

# 토양안정재를 혼합한 녹생토의 전단강도 및 침식저항특성

## Shear Strength and Erosion Resistance Characteristics of Stabilized Green Soils

오 세 옥<sup>1)</sup> · 전 진 철<sup>2)</sup> · 김 동 근<sup>3)</sup> · 이 현 호<sup>4)</sup> · 권 영 철<sup>†</sup>

Sewook Oh · Jinchul Jeon · Donggeun Kim · Heonho Lee · Youngcheul Kwon

Received: October 13<sup>th</sup>, 2015; Revised: October 16<sup>th</sup>, 2015; Accepted: November 5<sup>th</sup>, 2015

**ABSTRACT :** With the rising interest in the environment, more attention on ecological restoration for damaged slope surface to restore its original state has been drawn. Generally, the most useful method is vegetation based spray work. This method uses green soil including sewage sludge, sawdust, paper sludge, and weathered granite soil. However, because there are neither accurate information nor test values about green soil, green soil is often lost by environmental factors such as rainfalls and strong winds. To solve the problem of green soil, it is necessary to prepare design standards about green soil, and conduct studies to deal with green soil loss in consideration of various variables including basic material property, soil quality of slope surface, and weather. This study was conducted in the mixture of green soil and eco-friendly soil stabilizer. With green soil, basic material property test and compaction test were conducted for the analysis on the basic characteristics of green soil. In the mixture with soil stabilizer at a certain ratio, we conducted shear strength test depending on the ratio in order to analyze the maximum shear strength, cohesion and the change in internal friction angles. Furthermore, in the mixture ratio of green soil and soil stabilizer, which is the same as the ratio in the shear strength test, an inclination of slope surface was made in laboratory for the analysis on erosion and germination rate. Finally, this study evaluated the most effective and economic mixing ratio of soil stabilizer to cope with neighboring environmental factors. According to the test, the shear strength of green soil increased up to 51% rely onto the mixing ratio of and a curing period, and its cohesion and internal friction angle also gradually increases. It is judged that the mixture of soil stabilizer was effective in improving shear strength and thereby increased the stability of green soil.

**Keywords :** Green soils, Erosion rate, Germination rate, Shear strength, Soil stabilizer

**요 지 :** 최근 산림 훼손지를 원래 상태로 되돌리기 위한 생태복원에 대한 관심이 높아지면서 인공 비탈면을 보강하면서 친환경적인 녹화가 될 수 있는 연구가 진행되고 있으며, 이러한 생태복원을 목표로 식생생육의 기반이 되는 인공토양의 조성과 관련된 많은 기술들이 개발되고 있는 추세이다. 본 연구에서는 하수오니, 톱밥, 제지슬러지, 화강풍화토가 포함되어 사용되고 있는 녹생토와 친환경적인 토양안정재를 활용하여 연구수행을 하였다. 토양안정재와 혼합된 녹생토를 이용해 기본물성실험을 통해 녹생토의 기본적인 특성을 분석하였으며, 친환경적인 토양안정재를 일정비율로 녹생토와 혼합하여 각각의 비율에 따른 전단강도실험을 수행하여 최대전단강도를 분석하고 이에 따른 점착력과 내부마찰각을 산정하였다. 그리고 녹생토와 토양안정재의 혼합비율을 전단강도실험과 동일한 조건으로 비탈면의 기울기를 적용하여 토양안정재의 혼합비율에 대한 침식률과 발아율을 분석하여 주변 환경적 요인에 대처 가능한 토양안정재의 경제적인 혼합비율을 고찰하고자 한다. 실험결과 양생기간과 안정재의 혼합률에 따라 최대 51%까지 전단강도가 증가하였으며, 실험결과를 바탕으로 내부마찰각과 점착력이 모두 상승한 점을 확인하여 안정재가 녹생토의 전단성능과 침식저항 향상에 기여하고 있음을 확인하였다.

**주요어 :** 녹생토, 침식률, 발아율, 전단강도, 토양안정재

## 1. 서 론

우리나라는 국토의 70%가 산지로 이루어져 있으며 각종 도로의 개설, 주택단지 및 산업단지, 신도시 건설 등의 조성 및 개발에 따라 전국적으로 대규모 건설 현상이 발생하고

있어 이로 인한 대규모 비탈면의 훼손 현상이 심각하게 나타나고 있다.

이러한 비탈면 훼손은 대부분 산림과 인접한 도로 경계 부에서 생겨나 이질적인 경관을 연출하게 되며, 비탈면을 방지하게 되면 침식 및 붕괴현상을 수반한 추가적인 파괴가

1) Department of Construction & Disaster Prevention Engineering, Kyungpook National University

2) POSCO Engineering & Construction

3) Department of Environment and Environmental System, Kyungpook National University

4) Department of Forest Resources and Landscape Architecture, Yeungnam University

† Department of Construction System Engineering, Korea Soongsil Cyber University (Corresponding Author : kyc@mail.kcu.ac)

발생하게 된다. 특히 동절기에 지반이 해빙되면서 침식이 많이 발생된다. 최근에는 훼손된 비탈면을 원래 상태로 되돌리기 위한 생태복원에 관심이 높아지면서 생태적으로도 건전한 친환경적인 녹화에 대한 연구가 진행되고 있으며, 식생 생육의 기반이 되는 인공토양의 조성과 관련된 많은 기술들이 개발되고 있다(Kim & Kang, 2011).

우리나라의 경우 공사로 조성된 인공 비탈면은 식생의 생육기반이 불량하여 자연 복원력만으로 복원되기 힘들며 장기간이 소요된다. 이러한 이유로 훼손지를 복원하기 위한 다양한 녹화 방법들이 시행되고 있다. 일반적으로 식생기반 뽑어 붙이기 공법을 활용하고 있으며 재료는 하수오니, 톱밥, 제지슬러지, 화강풍화토가 포함되어 있는 녹생토를 사용하고 있다. 현재 국내에서 활용하는 녹화공법의 선정 경향을 볼 때 토질별로 몇 개의 녹화공법만을 적용하기 때문에 식생 생육기반재에 대한 정확한 정보와 검정치가 없어 강우와 강풍 등의 환경적인 영향으로 인해 유실되는 경우가 많이 발생되고 있다(Han et al., 2009; Choi & Song, 2011; Jang, 2011).

본 연구에서는 하수오니, 톱밥, 제지슬러지, 화강풍화토가 포함되어 사용되고 있는 녹생토와 친환경적인 토양안정재를 활용하여 연구수행을 하였다. 녹생토의 경우에는 상기 구성재료가 혼합된 상태로 공급된 시료를 사용하였으며 토양안정재는 실험변수로 상황에 따라 달라진다. 토양안정재는 친환경성이 강조된 결합재의 형태로 선정하였으며 시멘트와 동등한 성능을 유지할 수 있지만, 중금속 등을 함유하지 않아 환경에 대한 부하가 없는 시멘트 계열의 제품이다. 안정재는 녹생토 입자 사이에 결합력을 높이는 역할을 하며 고화처리된 이후에는 시멘트 혼합과 같이 양생을 통해 결합강도가 증가하는 고화메카니즘을 갖고 있다. 토양안정재와 혼합된 녹생토를 이용해 기본물성실험을 통해 녹생토의 기본적인 특성을 분석하였으며, 친환경적인 토양안정재를 일정비율로 녹생토와 혼합하여 각각의 비율에 따른 전단강도 실험을 수행하여 최대전단강도를 분석하고 이에 따른 점착력과 내부마찰각을 산정하였다. 그리고 녹생토와 토양안정재의 혼합비율을 전단강도실험과 동일한 조건으로 유지하여 비탈면의 기울기와 토양안정재의 혼합비율에 대한 침식과 전단강도 특성을 종합적으로 판단하여 토양안정재의 경제적인 혼합비율을 고찰하였다.

## 2. 실내시험

### 2.1 직접전단시험

녹생토의 전단강도정수인 점착력과 내부마찰각을 구하

기 위해 직접전단시험을 수행하였다. 직접전단시험기는 전단박스, 수평하중측정기, 수직변위측정기, 수평변위측정기, 구속응력 행거로 설계되어 있다. 전단박스는 직경 62mm, 높이가 40mm이며, 하단부 다공석판과 상단부 다공석판으로 고정하여 전단박스 내에 조성된 공시체의 유동과 배출수를 방지하였다. 수평하중측정기는 1mm/min의 전단속도로 상부 전단박스를 이동시켜 전단이 진행하였다. 시험 시 구속응력은 0.0325MPa~0.130MPa까지 조절하였다.

성토사면의 경우 강우 시 주로 얇은 깊이에서 파괴가 일어나므로 작은 구속응력에서 전단강도정수가 어떻게 달라지는가를 파악하기 위해서 구속응력의 크기를 조정하는 시험을 하였다. 시험 시 함수비는 고화정도에 영향을 미치므로 시험변수로 고려하였으며 시험이 종료된 후 공시체를 수거하여 함수비를 산정하였다. 동시에 토양안정재의 혼합비율에 따른 전단강도를 분석하기 위해 안정재 혼합비율을 증가시켜 혼합하였으며, 교반 함수비는 다짐시험을 통해 얻어진 결과에서 최적함수비인 30.4%를 동일하게 적용하였다. 토양안정재는 건조 중량을 기준으로 혼합비를 결정하였다. Table 1에는 본 연구에서 수행한 직접전단시험의 조건에 대해 정리하였다.

### 2.2 비탈면 경사에 대한 침식시험

본 연구에서는 식생기반재의 구조 안정성을 평가하기 위해 비탈면 경사를 30°로 조정하여 실내에서 인공강우실험을 통해 침식시험을 수행하였다. 식생기반재의 침식시험을 통해 토양안정재의 혼합비율이 강우가 비탈면 침식에 미치는 영향을 평가하였다. 침식시험에서는 강우강도를 20mm/min으로 고정하였으며, 본 연구에서 관심 있게 파악하고자 한 것은 정해진 시험조건에서 시험체의 정성적인 거동이기 때문에 침식의 절대량이 중요한 것은 아니라고 판단하였다. 따라서 강우강도는 실험변수로 사용할 의미가 없었던 것

Table 1. Conditions of direct shear test

Stabilizer ratio (%)	$\gamma_{dmax90\%}$ (t/m <sup>3</sup> )	OMC (%)	Normal stress (MPa)	Curing period (day)
0	1.2	30.4	0.0325	1 3 7
			0.0650	
			0.1300	
5	1.2	30.4	0.0325	
			0.0650	
			0.1300	
10	1.2	30.4	0.0325	
			0.0650	
			0.1300	
15	1.2	30.4	0.0325	
			0.0650	
			0.1300	

로 판단했으며, 강우강도를 하나로 고정하여 실내실험이 실시되었다.

인공강우실험 장치는 비탈면의 경사를 실내에서 재현하여 강우로 인한 침식과 붕괴 등을 모사할 수 있도록 철탈박스과 지지 프레임으로 구성되어 있으며 비탈면 경사를 조절하기 위한 기어와 축으로 구성되어 있다. Fig. 1은 본 연구에 사용된 인공강우실험 장치의 도면을 보여주고 있다. 각 하단부 모서리에는 고정이 가능한 바퀴가 설계되어 이동이 용이하게 제작되었다. 인공강우실험 장치 프레임 중앙에는 비탈면의 경사를 조절할 수 있도록 기어와 기어 축이 설치되어 있으며, 비탈면의 경사는 0°~60°까지 조절이 가능하도록 설계되어 있다. 철탈박스 하단부에 부직포를 크기에 맞게 설치함으로써 강우 침투 시 유실되는 토립자들로 인해 배수구가 막히지 않도록 하였으며, 비탈면을 실내에서 구현하기 위해 실내 다짐시험을 통해 산정된 최대건조단위중량의 90%에 해당하는 단위중량으로 약 200mm 조성하였다. 이때 90%는 혼합비율과 무관하게 모든 혼합비율에서 최종적인 단위중량을 기준으로 산정하였다.

### 3. 식생기반재의 물리적 특성

본 연구 수행에 사용된 식생기반재는 하수오니, 톱밥, 제

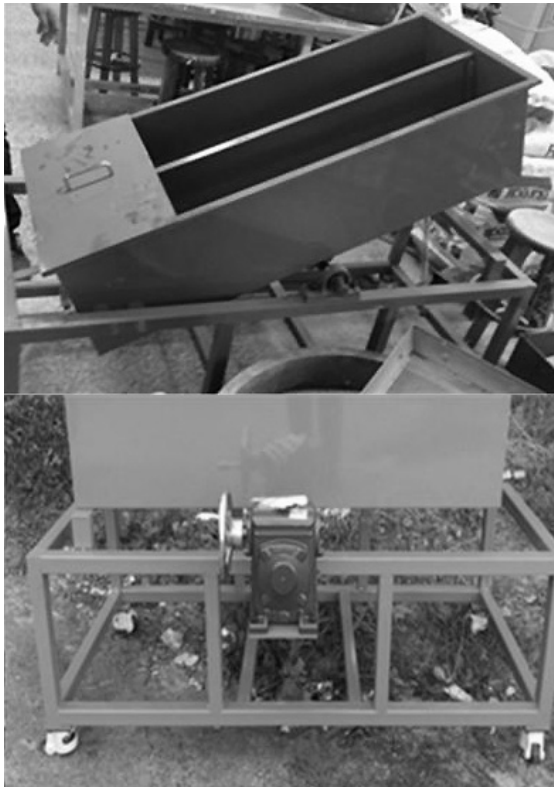


Fig. 1. Device of an artificial rainfall tests

지슬러지, 화강풍화토가 혼합되어 있는 녹생토로서 실험 재료의 물리적 성질을 분석하고자 입도분석시험, 비중시험, 애터버그한계시험, 다짐시험 등 물성시험을 수행하고 결과를 정리하였다. Table 2는 녹생토에 대한 물리적 성질을 나타내고 있다.

No. 200 체의 통과량은 5.4%로 세립분이 함유되어 있으며, 흙의 종류는 통일분류법(USCS)에 의해 이중기호인 ‘실트 섞인 입도 불량한 모래’의 SP-SM으로 분류되었다. 그리고 녹생토의 입도분포곡선은 Fig. 2와 같다. Fig. 3은 A-다짐시험을 수행 후 결과로부터의 다짐곡선이다. 다짐시험결과 녹생토의 최적함수비(OMC)는 30.4%이며, 최대건조단위중량은 1.32t/m<sup>3</sup>로 나타났다. 즉 녹생토를 이루는 하수오니와 제지슬러지 등의 영향으로 인해 세립화 현상이 나타나

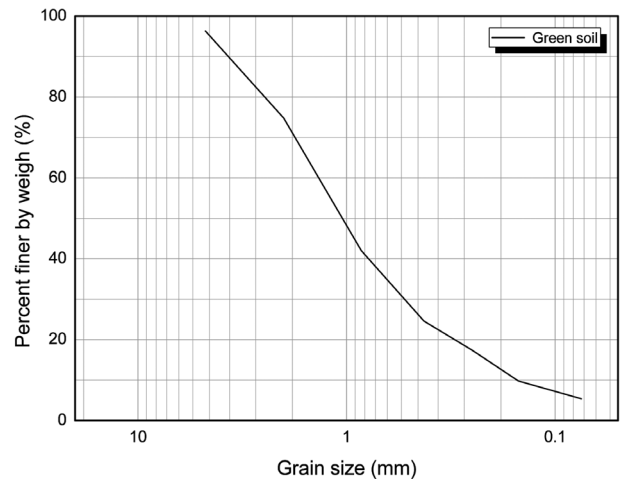


Fig. 2. The particle size distribution curve of green soil

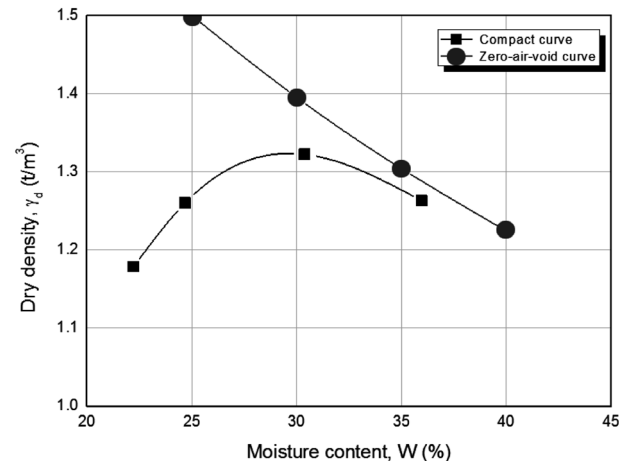


Fig. 3. The compaction curve of green soil

Table 2. Physical properties of green soil

Sample	$G_s$	LL (%)	PL (%)	$C_u$	$C_g$	$\gamma_{dmax}$ (t/m <sup>3</sup> )	OMC (%)	USCS
Green soil	2.46	32	N/P	8.4	1.4	1.32	30.4	SP-SM

최적함수비가 일반적인 화강풍화토에 비해 높게 나타났으며, 세립질의 시료 영향으로 인해 최대전단위중량 또한 일반적인 화강풍화토에 비해 작게 나타난 것으로 판단된다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 양생기간에 따른 전단강도 특성

본 절에서는 녹생토와 토양안정제 혼합토의 양생기간에 따른 전단강도 특성을 분석하였다. 녹생토와 토양안정제 혼합토의 전단강도 특성은 토양안정제의 혼합비율과 양생기간의 영향에 의해 영향을 받으므로 동일한 조건을 유지하여 직접전단시험을 수행한 결과를 각각의 토양안정제의 혼합비율과 양생기간의 변화에 따라 분석하였으며 각각의 파괴포락선 상에 위치한 측정 중 기준에 대해 벗어난 결과는 재시험을 수행하여 분석하였다.

Fig. 4는 양생기간이 1일이 경과 후 토양안정제의 혼합비율에 따른 전단강도 시험결과이다. 그림에서 나타나는 바와 같이 구속압력이 증가할수록 비례적으로 증가하고 있는 점은 일반적인 시험결과와 동일하다(Kuo et al., 2013). 토양안정제의 혼합비율 측면에서 보면 토양안정제를 혼합하지 않은 경우보다 15% 정도의 혼합비율을 유지한 공시체에서 최대전단강도는 32%가량 증가하는 것으로 나타났다. 양생기간이 1일일 경우에서 토양안정제의 혼합으로 인해 최대전단강도의 증가되는 경향을 나타내고 있다는 점을 알 수 있으나 구속압력이 낮은 영역에서보다는 구속압력이 큰 경우에서 증가 현상이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 현상은 후술하게 될 양생기간의 증가에서도 유사하게 나타나고 있다. 즉 녹생토의 경우에는 매립되는 경우보다는 노출되는 경우가 많고 토피 또한 깊지 않아 토양안정제의 혼합이 강도 증

진 목적으로 사용되는 경우에는 신중할 필요가 있다는 점을 시사하는 것으로 판단한다.

Fig. 5는 양생기간이 3일이 경과 한 후 토양안정제의 혼합비율에 따른 전단강도 실험결과를 나타낸 것이다. 양생기간이 늘어난 만큼 전단강도의 절대치가 상승하는 경향을 보이고 있으며 특히 토양안정제의 혼합비율이 15%일 경우 0%일 때보다 최대 40%까지 전단강도가 증가함을 알 수 있다. 그러나 낮은 구속압에 대해서는 양생기간이 1일일 경우보다 최대전단강도의 증가비율이 3%~4%가량으로 나타났다. Fig. 6은 양생기간이 7일이 경과 한 후 전단강도의 실험결과이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 전반적인 시료의 전단강도 증가를 확인할 수 있었다. 토양안정제의 혼합비율 측면에서도 0%에 비해 15%에서는 최대 15% 상승하였으나 양생기간이 1일일 경우보다 약 23%~51% 증가하였으며 3일의 양생기간보다 약 11%~47% 증가되었다. 이는 구속압력의 크기에 따라 상이하게 나타난다. 양생기간이 3일의 경우 제일 작은 구속압력에서는 약 3%의 전단강도가 증가함에 반해 양생기간이 7일일 경우에는 약 15%의 전단강도가 증가함을 알 수 있다. 따라서 토양안정제의 혼합비율과 양

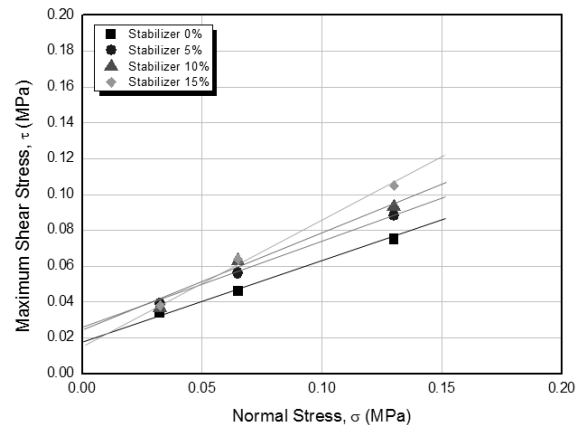


Fig. 5. Maximum shear stress after 3 days curing

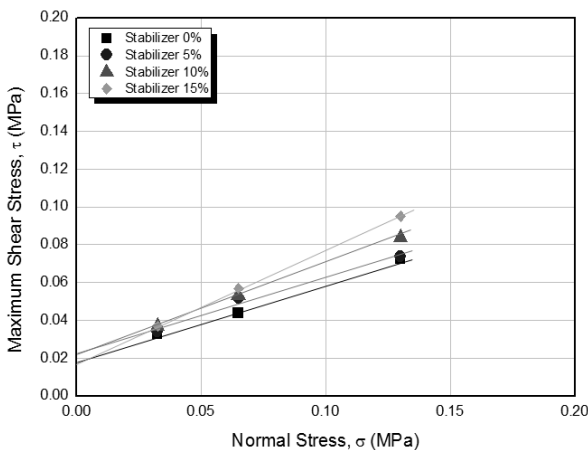


Fig. 4. Maximum shear stress after 1 day curing

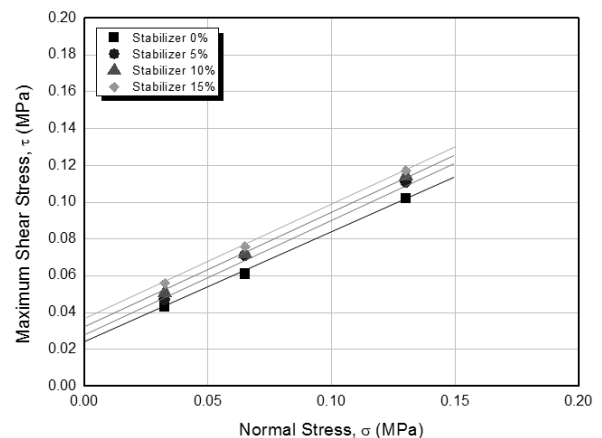


Fig. 6. Maximum shear stress after 7 days curing

양생기간이 전단강도에 미치는 영향은 큰 것으로 나타나며 양생기간이 7일 이상일 경우 최대전단강도의 증가율이 높은 것으로 나타났다. 또한 토양안정재의 혼합비율이 0%일 때와 비교하여 혼합비율이 5%와 10%인 경우에는 증가비율이 38%로 동일한 것으로 나타났으며, 혼합비율이 15%인 경우 최대전단강도 증가비율이 51%로 나타나 토양안정재의 혼합비율이 증가할수록 최대전단강도는 증가함을 알 수 있다.

#### 4.2 토양안정재의 혼합비율에 따른 전단강도 특성

Fig. 7은 토양안정재 0%를 혼합한 전단강도 실험결과이다. 그림에서 나타나듯이 토양안정재를 혼합하지 않은 일반 녹생토에서는 양생기간이 7일인 경우에 최대전단강도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 1일의 양생기간을 비교해 보면 3일인 경우 구속압력에 따라 약 2%~21% 증가되었으며, 7일인 경우 약 31%~41% 증가되었음을 알 수 있다. 또한 전단정수인 점착력을 비교한 결과 양생기간이 1일과 3일인 경우는 0.019MPa로 나타났으며, 내부마찰각은 22°로 유사한 경향을 나타내고 있지만 양생기간이 7일인 경우에는 점착력이 0.023MPa와 내부마찰각 31°로 나타나 각각 약 21%와 41% 증가되었음을 알 수 있다. Fig. 8은 토양안정재 5%를 혼합한 전단강도 실험결과이다. 토양안정재를 혼합한 결과 양생기간이 1일을 기준으로 양생기간이 3일, 7일에서 최대전단강도가 증가되었음을 알 수 있다. 이는 3일인 경우 약 1.5%~15%의 강도가 증가되었으며, 7일인 경우 약 39%~50% 증가 되었다. 이러한 결과는 토양안정재를 혼합한 경우 3일의 양생기간으로도 전단강도가 증가됨을 알 수 있으며, 양생기간이 7일인 경우 토양안정재가 고화되어 최대전단강도가 높게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 점착력은 양생기간이 1일과 3일에서 동일한 0.023MPa로 나타

났으며, 7일에서는 0.027MPa로 분석되어 약 17.4%가 증가되었음을 알 수 있다. 내부마찰각은 양생기간이 1일인 경우 21°로 나타났으며, 3일인 경우에는 26.7°, 7일인 경우에는 33°로 나타나 토양안정재를 혼합한 조건에서는 양생기간에 따라 고화되어 내부마찰각이 증가되는 것으로 나타났다. Fig. 9는 토양안정재의 혼합비율이 15%인 경우 전단강도 실험결과를 나타낸 것이다. 앞선 토양안정재의 혼합된 경우와 동일한 경향을 나타내고 있다. 특히 최소 약 11%~23.8%로서 증가되는 경향을 나타내지만 토양안정재의 혼합비율이 10%인 경우보다 강도 증가비율이 낮은 것으로 나타났다. 점착력 또한 양생기간이 7일인 경우 0.035MPa로 가장 크게 나타났지만 양생기간이 1일과 3일의 경우 토양안정재 혼합비율 10%와 마찬가지로 0.022MPa로 나타나 양생기간 초기의 점착력은 크게 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 그러나 내부마찰각은 토양안정재의 혼합비율이 증가함에 따라 점진적으로 증가하는 것을 알 수 있다.

위의 결과를 종합하여 분석한 결과 토양안정재를 혼합하지 않은 조건에서는 양생기간이 1일과 3일에서는 전단강도의 변화가 크지 않은 것으로 나타났지만 양생기간이 7일인

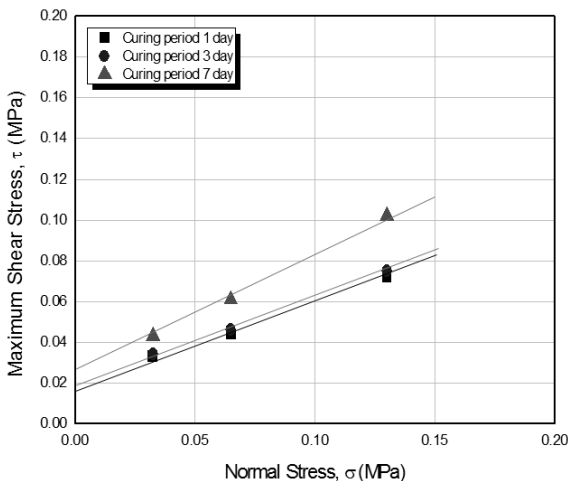


Fig. 7. Shear strength under the condition of mixing ratio, 0%

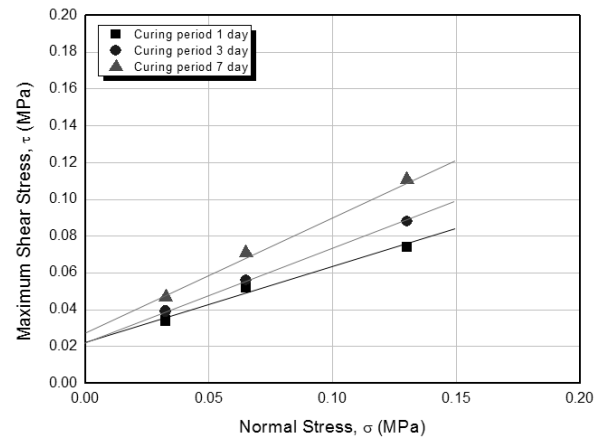


Fig. 8. Shear strength under the condition of mixing ratio, 5%

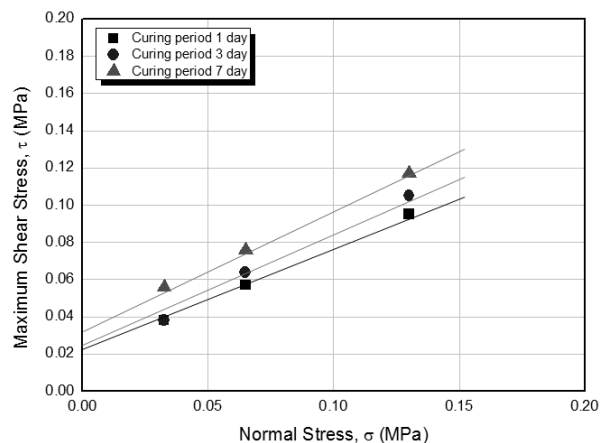


Fig. 9. Shear strength under the condition of mixing ratio, 15%

경우에는 최대전단강도가 증가되는 경향을 보인다. 그러나 토양안정재를 혼합한 경우 양생기간이 3일인 경우에도 강도가 발현되어 최대전단강도가 증가되었음을 알 수 있으며, 그 증가비율은 양생기간이 7일인 경우 최대전단강도가 발현되는 것으로 나타났다. 또한 점착력을 비교한 결과 양생기간이 지남에 따라 점착력은 점진적으로 증가됨을 알 수 있으며 내부마찰각도 동일한 경향을 나타내고 있다. 특히 토양안정재의 혼합비율이 10%인 경우 15%인 경우보다 최대전단강도는 낮게 측정되었지만, 증가비율은 혼합비율이 10%에서 큰 증가비율을 나타내고 있으며, 점착력 또한 양생기간이 1일과 3일에서 동일하게 나타나 토양안정재의 최적 혼합비율은 경제적 효과를 고려하여 10%가 적당할 것으로 분석되고 양생기간은 최대전단강도가 발현되는 7일이 적당할 것으로 판단된다.

### 4.3 전단강도정수 분석

일반적인 흙의 강도에 영향을 미치는 요소로서 입경, 간극비, 포화도를 들 수 있다. 전단강도를 이루는 영향요소 중 점착력은 포화도에 많은 영향을 받고 완전히 포화되면 점착력의 크기는 거의 OMPa로 떨어지며, 이때 흙은 순수한 마찰 재료로 거동하고 불포화될 때에는 높은 점착력의 크기를 보인다고 설명하였다(Bolton, 1986; Fioravante et al., 1999). 토양안정재 혼합비율에 따른 점착력을 분석한 결과 이와 부합하는 결과를 얻을 수 있었다. 직접전단시험의 연구수행에 사용된 시료는 녹색토로서 다짐시험결과 최적함수비는 30%로 산정되었다. 따라서 직접전단시험을 수행하기 위해 성형된 시료는 최적함수비인 30%의 조건으로 제작되었으며, 양생기간이 1일과 3일에서는 시료 내에 포함된 수분이 고화가 되기까지 충분히 소요되지 않아 습윤상태에서 실험을 수행하게 되어 점착력이 낮게 나타났다. 이러한 결과는 실험

을 수행하면서 직접적으로 관찰된 경향이다.

토양안정재가 혼합되지 않은 시료에 대해서는 상대적으로 점착력이 낮게 분석되었으며, 혼합비율이 5%, 10%, 15%가 증가됨에 따라 점착력은 증가하였다. 이것은 토양안정재가 혼합됨으로써 수분과 반응하여 고화가 진행되었다는 것을 알 수 있다. 특히 양생기간이 1일과 3일인 경우 점착력의 크기는 거의 비슷한 값을 나타내는 것으로 분석되었다. 즉 양생기간이 3일까지인 경우 시료 내의 토양안정재와 수분의 결합으로 인해 충분히 고화되는 단계에 미치지 못하는 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 10에서도 잘 나타나고 있다.

또한 내부마찰각에서도 나타나듯이 전단시료가 양생기간을 거쳐 고화됨에 따라 7일간 양생 시 고화조건에 의한 큰 차이가 나타난다. 토양안정재가 혼합되지 않은 조건에서는 양생기간이 1일과 3일에서는 동일한 결과를 나타내지만 양생기간이 7일인 경우 내부마찰각이 크게 측정되었음을 알 수 있으며, 토양안정재가 혼합된 조건에서는 5%, 10%, 15%의 경우에서 각 양생기간에 따라 점점 더 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉 전단시료의 양생기간이 지남에 대해 고화정도에 따라 내부마찰각이 증가되는 것으로 분석되었다. 이러한 경향은 Fig. 11에서도 잘 나타나고 있다.

따라서 전단정수인 점착력을 비교한 결과 토양안정재를 혼합한 전단강도 분석 시 양생기간은 7일이 적당한 것으로 판단되며, 최대전단강도의 증가비율에서도 나타나듯이 경제성과 효율성을 고려하여 토양안정재의 최적 혼합비율은 10%가 적당할 것으로 보인다. 두 강도 정수 사이에서는 큰 상관관계가 보이지는 않았다. 한쪽은 입자 간의 마찰에 관련되어 있으며 다른 한 변수는 화학적 결합에 관련된 정수이다. 따라서 토양안정재와 녹색토의 입자 간의 마찰력을 상승시키는 데는 크게 기여하는 반면 점착력은 점증하고는 있으나 그 증가폭은 상대적으로 작다고 할 수 있다. 이는 토양안정

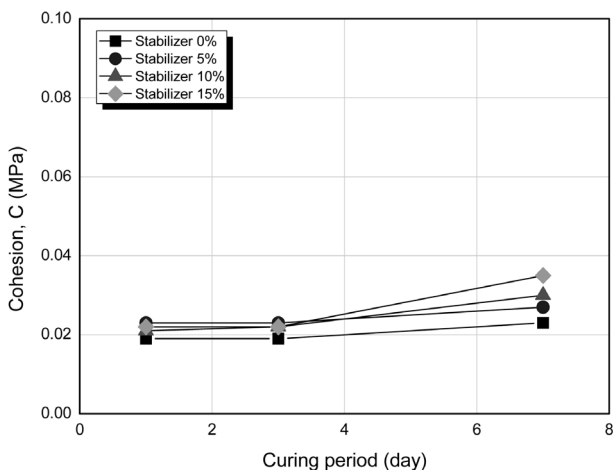


Fig. 10. Variation of cohesion by curing period

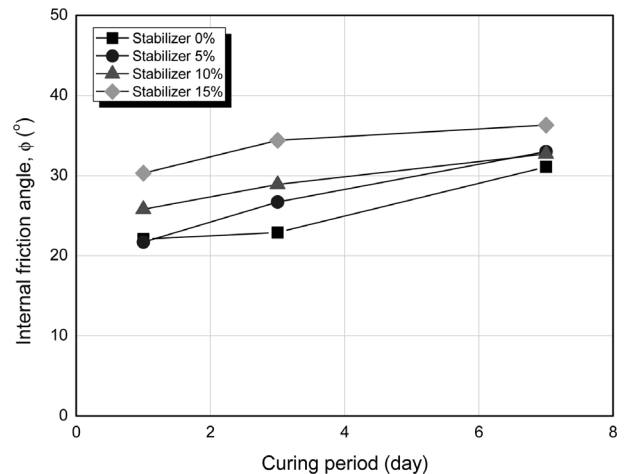


Fig. 11. Variation of internal friction by curing period

재가 화학적 결합력의 증가보다는 입자 간의 결합력을 증가시키는데 크게 기여하기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4.4 비탈면 경사에 대한 침식 특성

비탈면 녹생토와 토양안정재의 혼합토를 활용하여 식생기반재의 구조 안정성을 분석하기 위해 인공강우 실내시험을 통해 우수저항시험을 수행하였다. 실험을 통해 토양안정재의 혼합비율 0%, 5%, 10%, 15%의 조건과 비탈면의 경사도 30° 조건에서의 식생기반재의 외형적 변화와 부유물질의 변화를 관찰하였으며, 식생기반재 조성은 실내다짐시험을 통해 산정 최대건조단위중량을 기준으로 90%의 건조단위중량인 1.2t/m<sup>3</sup>를 적용하여 조성하였다. 실험을 수행하기 위해 우수저항시험 장치와 인공강우 시험 장치를 제작하고 활용하였으며, 적정의 강우량과 취부깊이, 배수시설 등을 결정하고 연구를 수행하였다.

우수저항시험을 통한 결과 강우 지속시간이 경과함에 따라 비탈면에 조성한 식생기반재의 누적 유실량이 증가됨을 알 수 있다. 그러나 60~120분이 경과함에 따라 감소하는 경향으로 나타났다. 이러한 결과는 Table 3에서도 알 수 있다.

Fig. 12는 비탈면 경사 30°에서 녹생토의 누적유실량을 시간에 따라 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 강우지속시간이 30분~120분까지는 점진적으로 증가하고 있으며, 약 180분 이후 유실량이 감소하는 것을 알 수 있다. 특히 토양안정재를 혼합하지 않은 경우 많은 양의 유실이 측정되었으며, 토양안정재를 혼합한 경우에는 유실량이 현저히 감소되었음을 알 수 있다.

또한 총 기반재의 양에 대한 유실률을 평가한 결과 토양안정재가 혼합되지 않은 식생기반재에서는 2.8%의 유실률이 나타났으며, 토양안정재가 5%, 10%, 15%가 혼합된 경우에는 각각 0.9%, 0.55%, 0.37%의 유실률이 나타났다. Fig. 13은 비탈면 경사 30°에 대하여 토양안정재 혼합비율에 따른 시간당 최대 유실량을 나타내고 있다. 그림에서 나타나듯이 토양안정재가 혼합되지 않은 경우에서 최대 유실량이 나타났으며, 시간별 30분~120분까지 최대 유실량이 나타난 것으로 보인다.

Table 3. Soil loss according to the stabilizer and slope (unit : g)

Slope	Time (min)	Stabilizer ratio (%)			
		0	5	10	15
30°	30	154.7	37.3	31.7	20.4
	60	162.3	57.2	60.2	32.7
	120	165.1	61.8	20.8	23.8
	180	134.4	40.8	18.1	11.1
	240	100.4	30.7	11.4	7.4

## 5. 결 론

본 연구에서는 토양안정재와 녹생토를 혼합하여 조성된 식생기반재에 대해 실내시험에 따른 전단강도 및 비탈면 경사에 따른 침식을 검토하였다. 연구결과 토양안정재를 혼합할 경우 전단강도 증진과 침식에 대한 내구성을 지니는 것으로 나타났다. 따라서 녹생토의 안정성에 대한 효과적인 토양안정재의 혼합비율은 10%인 것으로 판단되며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 토양안정재의 혼합에 따른 전단강도 특성 분석 결과 양생기간이 지남에 따라 전단강도는 최대 51% 증가되며, 토양안정재의 혼합비율이 15%인 경우 최대 41% 증가된다.
- (2) 토양안정재의 혼합으로 인해 최대전단강도의 증가되는 경향을 나타내고 있다는 점을 알 수 있으나 구속압력이 낮은 영역에서보다는 구속압력이 큰 경우에서 증가 현상이 뚜렷하게 나타났다. 이러한 현상은 양생기간의 증

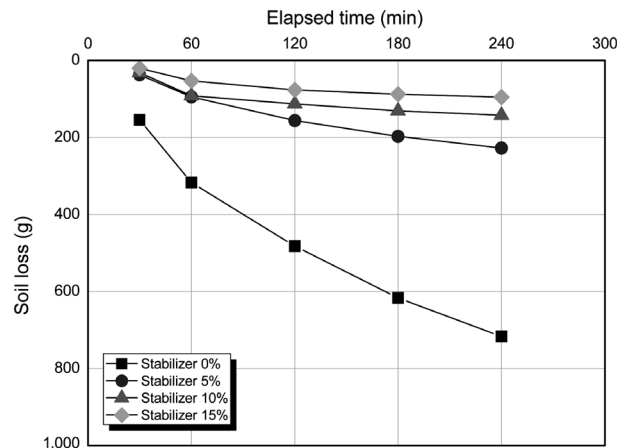


Fig. 12. Accumulated soil loss under the slope gradient 30°

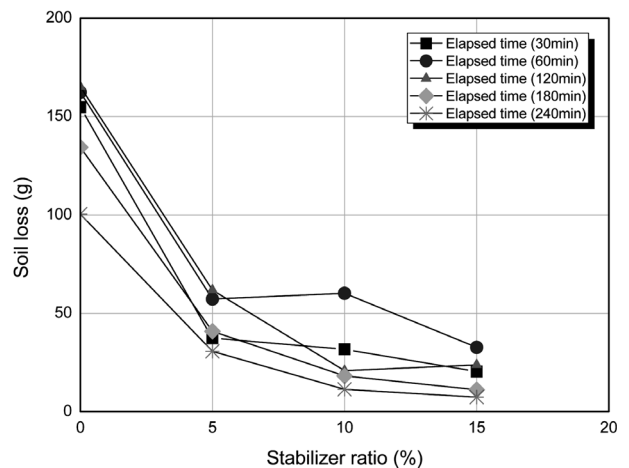


Fig. 13. Hourly soil loss under the slope gradient 30°

가에서도 유사하게 나타나고 있다. 즉 녹생토의 경우에는 매립되는 경우보다 노출되는 경우가 많고 토피 또한 깊지 않아 토양안정재의 혼합이 강도 증진 목적으로 사용되는 경우에는 신중할 필요가 있다는 점을 시사하는 것으로 판단한다.

- (3) 토양안정재의 혼합비율과 양생기간이 지남에 따라 점착력과 내부마찰각은 점진적으로 증가되는 것으로 나타나며, 이는 토양안정재의 혼합이 전단강도 증진에 효과적이고 이로 인해 녹생토의 안정성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 식생기반재의 침식 특성을 분석하기 위해 강우강도를 20 mm/min의 조건을 고정한 결과 초기의 강우 지속시간에 서는 약 180분 이후 유실량이 감소된다.

## 감사의 글

본 연구는 산림청 임업기술연구개발사업(과제번호: S121 213L130110)의 지원에 의해 수행된 결과의 일부입니다.

## References

1. Bolton, M. D. (1986), The strength and dilatancy of sands, *Geotechnique*, Vol. 36, No. 1, pp. 65~78.
2. Choi, J. J. and Song, J. W. (2011), Basic study on the characteristics of wooden sidewalk pavement material using wood waste chip, *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 31, No. 3D, pp. 413~420 (in Korean).
3. Fioravante, V., Ghionna, V. N., Pedroni, S. and Porcino, D. (1999), A constant normal stiffness direct shear box for soil-solid interface tests, *Rivista Italiana di Geotecnica*, Vol. 33, No. 3, pp. 7~22.
4. Han, S. J., Ahn, D. W., Park, J. M. and Kim, S. S. (2009), Engineering properties of liquefied stabilized soil by contents of humic acid, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 29, No. 5C, pp. 229~237 (in Korean).
5. Jang, D. H. (2011), An experimental study on the engineering characteristics of organic soil in dong-hae, Kwandong University Master's theory, pp. 1~29 (in Korean).
6. Kim, Y. T. and Kang, H. S. (2011), Shear and CBR characteristics of dredge soil-bottom ash-waste tire powder-mixed lightweight soil, *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 25, No. 3, pp. 34~39 (in Korean).
7. Kuo, W. T., Wang, Y. H., Shu, C. Y. and Su, D. S. (2013), Engineering properties of controlled low-strength materials containing waste oyster shells, *Journal of Construction and Building Materials*, Vol. 46, pp. 128~133.