐름도는 Fig. 3과 같다.

먼저 해석대상 사면의 분석을 위해 전체사면을 일정한 분할요소로 나눈 후 사면안정해석방법을 선택하다. 그리고 설정된 사면안정해석방법에 따라 평면파괴해석(무한사면해석)과 원호파괴해석을 선택하여 실행하도록 되어 있다. 본 연구에서는 매립지의 기하학적 조건을 고려하여 원호파괴해석만을 실시하였다. 원호파괴면 해석법의 경우 가상원호활동면의 원점으로 예상되는 부분에 원점망을 작성하여 원점망의 각절점을 중심점으로 한 무수한 가상원호 활동면에 대해 사면안전을 계산을 반복하여 최소사면안전율이 구하

여지는 원점과 가상원호 활동면을 찾는다. 사면안전을 계산은 한계평형원리에 입각한 절편법을 사용하였고, 각각의 원호활동면에 대하여 사면의 활동모멘트와 지반의 저항에 의한 저항모멘트를 계산하여 기억시킨다. 최종적으로 이를 이용하여 사면안전을 바로 계산한다.

본 연구에서는 한계평형이론에 의한 절편법 가운데 가장 널리 이용되고 있는 Bishop의 간편법을 사용하였다. 이 방법의 결과는 이론상으로 산출된 정확한 다른 방법과의 차이가 적으며 편리성과 신뢰성을 많은 경험으로부터 이미 입증 받았기 때문이다.¹²⁾ Bishop 방법은 절편의 양 수직면에 작용하는 힘의 합력은 수평방향으로 작용한다고 가정하고 해석하는 방법이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 재료특성

3.1.1. 물리적 재료 특성

폐광미와 재생 잔골재에 대한 KS 물리특성 시험 결과 (Table 3 참고), 폐광미는 세립분에 해당되는 0.08 mm체 통과량이 30%인 점토질 모래(SC)로, 재생 잔골재는 0.08 mm체 통과량이 10%, 균등계수가 21.4, 곡률계수 2.1인 입도 양호한 실트질 모래(SW-SM)로 분석되었다. 재생잔골재는 비소성(non-plastic) 특성을 나타낸 반면 폐광미는 22.2%의 소성지수 값을 보였다. 폐광미의 자연상태 함수비가 재생잔골재의 함수비보다 높게 나왔으며, 비중은 점토성분의 폐광미가 실트성분의 재생잔골재보다 낮은 값을 보여 주고 있다. 또한 다짐시험 결과, 폐광미의 최대건조밀도(γ_{dmax})와 최적함수비(OMC)는 각각 1.572 kg/cm³, 10%이며, 재생 잔골재의 최대건조밀도와 OMC는 각각 1.679 kg/cm³, 12.3%이므로 폐광미의 매립다짐시 다짐의 정도를 조절하는 값으로 재생잔골재를 사용할 수 있을 것으로 판단되었다. 투수시험에서는 점토성분이 섞인 폐광미의 투수계수가 5×10^{-7} cm/sec로 재생 잔골재(1×10^{-3} cm/sec)보다 낮은 결과를 보였다.

3.1.2. 역학적 재료 특성

삼축압축시험과 직접전단시험이 재료의 역학적인 특성을 알기 위해 실시되었고, 삼축압축시험은 비압밀비배수시험(UU Test)과 압밀비배수시험(CU Test)으로 구분되어 실시되었다. 또한 전단시험으로부터 전단강도정수를 도출할 수 있었으며, 종합적인 역학 특성실험 결과는 표 4와 같이 나타낼 수 있다.

재생잔골재의 내부마찰각과 점착력이 각각 41(UU 시험), 41(CU 시험), 32(직접전단시험), 0(점착력)이고, 폐광미의 경우 각각 17(UU 시험), 23(CU 시험), 23(직접전단시험), 0.25(점착력)로 측정되었다. 일반적으로 삼축압축시험은 CU 결과가 UU보다 큰 값을 보인다. 폐광미와 재생잔골재에 대한 특성실험을 통해 얻어진 이들 데이터는 다음 장에서 사면안정해석 프로그램의 입력 데이터로 사용되었다.

Table 3. The physical properties of wasted mine and recycled aggregates

Classification	Wasted mine tailing	Recycled aggregates (< 5 mm)
Water content(%)	14.3	11.2
Specific gravity(Gs) (kg/cm ³)	2.043	2.609
Percentage passing 0.08 mm sieve (%)	30	10
Unified soil classification system (U.S.C.S)	SC	SW-SM
Coefficient of permeability (cm/sec)	5×10^{-7}	1×10^{-3}

Table 4. The mechanical properties of wasted mine and fine recycled aggregates

Classification		Wasted mine tailing		Recycled aggregates (< 5 mm)	
Compaction test	Maximum dry unit weight(kg/cm ³)	1.572		1.679	
	Optimum moisture content (%)	10.0		12.3	
Triaxial test	Test condition	UU	CU	UU	CU
	Internal friction angle(°)	17	22.7	40.4	41.6
	Cohesion(c) (kg/cm ²)	0.25	0	0	0
Direct shear test	Internal friction angle(°)	23		32	
	Cohesion(c) (kg/cm ²)	0		0	

한편, Table 4와 같은 폐광미의 특성은 유기물을 많이 포함하고 있는 흙과 유사하다고 판단된다. 유기물 함량이 많은 흙의 경우 비중이 낮은 특성을 나타내고 결과적으로 낮은 단위 중량 값을 갖고, 수분을 내부에 저장할 수 있는 능력이 크다. 다시 말하면 유기물 함량이 많은 재료일수록 흡수율이 크고 비중은 낮은 특성을 보인다. 투수계수의 경우, 보통 자연상태의 유기질 토양은 투수계수가 크나, 폐광미처럼 고온 고압에 의해 생성이 된 재료의 경우 투수계수는 매우 낮은 값을 나타낸다. 지반공학적 측면에서 유기물을 많이 포함한 재료의 경우 문제가 되는 것은 침하에 대한 것으로 유기물을 포함하지 않은 재료에 비해 압축률이 상대적으로 큰 특성을 갖고 있다. 이와 같은 폐광미의 특성을 고려하여 볼 때 폐광미 매립지 조성시 지반공학적 측면에서 상대적으로 안정된 재생잔골재를 사용한다면 보다 안정된 결과의 도출이 예상된다.

3.2. 지하수 및 강우에 의한 재생 잔골재의 침하와 재료특성 변화

OH의 용출로 시멘트 모르타르성분이 빠져나가는 현상으로 인한 지반공학적 영향을 살피기 위해 실험을 실시한 결과, 40일 이상 0.4 kg/cm²의 하중을 재하한 조건과 하중이 없는 조건 모두 가시적인 침하는 발생하지 않았다. 재생잔골재의 CaO성분에서 OH가 물과 반응할 경우에도 침하에 영향을 주지 않는다고 판단되었다. 다만 재생잔골재의 흡수

Table 5. The change of properties by 80 times repetition leaching

	Water absorption(%)	Porosity(%)	Permeability(cm/s)
Before leaching	11.11	42.56	3.01×10^{-4}
After leaching	10.86	42.14	2.99×10^{-4}

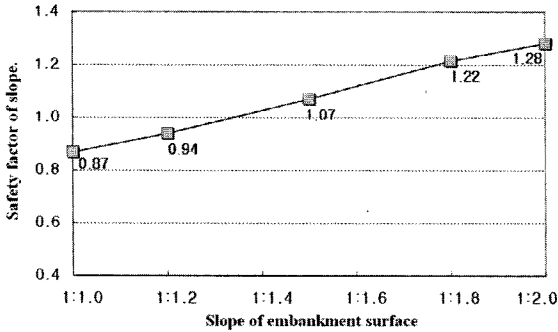


Fig. 4. Relation of slope of embankment surface and safety factor of slope.

을, 공극률, 투수계수를 측정된 결과, 실험 전·후 Table 5와 같은 변화가 발생하였다. 재생골재에서 OH의 용출로 흡수율이 미미하게 줄었을 뿐, 공극률과 투수계수에서는 큰 차이가 발생하지 않아 침하가 발생하지 않은 현상을 뒷받침해 주었다. 따라서 OH 용출에 의한 지반공학적 영향이 미소하므로 사면해석시 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

3.3. 사면안정해석

3.3.1. 사면 경사의 영향

Fig. 4는 매립지 사면의 경사에 따른 사면안정해석 결과로 사면의 경사에 따른 사면안전율의 변화를 나타낸 것으로 사면의 경사는 1:1에서부터 1:2까지 변화시켰다. 이때 해석 조건은 재생골재층 50 cm, 폐광미층 450 cm을 4단계로 성토된 사면을 기본으로 하였으며, 사면은 건조상태인 것으로 간주하였다. 그림에서 보는 바와 같이 사면의 경사가 완만해짐에 따라 사면안전율은 증가함을 알 수 있으며, 사면의 경사가 1:1 및 1:2일 경우 사면안전율(FS)은 각각 0.9 및 1.3인 것으로 나타났다. 한편, 폐기물관리법 제 20조(폐기물 처리시설의 설치기준) 별표 7에 의하면 제방의 경우에는 사면안전율을 1.3 이상으로 규정하고 있으므로, 1:2 이상의 완만한 경사로 시공이 되어야 할 것으로 본 시뮬레이션 결과 판단되었다.

3.3.2. 재생골재층의 두께 영향

매립지 사면의 재생골재 층 두께에 따른 사면안정해석 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 매립지 사면의 경사는 3.3.1의 결과를 참고로 1:2의 경사를 선택하였으며 역시 4단계의 성토를 수행하여 시공하는 것으로 하였다. 매립지 사면은 건조상태인 것으로 간주하고 해석하였다. 재생골재 층 두께를 20 cm인 경우에서부터 150 cm인 경우까지 변화시켜

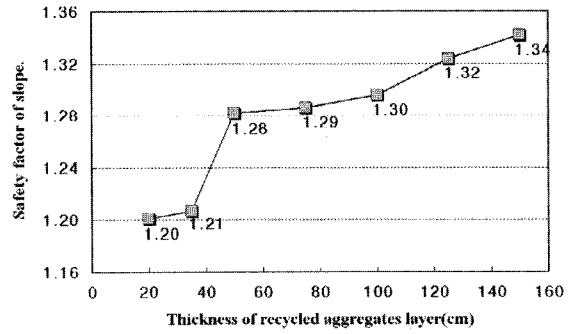


Fig. 5. The relation of thickness of recycled aggregates layer and safety factor.

사면안정해석을 실시하였다. 그 결과 Fig. 5와 같이 사면내 재생골재 층의 두께가 증가함에 따라 사면안전율은 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이는 재생골재의 내부마찰각이 폐광미보다 상대적으로 크기 때문에 그로 인한 사면의 저항모멘트가 증가되기 때문이다. 특히, 재생골재 층의 두께가 50 cm인 경우 사면안전율은 급격히 증가하므로, 재생골재층의 두께는 최소한 50 cm 이상 시공되어야 할 것으로 판단된다.

3.3.3. 사면내 수위의 영향

Fig. 6은 매립지사면 내 수위에 따른 사면안정해석결과를 나타낸 것이다. 해석조건에서 매립지 사면의 경사는 3.3.1의 결과를 참고로 1:2의 경사로 4단계의 성토를 수행하여 시공하는 것으로 하였다. 1:2보다 완만한 경사를 적용할 경우 안전율은 더 증가하겠지만 경제적인 매립지 설계 측면을 함께 고려하여 1:2 경사를 선택하였다. 재생골재 층의 두께는 3.3.2의 결과를 토대로 결정하였는데 재생골재 층의 두께가 50 cm인 경우 사면안전율은 급격히 증가한 후 두께의 증가폭에 비해 사면안전율의 증가폭이 별로 크지 않으므로 50 cm 두께를 해석조건으로 선택하였다.

해석은 매립지 사면내의 수위를 고려하지 않은 경우에서부터 4단계 성토층까지 완전히 포화되어 있는 경우까지 변화시켜 실시하였다. 그 결과, 그림에서 보는 바와 같이 사면내 수위가 높아짐에 따라 사면안전율은 급격하게 감소함을 알 수 있으며, 사면내 수위가 1단계 및 4단계 성토층에

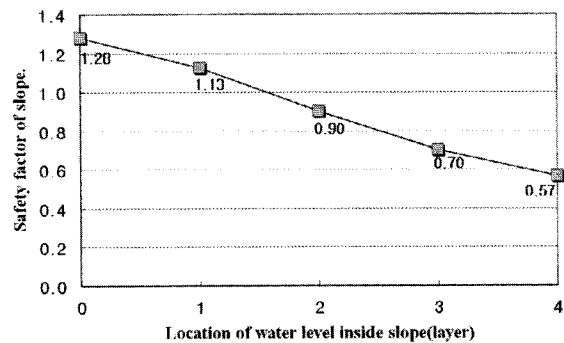


Fig. 6. The relation of location of water level inside slope and safety factor.

위치한 경우 사면안전율은 각각 1.12 및 0.58인 것으로 나타났다. 한편, 매립지 사면의 경우 강우에 의한 침투로 인하여 사면내 수위가 4단계 성토층까지 포화될 가능성이 크므로, 사면안정 해석 시 폐광미 표면까지 포화된 경우를 대상으로 해석을 실시하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 폐콘크리트 재생골재를 이용한 폐광미 매립지에 대한 사면안정해석을 수행하였다. 이에 대한 사면안정 해석 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 강우수나 지하수에 의해 재생골재의 OH가 용출될 경우 발생 가능한 재료특성 변화를 살펴본 결과, 용출에 의한 공극률, 투수계수, 흡수율의 변화는 미미하였으며 침하는 발생하지 않았다. 그러므로 우수 및 강우수에 의한 재생골재의 재료특성 변화는 사면해석에 큰 영향을 주지 않아 고려하지 않아도 된다고 판단된다.

2) 매립지 사면의 경사에 따른 해석결과, 사면의 경사가 1:1에서 1:2로 변화할 때 사면안전율(FS)은 0.9에서 1.3으로 변화하였다. 이를 통해서 경사가 완만해짐에 따라 사면안전율은 증가함을 알 수 있었다. 폐기물관리법 제 20조(폐기물 처리시설의 설치기준) 별표 7에서 사면안전율을 1.3이상으로 규정하고 있으므로, 1:2 이상의 완만한 경사로 시공이 되어야 할 것이다.

3) 사면의 재생골재 층 두께(20~150 cm)에 따라 해석을 실시한 결과, 사면내 재생골재층의 두께가 증가함에 따라 사면안전율은 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이는 재생골재의 내부마찰각이 폐광미보다 상대적으로 크기 때문에 그로 인한 사면의 저항모멘트가 증가되기 때문이다. 특히, 재생골재층의 두께가 50 cm인 경우 사면안전율은 급격히 증가하므로, 재생골재층의 두께는 최소한 50 cm 이상 시공되어야 할 것으로 판단된다.

4) 1:2의 경사로 50 cm 재생골재층 두께를 가지고 4단계 성토를 한 매립지사면에 대한 내부 수위변화가 사면안정에 끼치는 영향을 해석한 결과, 사면내 수위가 높아짐에 따라 사면안전율은 1.12~0.58로 급격하게 감소하였다. 강우에 의한 침투로 인하여 매립지 사면내 수위가 지표면까지 포화될 가능성이 크므로, 사면안정해석시 강우의 영향을 고려하여 지표면까지 포화된 경우를 대상으로 안정 해석을 실시하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

5) 폐콘크리트 재생골재층을 활용한 친환경적인 폐광미 매립지의 설계 및 시공시 사면의 경사, 재생골재층의 두께 및 사면내 수위에 대한 영향을 반드시 고려되어야 하며, 허용사면안전율을 만족하는 범위에서 수행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)”으로 지원받은 과제이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 이동훈, 오세강, 최충렬, 박만, 최정, “중석광 폐재광미의 매립지에서 나오는 침출수 중의 중금속 제거,” 한국환경공학회지, **19**(3), 218~222(2000).
2. 윤성진, 김성범, 문경주, 소양성, “폐광미를 혼입한 경화체의 특성,” 추계학술발표회논문집, 한국폐기물학회, pp. 89~92(2002).
3. 김태식, 이승학, 이재원, 박준범, 김시현, “폐석회를 이용한 반응 벽체의 폐광 산성 폐수내 황산염 제거 기작,” 춘계학술연구발표회논문집(II), 대한환경공학회, pp. 275~276(2001).
4. 이기철, 이승길, 한인호, 최광호, 정덕영, “금정광산 주변 토양의 중금속 오염현황 및 그 처리 방안,” 추계학술대회논문집, 한국지하수토양환경학회, pp. 189~194(1998)
5. 이재령, 오종기, 이화영, 김성규, 박재구, “알칼리 용출법에 의한 폐광산 광미중의 비소제거에 관한 연구,” 한국토양환경학회지, **2**(2), 73~79(1997).
6. 김종범, 오재일, 박찬식, “콘크리트 재생골재를 이용한 산성광산배수 중화처리,” 대한환경공학회지, **24**(1), 21~30(2002).
7. Bishop, A. W., “The Use of Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes,” *Geotechnique*, **5**, 7~17(1955).
8. 송영석, “활동역지시스템으로 보강된 사면의 설계법,” 중앙대학교 대학원 박사학위논문(2003).
9. Al-Khafaji, A. W., Andersland, O. B., “Geotechnical Engineering and Soil Testing,” Saunders College Publishing, Harcourt Brace Jovanovich College Publishers, New York(1992).
10. 이용수, 조재범, 현재혁, 정하익, “폐콘크리트를 이용한 중금속(Cd, Pb, Cu, Cr⁶⁺) 제거능 평가, 추계학술발표회 논문집, 한국폐기물학회, pp. 191~194(2000).
11. 이인모, “암반역학의 원리,” 도서출판 새론, pp. 53~60(2004).
12. 권호진, 박준범, 송영우, 이영생, “토질역학,” 구미서관, pp. 322~354(2001).