

시멘트 계 재료를 사용한 녹생토의 내구성 및 사면 안정성 평가

김일순¹, 최윤석², 양은익^{*}

¹강릉원주대학교 토목공학과, ²한국건설생활환경시험연구원 융합기술본부

Evaluation of Durability and Slope Stability of Green Soil using Cementitious Materials

Il-Sun Kim¹, Yoon-Suk Choi², Eun-Ik Yang^{*}

¹Department of Civil Engineering, Gangneung-Wonju National University

²Convergence Technology Division, Korea Conformity Laboratories

요약 다양한 사면 안정 공법 중 식물의 생육을 기반으로 하는 녹생토 공법의 경우, 환경적인 측면에서는 유리하지만 급경 사지나 암반 사면에 시공시 내구성 및 사면 안정성이 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 시멘트 계 재료를 사용하여 부착강도를 확보하고 ECG를 첨가하여 식생환경을 개선한 녹생토를 개발하였으며, 내구성 및 사면 안정성 등을 평가하여 암반 식생 기반재로서의 사용 가능성을 검토하였다. 실험 결과, 개발 녹생토의 점착력 및 내부 마찰각은 현장 녹화토 보다 높게 측정되어 현장 시공성에 문제가 없을 것으로 판단된다. 토양 경도는 26 mm 수준으로 식물의 가장 좋은 생육조건인 18~23 mm를 약간 상회하였으며, 건조수축은 약 3%의 수축률을 나타내어 녹생토의 내구성에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다. 사면 부착력을 평가하기 위한 강우강도 모사 실험 결과 모든 사면에서 붕괴는 발생하지 않았으며, 사면이 급경사일 수록 강우에 의한 손상은 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 개발된 녹생토는 내구성 및 사면 안정성이 우수하여 암반 사면에 적용이 가능할 것으로 판단된다.

Abstract Among the various slope stabilization methods, the green soil method based on the growth of plants is advantageous to the environment, but the durability and slope stability are insufficient when the green soil method is applied to a steep slope and rock slope sites. Therefore, in this study, green soil, which improved the adhesion performance and the vegetation environment, was developed using cementitious materials and ECG, and the durability and slope stability as well as the possibility of its use as a rock vegetation base material were assessed. From the results, the adhesive force and internal friction angle were higher than that of the existing green soil so that it could be used for in situ construction. The soil hardness value was 26 mm, which was slightly higher than that of the best growth condition of the plant, 18~23 mm, and the drying shrinkage strain was approximately 3%; hence, it is not expected to affect the durability of green soil. The results of a rainfall intensity simulation for evaluating the slope adhesion force showed that slope failure did not occur under all conditions. The damage decreased with increasing slope angle. Therefore, the green soils developed in this study have excellent durability and slope stability and can be used for rock slope sites.

Keywords : Cementitious material, Durability, Green Soil, Rainfall intensity, Slope stability

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(17CTAP-C097707-03)에 의해 수행 되었습니다.

*Corresponding Author : Eun-Ik Yang(Gangneung-Wonju Univ.)

Tel: +82-33-640-2416 email: eiyang@gwnu.ac.kr

Received February 27, 2018

Revised (1st March 30, 2018, 2nd April 24, 2018)

Accepted May 4, 2018

Published May 31, 2018

1. 서론

우리나라는 국토의 70%가 산지로 이루어져 있으며, 각종 도로의 개설, 주택단지 및 산업단지, 신도시 건설 등의 조성 및 개발에 따라 전국적으로 대규모 건설 현상이 발생되고 있다. 이로 인해 대규모 비탈면의 훼손 현상이 매우 심각한 실정이다. 이러한 비탈면 훼손은 대부분 산림과 인접한 도로 경계부에서 생겨나 강하고 이질적인 경관을 연출하게 되며, 비탈면을 방치하게 되면 침식 및 붕괴 현상을 수반한 추가적인 파괴가 발생하게 된다[1].

이에 따라 최근에는 환경에 대한 관심이 높아지면서 비탈면 훼손에 대하여 원래 상태로 되돌리기 위한 생태 복원에 관심이 높아지고 있으며 생태적으로 건전한 친환경적인 녹화가 될 수 있도록 연구가 진행되고 있다[2-4].

우리나라의 경우 공사로 조성된 인공 사면은 식생의 생육 기반이 양호하지 못하고 자연 복원력만으로 복원되기 힘들며 장기간이 소요된다. 또한 기존의 사면용 녹생토를 사용한 식생의 경우, 건조수축에 따른 표면 탈락으로 장기 부착 능력이 저조하게 발현되며, 우천 시 강우강도가 높을 경우 사면의 세굴 및 훼손에 대한 내구성 및 안정성이 열악한 실정이다. 이에 따라 환경친화적이며 안정성을 확보한 사면 안정대책 개발의 필요성이 증대되고 있다[5].

한편, 대부분의 흙 사면은 식물이 자랄 수 있도록 식생기반 토양을 충분히 제공하지만 급경사지나 암반 사면에서는 종자가 식생 가능하도록 물과 양분을 공급해 줄 수 있는 토양이 극히 부족하기 때문에 식물의 생장에 커다란 제약을 받는다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 최근 암반 사면의 식생공법은 강 망(wire mesh) 등을 암반에 부착·설치하고 1~5cm 정도로 식생이 용이한 인공토양을 제조하여 뿌칠하기와 파종을 동시에 시공하는 방법이 개발되어 사용되고 있다[6,7].

그러나 암반 사면 식생공법은 인공토양 아래에서 사면 파괴가 일어날 때에는 저항력을 발휘하기 못하는 한계가 있고 사면이 불안정할 때에는 보강공법이 선 시공되어야 한다. 반면, 보강의 목적으로 슛크리트 보강을 시공할 경우 시멘트 슛크리트로부터 용출되는 강알칼리로 인하여 식생용 녹생토를 보강용 슛크리트 위에 직접 시공할 수 없고, 최소 2~3년 이후에 알칼리양이 저감되었을 때 식생용 녹생토의 시공이 적합하다는 단점이 있다. 우리나라의 경우 국토의 약 70%가 산악지형이며 도로,

택지 개발, 공단 개발 등의 조성에 따른 암반 절개사면의 발생이 필연적이다. 이러한 암반 사면 조건의 지역에 적합한 사면 안정성을 유지하고 식물의 성장기반을 조성할 수 있는 암반 식생공법의 개발이 시급하며, 최근 이에 대한 개발연구가 진행 중이다[8-13].

본 연구에서는 시멘트 계 재료를 사용하여 부착강도를 확보하고 ECG(Eco Clean Cement Grout)를 첨가하여 식생 환경을 개선한 녹생토를 개발하고, 내구성 및 사면 안정성 등을 평가하여 암반 식생 기반재로서의 사용 가능성을 검토해 보았다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험재료

2.1.1 현장 녹화토 (Existing Green Soil)

본 연구에서 사용한 현장 녹화토는 실제현장에서 시공되고 있는 재료를 구입하여 사용하였다. 현장 녹화토는 유기질 퇴비, 하수 및 제지 슬러지가 주요 성분으로 구성되어 있으며, Table 1에 구성 성분을 나타내었다. 현장 녹화토와 개발 녹생토는 각각 다른 재료들로 구성되어 있으며, 사용재료들은 식생 기반과 점착력 확보 등 같은 목표를 가지고 구성되었다.

2.1.2 부엽토

본 연구에서는 식생기반재의 재료로 국내 S사의 천연 부엽토와 바크 퇴비를 혼합하여 제조된 토양개량제를 사용하였다. 사용한 부엽토의 구성 성분을 Table 2에 나타내었다.

2.1.3 결합재

본 연구에 사용한 결합재는 석고 계 시멘트이며, 상온에서 경화 속도가 빨라서 제조 시간을 크게 단축할 수 있다. 사용한 결합재의 화학적 성분을 Table 3에 나타내었다.

2.1.4 첨가제

본 연구에 사용한 첨가제로는 경화제, 분말 증점제, 고흡수성 폴리머, 친환경 보습제, pH 조절제를 사용하였다. 경화제는 팽창형 경화제를 사용하였고, 분말 증점제는 몬모릴로나이트계 벤토나이트를 사용하였다. 분말

증점제는 물과 반응하여 본래 체적보다 13~16배 정도 팽창하며 무게의 5배까지 물을 흡수하는 성질을 가지고 있다.

고흡수성 폴리머는 자체 무게의 500배 정도의 수분을 흡수할 수 있는 기능을 가진 합성 고분자 물질이며, 본 연구에서는 고흡수성 폴리머를 사용하여 녹색토의 수분 흡수율을 증가시키고자 하였다.

친환경 보습제는 국내 J사의 폴리카본산계 고분자 액상 가소제인 ECG를 사용하였다. ECG는 결합제 중의 알칼리 성분과 혼합되면 점성이 증가하여 가소성을 보이는 특징을 가지고 있으며, 시멘트의 증금속을 흡착하여 외부 유출 방지 및 pH 증가율을 방지하는 특징이 있다.

Table 1. Ingredient characteristics of E.G.S

Composition	Content (%)
Organic compost	30
Sewage sludge	20
Paper sludge	25
Peat	10
Granite weathered soil	10
Organic fertilizer	5

Table 2. Ingredient characteristics of leaf mold

Natural humus	Bark compost	CoCo peat	Vermiculite
70%	10%	15%	5%

Table 3. Chemical composition of binder

Chemical composition	Content (%)
Na ₂ O	0.026
Al ₂ O ₃	0.020
SiO ₂	0.083
P ₂ O ₅	0.028
SO ₃	50.5
K ₂ O	0.160
CaO	49.2
SrO	0.060
ZrO ₂	0.004

Table 4. Mix proportion of green soil

Water	Fertilizer (Leaf mold)	Binder	Additives					pH Adjusting Agent
			Hardener	Powder Thickener	Super Absorbent Polymer	Moisturizer	Unit Weight : Kg/m ³	
240	1,600	73.6	56	8	1.6	16	4.8	

녹색토의 결합제 및 경화제는 강알칼리성이므로 식생의 생육을 위해서는 pH를 조절해야 한다. 이에 본 연구에서는 황산알루미늄(Al₂(SO₄)₃)과 인산암모늄((NH₄)₂HPO₄)을 이용하여 개발 녹색토의 pH를 적정 수준으로 조절하고자 하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 배합표

본 연구에서 개발한 녹색토의 배합표는 Table 4에 나타내었으며, 배합 재료로는 물, 부엽토, 결합제 및 첨가제가 사용되었다.

2.2.2 녹색토 타설

본 연구의 실험을 위한 개발 녹색토의 타설은 1bar의 압력을 일정하게 분사할 수 있는 콤프레셔와 모르타르건을 사용하였으며, 각 실험에 적합한 크기의 시편에 타설 하였다. 토양의 일반적인 특성상 내부의 수분함량을 일정하게 유지하는 것은 상당히 어렵다. 따라서 본 연구에서는 사전 실험을 통하여 배합수량을 부엽토 질량의 15%로 하였으며, 부착력과 리바운드 양을 기준으로 평가하여 결정하였다. 강우강도 모사 실험용 시험체의 녹색토 타설 전경을 Fig. 1에 나타내었다.



Fig. 1. Installation of green soil

2.2.3 토양 경도

본 연구에서 개발한 녹색토는 사면 녹화용으로 사용될 예정이며, 식물의 씨앗을 같이 혼합하여 타설할 것이

다. 식물뿌리가 녹생토 속에서 성장하려면 적정 수준의 토양 경도를 확보해야 하므로, 이에 따라 산중식 경도계에 의한 토양 경도를 측정하였다. 측정된 경도는 도로 비탈면 녹화공사의 설계 및 시공지침[14]의 토양경도별 식물생육상태 기준에 따라 식물의 생육조건에 적합한 평가를 진행하였다. 외기 온도 및 습도에 대한 영향을 최소화하기 위해 온도 20 ℃, 습도 60% 인 항온 항습 조건에서 양생시키며 재령 120일까지 측정하였다.

2.2.4 점착력 및 내부마찰각

개발 녹생토의 토양 재료 정수 측정을 위해 직접 전단 시험을 실시하였다. 개발 녹생토의 직접 전단 시험은 KS F 2343[15]에 의거하여 수행하였으며, 점착력 및 내부마찰각을 측정하여 현장 녹화토(Existing Green Soil, 이하 E.G.S)와 비교해 보았다. 개발 녹생토(Development Green Soil, 이하 D.G.S)는 제시된 배합표(Table 4)에 따라 배합되었으며, 현장 녹화토는 시공현장에서 현장 시공 전에 채취하였다. 본 연구에서 사용한 직접 전단 시험장비를 Fig. 2에 나타내었다.

2.2.5 건조수축

일반적으로 시멘트 계열의 결합체는 수화반응이 진행되면서 필연적으로 체적변화를 일으키며, 수화반응 완료 후 남은 자유수의 증발로 인해 건조수축을 일으킨다. 이러한 개발 녹생토의 수축 특성을 알아보기 위하여, 건조수축을 측정하였다. 건조수축의 경우 온도 20 ℃, 습도 60% 인 항온 항습 조건에서 양생시키며 측정하였다. 녹생토는 콘크리트에 비해 강도가 크지 않기 때문에 일반적으로 사용되는 콘크리트의 건조수축 측정 방법을 적용할 수 없다. 따라서, 본 연구에서는 버니어캘리퍼스를 이용하여 건조수축을 측정하였다. 시험체는 (L)200×(W)100×(T)30 mm 의 크기로 제작되었으며, 마찰에 의한 구속을 최소화하기 위해 폴리에틸렌 비닐을 사용하였다. 측정은 타설 직후부터 시작하였으며, 재령 120일까지 측정하였다. 건조수축 결과 값은 다음의 식에 의해 계산되었으며, 시험체 3개의 평균 값을 사용하였다.

$$\delta = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

여기서, δ 는 건조수축 변화율, l 은 시험체 타설 후 최초 길이, Δl 은 시험체의 수축 후 길이를 나타낸다. 건

조수축 측정 전경을 Fig. 3에 나타내었다.

2.2.6 강우강도 모사 실험

녹생토 타설 후 강우로 인한 사면의 붕괴 여부를 관찰하고자 강우강도 모사 실험을 실시하였다. 개발한 녹생토를 인공 사면에 타설하고, 인공 강우 환경 모사 실험을 실시하여 강우에 대한 개발 녹생토의 사면 부착력을 평가하였다. 급경사지나 암반 사면에서의 조건을 모사하기 위하여 녹생토 타설 및 양생은 거치 각도 45°, 60°, 70°에서 각각 실시하였으며, 시험체의 크기는 (W)300 mm × (L)800 mm, 두께는 각각 30 mm와 20 mm로 타설하였다. 강우 환경 모사 실험은 제작된 인공 강우 장비를 이용하여 수행하였으며, 시험체 간의 상대 비교를 위해 일정 유량(5.0 l/min)을 한 시간 동안 살포한 후 녹생토 사면의 붕괴 여부를 관찰하고 부착력을 평가하였다. 여기서 살포된 유량은 강원도 영동 지역의 기상청 강우강도 자료를 바탕으로 산정하였으며, 최근 8년간의 자료 중 시간당 최대 강우량을 사용하여 유량을 결정하였다. 실험은 타설 후 재령 2일에 실시하였으며, 이때 녹생토 시험체의 산중식 경도계에 의한 토양경도는 12.5 mm 이다. 강우강도 모사실험 전경을 Fig. 4에 나타내었다.



Fig. 2. Soil direct shear tester



Fig. 3. Drying shrinkage test



Fig. 4. Simulation test of rainfall intensity

2.2.7 pH 값 측정 및 중금속 함유량 시험

개발 녹생토의 식생 가능성을 검토하기 위해 현장 녹화토와 개발 녹생토의 pH 값을 측정하여 비교하였다. 측정에는 pH meter를 이용하였다. 또한, 개발 녹생토에 사용된 결합재 및 첨가제로 인한 주변 환경의 중금속 오염에 대한 영향을 검토하고자 중금속 함유량 시험을 실시하였다. 시험은 토양오염 공정시험기준(환경부 고시 제 2015-261호)에 의거하여 실시하였고, 그 결과를 ‘토양환경보전법’에서 규정하는 ‘나’지역의 기준에 적합한지 평가하였다. 토양환경보전법에 따라 생태녹지지역, 자연공원 등 별도관리지역과 생태자연도 1등급, 2등급은 ‘가’지역을 적용하고, 기타 지역은 ‘나’지역의 기준을 적용한다. 중금속에 대한 식생기반재의 ‘나’지역에 대한 적용 기준을 Table 5에 나타내었다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 토양 경도

산중식 경도계에 의한 재령 기간별 토양 경도 측정 결과인 Fig. 5를 살펴보면, 재령 30일까지 경도가 상승하는 경향을 나타냈으나, 그 이후로는 경도 26 mm 수준으로 수렴하는 경향을 나타냈다. 도로 비탈면 녹화 공사의 설계 및 시공 지침[14]의 기준에 따르면 식물의 가장 좋은 생육조건의 경도는 18~23 mm 정도이다. 본 연구에서는 이보다 높은 26 mm 수준으로 나타났으며, 이는 외부 영향을 최소화하기 위해 항온 항습 조건에서 시편을 양생시킨 것이 경도를 증가시킨 것으로 판단된다. 녹생토는 불투수성 재료가 아니므로 야외 환경 노출시 온도·

습도의 변화 및 우천 환경에 따라 항온 항습 조건에서보다 경도가 감소할 수 있다. 따라서, 실제 녹생토 시공 조건에서의 경도는 녹화 공사 시공 지침[14]의 생육조건을 만족할 것으로 판단된다.

Table 5. Standard for application of vegetation to heavy metals

Type	'나' area*	Type	'나' area
Cd (mg/kg)	≤12	Pb (mg/kg)	≤400
Cu (mg/kg)	≤200	Cr ⁶⁺ (mg/kg)	≤12
As (mg/kg)	≤20	Zn (mg/kg)	≤800
Hg (mg/kg)	≤16	Ni (mg/kg)	≤160

* Factory & Railroad site, Road, Miscellaneous land

Table 6. Results of direct shear test

Type	Cohesion C	Internal friction angle Ø
E.G.S	0.331 MPa	88.02
D.G.S	0.397 MPa	88.96

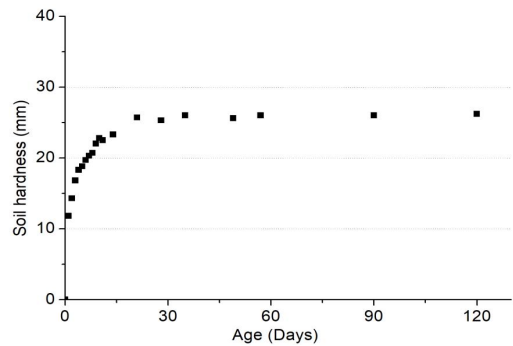


Fig. 5. Results of soil hardness measurement

3.2 점착력 및 내부마찰각

직접 전단 시험을 통해 연직 응력 및 전단응력-수평변위 곡선을 작성하여 최대 전단응력의 강도가 얻어진 결과를 토대로 Mohr-Coulomb의 파괴 기준에 의거하여 전단강도를 산정하였다. 개발 녹생토와 현장 녹화토의 토양 정수 비교 측정 결과, 개발 녹생토의 점착력과 내부마찰각이 현장 녹화토에 비해 크게 측정되었다. 이는 개발 녹생토를 바로 현장 적용하여도 시공성에는 문제가 없음을 의미하며, 급경사지나 암반 사면에서 충분히 부착력을 발휘할 수 있을 것으로 사료된다. 점착력 및 내부마찰각 측정 결과를 Table 6에 나타내었다.

한편, 본 연구에 사용된 녹생토와 일반적인 토양과의 차이점을 알아보기 위해 내부 마찰각과 점착력을 각각 비교하였다. 먼저 내부 마찰각의 경우 일반적인 흙에 비

해 높은 내부 마찰각을 나타냈다. 기존 연구 결과에 따르면[16], 간극비가 작아지면 조밀화에 의한 마찰각은 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 일반적인 토양에 비해 높은 내부 마찰각을 나타내는 녹생토가 더 토양이 조밀하고 입자 간의 간극이 작다는 것을 의미한다.

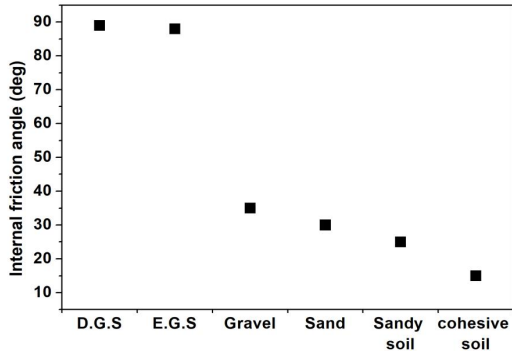


Fig. 6. Comparison of internal friction angle

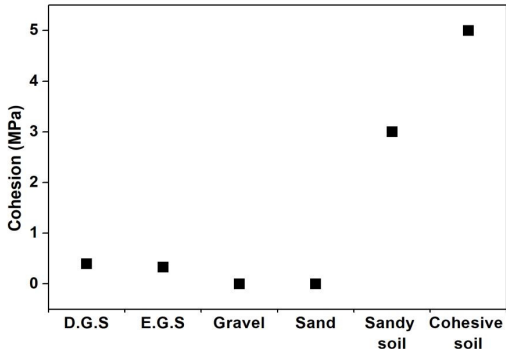


Fig. 7. Comparison of cohesion

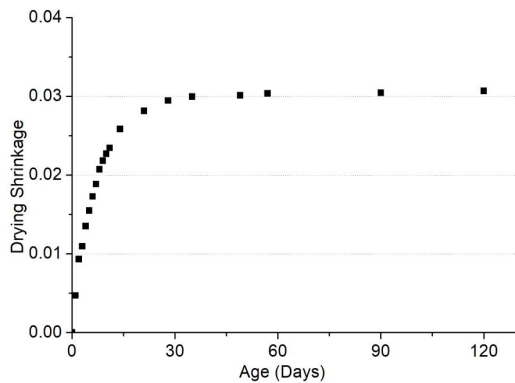


Fig. 8. Results of drying shrinkage test

또한, 흙 입자 사이의 응력인 점착력은 녹생토가 점성이 강한 사질토나 점성토 보다는 작지만 자갈 및 모래보다는 크게 측정되었다. 녹생토 자체의 점착력은 점성질의 토양에 비해 작지만, 녹생토는 현장 시공시 슛크리트 장비에 의해 타설되므로 타설압에 의해 점착력이 향상될 것으로 보이므로, 현장적용에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 일반 토양의 전단강도 추정을 위한 내부 마찰각 및 점착력[17]과 녹생토의 측정결과를 Fig. 6~7에 함께 나타내었다.

3.3 건조수축

건조수축 측정 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 결과를 살펴보면, 초기 재령에 급격한 수축률을 보이다가, 재령 30일 이후부터는 변형률 0.03에 수렴하는 경향을 나타낸다. 녹생토는 특성상 내부에 수분을 함유하고 있어야 하고, 식물의 발아 및 생장에 필요한 수분을 공급해 줄 수 있어야 한다. 따라서 수분 소모 및 증발에 의한 건조수축이 개발 녹생토에 균열 및 손상을 줄 것이라 예상되어 본 실험을 실시하였다. 그러나 측정 결과 약 3% 정도의 적은 수축률을 나타냈으며, 실제 타설 조건에서의 마찰 영향을 고려해도 건조수축으로 인한 큰 손상은 없을 것으로 판단된다. 또한, 부엽토는 유기물 및 퇴비 등으로 구성되어있어, 미립한 분자가 아닌 덩어리 상태로 존재하게 된다. 이러한 구조로 인해 녹생토 내부 조직이 치밀하지 못하게 되며 많고 큰 공극을 유발하게 되어 녹생토의 건조수축에 영향을 주었을 것이라 판단된다. 결론적으로 건조수축은 녹생토의 내구성에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

일반적인 토양은 특성상 강우, 강설 등 수분의 공급에 의해 수축과 팽창의 반복적인 거동을 나타낼 것이다. 그러나 본 연구에서 실시한 건조수축 실험은 온도 20 ℃, 습도 60% 인 항온 항습 조건에서 수행되었다. 따라서 수분의 공급이 이루어지지 못하는 조건이고, 실제 현장에서의 조건보다는 건조수축에 가혹한 환경에서 이루어진 측정이므로, 건조수축량이 과대 측정되었을 가능성이 있는 것으로 판단된다.

3.4 강우강도 모사실험

강우강도 모사 실험을 실시하여 개발 녹생토 타설 2일 후의 사면 부착력을 관찰한 결과, 모든 조건에서 사면의 붕괴는 발생하지 않았으며, 일부 사면에서 패임이 관

찰되었다. 사면이 급경사일수록 강우에 의한 손상은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 수직 낙하하는 강우의 입사각에 대한 영향으로 각도가 커질수록 강우의 녹생토에 대한 접촉면적이 감소하므로 상대적으로 적은 손상을 주는 것으로 판단된다. 결론적으로 개발 녹생토는 45° 이상의 사면에 대한 부착력을 충분히 확보하고 있는 것으로 판단된다. 강우강도 모사 실험 후 시험체의 전경을 Fig. 9~10에 나타내었다.

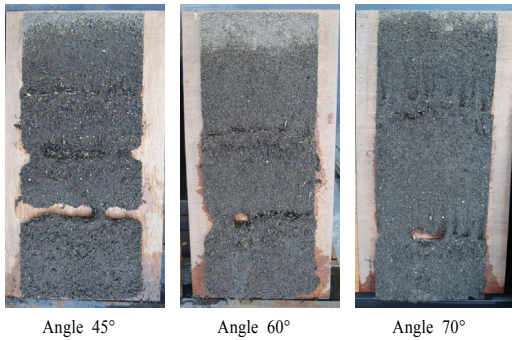


Fig. 9. Results of rainfall intensity (t=30mm)

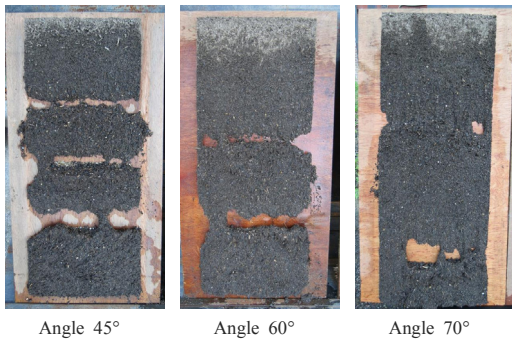


Fig. 10. Results of rainfall intensity (t=20mm)

Table 7. Results of heavy metal content test

Type	Binder	Hardener	Powder Thickener	S.A.P	Moisturizer	pH Adjusting Agent
Cd (mg/kg)	-	-	-	-	-	-
Cu (mg/kg)	4.4	4.5	79.1	9.2	-	2.4
As (mg/kg)	-	1.3	0.8	-	-	-
Hg (mg/kg)	-	-	-	-	-	0.1
Pb (mg/kg)	-	3.5	3.3	-	-	-
Cr ⁶⁺ (mg/kg)	-	1.4	-	-	-	-
Zn (mg/kg)	3.4	7.5	69.3	2.8	-	2.4
Ni (mg/kg)	0.4	2.5	28.0	10.0	-	0.6

※ S.A.P: Super Absorbent Polymer

3.5 pH 값 측정 및 중금속 함유량 시험

현장 녹화토 및 개발 녹생토의 pH 값 측정결과, 개발 녹생토의 pH 값은 7.86으로 현장 녹화토 pH 값 8.35 보다 낮은 수치를 나타내 현장 적용시 식생 환경에는 문제가 없을 것으로 판단된다. 한편, 개발 녹생토에 사용된 재료의 중금속 함유량 시험 결과, ‘나’지역에 대한 기준을 모두 만족시키는 것으로 나타났다. ‘가’지역은 환경보호를 필요로 하는 청정지역에 대한 기준으로 녹생토가 시공되는 현장과는 연관성이 적으므로, ‘나’지역에 대한 기준을 적용하는 것이 적합한 것으로 판단된다. 중금속 함유량 시험 결과를 Table 7에 나타내었다.

4. 결론

시멘트 계 재료와 첨가제를 혼합한 녹생토의 내구성 및 사면 안정성 평가 결과는 다음과 같다.

- 1) 개발 녹생토의 토양 경도 측정 결과, 재령 30일에 26 mm 수준으로, 식물의 가장 좋은 생육조건인 18~23 mm 보다 약간 높게 측정되었다.
- 2) 점착력과 내부 마찰각은 현장 녹화토보다 개발 녹생토가 다소 높게 측정되었다. 개발 녹생토는 현장 시공성에는 문제가 없으며 암반 사면에서 충분한 부착력을 발휘할 것으로 판단된다.
- 3) 개발 녹생토의 건조수축 측정 결과, 재령 120일에 수축 변화율은 3% 수준으로 측정되어 건조수축은 녹생토의 내구성에 큰 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.
- 4) 강우강도 모사 실험을 통한 개발 녹생토의 사면 부착력 관찰 결과, 모든 조건에서 사면 붕괴는 발생하지 않았으며, 각도가 커질수록 강우에 의한 손상은 감소하는 것으로 나타났다. 개발 녹생토의 사면 부착력은 충분히 확보하고 있는 것으로 판단된다.
- 5) 개발 녹생토의 pH 값 측정결과, 현장 녹화토보다 낮은 pH 값을 나타내었다. 또한 개발 녹생토에 사용된 재료의 중금속 함유량 시험 결과 ‘나’지역 기준에 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 개발 녹생토의 현장 적용시 식생 및 주변환경에는 문제가 없을 것으로 판단된다.

위의 실험 결과를 종합하면, 개발 녹색토는 내구성 및 사면 안정성이 현장 녹화토보다 우수하여 코아 넷트 등 보조장치의 설치 없이 타설이 가능할 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서는 개발 녹색토에 대한 단기 특성만 평가되어, 동결기의 동해에 대한 영향 등 장기적인 특성의 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] J. C. Jeon, "A Study on Vegetation and Shear Strength Characteristics of Green Soil According to Mixing Ratio of Soil Stabilizer", Master's dissertations, Kyungpook National University, Department of Civil Engineering, June, 2015.
- [2] K. H. Kim, Y. T. Kim, S. H. Lee, "A Study on Slope Reinforcing Effects Using Soil Stabilizer", *Journal of Korean Geotechnical Society*, vol. 26, no. 10, pp. 5-14, 2010.
- [3] S. W. Oh, J. C. Jeon, D. G. Kim, H. H. Lee, Y. C. Kwon, "Shear Strength and Erosion Resistance Characteristics of Stabilized Green Soils", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, vol. 16, no. 12, pp. 45-52, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.14481/jkges.2015.16.12.45>
- [4] S. Y. Seong, E. C. Shin, "Evaluation of Erosion Resistance Capability with Adhesive Soil Seeding Media", *J. Korean Geosynthetic Society*, vol. 14, no. 20, pp. 71-79, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgss.2015.14.2.071>
- [5] B. J. Lee, H. S. Heo, J. H. Noh, Y. I. Jang, "The Verification of Green Soil Material Characteristics For Slope Protection", *Asia-pacific Journal of Multimedia Services Convergent with Art, Humanities, and Sociology*, vol. 7, no. 6, pp. 681-692, 2017.
DOI: <https://doi.org/10.14257/AJMAHS.2017.06.15>
- [6] S. H. Kil, "Evaluating Erosion Risk of Revegetated Cutslope with Seed Spraying", *J. Korean Society of Environmental Restoration Technology*, vol. 19, no. 6, pp. 63-76, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.13087/kosert.2016.19.6.63>
- [7] B. T. Lee, C. M. Park, "Effects of Seed Coating and Molding on Seed Germination and Seeding Growth of Rehabilitating Plants in Forest Road Slopes", *Korean Society of Environment and Ecology*, vol. 20, no. 4, pp. 436-447, 2006.
- [8] E. I. Yang, S. Y. Choi, Y. S. Choi, I. S. Kim, Y. G. Kim, "A Study on Material Characteristics of Field Applied Green Slope Soil for Development of Vegetation Shotcrete using Mineral Additive", *Proceeding of Korea Institute for Structure Maintenance and Inspection*, vol. 20, no. 2, pp. 457-458, 2016.
- [9] E. I. Yang, S. Y. Choi, Y. S. Choi, I. S. Kim, Y. G. Kim, "Effects of Moisture Content of Fertilizer on the Properties of Green Slope Soil using Mineral Additives", *Proceeding of Korea Institute for Structure Maintenance and Inspection*, vol. 21, no. 1, pp. 322-323, 2017.
- [10] I. S. Kim, S. Y. Choi, Y. G. Kim, Y. S. Choi, E. I. Yang, "Evaluation of Slope Adhesion Force of Green Slope Soil by Rainfall Intensity Simulation", *Proceeding of Korea Institute for Structure Maintenance and Inspection*, vol. 21, no. 2, pp. 309-310, 2017.
- [11] I. S. Kim, Y. G. Kim, E. I. Yang, J. S. Choi, Y. S. Choi, "A Study on Vegetation Environment of Artificial Soil with Cement-based Material", *Proceeding of Korea Institute for Structure Maintenance and Inspection*, vol. 20, no. 1, pp. 597-598, 2016.
- [12] I. S. Kim, Y. S. Choi, Y. G. Kim, J. S. Choi, E. I. Yang, "Analysis of Heavy Metal Content in Artificial Soil mixed with Cement Based Material", *Proceeding of Korea Concrete Institute*, vol. 28, no. 2, pp. 535-536, 2016.
- [13] S. Y. Choi, K. M. Cha, I. S. Kim, Y. S. Choi, E. I. Yang, "A Study on Material Characteristics of Green Slope Soil for Application to Vegetation Shotcrete using Mineral Additive", *Proceeding of Korea Institute for Structure Maintenance and Inspection*, vol. 20, no. 1, pp. 550-551, 2016.
- [14] M.O.L.I.T., "Guidelines for Design and Construction of Road Slope Greening Works", *Ministry of Land, Infrastructure and Transport*, pp. 79-81, 2009.
- [15] KS F 2343, "Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions", *Korean Agency for Technology and Standards*, pp. 1-10, 2017.
- [16] Y. S. Kim, D. M. Kim, "Characteristics of Friction Angles between the Nak-dong River Sand and Construction Materials by Direct Shear Test", *Journal of the Korean geotechnical society*, vol. 25, no. 4, pp. 105-112, 2009.
- [17] Das, Braja M., Sobhan, Khaled, Principles of geotechnical engineering, Eighth Edition, Cengage Learning, pp. 429-437, 2012.

김 일 순(II-Sun Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : 강릉원주대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2010년 1월 ~ 2013년 9월 : 토목설계회사 근무
- 2013년 10월 ~ 2015년 10월 : 한국시설안전공단 진단본부 근무
- 2018년 3월 ~ 현재 : 강릉원주대학교 토목공학과 (박사과정)

<관심분야>

콘크리트 구조, 재료 및 내구성

최 윤 석(Yoon-Suk Choi)

[정회원]



- 2013년 2월 : 강릉원주대학교 토목공학과 (공학박사)
- 2014년 1월 ~ 2014년 7월 : 한국과학기술원 건설 및 환경공학과, Post-Doc.
- 2014년 8월 ~ 현재 : 한국건설생활환경시험연구원, 선임연구원

<관심분야>

콘크리트 구조, 내구성

양 은 익(Eun-Ik Yang)

[정회원]



- 1996년 11월 : 교토대학교 토목공학 (공학박사)
- 1998년 5월 ~ 2000년 2월 : 한국해양과학기술원, 선임연구원
- 2000년 3월 ~ 현재 : 강릉원주대학교 토목공학과, 교수

<관심분야>

콘크리트 구조 및 재료, 해양콘크리트