

석분슬러지 혼합토 매립사면에 대한 안정성 기준 제안

송영석* · 김경수

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 산사태재해연구팀

Proposal of stability standards for slopes reclaimed by soils mixed with stone dust

Young-Suk Song* and Kyeng-Su Kim

Geological & Environmental Hazards Div., Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

본 연구에서는 석분슬러지 혼합토를 복구토로 활용할 경우 조성되는 매립사면의 안정성 기준을 마련하였다. 이를 위하여 먼저 석분슬러지와 원지반토의 혼합비율을 5가지로 구분하고 각각에 대한 토질시험을 실시하였다. 실험결과 석분슬러지의 혼합비율이 감소할수록 전단강도 및 최대건조단위중량이 증가하는 경향을 나타내었다. 성토사면에 대한 국내외의 사면안전율 기준에 대한 조사를 토대로 석분슬러지 혼합토 매립사면의 사면안정등급을 불안정, 주의 및 안정의 3단계로 구분하였다. 석분슬러지 혼합토 매립사면에 대한 사면안정해석을 실시하여 안전한 사면높이, 사면경사 및 석분슬러지 혼합비율을 제안하였다. 매립사면에 대한 사면안정해석결과 석분슬러지 혼합토 성토사면의 사면높이를 10m로 할 경우 사면경사는 1:1.8 이상 되도록 매립하여야 안정함을 알 수 있다. 그리고 사면높이를 15m로 할 경우 석분슬러지 함유율이 50%이하로 하고 사면경사는 1:1.8 이상 되도록 매립하여야 안정함을 알 수 있다. 사면경사, 사면높이 및 석분슬러지 함유율이 동일한 조건일 경우 채석현장 내부의 절취암반에 접하여 매립된 사면과 평지에 성토하여 매립된 사면의 사면안정해석결과와는 유사함을 알 수 있다. 이와 같은 석분슬러지 혼합토 매립사면의 안정성 기준은 채석현장에서 실무적으로 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어 : 석분슬러지, 매립사면, 사면안정해석, 시공기준, 채석장

In this paper, the stability standards of slopes reclaimed by soils mixed with stone dust were proposed to manage the stone dust as recovery soils. First of all, the mixed ratio between stone dust and natural soil is classified into 5 groups, and a series of soil test was performed in each group. As the results of tests, the shear strength and the maximum dry unit weight were increased in decrease of the mixed ratio of stone dust. On the basis of the investigation to the safety factor standards of embankment slopes in and outside the country, a slope stability rank of slopes reclaimed by mixed soils were divided into 3 stages such as unstable stage, attention stage and stable stage. The slope angle, the slope height and the mixed ratio with stone dust were proposed by the result of stability analysis of slopes reclaimed by mixed soils. As the result of slope stability analysis, the slope angle of 1:1.8 at the reclaimed slope should be constructed in case of the slope height of 10 m. Also, the slope angle of 1:1.8 and the mixed ratio of stone dust less than 50% should be constructed in case of the slope height of 15 m. The analysis result of reclaimed slope constructed inside the quarry is similar to that of reclaimed slope constructed on the open ground in same conditions of the slope angle, the slope height and the mixed ratio with stone dust. The proposed stability standards of slopes reclaimed by soils mixed with stone dust can be used practically at the quarrying site.

Key words : stone dust, reclaimed slope, slope stability analysis, construction standards, quarry

*Corresponding author: yssong@kigam.re.kr

서 론

채석장에서 원석을 채취하고 건축석재, 쇠석골재 등으로 가공하는 과정에서 원석의 약 60% 정도가 폐석이나 석분슬러지로 손실되고 있다(산업자원부, 2000). 이 중에서 폐석의 일부만이 도로포장용 쇠석골재로 활용되고 있으며(서형찬 등 1995; 김경수와 송영석, 2007), 대부분의 석분슬러지는 석재의 가공이나 파쇄공정에서 분말형태로 물에 혼합되어 슬러지 탱크에 침전되게 된다. 이러한 석분슬러지가 방류되거나 살포되면 지표나 지중의 공극이 메워져 지표수의 지중침투, 지하수의 흐름, 공기의 소통이 원활하게 이루어지지 않아 생태계에 악영향을 끼치게 된다.

폐기물관리법(2003)에서 석분슬러지는 산업폐기물로 분류되어 있으므로 채석장 개발이후 석분슬러지를 현장 주변의 원지반토와 혼합하여 복구토로 주로 활용하고 있다. Fig. 1은 경기도 양주에 위치한 S사 현장으로서 석분슬러지와 원지반토를 대략 1:1로 혼합하여 매립함으로써 조성된 사면의 전경을 나타낸 것이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 석분슬러지를 원지반토와 함께 복구토로 매립하는 경우 인공적인 대규모 매립사면이 형성된다. 이와 같이 일정한 사면경사를 주어 매립사면을 형성하게 되는 경우 사면의 활동(sliding)에 대한 안정성은 매우 중요한 사항이며, 반드시 이에 대한 안정성이 확보

되어야 한다. 그러나 현재 석분슬러지를 복구토로 활용함으로써 조성된 매립사면의 안정성 검토는 전혀 이루어지지 않고 있으며, 이에 대한 기준도 마련되어 있지 못하다.

본 연구에서는 석분슬러지와 원지반토의 혼합토를 대상으로 석분슬러지 혼합비율에 따른 공학적 특성을 분석하고, 이를 토대로 석분슬러지 혼합토 매립사면의 안정성을 검토하고자 한다. 현재 시공되었거나 시공되고 있는 사례를 중심으로 시공방법, 사면경사, 사면높이, 석분슬러지의 혼합비율을 선정하여 석분슬러지 혼합사면의 안정성 검토를 실시한다. 사면안정해석법은 한계평형 해석으로 사면안정성을 평가하기 위해 가장 많이 이용되고 있는 Bishop의 간편법(Bishop, 1955)을 적용한다. 이상의 결과를 토대로 하여 석분슬러지와 원지반토의 혼합토를 복구토로 활용할 경우 조성되는 매립사면의 안정성을 검토함으로써 각 채석현장들에서 실무적으로 이용할 수 있도록 적절한 시공기준을 제시하고자 한다.

대상현장 및 시료채취

본 연구에서는 2개의 채석장을 직접 방문하여 골재를 생산할 때 발생된 석분슬러지와 함께 매립 또는 야적시에 석분슬러지와 혼합해서 사용되는 현장주변의 원지반토를 채취하였다. Table 1은 석분슬러지 및 원지반토 시



Fig. 1. Reclaimed slope constructed after quarrying work.



Fig. 2. Stone dust sampled for laboratory test.

Table 1. Sampling location of study area.

Location	Company	Address
Kyonggi-do	S	Doha-ri, Eunhyeon-myeon, Yangju
Chungcheongnam_do	A	Pyeonggi-ri, Janggi-myeon, Gongju

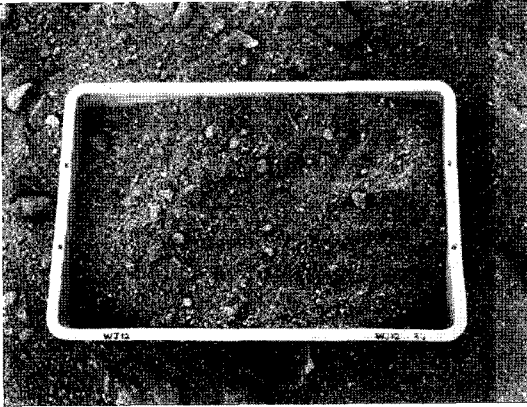


Fig. 3. Natural soil sampled for laboratory test.

료를 채취한 연구대상 채석장을 나타낸 것이다. Table 1에서 보는 바와 같이 시료채취는 경기도 양주시의 S사와 충청남도 공주시의 A사이다. 각종 토질시험을 수행하기 위한 시료는 현장에서 발생직후의 석분슬러지와 매립용으로 사용 중에 있는 원지반토를 시료상자에 담아서 채취하였다. Fig. 2 및 Fig. 3은 경기도의 S사 봉재사업소에서 채취한 석분슬러지 및 원지반토를 나타낸 것이다. 현장에서 채취한 석분슬러지와 원지반토는 밀봉한 상태로 현장조건이 최대한 유지되도록 실험실로 운반하였다.

혼합토의 토질시험 결과

먼저 석분슬러지와 원지반토에 대한 각각의 공학적 특성을 조사하기 위하여 각각에 대한 토질시험을 실시하였으며, 석분슬러지와 원지반토의 혼합도에 대한 특성을 조사하기 위하여 혼합비율을 조절하여 토질시험을 실시하였다.

석분슬러지 및 원지반토의 공학적 특성

경기도 양주시 S사의 지반에 대한 지질조건은 흑운모 화강암이며, 충청남도 공주시 A사의 지반에 대한 지질조건은 화강암질 편마암이다. 석분슬러지 및 원지반토의 공학적 특성을 조사하기 위하여 함수비시험(KSF 2306), 액성한계 및 소성한계시험(KSF 2303), 입도시험(KSF 2302) 등을 실시하였다. Table 2는 대상지역의 석분슬러지와 원지반토의 공학적 특성을 나타낸 것이다. 석분슬러지의 비중을 살펴보면 양주시 S사의 경우 2.72, 공주시 A사의 경우 2.77이며, 함수비 및 소성지수는 양주시 S사의 경우 22.24% 및 14.31%, 공주시 A사의 경우 22.63% 및 12.23%로서 유사한 것으로 나타났다. 석분슬러지의 모래 및 점토의 함유율을 살펴보면 양주시 S사의 경우 61.53% 및 38.47%, 공주시 A사의 경우 86.82% 및 13.18%로서 양주시 S사가 점토함유율이 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 통일분류법에 의한 토질분류에서는 점토질 모래(SC)로 동일하게 분류되었다.

한편, 원지반토의 비중을 살펴보면 양주시 S사의 경우 2.64, 공주시 A사의 경우 2.68이며, 함수비 및 소성지수는 양주시 S사의 경우 6.18% 및 비소성, 공주시 A사의 경우 2.17% 및 12.83%로서 서로 상이한 것으로 나타났다. 이러한 원인은 양주시 S사의 원지반토가 대부분 모래로 구성되어 있기 때문으로 판단된다. 즉, 원지반토의 모래함유율을 살펴보면 양주시 S사의 경우 94.05%, 공주시 A사의 경우 58.47%이며, 공주시 A사의 원지반토에는 38.21%의 자갈이 함유되어 있다.

혼합토의 공학적 특성

채석장에서 석분슬러지는 현장주변의 원지반토와 혼합하여 복구토로 활용하고 있으므로 석분슬러지와 원지반토의 혼합도에 대한 공학적 특성을 파악하여야 한다. 이를 위하여 석분슬러지와 원지반토의 혼합비율을 조절

Table 2. Engineering properties of stone dust and natural soil (Kim & Song, 2007).

Material & location	Specific gravity	Moisture content (%)	Consistency (%)			Grain size distribution (%)				Geology	
			liquid limit	plastic limit	plasticity index	gravel	sand	silt & clay	USCS		
Stone dust	Yangju S Co.	2.72	22.24	32.61	18.30	14.31	-	61.53	38.47	SC	Biotite granite
	Gongju A Co.	2.77	22.63	30.73	18.50	12.23	-	86.82	13.18	SC	Granitic gneiss
Natural soil	Yangju S Co.	2.64	6.18	Non plastic			2.66	94.05	3.29	SW	Biotite granite
	Gongju A Co.	2.68	2.17	32.72	19.89	12.83	38.21	58.47	3.32	SP	Granitic gneiss

하여 다양한 혼합토를 만들고, 각각에 대한 토질시험을 실시하여 혼합비율에 따른 혼합토의 공학적 특성을 조사하였다. 특히, 석분슬러지와 원지반토의 혼합토를 이용하여 매립된 사면의 안정성을 검토하기 위하여 전단강도 정수를 산정하였다. Table 3은 석분슬러지와 원지반토의 혼합비율을 나타낸 것으로 크게 5가지로 구분하였다.

석분슬러지와 원지반토의 혼합비율에 따른 전단강도 즉, 점착력 및 내부마찰각의 변화를 살펴보기 위하여 일련의 직접전단시험(KSF 2343)을 실시하였다. 직접전단 시험은 전단강도를 결정하기 위해서 가장 오래된 시험 방법으로서 현재까지도 가장 많이 활용되고 있는 시험이다. Table 4는 석분슬러지와 원지반토의 혼합비율에 따른 점착력(c) 및 내부마찰각(ϕ)의 결과를 정리한 것이다. Table 4에서 보는 바와 같이 석분슬러지의 함유량이 증가됨에 따라 점착력이 증가하고 내부마찰각은 감소하는 경향성을 보이는 것으로 나타났다.

Fig. 4는 연직응력이 1.57 t/m^2 일 경우 혼합토에서 석분슬러지의 혼합비율에 따른 전단강도를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 석분슬러지의 혼합비율이 감소됨에 따라 전단강도는 증가하는 것으로 나타났으며,

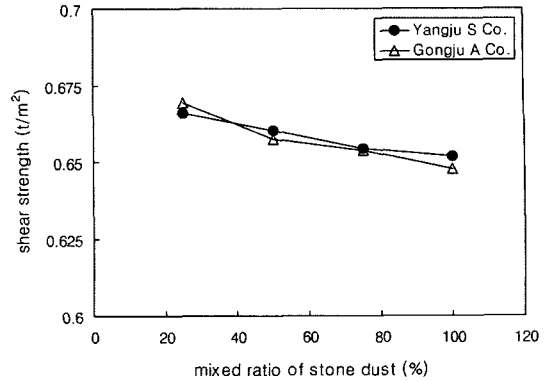


Fig. 4. Shear strength according to mixed ratio of stone dust.

석분슬러지의 혼합비율이 25%인 경우가 가장 큰 전단강도를 가지는 것으로 분석되었다. 이러한 결과에 따르면 석분슬러지의 혼합비율이 증가될수록 전단강도가 작아지는 경향을 나타내므로 혼합토의 사면활동에 대한 저항력 역시 감소될 것으로 예상된다. 따라서 전단강도 측면에서는 석분슬러지의 혼합비율을 25~50% 정도로 조절함이 좋은 것으로 판단된다.

한편, 석분슬러지와 원지반토의 혼합비율에 따른 단

Table 3. Mixed ratio between stone dust and natural soil.

Contents	Stone dust (%)	Natural soil (%)
A	100	0
B	75	25
C	50	50
D	25	75
E	0	100

Table 4. Strength parameters according to mixed ratio with stone dust (Kim & Song, 2007).

Mixed ratio (Stone dust : Natural soil)	Yangju, S Co.		Gongju, A Co.	
	c (t/m^2)	ϕ ($^\circ$)	c (t/m^2)	ϕ ($^\circ$)
A (100 : 0)	0.52	30.2	0.45	29.3
B (75 : 25)	0.51	30.8	0.51	30.6
C (50 : 50)	0.48	32.1	0.48	31.5
D (25 : 75)	0.44	33.4	0.40	34.2
E (0 : 100)	-	-	-	-

Table 5. Maximum dry unit weight according to mixed ratios with stone dust.

Mixed ratio (Stone dust : Natural soil)	Yangju, S Co. (t/m^3)	Gongju, A Co. (t/m^3)
A (100 : 0)	-	-
B (75 : 25)	1.71	1.68
C (50 : 50)	1.81	1.78
D (25 : 75)	1.88	1.91
E (0 : 100)	-	-

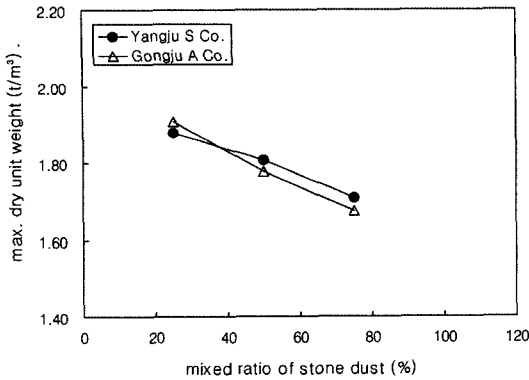


Fig. 5. Maximum dry unit weight according to mixed ratio of stone dust.

위중량을 산정하기 위하여 일련의 다짐시험(KSF 2312)을 실시하였다. 혼합비율에 따른 혼합토의 전체단위중량을 직접적으로 산정하기 어려우므로, 다짐시험을 통하여 최적함수비와 최대건조단위중량을 산정하고 이때 최대건조단위중량을 사면안정해석시 활용하고자 하였다. Table 5는 석분슬러지와 원지반토의 혼합비율에 따른 최대건조단위중량을 정리한 것이다. 그리고 Fig. 5는 혼합토에서 석분슬러지의 혼합비율에 따른 최대건조단위중량을 나타낸 것이다. Table 5 및 Fig.5에서 보는 바와 같이 석분슬러지의 혼합비율이 감소됨에 따라 최대건조단위중량은 증가하는 것으로 나타났다.

사면안정 등급분류

한계평형해석에서의 사면안정성은 사면안전율을 근거

로 하여 판단하고 있다. 사면안전율이란 주어진 사면활동면에 대해 토층의 전단강도를 현재의 전단응력으로 나눈 값이다. 따라서 이론상으로는 산정된 사면안전율이 1보다 크면 사면은 안전한 셈이지만, 실제에 있어서는 안전율이 소요안전율이상이 되어야 안전한 것으로 판정한다. 사면의 활동에 대한 안전율은 해석방법에 따라 각 다를 수 있으며, 설계할 때 자료의 불확실성을 보상하는 계수로서의 뜻이 강하다. 안전율의 크기에 의해서 안정성을 정량적으로 비교할 수 있는 것은 엄밀하게는 동일 조건의 구조물에서만 가능한 것이며, 조건이 다른 구조물에서는 안정성의 비교가 곤란하다.

성토사면에 대한 국내외의 사면안전율 기준을 조사하고, 이를 토대로 하여 연구지역에 적용할 수 있는 사면안전율의 기준을 제시하고자 한다. 그리고 사면안전율의 기준을 근거로 사면안정성 등급을 선정하고자 한다.

Table 6은 일본에서 기준으로 적용되고 있는 사면활동에 대한 소요안전율을 나타낸 것으로, 일본토질공학회, 일본도로실무강좌 및 일본건설성에서 제안한 기준을 정리한 것이다. 일본토질공학회의 경우 구조물의 종류별로 사면안전율을 구분하고 있으며, 일본도로실무강좌 및 건설성의 경우는 기준안전율만을 제시하고 있음을 알 수 있다. 이를 정리하면, 일본의 경우 성토사면에서의 사면안전율은 1.1~1.5 이상이 되어야 안전한 것으로 규정하고 있음을 알 수 있다(한국도로공사, 1996).

한편, Table 7은 국내에서 기준으로 적용되고 있는 사면활동에 대한 소요안전율을 나타낸 것으로, 건설교통부 및 한국도로공사가 제안한 기준을 정리한 것이다. 건설교통부의 구조물기초 설계기준(건설교통부, 1997)과

Table 6. Minimum safety factor of embankment slope (Japan).

Organization	Min. safety factor	Remarks
Japanese geotechnical society	$F_s \geq 1.0 \sim 1.2$	temporary and under construction structure
	$F_s \geq 1.3$	common structure
	$F_s \geq 1.5$	important structure
	$F_s \geq 1.25$	after starting the loading of common use
Training course of road construction	$F_s \geq 1.1$	general stability during construction period
	$F_s \geq 1.2 \sim 1.3$	guideline of road earthwork
Ministry of construction	$F_s \geq 1.1 \sim 1.3$	standard planning safety factor

Table 7. Minimum safety factor of embankment slope (Korea).

Organization	Min. safety factor	Remarks
Korea expressway construction(1996)	$F_s \geq 1.3$	summary of road design
Ministry of construction and transportation(1997)	$F_s \geq 1.3$	design standards of structure foundation

Table 8. Proposal of required safety factor and slope stability rank in reclaimed slopes.

Required safety factor	Slope stability rank
$F_s < 1.3$	unstable (reinforcement and decrease slope angle)
$1.3 < F_s \leq 1.5$	attention (need observation and monitoring)
$F_s \geq 1.5$	stable

한국도로공사의 도로설계요령에서는 성토사면의 소요안전율을 1.3으로 규정하고 있다(한국도로공사, 1996). 이를 정리하면, 국내의 경우 성토사면에서의 사면안전율은 1.3 이상이 되어야 안전한 것으로 규정하고 있음을 알 수 있다.

사면의 소요안전율은 지반의 물성 및 사면의 기하학적 조건에 대한 불확실성, 사면의 시공비용, 사면붕괴시 피해정도, 영구 혹은 가설구조물 여부, 그리고 강우조건 등에 따라 결정된다. 즉, 사면의 안전율은 재하조건하에서 피해의 정도와 경제성에 따라 결정되며 이를 고려하여 타당성이 있는 소요안전율을 적용하여야 할 것이다.

이상의 조사결과를 정리하여 보면, 국내외에서 적용되고 있는 소요안전율은 대상지역과 규모, 구조물의 중요성 등에 따라 서로 다르나 성토사면의 경우에는 일반적으로 1.1~1.5 정도의 범위의 사면안전율이 사용되고 있음을 알 수 있다.

국내외에서 적용되고 있는 사면안전율을 토대로 석분슬러지를 원지반토와 혼합하여 복구토로 사용할 경우 매립된 사면의 현장상황과 조건 등을 고려하여 소요 사면안전율을 Table 8과 같이 제안하고자 한다. Table 8에서 보는 바와 같이 사면안정성의 등급을 불안정, 주의 및 안정의 3단계로 구분하여 사면안전율 기준을 마련하였다.

매립사면에 대한 사면안정해석

사면안정해석 프로그램

본 연구에서는 석분슬러지를 원지반토와 혼합하여 복구토로 활용할 때 매립된 사면의 안정성을 검토하기 위하여 국내에서 개발된 SLOPILE(Ver 3.0)프로그램을 사

용하였다. SLOPILE(Ver 3.0) 프로그램은 원호파괴 및 평면파괴해석이 가능하며, 원호파괴해석은 Fellenius법(Fellenius, 1936)과 Bishop의 간편법(Bishop, 1955)으로 해석이 가능하다. 그리고 역지말뚝, 쏘일네일링, 앵커 및 지오그리드로 보강된 사면의 안정해석이 가능하다(홍원표와 송영석, 2006).

해석단면 선정

사면안정해석은 채석현장 내부의 절취암반에 접하여 매립되는 경우와 평지에 성토하여 매립하는 경우로 나누어 실시하였다. 어떤 채석현장들은 지하 깊이까지의 암반을 채석함으로써 생긴 지하공간에 원지반토와 석분슬러지를 혼합해서 되메우기를 하는 경우가 있는데, 이러한 경우는 사면이 형성되지 않으므로 검토대상에서 제외하였다. 한국도로공사의 도로설계요령(1976)에 의하면 매립 혹은 성토사면의 경사는 일반적으로 Table 9와 같이 흙의 종류에 따라 결정되어 진다. 원지반토와 석분슬러지를 섞은 혼합토는 앞의 실험결과에서 보듯 주로 SP로 분류되므로 Table 9에 따르면 사면의 높이는 10m이고 경사는 1:1.8로 시공하도록 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서는 사면의 경사를 1:1.5, 1:1.8 및 1:2의 세가지 경우로 구분하여 각각에 대한 사면안정해석을 실시하였다. 그리고 석분슬러지와 원지반토의 혼합비율(석분슬러지 : 원지반토)을 75%:25%, 50%:50% 및 25%:75%로 각각 구분하고, 사면의 높이가 10m와 15m일 경우를 대상으로 하여 사면안정해석을 실시하였다. 이상의 해석결과를 토대로 하여 석분슬러지를 원지반토와 혼합해서 복구토로 활용할 때 적절한 사면의 시공기준을 제시하고자 한다.

Table 9. Standards of slope angle according to materials and heights of embankment.

Materials	Slope height	Slope angle	Soil classification
Well-grade sand	0~6 m	1 : 1.5	GW, GP, GM, GC, SM
Gravel and sand included in gravel	6~15 m	1 : 1.8	
Poor-graded sand	0~10 m	1 : 1.8	SP
Rock, gravel	0~6 m	1 : 1.5	SW, GP, GM
	more than 6 m	1 : 1.8	
Sand, hard clayey soil, hard clay	0~6 m	1 : 1.5	SM, SC, CL
	more than 6 m	1 : 1.8	
Soft clay	0~6 m	1 : 1.8	CH, OH, ML, MH

해석지반의 물성치

경기도 양주시의 S사와 충청남도 공주시의 A사 현장에서 채취된 석분슬러지와 원지반토를 일정한 비율로 섞은 혼합토를 복구토로 활용하는 것으로 가정하여 사면 안정해석을 실시하였다. 사면안정해석을 수행함에 있어 혼합토층의 물성치는 석분슬러지와 원지반토의 혼합비율(석분슬러지:원지반토)을 75%:25%, 50%:50% 및 25%:75%일 때를 대상으로 하였으며, 경암층의 물성치는 기존의 사면설계시 사용되었던 값(한국도로공사, 1998)을 적용하였다. 사면안정해석에 적용된 혼합토층 및 경암층의 지반물성치를 정리하면 Table 10과 같이 나타낼 수 있다.

사면안정해석은 실제 현장에서 수행되고 있는 매립형

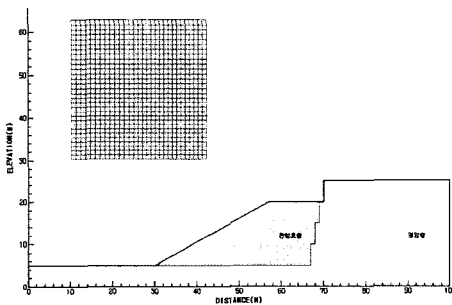


Fig. 6. Modelling of the reclaimed slope constructed inside the quarry.

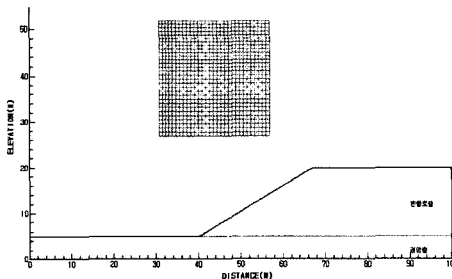
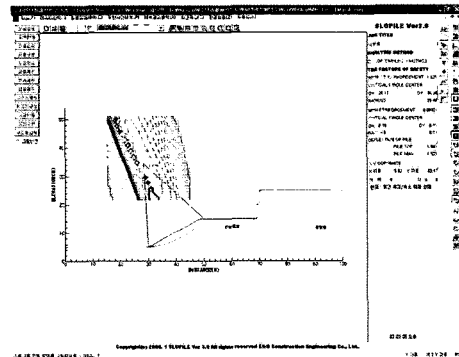


Fig. 7. Modelling of the reclaimed slope constructed on the open ground.

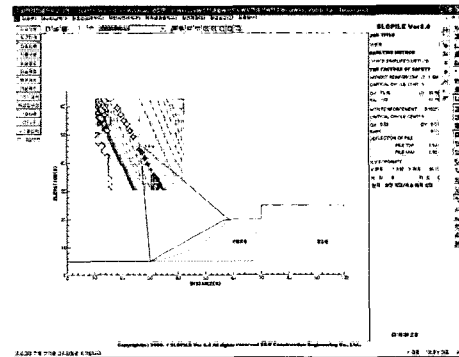
태를 고려하여 채석현장 내부에 절취암반에 인접하여 매립된 사면과 평지에 성토되어 매립된 사면을 대상으로 실시하였다. Fig. 6은 및 Fig. 7는 채석현장 내부의 절취암반에 접하여 매립하는 경우와 평지에 성토하여 매립하는 경우로 구분하여 SLOPILE 프로그램에 의해 모델링한 것으로, 사면의 경사가 1:1.8이고 높이가 15 m 인 경우를 예로 나타난 것이다.

해석결과

Fig. 8 및 Fig. 9는 경기도 양주시의 S사 현장의 물



(a) mixed ratio with stone dust 50%, slope angle 1:1.8, slope height 10m

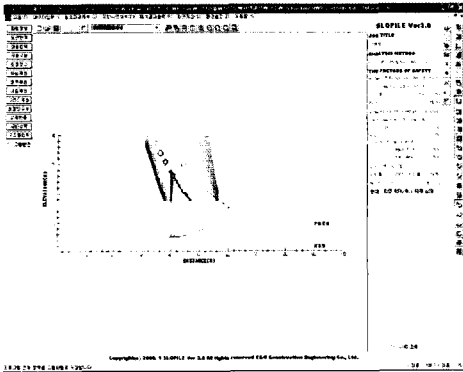


(b) mixed ratio with stone dust 50%, slope angle 1:1.8, slope height 15m

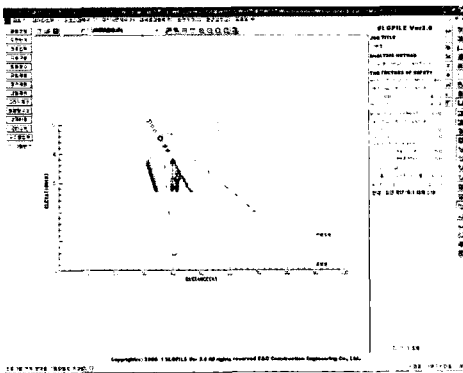
Fig. 8. Slope stability analysis of the reclaimed slope constructed inside the quarry.

Table 10. Soil and rock properties applied in slope stability analysis.

Mixed ratio (Stone dust : Natural soil)	Yangju, S Co.					Gongju, A Co.			
	γ_t (t/m ³)	γ_{sat} (t/m ³)	c (t/m ²)	ϕ (°)	γ_t (t/m ³)	γ_{sat} (t/m ³)	c (t/m ²)	ϕ (°)	
Mixed B (75 : 25)	1.71	1.81	0.51	30.8	1.68	1.78	0.51	30.6	
soil C (50 : 50)	1.81	1.91	0.48	32.1	1.78	1.88	0.48	31.5	
layer D (25 : 75)	1.88	1.98	0.44	33.4	1.91	2.01	0.40	34.2	
Hard rock layer	2.65	2.75	15	40	2.65	2.75	15	40	



(a) mixed ratio with stone dust 50%, slope angle 1:1.8, slope height 10m



(b) mixed ratio with stone dust 50%, slope angle 1:1.8, slope height 15m

Fig. 9. Slope stability analysis of the reclaimed slope constructed on the open ground.

성치를 적용하여 해석한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 8은 채석현장 내부의 절취암반에 접하여 매립할 경우의 사면에 대한 해석결과를 나타낸 것으로서 혼합토층의 석분슬러지와 원지반토의 혼합비율은 50:50이고, 사면의

경사는 1:1.8이다. 해석결과 사면안전율은 한 층의 사면높이가 10m일 경우 1.63로서 안정한 것으로 나타났으나, 사면높이가 15m일 경우는 1.48으로 주의가 요망되는 것으로 나타났다. 한편, Fig. 9는 평지에 성토하여 매립할 경우의 사면에 대한 해석결과를 나타낸 것으로서 혼합토층의 석분슬러지와 원지반토의 혼합비율은 50:50이고, 사면의 경사는 1:1.8이다. 해석결과 사면안전율은 한 층의 사면높이가 10m일 경우는 1.62로서 안정한 것으로 나타났으나, 사면높이가 15m일 경우는 1.48으로서 주의가 요망되는 것으로 나타났다.

Table 11 및 Table 12는 경기도 양주시의 S사와 충청남도 공주시의 A사에 대한 지반 물성치를 적용하여 해석한 결과를 나타낸 것이다. Table 11, 12에서 보는 바와 같이 석분슬러지 혼합도 매립사면에서 사면경사, 사면높이 및 석분슬러지 함유율이 동일한 조건일 경우 채석현장 내부의 절취암반에 접하여 매립할 경우와 사면과 평지에 성토하여 매립할 경우 사면안정해석결과는 유사한 것으로 나타났다. 각각의 조건에 대한 사면안정 해석결과를 살펴보면 사면의 높이가 15m인 경우 사면경사가 1:2이면 안정한 것으로 나타났으며, 석분슬러지 함유량이 50%이상 이고 사면경사가 1:1.2이면 불안정한 것으로 나타났다. 만약 사면경사가 1:1.8이면 석분슬러지의 함유량을 25%이하로 조절하여야 안정한 것으로 나타났다. 그리고 사면의 높이가 10m인 경우 사면경사가 1:1.8이면 안정한 것으로 나타났다.

이상의 결과를 토대로 하여 석분슬러지 혼합도 성토 사면의 사면높이를 10m로 할 경우 사면경사는 1:1.8 이상 되도록 매립하여야 안정함을 알 수 있다. 그리고 사면높이를 15m로 할 경우 석분슬러지 함유율이 50% 이하로 하고 사면경사는 1:1.8 이상 되도록 매립하여야 안정함을 알 수 있다.

Table 11. Result of slope stability analysis (applied in ground condition of S Co.).

Mixed ratio (Stone dust : Natural soil)	Slope angle	Slope height	Safety factor of slope stability	
			Reclaimed slope constructed inside the quarry	Reclaimed slope constructed on the open ground
B (75 : 25)	1 : 1.5		1.363/1.254	1.360/1.254
C (50 : 50)			1.384/1.279	1.379/1.279
D (25 : 75)			1.402/1.305	1.399/1.306
B (75 : 25)	1 : 1.8	10 m/15 m	1.603/1.446	1.593/1.446
C (50 : 50)			1.625/1.480	1.621/1.480
D (25 : 75)			1.651/1.514	1.650/1.514
B (75 : 25)	1 : 2.0		1.692/1.575	1.692/1.574
C (50 : 50)			1.723/1.614	1.723/1.614
D (25 : 75)			1.756/1.654	1.755/1.655

Table 12. Result of slope stability analysis (applied in ground condition of A Co.).

Mixed ratio (Stone dust : Natural soil)	Slope angle	Slope height	Safety factor of slope stability	
			Reclaimed slope constructed inside the quarry	Reclaimed slope constructed on the open ground
B (75 : 25)	1 : 1.5	10 m/15 m	1.360/1.250	1.358/1.249
C (50 : 50)	1 : 1.5		1.364/1.258	1.359/1.258
D (25 : 75)	1 : 1.5		1.407/1.317	1.403/1.316
B (75 : 25)	1 : 1.8		1.600/1.441	1.589/1.442
C (50 : 50)	1 : 1.8		1.601/1.455	1.596/1.455
D (25 : 75)	1 : 1.8		1.661/1.530	1.662/1.531
B (75 : 25)	1 : 2.0		1.688/1.569	1.688/1.568
C (50 : 50)	1 : 2.0		1.696/1.686	1.696/1.586
D (25 : 75)	1 : 2.0		1.770/1.675	1.768/1.674

결 론

본 연구에서는 석분슬러지 혼합토를 복구토로 활용할 경우 조성되는 매립사면의 안정성 기준을 마련하였다. 이를 위하여 먼저 석분슬러지와 원지반토의 혼합비율에 따른 지반 물성치의 변화를 조사하였다. 그리고 성토사면에 대한 국내외의 사면안전율 기준을 조사하여 석분슬러지의 혼합토 매립사면에 대한 사면안전율의 기준을 제시하였다. 이를 토대로 석분슬러지 혼합토 매립사면 조성시 안전한 시공방법, 사면높이, 사면경사 및 석분슬러지 혼합비율을 제안하였다. 이상의 결과들을 정리하면 다음과 같다.

1. 대상지역의 석분슬러지는 비중 2.72-2.77, 함수비 22.24%-22.63%, 소성지수 12.23%-14.31% 범위에 있으며, 통일분류법에 의한 토질분류에서는 점토질 모래(SC)로 분류할 수 있다. 한편, 대상지역 원지반토의 비중은 2.64, 함수비 및 소성지수는 6.18% 및 비소성이며, 대부분 모래로 구성되어 있다.

2. 석분슬러지와 원지반토의 혼합토에서 석분슬러지의 혼합비율에 따라 5가지로 구분하고 각각에 대한 토질특성을 조사하였다. 조사결과 석분슬러지의 혼합비율이 증가할수록 점착력이 증가하고 내부마찰각 및 최대전단위중량은 감소함을 알 수 있다. 그리고 석분슬러지의 혼합비율이 감소할수록 지반의 전단강도는 증가함을 알 수 있다.

3. 국내외에서 적용되고 있는 성토사면에 대한 소요 사면안전율 기준들과 석분슬러지 혼합토 성토사면의 현장상황을 고려하여 소요 사면안전율을 제안하였다. 그리고 이를 토대로 석분슬러지 혼합토의 매립사면에 대한 사면안전등급을 불안정, 주의 및 안정의 3단계로 구분하였다.

4. 석분슬러지 혼합토 매립사면에서 사면경사, 사면높이 및 석분슬러지 함유율이 동일한 조건일 경우 채석현장 내부의 절취암반에 접하여 매립된 사면과 사면과 평지에 성토하여 매립된 사면의 사면안전해석결과는 유사함을 알 수 있다.

5. 석분슬러지 혼합토 매립사면 조성시 사면높이를 10m로 할 경우 사면경사는 1 : 1.8 이상 되도록 매립하여야 하며, 사면높이를 15 m로 할 경우 석분슬러지 함유율이 50%이하로 하고 사면경사는 1 : 1.8 이상 되도록 매립하여야 안정함을 알 수 있다.

감사의 글

이 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 “지질재해 피해 평가기술 및 대응기술 실용화사업” 과제의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

건설교통부, 1997, 구조물기초 설계기준, 기술경영사
 김경수, 송영석, 2007, 도로 보조기층재로서 채석장 석분토의 재활용가능성 분석, 지질공학, 17(2), 279-288.
 산업자원부, 2000, 석분토 활용기술 개발에 관한 연구, 13-14
 서영찬, 박광현, 남영국, 이성희, 1995, 석분 Screenings 기층의 아스팔트포장 상대강도계수 결정 연구, 대한토목학회논문집, 15(5), 1233-1239.
 폐기물관리법, 2003, 제1장 제2조
 한국도로공사, 1976, 도로설계요령, 제2권 토공 및 배수
 한국도로공사, 1996, 도로설계실무편람 - 토질 및 기초 -
 한국도로공사, 1998, 전주-함양간 고속도로 건설공사 실시설계 사면안전해석 기준 (안)
 홍원표, 송영석, 2006, 활동역지시스템으로 보강된 사면의 안정해석 프로그램 개발, 지질공학, 16(1), 45-58.
 Bishop, A.W., 1955, "The use of the slip circle in the

stability analysis of slopes”, *Geotechnique*, 5, 7-17.
 Fellenius, W, 1936, “Calculation of the stability of earth
 dams” *Transactions Seond Congress on Large Dam*,
 Int. Com. on Large Dams of the World Power Con-
 ference, 4, 445-462.

2007년 8월 7일 원고접수, 2007년 9월 15일 게재승인

송영석

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 산사태재해
 연구팀

305-350, 대전광역시 유성구 과학로 92

Tel: 042-868-3035

Fax: 042-868-3415

e-mail: yssong@kigam.re.kr

김경수

한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 산사태재해
 연구팀

305-350, 대전광역시 유성구 과학로 92

Tel: 042-868-3054

Fax: 042-868-3415

e-mail: kks@kigam.re.kr