

## 지반안정재 개량토의 토사 비탈면 현장 적용성 평가

### Evaluation of Field Applicability of Slope of Improved Soil for Ground Stabilizer

이강일<sup>1\*</sup>, 박성백<sup>2</sup>, 최민주<sup>3</sup>

Kang-Il Lee<sup>1\*</sup>, Seong-Bak Park<sup>2</sup>, Min-Ju Choi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do 11159, Republic of Korea

<sup>2</sup>Member, Ph.D. Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do 11159, Republic of Korea

<sup>3</sup>Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Daejin University, 1007 Hoguk-ro, Pocheon-si, Gyeonggi-do 11159, Republic of Korea

#### ABSTRACT

This research studies the stabilization method for improved soil sloped through the on-site application of Paper Flyash ground stabilizers. The target strength required for improved soil is 500 kPa, and the compressive strength for the slope surface needs to be less than 1,000 kPa after the improvement in order to plant vegetation. To meet this condition, we mixed soil from the site and the ground stabilization material, which is the main material for surface improvement material, performed mixing design and conducted various tests including strength test, permeability test and plantation test. After analyzing the results of the compression test on improved soil slope, we proposed soil constants for the improved soil. In order to evaluate the applicability of the improved soil on the slope, the site construction was carried out on the collapsed slope and the reinforcement evaluation of the surface of the improvement soil was conducted. The stability was not secured before the reinforcement, but the test shows after the reinforcement with improved soil, the safety rate is secured up to 48 hours during the raining period. In addition, the compressive strength of the improved soil at the site was secured at more than 200 kPa adhesion as planned, and the soil hardness test result was also found to be within the specified value of 18–23 mm, which increased the resistance to rainfall and ability to grow plant on the surface for improved soil.

#### 요 지

본 연구는 제지 플라이애시 지반안정재를 활용하여 개량토 토사 비탈면의 현장 적용을 통한 안정화 방법을 연구하였다. 개량토에 요구되는 목표강도는 500kPa이며 토사 비탈면을 개량후 식생이 발아하기 위한 압축강도는 1,000kPa 이하이다. 이 조건을 만족하기 위해 현장에서 반입된 시료를 가지고 표층개량의 주원료인 지반안정재와 혼합하여 배합설계를 거쳐 강도시험 및 투수시험 그리고 식생 발아시험 등 다양한 시험을 실시 하였다. 그리고 개량토로 시공된 비탈면에 대한 기존 압축시험 결과를 분석한 후 개량토의 지반정수를 제안하였다. 또한 개량토의 비탈면 현장 적용성을 평가하기 위하여 붕괴된 비탈면에 대하여 현장 시공을 실시하여 개량토의 표층부 보강평가를 실시하였다. 그 결과 보강 전에는 안정성을 확보하지 못했지만 개량토로 보강한 이후 안전율은 강우 지속시간 48시간까지 최소 안전율을 확보하는 것으로 나타났다. 그리고 현장 개량토의 압축강도는 설계치인 점착력 200kPa 이상을 확보하고 토양경도계 시험 결과도 규정 값인 18~23mm 이내로 확인되어 개량토 비탈면의 경우 강우에 저항성이 증대되고 표층부의 식물생육이 가능한 것으로 나타났다.

**Keywords** : Soil hardness, Germination test, Soil stabilizer, Improved soil, Surface improvement

#### 1. 서 론

최근 이상기후에 의한 기후변화로 태풍과 게릴라성 호우가 빈번하게 발생하고 있으며, 이에 따른 자연재해는 주

Received 3 Feb. 2021, Revised 10 Mar. 2021, Accepted 10 Mar. 2021

\*Corresponding author

Tel: +82-31-539-2024; Fax: +82-31-549-2020

E-mail address: kilee@daejin.ac.kr (K. Lee)

로 비탈면 붕괴에 의한 산사태와 제방의 유실로 인한 침수 피해, 도로의 유실 등이 발생하고 있다. 그 중에서도 비탈면의 표층부 붕괴가 상당히 많기 때문에 이에 대한 경제성을 확보한 재료, 설계, 시공 및 비탈면의 안정도를 극대화할 수 있는 연구가 필요한 실정이다. 이를 위해서 본 연구는 플라이애시 지반안정재를 토사에 혼합할 경우 다공성의 성분이 수분, 유기질, 악취 등을 흡수하며, 이후 수화반응에 의해 알루미늄 산화물 수화물을 생성하게 되는 원리를 이용하여 토사 비탈면의 표층지반 강도개선 및 표면 보호 방법을 연구하였다.

이와 관련된 연구로 Kim(2018)은 표층지반 개량재와 쓰일네일링을 겸용한 비탈면 보강효과에 관한 연구를 Park(2019)은 플라이애시를 이용한 개량토 비탈면의 표층부 안정성 평가를 통해서 강우시 개량토의 우수성을 확인하였다. Shim and Seo(1998)는 플라이애시를 5%~15%로 일반토사에 혼합하였을 때 강도특성에 가장 효율적이라고 제시하였으며, Jeong et al.(2001)은 토질개량의 유효성을 산업폐기물인 플라이애시를 이용하여 확인하였고, X-ray 회절분석으로 성분변화를 분석하였다. Kim et al.(2011)은 송도의 실트질 점성토의 고화처리에 대하여 최적 배합조건을 평가하였다. Kim et al.(2015)은 플라이애시를 활용하여 강도시험 및 한계 소류력 시험을 실시하여 혼합비가 6%이상일 경우 평평, 초본류 파종, 식생매트공법 이상의 효과가 있음을 제시하였다. 또한 Bhang(2007, 2016)은 플라이애시 계열의 지반개량토를 활용하여 급경사지 비탈면의 보호공법으로 토질별 역학시험 및 모형시험을 실시하고 그 안정성 및 현장 적용성을 확인하였다. 그리고 Baker(1954)는 흙-시멘트의 강도특성을 시멘트의 혼합정도 연구를 통해 시멘트의 공기함유량, 점토의 미립분, 배합시간, 밀도, 함수비 등의 요소가 혼합토의 특성에 영향을 미친다고 하였다. Ko et al.(1996)은 시멘트 및 연약점토를 혼합한 지반에 대해서 일축압축시험 및 삼축압축시험을 통하여 공학적 거동을 연구하였다. Horpibulsuk et al.(2004)은 시멘트의 함유량, 점토의 함수비, 양생기간 등을 변화시키며 실내시험을 하였고 이를 통해서 일축압축강도 영향요인들의 특성과 최상의 배합조건 및 일축압축강도의 추정식을 제안하였다. Seo et al.(2019)은 심층혼합처리공법에 지반안정재를 사용하는 경우, 흙의 종류와 입도분포, 함수비 등의 조건 별 지반의 안정성을 확보하기 위해 필요한 단위결합재량을 산정하기 위한 연구를 실시하였다.

본 연구는 강우시 세굴 취약성 및 표층부 붕괴가 자주 발생하는 풍화토 비탈면을 대상으로 제지 플라이애시 지반안정재를 일반토사와 혼합한 개량토로 0.5~2.0m내의 표층부를 치환하고 다짐을 통해 표층부 보강을 현장에 적용할 수 있는 방안을 연구하는 것이 주 목적이다. 현장 적용성을 확인하기 위해 개량토의 물리, 화학적 특성 분석을 제시하고 식생이 가능하면서 일정 강도 이상의 조건을 만족할 수 있는 최적 배합조건을 시험을 통해 제시하였다. 다음으로 기존의 연구자료 및 실험결과를 종합하여 현장에 적용 가능한 지반정수를 평가하였다. 마지막으로 실제 붕괴된 비탈면에 개량토를 시공하고 개량전·후에 대하여 강우지속시간별 안정성과 현장 개량토에 대한 압축강도 및 식생이 가능한지 평가를 통해 현장 적용성 및 개량토의 우수성을 확인하였다.

## 2. 지반안정재의 고화특성

지반안정재는 흙과 간극 사이에 존재하는 물과 혼합재료의 화학반응에 의한 고화작용으로 흙의 공학적 특성 및 강도를 개선하여 지반의 안정성을 향상시킬 수 있는 재료를 의미한다. 지반안정재로는 시멘트(90% 이상이 산화칼슘(CaO), 이산화규소(SiO<sub>2</sub>), 산화알루미늄(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)으로 구성)과 생석회(90% 이상이 순수한 산화칼슘이 구성)가 가장 일반적으로 사용되고 있다. 시멘트와 생석회의 경우, 구성 성분은 거의 동일하나 구성 비율이 차이를 보이고 있어 고화효과 또한 다르게 발생한다. 따라서 많은 현장에서는 이러한 원리를 활용하여 고화처리의 목적과 용도에 따라 시멘트와 석회를 주재료로 하는 지반안정재를 사용하고 있다.

시멘트와 생석회를 주재료로 하는 지반안정재를 흙과 혼합하는 경우, Fig. 1과 같이 간극 사이에 존재하는 물과 생석회 및 시멘트에 혼합된 산화칼슘이 수화반응을 일으켜 포틀랜드이트(Ca(OH)<sub>2</sub>)를 생성하게 되고, 생성된 포틀랜드이트가 규산염(SiO<sub>2</sub>) 및 알루미늄산화물(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)과 반응하여 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H)과 칼슘알루미늄에이트 수화물(C-A-H) 등을 장기간 서서히 생성하게 된다. 이때 산화칼슘(CaO)은 간극수의 소화와 함께 포틀랜드이트(Ca(OH)<sub>2</sub>)를 생성하게 되고, 자경효과에 의한 초기강도를 결정짓게 되며, 포틀랜드이트(Ca(OH)<sub>2</sub>)에서 방출되는 Ca<sup>2+</sup> 이온은 흙 속에 포함되어 있는 규산염과 알루미늄산화물과 반응하여 역시 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H) 및 칼슘

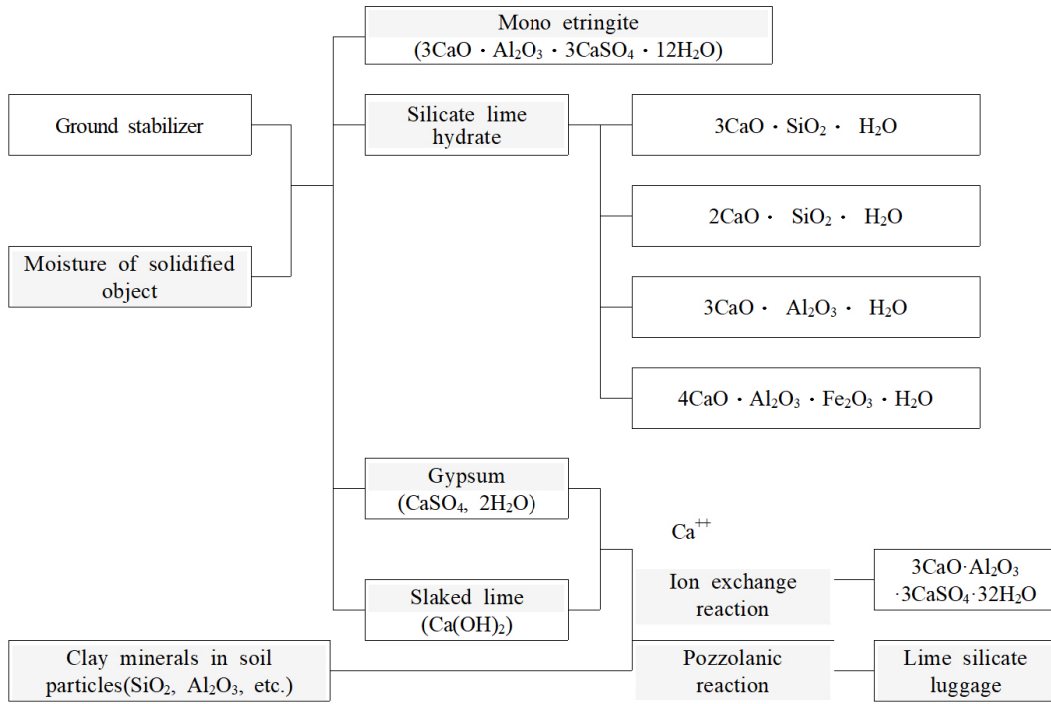


Fig. 1. Reaction characteristics of ground stabilizer and soil (Bang, 2016)

Table 1. Chemical composition of ground stabilizer

Division	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Ig-Loss
Ground stabilizer	18,8	9,51	8,46	50,7	4,34	2,60	-	-	-	1,26

알루미늄에이트 수화물(C-A-H) 등을 생성하게 되며, 흙의 공학적 특성을 개선하고 강도를 증가시키게 된다.

본 연구에서는 수화열의 감소, 건조수축의 감소, 양호한 포졸란 반응, 강도증진 등의 장점으로 시멘트와 콘크리트 산업에 많은 사용이 이루어졌던 플라이애시(Fly ash) 중 제지 슬러지(Paper sludge)의 수분 제거과정과 소각과정을 거친 후에 전기집진기에 의하여 포집된 저품위 제지 플라이애시를 주재료로 사용하였고, Table 1에 지반안정재의 화학적 구성성분을 나타내었다. 표와 같이 본 연구에 사용된 지반안정재는 SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO가 전체의 80% 정도로 대부분을 차지하고 있고, 그 외에 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, SO<sub>3</sub> 등의 성분들로 구성되어 있어 흙 속의 간극수와 반응할 경우 충분한 고화효과를 유도할 수 있다.

### 3. 지반안정재 개량토의 공학적 특성

#### 3.1 배합시험을 통한 일축압축시험

지반안정재 개량토는 비탈면 보호 및 식생이 가능하기 위해서는 목표 압축강도 500kPa와 식생이 발아하기 위해서 필요한 압축강도가 1,000kPa 이하인 조건을 만족하는 배합비를 구하는 것이 중요하다. 따라서 제지 플라이애시 지반안정재를 현장에서 반입한 토사(Table 2 참조)와 혼합한 개량토를 비탈면에 적용하기 위해 실험실에서 수차에 걸친 배합시험결과 지반안정재 비율별 최종 Table 3과 같으며 이때 다짐은 KSF 2312(2016) 규정에 의해 실시하였다.

Table 3의 배합시험 조건으로 지반안정재 비율별(5%, 10%, 15%)로 최대건조밀도의 95%를 적용하여 3일, 7일,

Table 2. Physical property test result of field sample

No	$\omega_n$ (%)	$G_s$	LL(%)	Sieve analysis			USCS
				No.4	No.10	No.200	
1	7.1	2,686	N,P	98.1	81.0	0.8	SP

Table 3. Ground stabilizer compounding test

Division	Compaction result		Mixing ratio			
	$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\omega_{opt}$ (%)	Total mass (g)	soil (g)	Water quantity (g)	Ground stabilizer (g)
Ground stabilizer 5%	18.11	10.6	337.72	280.01	41.72	16.09
Ground stabilizer 10%	18.06	12.2	336.94	265.28	41.12	30.64
Ground stabilizer 15%	17.52	12.7	326.73	243.82	39.99	42.57

Table 4. Compressive strength of improved soil by ratio of ground stabilizers

Ground stabilizer ratio (%)	Compressive strength (kPa)		
	3day	7day	27day
5	245	302	378
10	528	691	977
15	753	1024	1658

Table 5. Compressive strength of improved soil with 10% of ground stabilizer ratio

Division	Compressive strength (kPa)					Average
	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	
Ground stabilizer 10%	823	711	793	643	934	781

Table 6. Result of improved soil permeability test

Division	Permeability coefficient (cm/sec)					Average
	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	
Ground stabilizer 10%	$2.13 \times 10^{-5}$	$1.33 \times 10^{-5}$	$1.24 \times 10^{-5}$	$1.68 \times 10^{-5}$	$1.91 \times 10^{-5}$	$1.66 \times 10^{-5}$

Table 7. Environmental stability test result of improved soil

Test items	Unit	Test limit	Standard	Test result				
				T-1	T-2	T-3	T-4	T-5
Plumbum	mg/L	0.040	3	0.065	N,D	N,D	N,D	N,D
Copper	mg/L	0.006	3	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D
Arsenic	mg/L	0.050	1.5	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D
Hydrargyrum	mg/L	0.0005	0.005	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D
Cadmium	mg/L	0.004	0.3	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D
Hexavalent chromium	mg/L	0.04	1.5	N,D	N,D	N,D	N,D	N,D
Remark	1. N,D : Not detected							

28일 재령일별로 공시체를 제작하였다. 압축시험결과는 Table 4와 같으며 지반안정재 10%에서 식생이 가능한 1,000kPa 이하를 만족하면서 비탈면 보호가 가능한 500kPa 이상을 만족하는 비율로 나타났다. 따라서 Table 3의 지반안정재 비율이 10%인 배합조건으로 Table 5와 같이 총 5개 공시체 시료를 재 제작한 후 압축시험을 실시하였으며 그 결과 양생 28일에서 평균값이 781kPa로 식생이 가능한 1,000kPa 이하와 비탈면 보호가 가능한 500kPa 이상을 만족하는 결과가 나타났다.

### 3.2 투수시험

최종 배합시험결과 지반안정재 10%에서 식생과 비탈면 보호를 만족하는 강도가 나타나 최종 배합비로 선정하

였으며, 지반안정재 10%의 배합비로 직경 100×200mm로 총 5개의 실험체를 제작하여 변수위 투수시험을 실시하였으며 그 결과는 Table 6과 같으며 평균 투수계수는  $1.66 \times 10^{-5}$  cm/sec로 나타났다.

### 3.3 환경안정성시험

최종배합비로 선정된 지반안정재 10% 비율의 공시체로 National Institute of Environmental Research(2017)에 따라 환경안정성시험을 실시하였다. 시험결과 Table 7과 같이 나타났으며, 모든 중금속에서 관련 기준치 미만으로 나타나 비탈면 보강공사로 인한 환경문제는 없을 것으로 판단된다.

### 3.4 개량토의 강도특성 분석

Bhang(2016)은 원지반 토사와 플라이애시를 혼합한 지반안정재 개량토의 강도특성을 파악하기 위해서 실내시험을 실시하였다. 각 현장의 지역별 물리적 특성은 Table 8과 같으며 통일분류상 점토에서 실트 섞인 모래까지 다양한 시료에 해당한다.

일반적으로 비탈면의 경우 깊은파괴와 얇은파괴로 나누며 많은 경우 얇은파괴가 주를 이루게 되는데 이 경우 집중 호우시 표면부터 포화(0.5~3m)되는 구간에 대하여 지반정수가 감소되므로 비탈면의 취약한 지점을 중심으로 무한 병진활동 형태의 얇은파괴가 발생하게 된다. 이 경우에 본 연구에서 제시한 플라이애시를 혼합한 개량토는 강우 및 세굴 그리고 표층부의 표면유실을 방지하게 위해 사용되는 비탈면 표층보호를 위한 지반개량재이다. 따라서 이러한 개량토를 원지반 토사와 혼합 후 다시 표층부에 일정두께로 다짐을 하여 시공하게 되는데 이렇게 시공된 표층부는 강도특성에 좌우되므로 이와 관련된 지반정수 선정이 매우 중요하다.

보편적으로 표층부 개량토의 해석에 사용되는 지반정수 중 단위중량 및 내부마찰각은 안전율을 고려하여 흙쌓

기층과 동일한 값을 적용하고 있으나 점착력의 경우는 지반의 토질 종류별로 플라이애시의 혼합비 특성 등을 고려하여 다양한 시험결과 값을 종합적으로 판단하여 적용하고 있다. Table 9는 다양한 현장에 대하여 일축압축 강도와 Terzaghi-Peck이 제안한 식을 이용하여 점착력을 정리하여 나타내었으며 전단시험 값은 시험 값을 그대로 적용하였다. 이때 마찰각은 원지반토에 비해 시험 값이 크게 산정되었으나 양생일별, 혼합비가 증가함에 따라서 크게 내부마찰각이 증가되는 경향이 명확하지 않으므로 안전율을 고려하여 쌓기층 원지반토의 내부마찰각을 그대로 적용하는 것으로 보고 이 표의 분석에서는 제시하지 않았다.

Table 9는 재령 28일 강도 값을 기준으로 일축압축시험의 경우 점착력은 390.5~909.5kPa로 나타났다. 전단시험 결과 값은 329~786kPa로 편차가 심하고 토질별로도 일관성이 나타나지 않아서 다소 신뢰성이 떨어지는 것으로 나타났다. 이러한 원인은 시험자, 현장토질의 불균일성, 시료입자의 차이 및 시험방법에서 기인된 것으로 평가된다.

플라이애시를 혼합한 개량토의 점착력은 강우특성, 현장에서 지반안정재의 혼합의 불균질성, 장기간 표면 노출로 인한 표층부의 안전율 등을 고려하여 현장 개량토 점착력의 60%를 적용하고 있다. 이 경우 7개소 현장의 일축압

Table 8. Physical characteristics of site soil (Bhang, 2016)

City Name	$G_s$	A Compaction		USCS
		$\gamma_{dmax}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$W_{opt}$ (%)	
Haenam	2,648	15,96	20,45	SC
Gunsan	2,676	15,34	15,67	CL
Haechang	2,685	15,53	17,52	ML
Iksan	2,663	16,92	9,23	SW
Yeosan	2,664	15,97	18,56	SM
Wanju	2,669	17,90	14,5	ML
Saemangeum	2,664	18,06	12,2	SP

Table 9. Strength test value of improved soil by site

Soil type	Compression test		Shear test	City Name
	q (kPa)	c=q/2 (kPa)	c (kPa)	
SC	1,048	524,0 (314,4)	495 (297,0)	Haenam
CL	927	463,5 (278,1)	369 (221,4)	Gunsan
ML	792	396,0 (237,6)	333 (199,8)	Haechang
SW	1,819	909,5 (545,7)	786 (471,6)	Iksan
SM	1,444	722,0 (433,2)	662 (397,2)	Yeosan
ML	-	-	329 (197,4)	Wanju
SP	781	390,5(234,3)	-	Saemangeum
Remark	( ) means the value when 60% of the test value is applied.			



(a) Immediately after sowing the seeds



(b) Growth status after 2 months

Fig. 2. Plant growth conditions (Yeo, 2019)

축시험의 점착력은 Table 9와 같이 약 234.3~545.7kPa로 나타났으며 전단시험 값의 점착력은 약 197.4~471.6kPa로 나타났다. 실제 설계시 적용하고 있는 개량토의 점착력은 토질에 따라서 다르지만 150~200kPa 값을 일반적으로 적용하고 있는데 실내시험 값은 이 설계값의 범위를 모두 상회하는 것으로 나타났다.

따라서 지금까지의 배합시험을 통한 일축압축강도와 기존 연구자료를 통해서 얻은 강도정수 값을 종합해 볼 경우 플라이애시 지반안정재를 활용한 개량토의 점착력은 150~200kPa 값을 단위중량과 내부마찰각은 풍화토에 지반안정재를 첨가할 경우 강도개선효과가 나타나지만 안전율을 고려하여 일반적인 풍화토의 지반정수를 적용하며 투수계수는 시험결과 평균값이  $1.66 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$  이지만 안전율을 고려하여  $1.0 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$  값을 적용하더라도 문제가 없을 것으로 판단된다.

## 4. 개량토 지반의 식생성능 평가

### 4.1 식생 모형시험

지반안정재는 앞에서 언급한 바와 같이 붕괴된 원지반토의 약 0.5~2.0m 두께로 절취를 한 뒤 지반안정재와 혼합하여 이를 표층부에 다시 다짐을 통해 비탈면을 형성하게 되는데 이는 먼저 표층부 일정 두께의 강도가 개선됨으로 인한 저항능력이 발생되고 다음으로 식생녹화 등을 통해 표층부의 세굴 등을 방지하는 것이 주목적이다. 따라서 개량토에 식생녹화가 가능한지를 평가하기 위해 식생 모형실험을 실시하였다(Yeo, 2019). 모형토조의 규격은

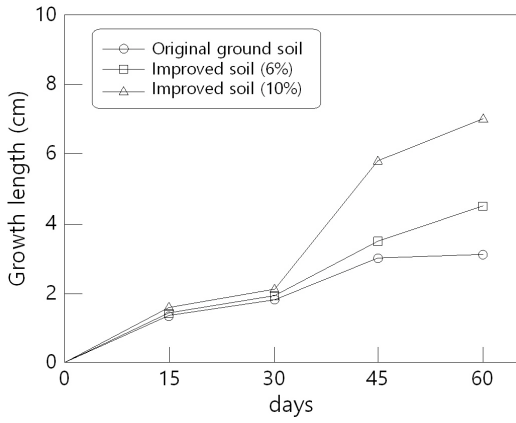
20×10×8cm이며 합판으로 토조 6개를 제작하고 3층 A다짐을 실시하여 이를 다시 Fig. 2와 같이 플라스틱 함에 넣고 식생을 하였다.

식생 모형실험에 사용한 식물은 일반적으로 발아율이 높은 외래초종을 선택하였다 그 이유는 외래초종의 성장이 재래종과의 경쟁에서 초기 생육이 우수하다는 경향 때문이다. 본 실험에서 외래초종은 가는 보리풀(Perennial ryegrass)과 붉은 토끼풀(*Trifolium pratense*) 두 종류를 선정하였다. 각 초종에 대한 특징(Kim, 2008)은 다년생 초종으로 정원, 묘지, 비행장, 골프장 및 비탈 녹화용으로 경관이 양호하고 발아율이 우수하다는 특징을 가지고 있다.

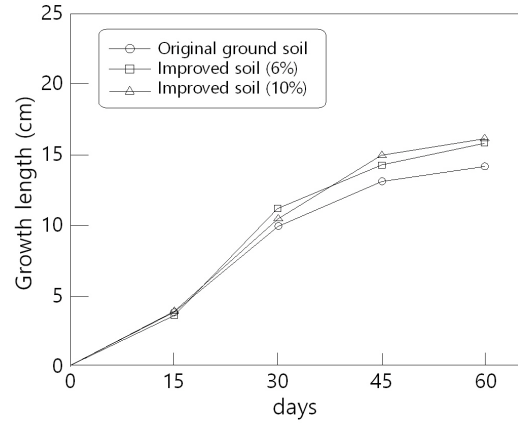
### 4.2 식생 모형시험 결과

Fig. 2는 모형토조 시료 위에 두 식물의 씨앗을 Fig. 2(a)와 같이 뿌렸고 가는 보리풀은 씨앗 위에 상토를 덮어 실험을 진행하였다. 실험 기간은 2개월 동안 실시하였으며, 토조는 야외 옥상에 배치하여 자연적인 강우와 같은 외적 환경을 최대한 받도록 하였다(Yeo, 2019). 실험 결과, Fig. 2의 왼쪽부터 차례대로 원지반토, 지반안정재 혼합비(6%), 그리고 지반안정재 혼합비(10%)를 혼합한 토양 3군에 대하여 실험을 실시하였으며 모두 식생성장이 가능하였다. 특히 Fig. 2(b)에서와 같이 2개조 중 제일 좌측은 붉은 토끼풀이며 우측은 가는 보리풀로 가는 보리풀에서 식생성장률이 높음을 알 수 있다. 이 두 종에 대해 시험군별 날짜에 따른 성장길이를 나타낸 것이 Fig. 3이다. 그림에서와 같이 식생성장은 붉은 토끼풀 보다 가는 보리풀에서 훨씬 식생성장이 빠른 것을 알 수 있고 원지반토 보다는 지반안





(a) Growth length of Trifolium pratense by days



(b) Growth length of Perennial ryegrass by days

Fig. 3. Growth length by plant type

정재를 혼합한 2 종류 초본에서 식생성장이 빠름을 확인하였다. 이를 통해 지반안정재를 6~10% 혼합한 개량토에서도 식물들이 성장을 잘하고 있어 녹화에 문제가 없는 것으로 판단된다.

## 5. 현장적용성 평가 및 고찰

### 5.1 현장개요

개량토 비탈면 현장은 Fig. 4의 횡단면도에서와 같이 포장부 일부균열 및 하부 비탈면에서 우수 및 강우에 의한 세굴 및 침식이 발생하였다. 현장에서 발생한 비탈면 주요 손상은 상부도로 아스팔트 포장구간의 침하로 인한 종방향 균열 발생과 하부 비탈면의 세굴 및 단면손실이 연장 30m, 폭 10m 정도로 확인되었다. 따라서 표층부 비탈면 보호를 위하여 개량토로 표층부를 2.0m 두께로 보강을 실시하고 식생을 실시하였다.

본 현장은 풍화토, 풍화암, 연암으로 구성된 지층으로 강우에 의한 비탈면의 안정성 평가를 위하여 기존 설계자료를 이용하여 지반의 지반정수를 산정하였으며, 표층개량층의 경우는 앞 절에서 제시한 값을 기준으로 Table 10

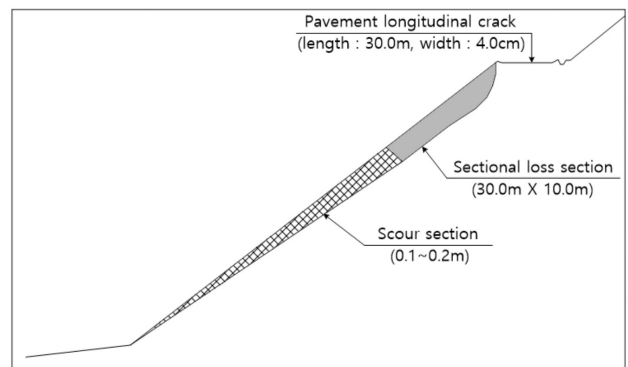


Fig. 4. Site cross-sectional view

과 같은 지반정수 값을 적용하였다. 그리고 이를 이용하여 개량토로 보강 전 및 후 단면에 대하여 강우 지속시간별 비탈면의 안정성을 확인하였다.

### 5.2 개량토 비탈면의 안정성 및 시공성 평가

개량토 비탈면의 안정성 평가는 한국도로공사에서 제시한 기준(Korea Expressway Corporation, 2009)에 의거한계평형해석법을 적용하였다. 그리고 Fig. 4의 대표단면으로 강우 지속시간에 따른 안정성 평가 결과 Table 11과

Table 10. Field design constant

Division		$\gamma_t$ (kN/m <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)	k (cm/sec)
Site	Filling material	19	15	25	$1.0 \times 10^{-4}$
	Weathered soil	19	15	30	$1.0 \times 10^{-4}$
	Ripping rock	19	30	35	$1.0 \times 10^{-4}$
	Blasting Rock	20	100	37	Impermeable layer
Improvement layer		19	200	30	$1.0 \times 10^{-5}$

Table 11. Stability results of slope of improved soil before and after reinforcement

Rainfall duration	Before reinforcing improved soil		After reinforcing improved soil	
	Fs	Result	Fs	Result
Dry (Fs>1,5)	1,308	N,G	1,791	O,K
12hr (Fs>1,3)	1,131	N,G	1,669	O,K
24hr (Fs>1,3)	0,898	N,G	1,655	O,K
36hr (Fs>1,3)	0,886	N,G	1,607	O,K
48hr (Fs>1,3)	0,886	N,G	1,576	O,K
Saturation (Fs>1,2)	0,645	N,G	1,003	N,G

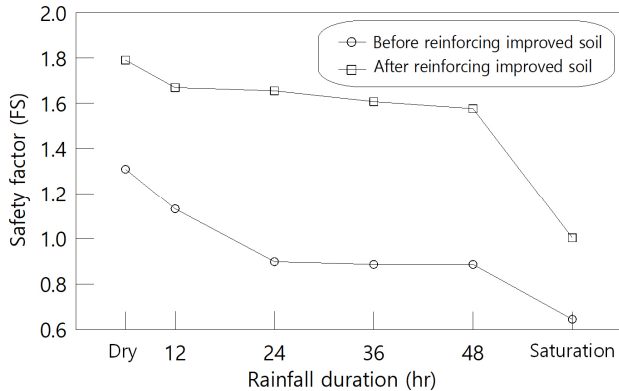


Fig. 5. Safety factor of slope of improved soil before and after reinforcement

Fig. 5에서와 같이 개량토 미 적용시(보강전) 건기시 및 우기시 그리고 완전 포화시 모두 안정성이 확보되지 못하는 것으로 나타났다. 그러나 붕괴된 구간에 대하여 개량토 2.0m 두께로 보강후는 건기시 및 우기시에 모두 안정성을 확보하는 것으로 나타났지만 완전 포화시에는 안정성이 확보되지 못하는 것으로 나타났다. 따라서 강우지속 48시간까지 최소 안전율을 확보하고 있고 완전 포화시에서도 최소안전율이 1.0 이상으로 분석되어 표층부 개량토에 대한 보강 효과는 상당히 우수한 것으로 판단된다.

### 5.3 개량토의 현장 시공성 평가

개량토의 현장시공은 현장 비탈면의 표토를 제거하고, 비탈면 하부 보강과 원지반토를 집토한다. 집토한 원지반토와 지반안정재를 혼합하여 복토 및 다짐하여 비탈면을

재형성 후 비탈면에 녹화를 실시하였다. 집토한 원지반토와 지반안정재를 혼합하여 만들어진 개량토의 세굴 및 침식에 대한 저항성 증대와 품질 확인을 위하여, 첫 번째는 개량토가 시공된 비탈면에서 양생 7일 후 토양 경도계를 이용하여 경도시험을 수행하고 두 번째는 현장에서 직접 배합된 공시체를 제작하여 양생 7일의 압축시험을 실시하였다.

경도계에 대한 역학적 강도 기준은 Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2009)에서 제시된 토양경도 기준에 의하면 토양경도는 산중(山中)식 토양경도계의 측정치를 기준으로 하며, 총 10곳의 위치에서 측정하여 산술 평균으로 토양경도별 식물 생육상태를 평가하도록 되어 있다. 상기 기준에 의하면 토양경도계 값이 18~23mm를 가장 이상적으로 보고, 우리나라 비탈면 토양의 대표적인 토질인 실트, 사질실트, 약점토의 실트와 모래의 혼합토(SM, SC)인 토질에서 이를 일축압축 강도로 환산하면 Fig. 6에서와 같이 산중식 경도계 측정기준과 같이 약 470~1,000kPa가 된다.

따라서 현장 개량토에 대한 품질을 확인하기 위하여 10개소에 대하여 토양 경도계를 사용하여 Table 12와 같이 시험을 실시하였다. 시험결과와 평가는 Fig. 6의 표준형 토양 경도계의 관입깊이와 지지력의 관계로부터 제시된 규정범위(18~23mm)를 만족하는지를 평가하였다. 그 결과 토양경도계 측정값이 19~22mm의 범위로 측정되어 규정 값의 범위를 만족하는 것으로 나타났다.

개량토에 대한 현장 압축강도 시험결과와 Table 13과 같이 830~900kPa로 측정되었으며, 위치별 평균은 843~

Table 12. Soil hardness tester measurement results

Location	T-1	T-2	T-3	T-4	T-5	T-6	T-7	T-8	T-9	T-10
Measure	21,0	22,0	20,0	21,0	23,0	19,0	21,0	20,0	20,5	22,0
Result	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
Remark	Regulation scope : 18~23 (mm)									



Table 13. Compressive strength in case of curing 7

Location	Original ground soil (kPa)	Compressive strength of improved soil (kPa)		
		No.1	No.2	No.3
Compressive strength	216	830	890	870
	184	860	860	860
	-	840	900	890
Average	202	843	883	873

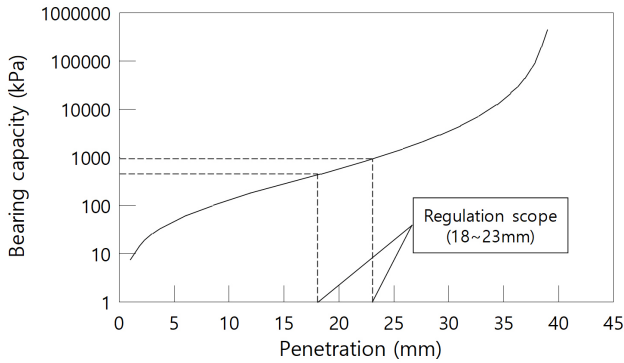


Fig. 6. Penetration depth and bearing capacity of standard soil hardness tester relationship (Han et al., 2011)

883kPa의 범위이며 총 평균은 866kPa 압축강도를 나타내었다. 이 값은 원지반 평균 일축압축강도(202kPa)에 비해 약 4.3배 정도 증가하는 값으로 실제 28일 강도일 경우 이 값은 더욱 증가될 것으로 판단된다. 특히 이 값을 점착력으로 환산하면 총 평균(866kPa) 일축압축강도를 2로 나누고 현장 적용시 이 값의 60%를 적용한다면 약 259.8kPa로 실제 설계시 적용된 점착력 200kPa 이상을 만족한다. 따라서 비탈면의 안정해석에 사용된 점착력과 비교하여 약 4배 정도 강도가 증가하고 비탈면의 안정성 평가 등을 종합하여 분석하면 비탈면에 적용된 개량토는 강우에 저항성이 크게 증대하여 비탈면의 안정성이 확보된 것으로 판단된다.

## 6. 결론

- (1) 비탈면 보호가 가능한 압축강도 500kPa 이상과 식생이 가능한 압축강도 1,000kPa 이하를 만족하는 개량토의 최적 배합조건은 지반안정재 비율 10%, 재령 28일 강도 일 때이며 이때 평균 압축강도는 781kPa이며 평균 투수계수는  $1.66 \times 10^{-5}$  cm/sec이다.
- (2) 식생시험 결과 원지반토보다 개량토에서 원활한 식생성장을 보이는 것으로 나타났으며 환경안정성 시험

결과 모든 중금속에서 관련 기준치 미만으로 나타나 개량토를 비탈면 적용하더라도 환경문제는 없을 것으로 보인다.

- (3) 개량토를 이용한 비탈면에 대한 현장 적용성은 보강전의 경우 모든 조건에서 안정성을 확보하지 못했지만 개량토로 보강한 이후 안전율은 강우지속 시간 48시간까지 최소 안전율을 확보하는 것으로 나타났다.
- (4) 현장 개량토의 양생 7일 압축강도는 설계치인 점착력 200kPa 이상으로 강우 및 우수에 저항성이 크게 증대하였으며 토양경도계시험 결과도 규정 값인 18~23mm 이내로 확인되어 식물생육이 가능한 것으로 나타났다.

## References

1. Baker, C. N. (1954), "Strength of Soil-Cement as a Function of Degree of Mixing", Highway Research Board Bulletin, No.98, pp.33-52.
2. Bhang, I. H. (2007), "A study on the technology related to the control and rehabilitation of slope surface erosion", Master Thesis, Graduate School of Industrial Technology of Jeonbuk National University.
3. Bhang, I. H. (2016), "A Study on the Behavior Characteristic of Composite Reinforced Earth with Improved Soil Surface and Geogrid-reinforced Backfill", Ph.D. Thesis, Graduate School of Jeonbuk National University.
4. Han, K. H., Cho, H. R. Jeon, S. H. and Zhang, Y. S. (2011), "A Study of Relation Between Yamanaka Hardness and Penetrometer Cone Index", Vol.44, No.3, pp.344-346.
5. Horpibulsuk, S., Miura, N. and Bergado, D. T. (2004), "Undrained Shear Behavior of Cement Admixed Clay at High Water Content", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol.130, No.10, pp.1096-1105.
6. Jeong, D. Y., Lee, B. S. and Lee, K. J. (2001), "A Study on Reaction Characteristics of Stabilized Red Yellow Soil with Flyash", Journal of the Korean geotechnical society, Vol.17, No.2, pp.59-72.
7. Kim, J. S. (2008), "The Analysis on the Vegetation Construction

- Cases of Road Slope in West Gyeongnam Regions”, Master’s Thesis, Industrial Graduate School of Kyungnam National University.
8. Kim, J. Y., Jang, E. R., Chung, C. K. and Jang, S. H. (2011), “The Optimum Mixture Condition for Stabilization of Songdo Silty Clay, *Journal of the Korean Geotechnical Society*”, Vol.27, No.5, pp.5-15.
  9. Kim, W. H. (2018), “A Study on the Effect of Slope Stabilization Method using Soil Stabilizer and Soil-Nailing”, Master’s Thesis, The Graduate School of Daejin University.
  10. Kim, Y. S., Kim, J. H., Seo, S. G. and Bhang, I. H. (2015), “Comparison of Critical Tractive Forces for Application of Soil Improvement Material to Bank Revetment Work”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.31, No.2, pp.65-73.
  11. Ko, H. W., Seo, S. G., An, Y. J., Kim, Y. S. and Cho, D. S. (1996), “Applicability Evaluation of Eco-Friendly Binder Material using Desulfurized Dust in Deep Cement Mixing Method”, *Korean Geosynthetics Society*, Vol.15, No.2, pp.1-12.
  12. Korea Expressway Corporation (2009), “Road Design Guidelines, Vol.2 Earthwork and Drainage” No. 5, pp.156-159.
  13. Korean Agency for Technology and Standards (2016), “Standard Test Method for Soil Compaction using a Rammer”, KS F 2312.
  14. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2009), “Design and Construction Guidelines for Road Slope Greening Work”.
  15. National Institute of Environmental Research (2017), “Waste process test standard”.
  16. Park, M. J. (2019), “Stability Evaluation of Surface Layer of Improved Soil Slope Using Fly Ash”, Master’s Thesis, The Graduate School of Daejin University.
  17. Seo, S. G., Lee, K. S., Kim, Y. S. and Cho, D. S. (2019), “A Study on the Estimation of Optimal Unit Content of Binder for the Soil Stabilizer Using the Recycled Resource in DMM”, *Korean Geosynthetics Society*, Vol.18, No.2, pp.37-44.
  18. Shim, J. W. and Seo, C. H. (1998), “A Study on the Strength Property of Cement Matrix with Fly-ash”, *The Architectural Institute of Korea*, Vol.18, No.2, pp.587-592.
  19. Yeo, D. J. (2019), “A Study on the Ground Improvement Material using Fine Powder of Coal Bottom Ash”, Master Thesis, Graduate School of Jeonbuk National University.