

AAS계 토양개량제의 활용 및 적용방법에 대한 실험적 연구

고건우*, 이병석, 여동준
전북대학교 토목공학과

An Experimental Study on the Use and Application Method of AAS-based Soil Stabilization

Kun Woo Ko*, Byung Suk Lee, Dong Jun Yeo
Department of Civil Engineering, Jeonbuk National University

요약 토사로 이루어진 비탈면은 장마철 지속적인 강우 등으로 인한 침식 및 세굴에 의해 붕괴가 자주 발생하여 재산적, 인명적 피해를 입힌다. 본 연구에서는 이러한 피해를 막기 위해 사면보호 공법중 하나인 토양개량공법에 AAS계 토양개량제를 적용하여 토질별 최적의 배합비를 제안하고 인공강우실험을 진행하여 현장 활용성 및 적용방법에 대해 실험적 연구를 진행하였다. AAS계 토양개량제는 고로슬래그 분말에 액상의 알칼리 화합물을 조합하거나 조해성이 큰 알칼리 화합물과 슬래그를 혼합 분쇄한 형태로서 시멘트 사용 없이 산업부산물과 첨가제를 통해 배합한 것이다. 국지성 호우로 인해 붕괴된 18개소의 현장토를 대상으로, AAS계 토양개량제를 사용해 각 시료의 함수비별 일축압축실험 결과를 통해 최적 배합비를 제안하였으며, Casagrande법으로 흙을 분류하였을 때 세립토의 분류가 명확하지 않아, Fall Cone Test를 이용해 보다 분명한 토질별 최적 배합비를 제안하였다. 시험 결과, 식물 생육이 원활한 강도인 1,300~2,800kPa를 나타내기 위해서는 SC, SM과 같은 사질토에서는 9%, ML은 6%, CL은 9%, MH, CH는 12%의 배합비가 적절한 것으로 나타났다. 또한, AAS계 토양개량제를 이용해 사면 보호를 위한 표층개량공법 적용 시에 침식 및 세굴에 대한 우수성을 검토하기 위해 인공강우실험을 실시하였다. 시험 결과, 원지반에 비해 미세한 국부적인 유실 이외에는 세굴이 발생하지 않아 우수한 보호 효과를 보였다.

Abstract Slopes made of soil often collapse due to erosion and scouring due to continuous rainfall during the rainy season. The possibility of applying slope stabilization material based on alkali activated slag (AAS) in a surface improvement method was studied. AAS-based slope stabilization material is made by mixing and pulverizing a liquid alkali compound with blast furnace slag powder or an alkali compound with high deliquescent properties and slag using industrial by-products and additives. The optimal mixing ratio was calculated from the results of uniaxial compression experiments for different water contents of each sample using AAS-based slope stabilization material in 18 sites that had collapsed due to local heavy rains. When soil was classified by the Casagrande method, it was considered difficult to accurately classify fine soil, so the Fall Cone Test was used to suggest clearer optimal mixing ratio for each soil. As a result, it was found that the appropriate mixing ratio was 9% for sandy soils such as SC and SM, 9% for ML, 9% for CL, and 12% for MH and CH to represent 1,300-2,800kPa. In addition, as a result of an artificial rainfall test, scour did not occur except for minute local loss compared to the original soil, showing an excellent protection effect.

Keywords : Slope Stabilization Material, Slope Collapse, Alkali Activated Slag, Surface Improvement Method, Casagrande Method, Fall Cone Test

*Corresponding Author : Kun Woo Ko(Jeonbuk National Univ.)

email: kunwoo@jbnu.ac.kr

Received April 21, 2022

Accepted September 2, 2022

Revised August 5, 2022

Published September 30, 2022

1. 서론

최근 지구온난화로 인하여 전 세계적으로 기후변화가 진행되고 있으며, 국내 또한 기후변화에 예외는 아니다. 국내 장마전선은 매년 6월 말부터 7월까지 장기간 진행되었으나, 최근 들어 장마전선은 7월 말부터 8월 초까지 폭풍우와 함께 폭우가 쏟아지며 짧은 기간 동안 강수량이 급격히 증가한 국지성 호우가 발생하고 있다[1]. 더불어 최근 9년간 집중호우 발생 빈도가 높아지면서 한반도 남부로 유입되는 다량의 수증기가 여름철 황해로 유입되어 남부지역의 집중호우 빈도가 높아졌으며, 최근 20년 동안 집중호우 주의보는 25%, 호우경보는 60%가 증가하였다[2]. 특히, 2020년도에는 역대 가장 긴 장마철과 잦은 집중호우가 발생하였으며, 8 ~ 9월 한 달간 고수온역을 통과하여 강도를 유지한 태풍이 연이어 영향을 주었기에 기후변화로 인한 기상이상의 문제에 대한 대책이 요구된다. 이러한 기상이상으로 인한 집중호우의 발생은 도로의 비탈사면 등 여러 곳에서 지표면의 침식으로 인해 붕괴를 발생시킨다. 일반적인 비탈면의 붕괴 형태는 원호파괴 형태로 알려져 있으나, 실제 붕괴 형태는 다르게 나타난다. 이는 한국도로공사 2020년도 비탈면 붕괴 현황인 Fig. 1을 통해 알 수 있다. 자료에 따르면 전체 붕괴 유형 중 81%는 세굴 및 유실에 의한 형태로 이를 뒷받침하고 있다(Fig. 2).

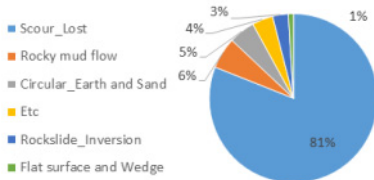


Fig. 1. Slope damage state[3]



Fig. 2. Slope surface failure and erosion

장마철 지속적인 강우는 시간이 경과함에 따라 충분한 지표면 침투가 발생한 후, 밀봉(sealing)효과에 의해 강우에 의한 빗물의 대부분은 비탈면 지표면을 따라 흘러가게 되어 Fig. 2 왼쪽 사진과 같은 붕괴가 발생한다. 이

러한 사면 붕괴의 주된 원인은 일반적으로 지표면으로 침투된 침윤전선(포화)에 의한 전단강도 감소에 기인한 것으로 여러 연구자들에 의해 보고되고 있다[4-7].

비탈면 붕괴시 네일링(Nailing), 앵커(Ancho) 등의 공법들이 사용되고 있으나, Fig. 2 오른쪽 사진과 같이 실질적인 표면 세굴 및 유실에 대한 문제를 해결 할 수 없다. 재산과 인명피해 우려가 적은 지역에서는 이를 해결하기 위해 경제적이고 친환경적인 방법을 많이 시도하고 있으며, 시멘트와 원지반을 교반하는 토양개량제를 활용한 표층개량공법이 있다. [8]은 표층개량공법과 구배 완화, 옹벽, 파일, 보강토 옹벽의 안정성, 작업성, 경제성, 시공 기간, 지속성에 대한 5가지 항목에 대해 평가 결과 표층개량공법의 효용성을 높게 평가하였으며, 일반적으로 표층의 전단강도를 크게 향상시켜 얇은 파괴나 대원호 파괴를 유발하는 침식 및 세굴에 피해를 막을 수 있는 사면보호 공법중 하나인 표층개량공법을 제시하고 있다[4,8-10].

표층개량공법은 일반적으로 Fly Ash나 시멘트 계열의 토양개량제를 많이 사용하여 표층을 개량하고 강도 개선과 동시에 강우로부터 효과적인 세굴 및 침식에 우수하다고 하였으나, 1970~1980년대부터 환경오염의 문제가 되면서 사용량이 현저히 감소하고 있다[9]. 이를 대체하기 위해 잠재 수경성 성질을 가지고 있는 고로슬래그에 다양한 알칼리 활성화제를 이용하여 칼슘실리케이트 수화물(C-S-H)이나 칼슘알루미네이트 수화물을 형성시켜 경화시키는 AAS(Alkali Activated Slag)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[11-20]. AAS의 특성은 세굴 및 침식에 대해 우수한 성능을 보이고 있어 표층개량공법으로 사용가능하나, 현재 현장 적용 기준이 마땅히 없으며 표층개량공법 시방 기준에 따라 수밖에 없다. 시방서의 기준에 따르면 함수비 30% 이하에서는 6%의 배합비, 함수비 30% 이상에서 9%의 배합비를 적용하도록 제안하고 있으나 명확한 근거자료가 없고 이를 맞추기에는 재료, 토질, 함수비 등에 품질에 영향을 받기 때문에 이를 적용하기 위해서는 명확한 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 AAS계 토양개량제를 표층개량공법을 현장에 적용하기 위하여 세굴 및 유실이 발생한 18개소 현장 시료를 채취하여 물리적 실험을 통해 흙을 공학적으로 분류하고, 일정 함수비에 따른 토양개량제의 일정 배합비율로 일축압축시험을 수행하여 AAS계 토양개량제의 90일 강도를 측정하였다. 이를 통해 AAS계 고화제의 표층개량공법 적용 가능 배합비율과 이를 도출하는 방안을 제안하였고, AAS계 토양개량제의 사면 보

호 효과를 검토하고자 인공 강우 실험을 통해 표층 침식 및 세굴에 대하여 검토하였다.

2. 실험 방법

2.1 AAS계 토양개량제

토양개량제를 이용한 사면 보호 공법은 연약한 기초 지반의 공학적 성질을 개량시켜 지반 지지력 증대, 침하의 방지, 수압 및 투수성의 감소 또는 제저 등을 목적으로 흙의 치환, 다짐, 탈수, 고결 등의 처리를 통해 안정성을 높여 천재지변 및 작용하중에 대한 변형을 감소시키는 것이다[17].

이러한 고화제를 이용한 지반개량 방법은 시멘트나 석회 등의 재료로 토립자들을 접착시켜 고결시키는 방법으로 대부분 Soil-Cement를 기반으로 한 시멘트계 토양개량제가 가장 많이 사용되고 있다. 시멘트계 토양개량제는 흙에 시멘트계 고화제를 첨가하여 지반의 강도를 증진시키는 토양개량제로서, 수화단계에서 생성되는 Ettringite의 생성을 높여 토립자와 시멘트의 공극을 채워줌으로서 우수한 강도를 발현할 수 있다[20].

하지만, 시멘트는 생산과정에서 석회석 등의 천연자원이 소비되고, 다량의 온실가스가 발생하는 등 환경적 문제가 발생하고 있으며, 이를 그라우팅에 사용시에는 주입량, 배합비, 주입압력, 주입시간, 시멘트의 분말도에 따라 효과가 다르게 나타나는 단점들이 있다[21,22]. 특히, 온실가스 중 55%를 차지하는 CO₂의 배출량 중 약 10%는 시멘트 제조 분야에서 배출되는 것으로 알려져 있으며, 1톤의 시멘트를 생산할 때마다 약 1톤의 CO₂가 배출되고 있다. 현장에서 이 시멘트계 토양개량제를 사용할 경우에는 경화 과정 중 토질의 영향을 많이 받을 뿐 아니라, 시멘트의 수화반응이 토양 중 유기질에 의하여 방해, 강도확보를 위한 다량 혼합으로 건조수축 발생 및 시멘트 과다사용, 이토의 처리 시 폐기물처리 방법 및 폐기물의 성상 분류가 모호, Cr⁶⁺와 같은 중금속 용출에 의한 주변토양 및 지하수 오염 문제 발생과 같은 문제가 발생할 수 있다. 따라서 시멘트 사용으로 인한 환경부하 및 환경오염을 저감시키는 동시에, 지반재료의 사용목적에 따른 요구성능에 부합하고 가격 경제성을 가진 친환경 지반재료 등을 사용하는 연구가 필요하다[23].

하여, 최근에는 이를 대체하기 위한 시멘트의 사용 없이 AAS계 토양개량제를 이용하는 연구가 많이 수행되었고 이는 잠재수경성 특징을 가지는 고로슬래그와 Fly

Ash에 알칼리 활성제를 통해 칼슘실리케이트, 칼슘알루미네이트와 같은 수화물을 형성시킨다. 고로슬래그는 장기강도 발현에 이점을 가지고 있지만 조기강도 확보에 단점을 가지는 재료로, 이에 대하여 분말도 등을 조절하여 이러한 단점을 해결하는 토양개량제 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, [24]와 같이 시멘트를 사용하는 토양개량제는 강도가 매우 높아 식물 생육이 어려워 녹화에 큰 어려움이 있지만, AAS계 토양개량제는 단기적으로도 적절한 강도를 확보할 뿐 아니라 장기적으로도 식생생육이 가능하면서 비탈면의 안정성을 확보할 수 있어 미관적으로도 보다 나은 효과를 나타낼 것으로 예상된다.

본 연구에서 사용하는 토양개량제는 AAS계(Alkali Activated Slag) 무기 결합제로서, 고로슬래그 분말에 액상의 알칼리 화합물을 조합하거나 조해성이 큰 알칼리 화합물과 슬래그를 혼합 분쇄한 형태이다. 토양개량제에 사용된 주된 재료는 시멘트 사용 없이 산업부산물과 첨가제를 통해 배합한 것을 사용하였다.

2.2 흙의 물리적 실험 및 강도 측정 방법

토양개량제와 붕괴된 현장시료를 이용한 표층개량공법은 백호 등의 장비를 이용하여 현장에서 즉시 혼합하는 건식 방식으로 시공을 실시한다. 따라서 세굴 및 침식에 대한 저항성 증대를 위한 역학적 성질 변화는 토질별 분류, 사용되는 토양개량제의 재료적 특징, 함수비, 다짐도 등 여러 요인에 좌우된다.

토양개량제의 사용은 재료적 특징에 따라 다르지만 본 연구에서는 AAS계열의 토양개량제에 대해서 연구를 수행하였고, 한 가지 토양개량제에 대해서만 검토하였다. 토양개량제의 최적의 강도발현 요인을 검토하기 위해 정확한 토질의 공학적인 분류가 필요하였고, 먼저 현장의 원지반토에 대하여 물리적 실험을 수행하였다. 특히, 세립토의 공학적 분류 방법은 KS F 2303인 Casagrande cup과 Thread Rolling으로 규정되어 있지만, 이는 동적 시험 방법으로서 정적 상태인 지반에 대해 이 시험 방법을 사용하는 데에 몇몇 연구자들은 문제점을 제기하고 있다. 따라서 정적 실험방법인 Fall Cone(BS 1377)을 병행하여 흙을 분류하였으며, 분류방법에 따른 결과는 3장에서 자세히 나타내었다.

또한, 토양개량제를 붕괴사면에 적용할 경우 토공사로 볼 수 있기에, 최적의 배합비율 제안을 위해서 다짐 시험을 통하여 최대건조밀도와 최적함수비를 도출하여 이를 근거로 각각의 배합비에 따른 함수비별 일축압축강도를 위해 일축압축시험을 수행하였다. 일축압축시험의 공시

체는 직경 5cm, 높이 10cm.의 원통형 모양 콘크리트 실린더 몰드를 사용하여 3개를 제작하였고, 고로슬래그 기반의 토양개량제임을 고려하여 90일 강도를 측정하였다. 공시체 제작은 KS F 2312에 의거한 흙의 다짐시험 방법 중 A다짐 방법의 다짐에너지지를 기준으로 3층 다짐을 실시하였다. 이는 현장 시공 시 백호를 통한 다짐을 수행하기에 현장 적용성을 고려하여 A다짐을 적용하였다. 또한, 토양개량제가 혼합된 시료의 강도 특성상 일반 토질실험용 일축압축시험기 사용은 어렵기 때문에, 최대 재하하중은 3ton 용량이고 1mm/min의 일정한 속도로 재하하는 압축시험기를 사용해 일축압축강도를 측정하였다.



Fig. 3. Sample Curing(Left) and test apparatus

2.3 공시체 제작

본 연구에 사용한 원지반 시료는 18군으로 Mudstone, 담양A, 담양B, 진안B, 충주, 전주, 나주A, 나주B, 고령A, 고령B, 구례A, 구례B, 광양, 곡성, 임실, 진안A, 진안C, 경주 지역의 사면 붕괴 현장 시료를 채취하여 사용하였으며, 원지반의 물리적 특성을 파악하기 위해 KS규정에 의거하여 비중시험(KS F 2308), 체가름 시험(KS F 2309), 다짐시험(KS F 2312), 비중계시험(KS F 2302), 액·소성 한계 시험(KS F 2303, BS 1377)을 실시하였다. Table 1은 실험 결과 중 액·소성한계 시험을 제외한 결과를 정리한 것이다. 이는 본 절의 내용에 흙의 공학적 분류에 관한 사항은 차후 일축압축시험 결과와 액·소성한계 시험 결과값을 통해 토질의 공학적 분류에 따른 최적 배합비 제안을 위해 생략하였다. 토양개량제를 원지반 중량 대비 각 6%, 9%, 12%를 혼합 후 진비빔 손배합을 통해 공시체를 제작하였으며, AAS계 토양개량제의 최적의 배합비율을 검토하기 위해서 임의의 함수비군을

Table 1. Physical properties of the grounds

Mechanical analysis	Mudstone	Damayang A	Damyang B	Jinan B	Chungju	Jeonju	Naju A	Naju B	Goryung A
D10(mm)	-	0.009	0.0013	0.001	0.0030	0.0025	0.0015	0.0015	0.0045
D30(mm)	-	0.05	0.0500	0.0090	0.0390	0.0550	0.029	0.008	0.007
D60(mm)	-	0.09	0.0680	0.0700	0.2000	0.1000	0.09	0.05	0.009
Passed #200 sieve(%)	67.2	57.7	73.3	61.0	53.5	54.9	58	62.5	97
Passe #4 sieve(%)	94.7	85.6	99.6	89.4	84.2	99.1	99.6	99.9	99.4
Specific gravity	2.64	2.65	2.65	2.7	2.89	2.70	2.65	2.65	2.51
Optimum moisture content(%)	15.3	15.9	20.1	-	18.3	17.1	14.6	17.5	25.6

Mechanical analysis	Goryung B	Gurye A	Gurye B	Gwang yang	Goksung	Imsil	Jinan A	Jinan C	Gyeongju
D10(mm)	0.0095	0.01	0.001	0.02	-	-	0.0054	0.0026	0.02
D30(mm)	0.11	0.17	0.15	0.068	-	-	0.0500	0.0800	0.4
D60(mm)	0.035	0.85	0.75	2.5	-	-	2.9	0.2200	1.75
Passed #200 sieve(%)	91.2	17.9	19.8	34.6	33.7	29.6	33.7	27.9	14.8
Passe #4 sieve(%)	99.1	96.8	94.3	68.3	96.8	99.8	77.8	98.3	89.1
Specific gravity	2.69	2.62	2.65	2.74			2.68	2.66	2.68
Optimum moisture content(%)	26.8	11	11	16.2	13	16.3	19.5	15.9	11.6

Table 2. Uniaxial Compressive Strength for each site

Site	Slope Stabilizer material content(%)	Water Content(%)				
		10	15	20	25	30
		Uniaxial Compressive Strength for each sample(kPa)				
Mudstone	6	765.63	1557.11	2259.75	2247.6	1412.02
	9	1308.02	2259.41	3015.14	3015.14	3508.9
	12	1277.8	3178.69	3861.99	4897.22	2112.06
Damyang A	6	-	587.1	615.01	692.94	-
	9	-	765.44	1187.98	1479.55	1049.99
	12	-	853	1417.85	2017.914	1873.64
Damyang B	6	679.53	1580.17	1523.94	2187.39	1950.75
	9	900.77	2174.69	2398.83	3536.37	4082.13
	12	883.01	2456.65	3022.13	3785.87	4965.25
Jinan B	6	405.65	683.49	965.67	1024.32	625.53
	9	441.63	668.02	1095.39	1212.98	1400.58
	12	637.87	1203.82	1215.28	2052.61	2258.47
Chungju	6	755.17	802.7	866.4	971.7	445.9
	9	1093.12	1396.36	1124.53	1528.22	920.41
	12	978.38	1618.1	1199.9	1690.23	1648.02
Jeonju	6	1450.43	1808.954	2163.318	1969.506	-
	9	1488.098	2451.76	3539.095	3707.426	-
	12	-	2852.167	4032.627	4923.714	-
Naju A	6	211.782	505.044	768.175	797.232	671.879
	9	-	656.405	1113.809	1352	1337
	12	-	830.064	1361.942	1834.919	2192.755
Naju B	6	-	-	337.227	623.832	322.017
	9	-	-	635.712	918.73	707.665
	12	-	-	1077.961	1240.513	1536.395
Goryung A	6	-	220.098	303.605	312.395	317.388
	9	-	429.387	654.13	681.918	676.147
	12	-	707.029	1012.439	1106.373	1230.349
Goryung B	6	-	302.052	491.439	608.365	601.0256
	9	-	504.416	863.044	1070.392	1047.492
	12	-	917.399	1379.477	1564.937	1415.105
Gurye A	6	809.189	1698.689	2192.75	1814.927	-
	9	1075.593	1834.059	2596.343	2854.824	-
	12	-	2491.477	2880.978	3373.206	2375.619
Gurye B	6	851.95	1580.58	2306	2298.82	-
	9	-	1891.04	3101.88	3720.79	-
	12	-	2851.74	3796.18	5367.25	-
Gwangyang	6	518.553	948.121	1300.858	1335.196	-
	9	818.67	1195.289	1912.541	2689.579	-
	12	768.54	1731.801	2557.995	3809.846	4114.791
Goksung	6	233.55	819.33	1406.667	1588.453	-
	9	300.017	986.7	2183.376	3407.922	-
	12	446.774	1305.98	2693.251	3648.055	2959.517
Imsil	6	-	913.032	1047.192	1067.709	-
	9	-	1408.428	1877.617	2374.222	-
	12	-	1887.132	2380.275	2965.795	-
Jinan A	6	-	530.76	794.87	874.7	1055.23
	9	-	803.31	1377.27	1809.78	2208.56
	12	-	-	1848.62	2415.87	3367.82
Jinan C	6	731.1151	1449.873	1657.599	1704.986	1523.297
	9	800.264	1800.872	2409.022	2664.157	3088.973
	12	1070.587	2298.481	2820.334	3728.136	4417.794
Gyeongju	6	707.873	1069.689	1356.536	1516.704	-
	9	997.3895	1417.877	2132.451	3374.967	-
	12	975.1067	1842.799	2615.362	4210.069	3757.172

선정하여 공시체를 제작하여 실험을 수행하였다. 너무 낮거나 높은 함수비를 갖는 경우에는 공시체 제작이 불가능하여, 이를 제외한 나머지 제작이 가능한 공시체들에 대하여 실험을 진행하였다. 제작된 공시체는 A다짐 에너지 5.63kgf/cm^3 으로 콘크리트 실린더 몰드의 규격의 체적을 계산하여 각 층의 다짐횟수를 산정하였고 3층별 각각 6회, 6회, 7회의 횟수로 다져 공시체를 제작하였다. 양생일별 강도 측정은 AAS계 토양개량제의 특성상 90일까지 강도발현이 되기 때문에 90일 강도에 맞추어 시료를 제작하였으며, 현장의 붕괴된 토사의 채취 여건 문제로 90일간 양생한 공시체의 강도만 측정하였다. 또한, 공시체는 Fig. 3과 같이 램으로 밀봉 후 실내온도 24°C 에서 양생시켜 공시체 내 수분만 반응할 수 있도록 공시체를 제작하였다.

3. 실험 결과

3.1 일축압축강도 및 최적 배합비 제안

앞에서 언급한 방법대로 3개의 공시체를 제작하였으며, 각 원지반토에 토양개량제를 혼합하여 양생일별로 일축압축시험을 실시한 결과를 각 각의 현장별로 Table 2에 나타내었다. 모든 시험 군에서 확인한 강도증진양상을 보였으며 전반적으로 AAS계 토양개량제의 함유율이 높을수록 강도발현이 높아 장기적으로 표층을 보호할 수 있는 표층개량공법에 적용 가능한 것으로 나타났다. 그러나 강도 발현의 정도에 대하여 토양개량제를 사용하였을 때의 규칙성 혹은 일정한 경향을 나타내지 않았다. 또한, 유일하게 표층개량공법에 대한 규정이 명시되어 있는 도로공사가 제시한 기준인 함수비 30%이상일 경우 9%의 배합비 혹은 30%이하일 경우 6%의 배합비를 충족하기에는 어려울 뿐 아니라 명확한 기준을 제시할 수 없었다. 이에 따라, AAS계 토양개량제를 활용하여 표층개량공법을 사용하는데 있어 현장 품질관리에 대한 명확한

기준이 필요한 것으로 판단되었다. 또한, 단순히 토양개량제의 함유 비율을 높여도 강도가 비례하여 증가하지 않고 배합비-함수비에 따른 강도발현에 대해 변곡점이 있는 것으로 보인다.

따라서 AAS계 토양개량제를 사용하기 위해서는 적정 함수비와 토질별 분류에 따른 배합비율이 서로 다른 것으로 판단되었다. 예시로 대다수의 현장 시료는 함수비 30%이상의 경우 일축압축공시체 제작이 불가능하여 기준 도로공사에서 제시한 표층개량공법에 대한 기준을 AAS계 토양개량제에 적용하기에는 불가능하였고, Jinan 지역의 A, B, C의 일축압축강도 발현정도는 각 함수비에 따라 다르게 나타나 토질의 특성에 따른 강도 발현 정도의 차이를 나타냈다. 또한, Gyeongju 현장의 12%의 배합비율에서 각각 함수비의 일축압축 강도는 5~20%의 함수비의 경우 증가하는 양상을 보이나 25%의 함수비의 경우 오히려 감소하는 것으로 나타났으며, 이외의 대다수 현장도 이와 동일한 경향을 보이고 있다. 특히, 이러한 강도 감소 경향은 막연히 토양개량제의 사용량이 높을 경우 최고의 효과를 나타내는 것이 아닌, 최적의 강도를 발현할 수 있는 일정량의 함수비를 충족하는 것이 중요하다라는 것을 분명하게 보였다. 따라서 토양개량제의 현장 활용성을 높이기 위해서는 붕괴 사면의 함수비와 토질별 분류에 따른 최적의 배합비율 제안이 요구된다.

각 현장의 배합비율-함수비별 일축압축강도 실험 결과, 토양개량제를 사용하기 위해서는 현장의 토질 특성과 함수비에 따라 다르며, 현장에서 시공 시 일정한 품질관리를 위해서는 어떠한 공통된 기준에 의거한 최적의 배합비율이 필요하다. 앞서 설명한 것처럼 최적의 강도를 발현하는 일정량의 함수비는 각각의 현장 시료마다 다르기 때문에 다른 방안을 활용하여 최적 배합비를 제안해 보았고, Fig. 4의 과정을 통해 최적 배합비를 결정하였다.

Table 3. Soil Harness Tester Penetration - Plants State (KOREA MOLIT, 2010)

Compressive Strength(kPa)	Soil Hardness Tester Penetration (mm)	Plant growth status by soil hardness
0 ~ 460	~ 18	Good plant growth, risk of slope collapse
460 ~ 1300	18 ~ 23	Most suitable for root growth
1300 ~ 2800	23 ~ 27	Plant growth is good, growth activity is not very good
2800 ~ 5200	27 ~ 30	A condition in which it is difficult for the root system of a plant to invade

표층개량공법은 사면보호를 위해서 붕괴된 토사를 토양개량제와 혼합하는 일종의 토공사이다. 토공사의 경우 현장에서의 품질관리는 보통 다짐도를 보통 확인하므로, 최대진조단위중량과 최적함수비를 활용하여 최적 배합비를 추정해 보았다. 최대진조단위중량과 최적함수비를 활용하는 이유는 이때의 토질이 투수계수가 가장 작고 최대 전단강도를 가져 역학적으로 가장 유리한 상태이기 때문이다. 또한, 현장 시공시 최적 배합비를 위한 목표 강도 값은 명확한 설계기준이 없고 표층개량공법은 시공 후 녹화공법이 적용된다. 따라서 국토교통부(KOREA MOLIT, Ministry of Land, Infrastructure and Transport)에서 제시한 도로 비탈면 녹화공사 설계 및 시공지침의 토양경도계 관입 깊이에 따른 식물 생육관계를 통해 목표 강도치를 선정하였고, 이는 Table 3과 같다. 사면 보호를 위해서는 강도가 클수록 투수계수 값이 작아 유리하지만, 표층개량공법 이후 녹화공법을 수행하기 때문에 단순한 강도증진을 보기보다는 Table 3을 통해 적정 강도를 발현하는 것이 필요하다. 따라서 최적 배합비를 제안하기 위해 식물 생육이 양호하며 근계 성장에 가장 적합한 발현 단계를 고려하면 1,300~2,800kPa이 적정 강도라 사료된다. 이를 활용해 최적 배합비를 제안하기 위해 적정 강도 범위를 강도기준선인 SL(Strength Line)을 도식하고, 최적함수비, 건조축, 습윤축의 함수비선과 교차하여 형성된 영역에 해당하는 일축압축강도를 최적 배합비로 결정하였다.

예시로 Table 4, Table 5는 각각의 현장에 따른 배합비율-함수비의 일축압축강도 그래프를 나타낸다. 앞서 서술한 방법으로 최적 배합비를 제안하는 방법은 각 현장의 최적함수비(OMC)에 SL을 도식하여 교차되는 영역을 최적 배합비로 선정하였다. 분류 결과 토질분류에 따른 최적 배합비는 Table 6과 같이 나타났다. 또한, 최적 배합비 실제 실험결과를 통해 비교해본 결과 최적함수비에서 -5%의 영역은 강도 발현이 낮게 나타났고, 세굴 및 침식이 발생한 현장 토사의 건조 과정이 필요해 시공성이 떨어진다. 반면 습윤 상태인 경우 살수차로 간단히 해결 가능하다.

따라서 강도 발현 정도와 자연상태 함수비를 맞추는데 있어 습윤 축에 맞추기에 용이하기 때문에 최적 함수비와 최적 함수비의 +5%의 함수비선과 기준강도인 1,300~2,800kPa의 SL의 교차 영역을 기준으로 정하였고 최적 배합비를 제안하였다. 또한, 최적 배합비 제안 시 영역 내에 6%와 9% 모두가 충족하는 경우에는 최적 배합비 제안에 경제성을 고려해 작은 배합비를 적용하여 제안하였다.

Table 4. Uniaxial Compressive Graph
(Slope Stabilizer content-Water Content) 1

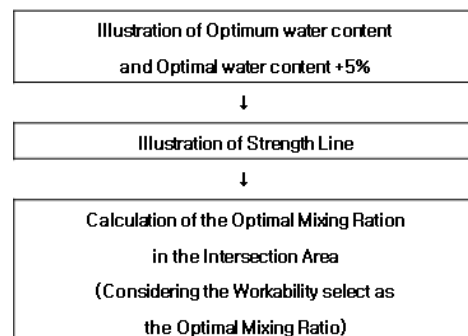
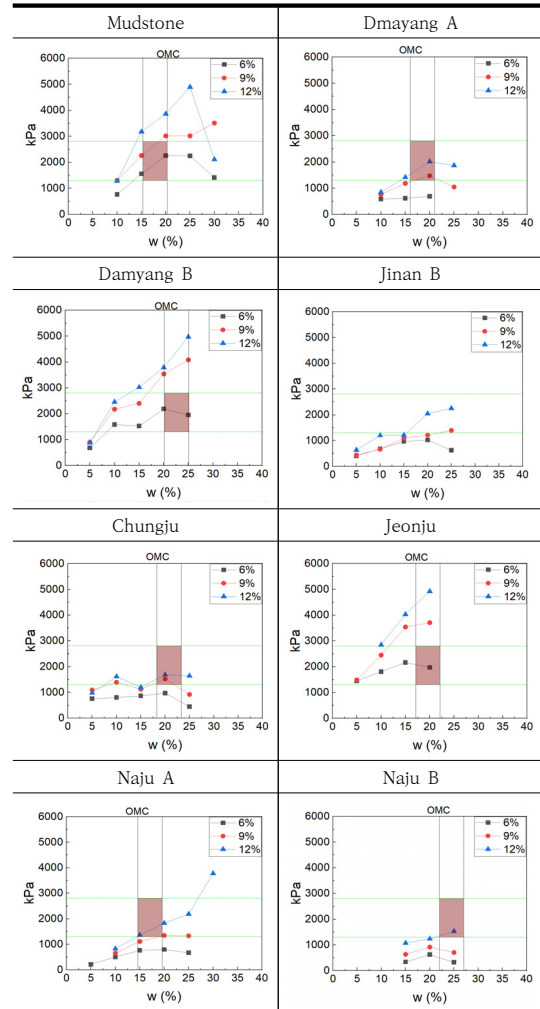
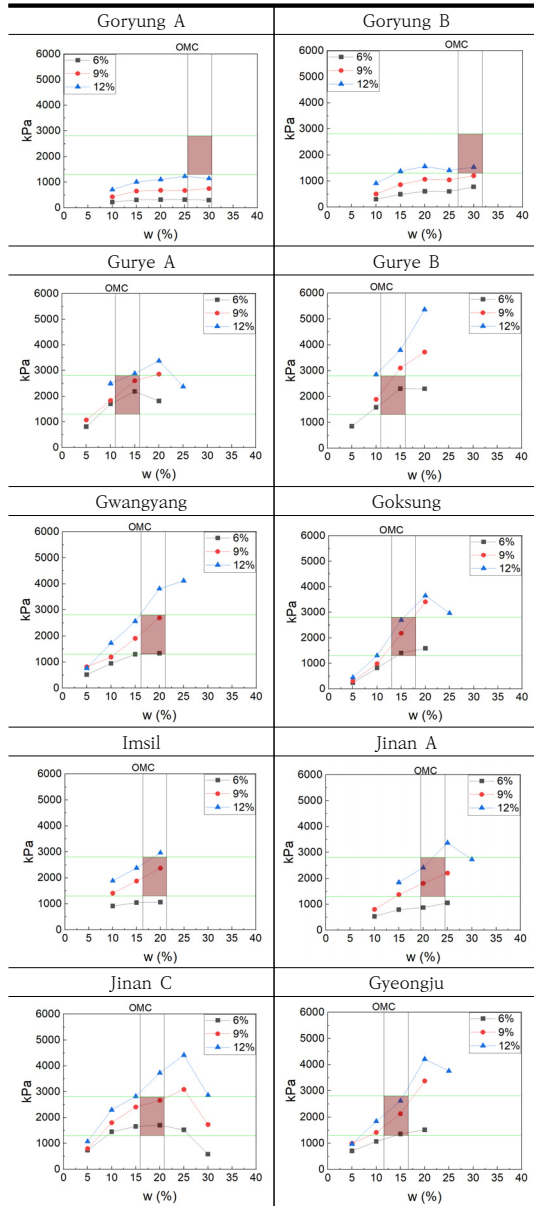


Fig. 4. Optimu Mixing Ratio Calculation Process

Table 5. Uniaxial Compressive Graph
(Slope Stabilizer content-Water Content) 2



일축압축강도 그래프에 최적함수비와 SL을 이용하여 토질분류에 따른 최적 배합비를 제시하였다. 이는 현장별 최적 배합비율의 결과이며 토양개량제를 이용한 사면 보호의 설계와 시공을 빠르고 경제적으로 실시하기 위해 토질에 따른 공학적 분류를 통해 최적 배합비에 대한 제시가 필요하다.

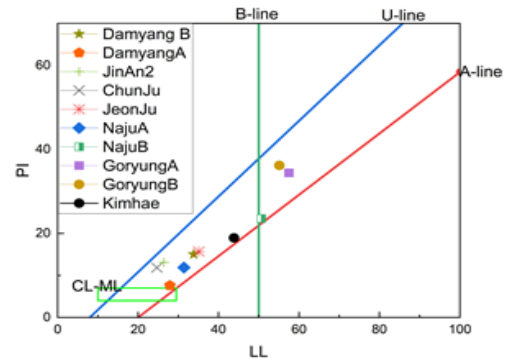


Fig. 5. USCS of Fine-Grained Soil
(Casagrande method)

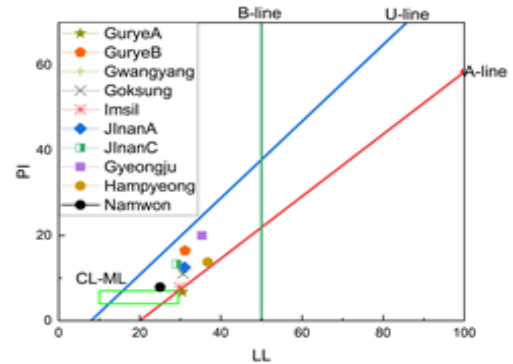


Fig. 6. USCS of Coarse-Grained Soil
(Casagrande method)

따라서 각 현장 시료에 대해 물리적 실험 결과를 토대로 통일분류법(USCS)에 의거하여 이를 분류하였고 이에 대한 자료는 Fig. 5, Fig. 6, Table 6에 나타내었으며, 이를 종합한 결과는 Table 7에 나타났다. 실험 결과 조립토 현장 시료의 경우의 최적 배합비는 SM은 6%, SC는 6~9%로 나타났으나 SM으로 분류된 현장은 Gurye A 하나로 추가적인 검증이 필요하다. 또한, SC에 해당하는 현장 시료의 경우 배합비는 6~9%로 명확하게 분류되지는 않았다. 특히, Imsil, Jinan A의 현장에서는 9%이고 나머지 5개의 현장에서는 6~9%의 배합비율이 최적의 배합비율로 나타났다. 당초 최적 배합비 산출 과정에서 배합비율이 2가지가 영역에서 중복되면, 경제성을 고려하여 낮은 배합비율을 최적 배합비로 산출하였다. 현장 적용 사례는 적으나 현재 SC라는 토질로 분류된 경우 9%를 최적 배합비로 산출한다면 모두 충족 가능하다. 따라서 SC의 최적 배합비율은 9%로 제안하였다.

Table 6. U.S.C.S by Casagrande method

Mechanical analysis	Mudstone	Damyang A	Damyang B	Jinan B	Chungju	Jeonju	Naju A	Naju B	Goryung A
Classification of soil (U.S.C.S)	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CL	CH
Plastic limit(%)	10.26	18.59	19.23	13.3	12.80	17.6	20.09	50.66	23.06
Liquid limit(%)	26.28	33.83	30.34	26.42	24.66	32.49	30.81	27.1	57.49
Plasticity index(%)	26.02	15.24	11.11	13.12	11.86	14.89	10.72	23.56	34.43
Optimal Mixing Ratio(O.M.R) (%)	6	9	6	9	9	6	9	12	12

Mechanical analysis	Goryung B	Gurye A	Gurye B	Gwang yang	Goksung	Imsil	Jinan A	Jinan C	Gyeongju
Classification of soil (U.S.C.S)	CH	SM	SC	SC	SC	SC	SC	SC	SC
Plastic limit(%)	18.93	23.81	14.72	19.25	19.57	21.90	18.49	15.79	15.33
Liquid limit(%)	55.12	30.55	31.16	30.61	30.63	29.81	31.01	29.1	35.33
Plasticity index(%)	36.19	6.74	16.43	14.35	11.06	7.92	12.52	13.31	20.00
Optimal Mixing Ratio(O.M.R) (%)	12	6	6	6	6	9	9	6	6

또한, 세립토 현장 시료에 대하여 최적 배합비율을 제안한 결과 CL의 경우 6%, 9%, 12%의 다양한 최적 배합비를 나타냈다. 때문에 세립토 현장에 AAS계 토양개량제를 적용하기에는 어려움이 있는 것으로 나타났다. 이는 기존의 Casagrande법에 의한 토질의 공학적 분류 수행시 문헌 조사 결과처럼 실험자의 숙련도에 따른 정확성이 주요인으로 판단된다. 이를 대체할 수 있는 방안으로 절차가 단순하고 실험장치가 시험결과에 미치는 영향이 적어 실험자의 숙련도에 따른 오차가 최소화되는 방법인 Fall cone을 이용하여 분류한 뒤 최적 배합비를 제안해보았다.

Table 7. Proeposed Optimal Mixing Ratio (by Casagrande method)

Purpose Slope Stabilizer content Ratio(%)	Fine-Grained Soil	Coarse-Grained Soil
6%	CL	
9%	CL	SM, SC
12%	CL, CH	-

3.2 Fall Cone Test 결과 최적 배합비 제안

KS F 2303인 흙의 액·소성 한계 실험은 세립토의 공학적인 분류에 중요한 실험이지만, 이 중 소성한계 시험인 Thread Rolling의 경우 시험자의 숙련도에 따라 결

과 값의 오차가 커 신뢰성 문제가 있다. 이를 해결하고자 1942년 Vasiljev에 의해 GOST 5184로 처음 언급된 Fall Cone Test는 Casagrande법에 대한 대안방법으로 처음 제시되었고 이는 현재 국내 KS 규정을 제외하고 영국, 프랑스, 일본 등 전 세계적으로 사용되고 있다. 이 방법은 점성토의 컨시스턴스에 따라 콘의 관입량 차이 즉, 액소성한계의 강도비를 활용한 실험으로 실험자의 숙련도에 영향을 받지 않는 장점을 가지고 있다.

따라서 KS F 2303을 이용하여 최적 배합비를 제안하였으나 점성토의 경우 명확한 결과를 얻지 못하였기 때문에 BS 1377에서 제시된 Fall Cone Test를 통해 최적 배합비 산출을 수행해 보았다.

각 현장 시료 수급 여건의 한계로 몇몇 시료에 대해서는 Fall Cone Test를 수행하지 못하였으며, 이를 제외한 다른 시험군들에 대해 Fall Cone Test를 수행하여 통일 분류법으로 분류한 결과를 Fig. 7, Fig. 8, Table 8을 통해 나타내었다.

Fall Cone Test를 수행하여 조립토를 분류해본 결과 Casagrande법과 비교했을 때 Gurye A가 SM에서 SC로 Imsil이 SM에서 SC로 흙의 분류가 바뀐다. 이로 인해 명확한 최적 배합비를 제시하는 것은 아니고 조립토의 분류에서 컨시스턴스는 큰 비중을 차지하지 않기 때문에 당초 실험 결과인 9%가 적합한 것으로 사료된다.

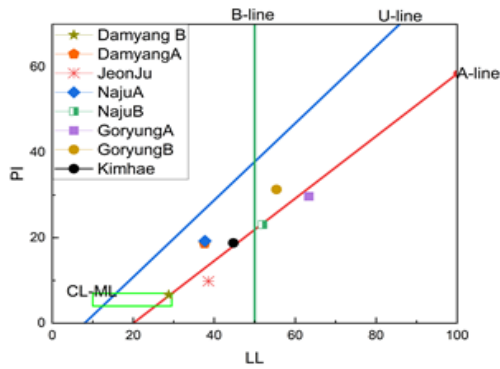


Fig. 7. USCS of Fine-Grained Soil (Fall cone method)

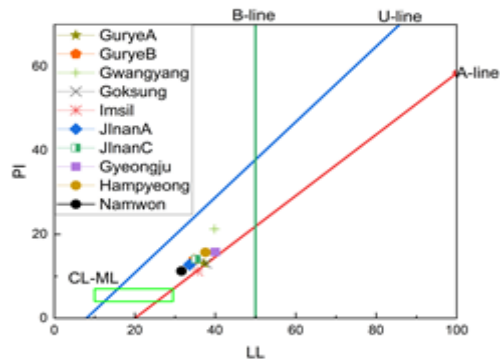


Fig. 8. USCS of Coarse-Grained Soil (Fall cone method)

반면, 세립토 현장 시료를 분류한 결과 가장 큰 차이를 보였다. 실험 결과 ML시료의 경우 6%, CL시료의 경우 9%, MH, CH의 경우에는 12%로 나타났다. 이전 최적 배합비 제안에 사용된 KS F 2303에 비하여 명확하게 분류되었다. 이를 종합하여 정리한 결과는 Table 9와 같다. 비록 실험군이 적어 표준적인 방법으로서 제안하기엔 부족하나, Fall Cone test가 Casagrande법에 비해 실험자들의 숙련도에 따른 오차가 발생하지 않아 세립토에서 활용성을 확인 할 수 있었다.

Table 9. Proeposed Optimal Mixing Ratio
(by Fall Cone method)

Purpose Slope Stabilizer content Ratio(%)	Fine-Grained Soil	Coarse-Grained Soil
6%	ML	-
9%	CL	SM, SC
12%	MH, CH	-

따라서 AAS계 토양개량제를 이용한 표층개량공법에 대한 명확한 기준을 제시한 Table 9를 이용한다면 시공 현장 적용시 품질 관리에 적합한 것으로 판단되었고, 현재 국내에선 표준화 되어있지 않고 국가마다 규정이 달라 보조수단으로 주로 사용하고 있는 Fall cone Test를 이용한다면 보다 정확한 설계를 수행할 수 있어 명확한 분류가

Table 8. U.S.C.S by Fall cone method

Mechanical analysis	Mudstone	Damyang A	Damyang B	Jinan B	Chungju	Jeonju	Naju A	Naju B	Goryung A
Classification of soil (U.S.C.S)	-	CL	ML	-	-	ML	CL	MH	MH
Plastic limit(%)	-	18.54	25.54	-	-	28.31	21.76	28.88	33.65
Liquid limit(%)	-	29.03	36.82	-	-	36.85	38.55	51.95	63.36
Plasticity index(%)	-	10.49	11.28	-	-	8.54	16.79	33.65	29.72
Optimal Mixing Ratio(O.M.R) (%)	6	9	6	9	9	6	9	12	12

Mechanical analysis	Goryung B	Gurye A	Gurye B	Gwang yang	Goksung	Imsil	Jinan A	Jinan C	Gyeongju
Classification of soil (U.S.C.S)	CH	SC	SC	SC	SC	SM	SC	SC	SC
Plastic limit(%)	24.07	24.23	20.83	18.54	13.08	24.32	20.85	21.07	24.17
Liquid limit(%)	55.38	37.28	34.78	39.81	37.698	35.58	33.59	35.16	39.99
Plasticity index(%)	31.31	13.05	13.96	21.26	13.08	11.26	12.75	14.09	15.82
Optimal Mixing Ratio(O.M.R) (%)	12	6	6	6	6	9	9	6	6

가능할 것으로 사료된다. 하지만, 본 연구의 분석 결과는 9군의 세립토를 통해 분석한 것으로서 이를 활용하기 위해서는 보다 많은 현장 케이스를 통한 검증이 필요하다.

4. 실내모형실험

4.1 실험 방법

사면의 세굴 및 침식 현상을 관찰 및 연구하기 위해서는 자연 강우에 의한 실질적인 현장 관찰에 의존해야하나, 이를 대체할 수 있는 방법으로 실내에서 인공강우실험을 통해 이를 비교할 수 있다[6,7].

표층개량공법은 집중호우 발생시 지표로부터 세굴 및 유실에 좋다고 알려져 있다[7]. AAS계 토양개량제 적용시 표층개량공법에서의 세굴 및 유실에 대한 저항성을 검토하기 위해 SC시료에 대하여 인공강우실험을 실시하였다. 시험체 제작은 사면과 비슷한 조건을 만들기 위해 Fig. 9와 Fig. 10과 같이 직사각형(가로×세로×높이=40cm×84cm×7cm)의 거푸집 틀을 제작하였으며, Fig. 11와 같이 원지반과 배합비 6%, 9%, 12%의 토양개량제를 혼합하여 시험체를 제작하였고 이를 Fig. 12, Fig. 13, Fig. 14에 나타내었다. 또한, 국토해양부(2011)와 한국도로공사의 설계기준에 의하면 0~6m 높이의 흙쌓기와 5m 이상의 땅깍기 사면의 기울기는 1:1.5이기 때문에, 본 인공강우실험 시 사면의 기울기는 1:1.5로 설정하였다. 일반적으로 최근 7~9월에 집중적으로 발생하는 강우는 게릴라성 호우로 집중호우라고 하며, 시간당 30mm이상의 강우를 집중호우로 분류하기에 이를 기준으로 하였다.

4.2 실험 결과

인공강우실험 결과, Table 10과 같이 나타났으며, 원지반의 경우 실험 전 시료 38.1kg에서 종료 후 침식된 시료의 무게를 측정한 결과 27.6kg으로 강우 시험 이후 72%의 토사가 유실되는 것을 확인할 수 있었다. 이에 반해 토양개량제를 혼합한 경우, 6%에서 0.1g의 유실된 시료 외에는 유실된 시험군이 없었으며, 경험상 빗물의 낙차로 인한 국부적인 유실은 발생하였으나 원지반 대비 우수한 것으로 나타나 침식 및 세굴에 대한 저항성을 갖는 것으로 판단되었다. 따라서 AAS계 토양개량제를 사면 보호를 위한 표층개량공법에 적용하여 현장에 시공하였을 경우 수리적 요인으로부터 사면을 효과적으로 보호할 수 있는 것으로 나타났다.

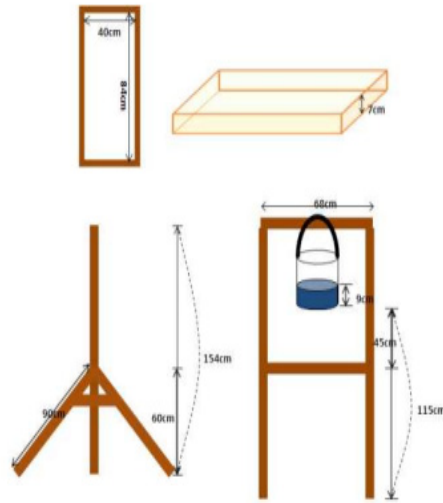


Fig. 9. Mimetic diagram of rainfall test

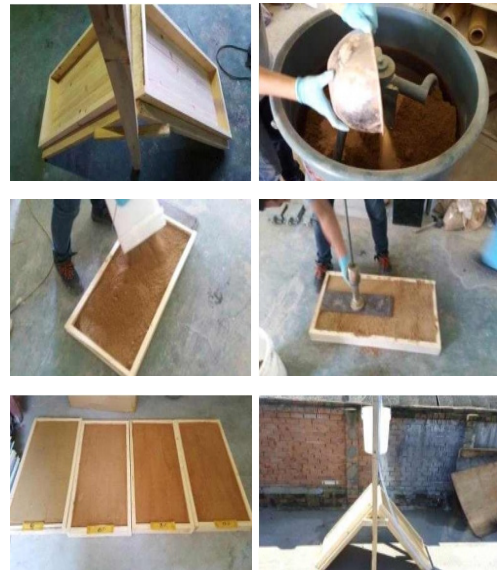


Fig. 10. Specimen production and experiment scene

Table 10. Proeposed by Optimized Slope Stabilizer Content Ratio

Slope Stabilizer content(%) Weight(g)	In situ soil	6%	9%	12%
0min Weight	38.1	38.0	37.6	36.7
60min Weight	10.5	37.9	37.6	36.7
Erosion Weight	27.6	0.1	0	0

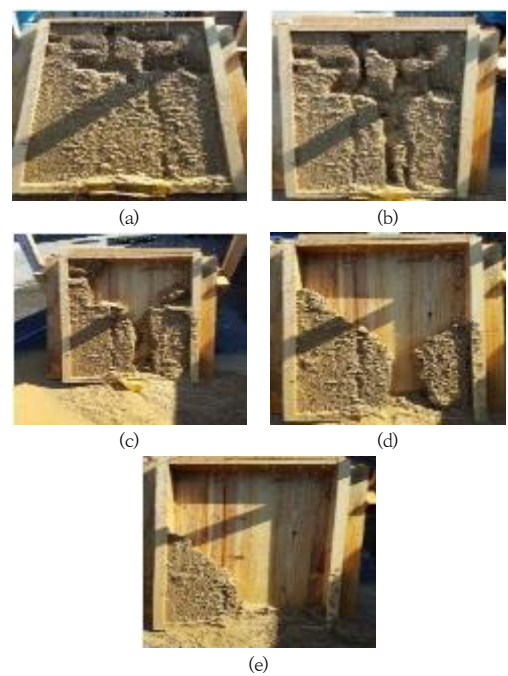


Fig. 11. Rainfall test result (ground)
(a) 5min (b) 10min (c) 15min (d) 20min (e) 30min

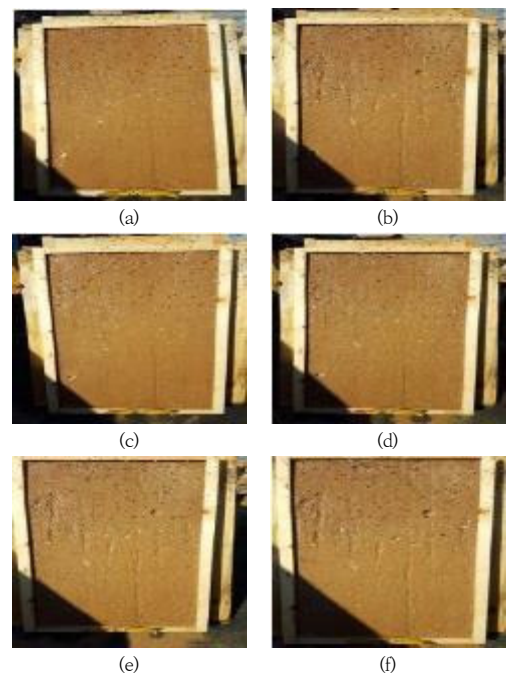


Fig. 12. Rainfall test result (6% mix applied)
(a) 5min (b) 10min (c) 15min (d) 20min (e) 30min (f) 60min

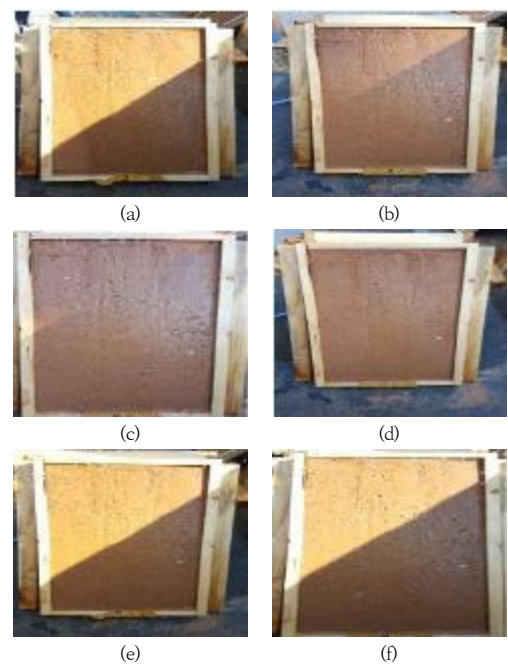


Fig. 13. Rainfall test result (9% mix applied)
(a) 5min (b) 10min (c) 15min (d) 20min (e) 30min (f) 60min

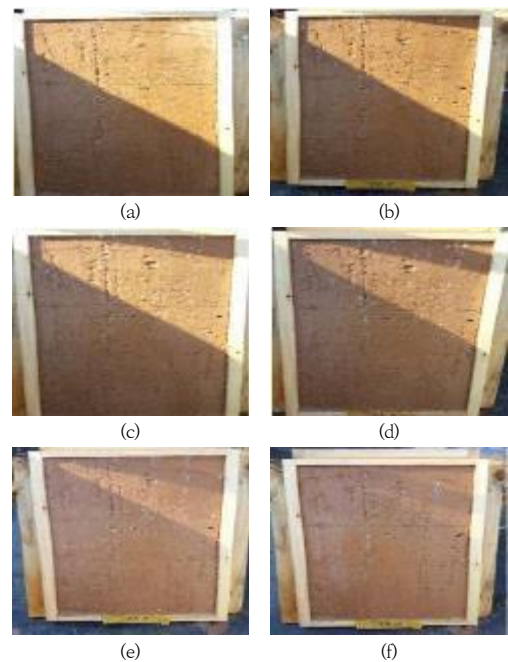


Fig. 14. Rainfall test result (12% mix applied)
(a) 5min (b) 10min (c) 15min (d) 20min (e) 30min (f) 60min

5. 결론

본 연구에서는 국지성 호우로 인해 붕괴된 18개소의 현장토를 대상으로 흙의 물리적, 역학적 실험, 인공강우 실험을 통하여 AAS계 토양개량제의 활용성과 사면보호를 위한 표층개량공법 적용시 현장 적용성에 대한 검토를 수행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 슬래그에 알칼리성 자극제를 혼합하여 개발한 AAS계 토양개량제를 원지반에 혼합하였을 경우 확인한 강도증진양상을 보였으며, 장기적으로도 높은 강도를 나타내어 표층을 보호할 수 있을 것으로 판단된다.
2. AAS계 토양개량제를 표층개량공법으로 현장에 적용하기 위해서는 최적 배합비가 필요하다. 이를 제안할 수 있는 명확한 기준이 현재 없어 본 논문에서는 식물 생육이 원활한 강도인 1,300~2,800kPa의 기준강도선과 최적함수비, 최적함수비의 +5% 선의 교차되는 영역에 해당되는 시료의 일축압축강도를 최적 배합비로 추정하는 방법을 제안했다. 분석 결과 KS F 2303 기준에 의거하여 토질을 분류하여 비교하였을 때 SC와 SM은 9%가 적합하였으나 점성토의 경우 명확하게 추정할 수 없었고 이는 시험자의 숙련도에 영향으로 사료되었다. 이를 줄이기 위해 Fall Cone Test를 이용하여 최적 배합비를 추정한 결과 SC, SM의 경우 동일하게 9%로 추정되었고, 점성토의 경우 ML은 6%, CL은 9%, MH, CH는 12%가 적합한 것으로 나타났다.
3. 최적 배합비 제안시 시험자에 의한 오차가 많다고 알려진 Casagrande법을 이용한 경우, 세립토의 분류시 정확한 분류가 이루어지지 않는 것으로 사료되었으며, 이를 Fall Cone Test를 이용하여 AAS계 토양개량제의 일축압축강도의 양상과 분류 결과를 분석하였을 때 보다 분명하게 토질별 최적 배합비를 제안할 수 있었다. 따라서 현재 국내에선 규정되어 있지 않지만 이를 활용한다면 보다 정확한 설계를 수행할 수 있을 것으로 사료된다.
4. 본 연구에서 사용한 시료 군은 18군으로, 이 중 세립토 9개 군을 이용하여 최적 배합비를 제안하였으나, 시료군이 적어 결과 자료로 활용하기 위해서는 보다 많은 케이스의 실험을 진행하여 신뢰성 검증을 통한 보완이 필요하다고 판단된다.
5. AAS계 토양개량제를 사면보호를 위한 표층개량공법에 적용하였을 때의 침식 및 세굴에 대한 우수성

을 검토하기 위해 인공강우실험을 실시하였으며 72%이상의 세굴이 발생한 원지반에 비해 토양개량제를 사용하였을 경우 일부 미세한 국부적인 유실 이외에는 발생하지 않아 수리지질학적 요인으로부터 사면 보호 효과가 탁월한 것으로 나타났다.

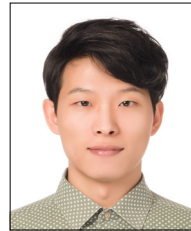
References

- [1] Y. S. Chung, M. B. Yoon, H. S. Kim, "On Climate Variations and Changes Observed in South Korea". *Climatic Change*, 66 (1-2): 151-161, Jan. 2004. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000043141.54763.f8>
- [2] K. H. Seo, L. J. Lee, A white book of Changma, p.268, KMA, 2011.
- [3] Korea Expressway Corporation, Korea Expressway Corporation open data portal, Disaster Collapse status, 2020. Available From: <http://data.ex.co.kr/portal/fdwn/view?type=ETC&num=U4&requestfrom=dataset> (accessed May 16, 2022)
- [4] T. B. Edil, H. A. Acosta, C. H. Benson, "Stabilizing Soft Fine-Grained Soils with Fly Ash", *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.18, No.2, pp.283-294, 2006.
- [5] D. G. Fredlund, H. Rahardjo, Soil Mechanics for Unsaturated Soils, John Wiley & Sons Inc., 1993. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470172759>
- [6] J. H. Kim, S. W. Park, S. S. Jeong, J. H. Yoo, "A Study of Stability Analysis on Unsaturated Weathered Slopes based on Rainfall-induced Wetting", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.18, No.2, pp.123-136, Apr. 2002.
- [7] D. H. Kang, Y. S. Kim, I. T. Hwang, J. H. Kim, "A Study on Soil Improvement Agent for Rainfall-Induced Erosion on the Soil Slope", *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, 41(3), pp.237-246, June 2021. DOI: <https://doi.org/10.12652/Ksce.2021.41.3.0237>
- [8] Y. W. Jason, H. Kaiming, S. Munira, "Remediation of Slope Failure by Compacted Soil-Cement Fill", *Ameriacn Society of Civil Engineers*, Vol.31, No.4, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000998](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000998)
- [9] I. H. Bhang, "A study on the technology related to the control and rehabilitation of slope surface erosion", Master Thesis, Jeonbuk National University. Jeonju, Korea, 2007.
- [10] Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(MLTMA), Standard for slope stability design(in Korean), 2016.
- [11] A. N. Reddy, D. Anitha, U. V. Tilak, "Performance of Alkali Activated Slag and Alkali Activated Slag + Fly Ash with various Alkali Activators", *Journal of Engineering and Technical Research*, Vol.2, Issue.1, pp.73-78, Jan. 2014.
- [12] A. Fernandez-Jimenez, J. G. Palomo, F. Puertas, "Alkali-activated slag mortars Mechanical strength

- behavior", *Cement and Concrete Research*, Vol.29, Issue.8, pp.1313-1321, Aug. 1999.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00154-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00154-4)
- [13] A. M. Rashad, Y. Bai, P. A. M. Basheer, N. B. Milestone and N. C. Collier, "Hydration and properties of sodium sulfate activated slag", *Cement and Concrete Composites*, Vol.37, No.1, pp.20-29, Mar. 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.12.010>
- [14] S. Goto, H. Fujimori, A. Hidaka, K. Ioku, "Effects of components on the rate of heat liberation of the hydration in the system of glass/gypsum/lime", *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.26, No.4, pp.771-776, Dec. 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2005.07.053>
- [15] S. H. Lee, W. K. Kim, S. H. Kang, "Hydration Mechanism of Ground Granulated Blast Furnace Slag", *Magazine of the Korea concrete Institute*, Vol.24, No.6, pp.31-34, Nov. 2012.
- [16] S. M. Kang, *Characteristics of Hydration and Hardening of Non-Portland Cement Binder Based on Blast Furnace Slag Activation*, Ph.D dissertation, Kangwon National University, Chuncheon, Korea, 2016.
- [17] S. M. Park, *A Study on the Utilizing of SRF(Solid Recovery Fuel)+Coal Ash for Alkali-Activated No-Cement Material*, Master's thesis, Jeonbuk National University, Jeonju, Korea, 2020.
- [18] S. H. Park, S. G. Seo, D. S. Cho, "A Study on the Reinforcing Effect Analysis of Aging Reservoir Reinforced with surface Stabilizer", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 21(9): 5-14, Sep. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.14481/jkges.2020.21.9.5>
- [19] W. H. Zang, *A Study on Mechanical Properties of Cement Mortar Contained the Remicon Sludge*, Master's thesis, Chungang University, Seoul, Korea, pp.6-12, 2001.
- [20] J. H. Kim, Y. S. Kim, D. S. Cho, "A Study on the Reinforcement Effect Analysis of Aging Agricultural Reservoir using Surface Stabilizer", *Korean Geosynthetics Society*, Vol.19, No.2, pp.13-21, June 2020.
DOI: <https://doi.org/10.12814/jkgss.2020.19.2.013>
- [21] S. H. Song, S. G. Seo, "A Study on the Application of Chemical Grouting Method for Aging Reservoir Reinforce according to the Change of Binder and using Water", *Journal of the Korean Institute of Rural Architecture*, Vol.21, No.4, pp.45-52, 2019.
Available From: <https://www.earticle.net/Article/A365219>
- [22] S. J. Lee, H. J. Kang, H. T. Lim, J. H. Jin, Y. S. Kim, "A Study on Application a Permeable Compacting Grout for Reservoir Impermeability Reinforcement", *Proceedings of the Korean Society of Agricultural Engineers Conference*, Vol. 2019, pp.161.
- [23] K. J. Mun, G. L. Yoon, "Case Study of Eco Binder to Soft Ground Improvement using Recycling Resources", *Geotechnical Engineering*, Vol.29, No.7, pp.16-25, 2013.
- [24] J. W. Cho, Y. S. Lee, J. Yu, S. H. Kim, "Strength Characteristics of Low Cement Ratio Soil Stabilizer Using Industrial By-products", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.22, No.4, pp.31-39, Apr. 2006.

고 건 우(Kun-Woo Ko)

[정회원]



- 2015년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 토목공학과 (박사과정)

<관심분야>

지반공학, 지구물리탐사

이 병 석(Byung-Suk Lee)

[정회원]



- 1986년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1992년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 토목강학과 교수

<관심분야>

지반공학, 지구물리탐사

여 동 준(Dong-Jun Yeo)

[정회원]



- 2017년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학사)
- 2019년 2월 : 전북대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2019년 3월 ~ 현재 : 전북대학교 토목공학과 (박사과정)

<관심분야>

지반공학, 지구물리탐사