

토사안정제를 이용한 비탈면보강 효과에 관한 연구

A Study on Slope Reinforcing Effects Using Soil Stabilizer

김 기 환¹ Kim, Ki-Hwan

김 유 태² Kim, Yu-Tae

이 승 호³ Lee, Seung-Ho

Abstract

The slope stability method using the soil stabilizer is a way to ensure that the slope stability from reinforcing method is environmentally friendly. However, the reinforcing method does not ensure slope stability for lack of research on the reinforcement effect of the mixture with soil. So the application of this method implies difficult technical issues. In this research, reinforcement effect is investigated according to the different ratio of mixture. And the optimum reinforcement depth is proposed according to the height of slope from numerical analysis. The results show that approximately the soil strength increases from two to three times. From numerical analysis, it is possible to estimate the optimum height according to the height of slope. It is anticipated that the use of soil stabilizer will increase the slope stability.

요 지

토사안정제를 이용한 비탈면 보강공법은 환경친화적이고 원지반의 강도증대를 통한 비탈면안정성을 확보하는 방법이다. 그러나 비탈면 보강공법으로 적용할 경우 현장토질과의 혼합에 따른 실제 강도증가 정도가 명확하지 못하고 보강효과에 대한 연구가 부족하여 현장에서 많이 적용되고 있지 못하고 있는 실정이다. 본 논문에서는 토사안정제 혼합율에 따른 지반강도증가 효과를 알아보고 수치해석을 통하여 비탈면 설계 적용시 비탈면 높이에 따른 적정 보강 두께를 제시하고자 하였다. 실험결과 토사안정제 함량별로 강도증가가 차이는 있지만 대략 2.0~3.0배정도 강도가 증가 효과가 있는 것으로 나타났으며 수치해석을 통해서도 비탈면 높이에 따른 적정높이를 산정할 수 있었다. 향후 비탈면 보강목적으로 토사안정제의 활용도가 높을 것으로 판단된다.

Keywords : Reinforcing effect, Reinforcing method, Shear strength, Slope stability, Soil Stabilizer

1. 서 론

기존에는 비탈면 보강을 위해 시멘트계나 석회계의 안정제(숏크리트)를 적용하여 안정성을 확보하였으나 투수성에 문제가 있어 별도의 배수공을 설치하여야 하고, 보호목적으로 추가적인 녹생토 및 씨드 스프레이를

시공하게 되어져 있다(건설교통부, 2006). 그러나 환경적인 문제와 시멘트계 상부에 녹생토 조성으로 발현 등의 문제점들이 발생하고 있다.

그러나 수화화학물질인 토사안정제를 활용한 보강토체는 현장토사와 토사안정제를 교반하여 원 비탈면에 덧붙여 비탈면의 안정을 확보하는 공법으로 개량된 토

1 정회원, 삼보기술단 지반사업부 차장 (Member, Deputy General Manager, Tunnel & Underground Facility Design, Sambo Engineering Co., LTD.)

2 정회원, 익산지방국토 관리청, 도로시설국장 (Member, Director of Road Facilities, Iksan Regional Construction Management Office)

3 정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 정교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Univ. of Sangji, shlee@sangji.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

사는 입자자체의 구조적인 변화 없이 토사자체가 투수성을 갖는 고결층으로 변화되므로 비탈면내의 지하수를 표면으로 배출할 수도 있다.

또한 적절한 수분을 흙 구조 내에 함유시키면서도 안정화된 고결층을 형성하게 되므로 건기시나 우기시 및 동절기에도 침식이나 세굴 등의 풍화작용에 저항성능을 발휘하게 되는 장점이 있다. 이런 장점으로 가까운 일본에서는 많은 연구를 통하여 여러 토사안정제를 개발 활용하여 비탈면 붕괴 위험지역의 보강에 이용하고 효과도 얻고 있는 실정이다. 그러나 국내에서는 아직까지 체계적인 연구와 개발이 없어 현장적용성에 많은 어려움을 겪고 있다.

따라서 본 논문에서는 기존 문헌조사를 통하여 관련 문헌을 수집·분석하였고, 이를 토대로 토사안정제의 혼합비율과 시공방법에 따른 강도증가를 파악하기 위하여 수해복구지역의 절토사면 현장 시험시공을 수행하고 강도측정을 하였다. 실내실험으로 원지반 토사와 토사안정제의 최적 배합비를 파악하기 위해 배합비율에 따른 일축압축강도시험과 전단시험 등을 수행하여 강도증가 효과를 검토하였으며 비탈면 수치해석을 통하여 토사 안정제의 두께에 따른 안전율 변화를 분석하였다. 실험 및 수치해석결과 토사안정제 함유량 비율에 따라 강도증가가 되어짐을 확인할 수 있었으며 수치해석결과 현장 적용시 비탈면 높이에 따른 토사안정제 두께를 어느 정도 파악할 수 있어 향후 설계시 적정 보강두께를 제시 할 수 있었다.

2. 연구에 사용된 토사안정제

2.1 토사안정제의 성분과 반응과정

토사안정제를 이용한 비탈면 토층안정공법은 일반 현장 토사에 무기 반응첨가제를 혼합하여 굴삭기나 고압취부기로 적정량의 수분을 가해 높은 비탈면의 암반층 붕괴구간, 공동(동굴과 같이 파여진 곳)이 나타나는 지점이나 안정적 토사층의 보완이 필요한 곳에 고결토층을 형성시키는 공법이다. 개량재 반응 메커니즘에 의해 표층의 강도를 증가시키고 토층 자체를 투수성이 있는 고결체로 만든다. 반응성 첨가제는 플라이애쉬(SiO_2 , Al_2O_3)가 주재료로 사용되고 석회(CaO , 산화칼슘)와 석고($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), 그리고 수산화알루미늄($2\text{Al}(\text{OH})_3$)이 부재료로 사용된다.

토층의 개량 원리는 현장토사와 수분(H_2O) 및 토사안정제의 적정배합에 의해 수화반응과 포졸란 반응이 발생하게 되는데, 수화반응시에는 주위의 수분과 흙입자내의 수분을 흡수하면서 다량의 에트링가이트(Ettringite : $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$)의 화학식을 갖는 화합물로서 생성시 32분자의 물분자를 구속하게 되므로 토양 입자의 이동을 구속하여 결합을 강화시키는 작용을 합)가 생성되어 흙입자 사이를 고결시키게 된다. 생성된 에트링가이트는 흙입자내의 포졸란(pozzolan)성분과 장기간에 거쳐 반응하면서 표토의 장기적인 강도를 유지하게 된다. 수화반응 및 고결화 하는데 소요되는 시간은 초기반응이 1~2시간, 1차 응결은 3~4시간이 소요되며 장기적으로 반응이 발생하면서 지속적 응결상태가 유지된다.

2.2 토사안정제의 특징

개량된 토사(보강토체)는 입자자체의 구조적인 변화 없이 토사자체가 투수성을 갖는 고결층으로 변화되므로 비탈면내의 지하수를 표면으로 배출할 수 있으며 적절한 수분을 흙 구조내에 함유시킬 수 있을 뿐만 아니라 안정화된 고결층을 형성하게 되므로 건기시나 우기시 및 동절기에도 침식이나 세굴 등의 풍화작용에 저항성능을 발휘하게 된다. 또한, 대상비탈면에 취부 또는 다짐 시공 후 2~4시간 정도가 지나면 1차 응결이 완료되며 안정된 강도가 발휘되므로 표면 개량 후에 곧바로 녹화공법의 적용이 가능하게 된다.

기존의 시멘트계 또는 석회계열의 보호보강공법은 자기 자신이 고화되면서 주변 흙과 부착되므로 전반적인 강도는 증가하지만, 투수성이 불량하고 식생을 위한 조건이 열악해지므로 강도증가의 목적은 달성하더라도 식생기반재로서의 활용이 떨어지는 단점이 있다. 그러나 수화화학광물질을 이용한 토사안정제는 자체적인 고화작용이 아니라 주변 흙과의 반응에 의해 표토의 고결작용을 통하여 표층 교란시 기존의 표토 상태로 환원되므로 환경적인 측면에서 식생기반재로서의 활용가능성이 높다.

김경석과 유병옥(2002)에 따르면 토사안정제로 현장의 토사를 활용하여 치환할 경우 기존의 보호공법에 비하여 토사안정제와 흙입자간 반응에 의해 입자간 부착력 증대효과와 흙 구조를 그대로 유지하게 되므로 투수성과 수분함유 기능을 유지할 수 있으며 표층안정화 후

표 1. 수화학광물질계 토사안정제와 기존 안정제(시멘트계, 석회계) 비교

구 분	수화학광물질계 토사안정제	기존 시멘트계, 석회계 안정제
PH	<ul style="list-style-type: none"> 알칼리성→중성화(7일후) 식물의 생육에 영향을 끼치지 않음 시공 후 식생이 가능 유출수도 알칼리화되지 않음 	<ul style="list-style-type: none"> 높은 알칼리성, 식물의 생육에 장애 알칼리 장애는 장시간에 걸쳐 물이나 토양에 녹아들게 되어 점차적으로 잔디 등의 식물생육에 피해가 확대
투수성	<ul style="list-style-type: none"> 개량한 토질은 단립화상태가 되므로 투수성과 배수성이 양호한 지반이 됨 	<ul style="list-style-type: none"> 시멘트계나 석회계로 고화한 경우 투수성이 불량, 물이 빠지지 않는 토질화 지중배수가 되지 않아 식물의 뿌리가 썩게 됨
강도	<ul style="list-style-type: none"> 단립화가 진행되어 균질화 되므로 재굴취가 용이 토사의 재이용이 가능하며 시간이 경과됨에 따라 주변의 토질과 융합되어 인위적인 고화상태가 아닌 자연의 지반으로 변화함 개량 후 기중기류의 주행이 가능 	<ul style="list-style-type: none"> 중장비의 주행으로 전압된 개량지반은 저질 콘크리트 정도의 강도발현 시멘트계의 경우 시공 후 기중기류의 주행이 불가능

에도 식생이 가능하다 또한 기존 시멘트계열의 토사안정제는 교란시 흙과 이질적인 재료로 분리되어 폐기물화 되지만 토사안정제를 사용할 경우에는 교란 시에는 원지반 상태와 동일상태로 환원되므로 환경적으로 문제가 발생하지 않는다(표 1).

3. 현장실험

현장 시공방법과 토사안정제의 함유량에 따른 강도증가를 파악하기 위하여 현장실험을 실시하여 분석하였다.

시험시공 현장을 적용한 시공방법은 인근의 토사와 토사안정제를 혼합한 뒤 교반다짐법과 고압 분사법으로 시공하였으며 두 공법의 차이는 다음 표 2와 같다.

표 2. 현장실험에 적용한 시공방법

교 반 다 짐 법	고 압 취 부 법
<ul style="list-style-type: none"> 비탈면높이가 낮고 경사가 완만한 경우 (H=10m 내외, 경사<1:1.0) 	<ul style="list-style-type: none"> 비탈면높이가 높거나 경사가 급한 경우 (H>10m, 경사>1:1.0)
<ul style="list-style-type: none"> 유실구간 정리 굴삭기를 이용하여 유유토와 안정제 배합 굴삭기로 포설하면서 다짐 	<ul style="list-style-type: none"> 교반기와 압축기, 고압취부기 별도 준비 교반기에 유유토와 안정제 배합 고압취부기로 비탈면표면에 취부(10kgf/cm²)
<ul style="list-style-type: none"> 현장유유토의 최대입경은 30cm이하 	<ul style="list-style-type: none"> 현장유유토의 최대입경은 5cm이하

콘 베이어벨트 토층안정제 투입	콘 베이어벨트 토층안정제 투입
<p>토 사</p> <p>↓</p> <p>굴삭기로 혼합 및 변경리</p> <p>→</p> <p>굴삭기로 포설 및 다짐</p> <p>→</p> <p>보강토체 형성</p> <p>→</p> <p>법면취부 성토</p> <p><시공모식도></p>	<p>토 사</p> <p>↓</p> <p>교반기혼합 및 압송출</p> <p>→</p> <p>고압호스 이송</p> <p>→</p> <p>보강토체 형성</p> <p>→</p> <p>법면취부 성토</p> <p><시공모식도></p>

3.1 실험방법

현장시험 위치는 최근 수해복구현장으로 절토 비탈면 시공 중 불량된 지역으로 경사도 1:0.5~1:0.7 범위의 풍화암 사면이다. 시공방법은 사면에 고압취부성과 교반다짐방법으로 현장시료에 토사안정제의 비율을 변화시켜 시공한 후 시간경과에 따른 보강토체의 강도증가를 확인하였다.

현장의 강도측정은 휴대용 토양경도계(Soil Hardness Tester)를 이용하여 비탈면을 각 9회씩 측정, 평균하여 토양 경도지수(mm)를 구하여 강도증가를 검토하였다(그림 1).

3.2 실험결과

토사안정제 적용전의 토양경도지수는 16.2mm으로 나타났다. 현장시료에 토사안정제 5%를 혼합시켜 다짐

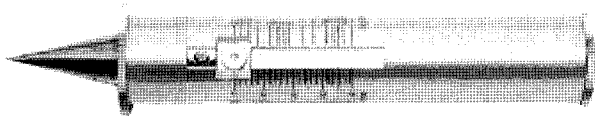


그림 1. Soil Hardness Tester(상) 및 현장경도측정(하)

용하여 분사하여 적용한 후의 토양경도지수는 29.7mm, 토층안정제 7%를 혼합시켜 분사하여 적용한 경우는 30.8mm으로 개선된 것으로 나타났다.

표 3을 이용하여 토양경도지수와 강도와의 관계를 환산해 보면 시료에 토사안정제 5%를 혼합시켜 다짐하여 적용한 후 토양강도는 30kg/cm², 현장시료에 토사안정제 5%를 혼합시켜 고압취부기기를 이용하여 분사하여 적용한 후의 토양강도는 34kg/cm², 토층개량재 7%를 혼합시켜 분사하여 적용한 경우는 45kg/cm²로 모두 토층개량재 적용전의 토양강도 3.5kg/cm²보다 각각 8.5배, 9.7배, 약 12.8배로 개선되었다(표 4). 토사안정제의 5%함유일 때 강도증가 경향은 시공방법을 달리하여도 시간에 따른 강도증가는 유사하게 증가하는 것을 알 수 있었다(그림 2).

하여 시공한 후 48시간 토양경도지수는 29mm으로 개선되었다. 토사안정제 5%를 혼합시켜 고압취부기기를 이

4. 시간경과에 따른 강도효과

실내실험은 토사안정제의 혼합율과 경과시간에 따른

표 3. 토양경도계의 경도지수와 강도와의 대조표(표준형)

지수	이론치	근사값	지수	이론치	근사값	지수	이론치	근사값
mm	kg/cm ²	kg/cm ²	mm	kg/cm ²	kg/cm ²	mm	kg/cm ²	kg/cm ²
1.0	0.08	0.1	16.0	3.49	3.5	29.0	30.14	30
2.0	0.17	0.2	16.5	3.16	3.8	29.5	33.63	34
3.0	0.28	0.3	17.0	4.04	4.0	30.0	37.73	38
4.0	0.39	0.4	17.5	4.35	4.3	30.5	42.50	43
5.0	0.51	0.5	18.0	4.68	4.7	31.0	48.13	48
5.5	0.58	0.6	18.5	5.03	5.0	31.5	54.83	55
6.0	0.65	0.6	19.0	5.42	5.4	32.0	62.88	63
6.5	0.73	0.7	19.5	5.84	5.8	32.5	72.66	73
7.0	0.81	0.8	20.0	6.29	6.3	33.0	84.70	85
7.5	0.90	0.9	20.5	6.78	6.8	33.5	99.70	100
8.0	0.93	1.0	21.0	7.32	7.3	34.0	118.75	120
8.5	1.08	1.1	21.5	7.90	7.9	34.5	143.45	140
9.0	1.18	1.2	22.0	8.54	8.5	35.0	176.05	180
9.5	1.28	1.3	22.5	9.24	9.2	35.5	220.49	220
10.0	1.40	1.4	23.0	10.00	10.0	36.0	282.95	280
10.5	1.52	1.5	23.5	10.86	11.0	36.5	347.70	350
11.0	1.64	1.6	24.0	11.79	12	37.0	516.97	500
11.5	1.78	1.8	24.5	12.82	13	37.5	754.53	800
12.0	1.93	1.9	25.0	13.97	14	38.0	1194.67	1,200
12.5	2.08	2.0	25.5	15.25	15	39.0	4904.42	5,000
13.0	2.24	2.2	26.0	16.68	17	40.0	∞	∞
13.5	2.42	2.4	26.5	18.53	18			
14.0	2.62	2.6	27.0	20.09	20			
14.5	2.80	2.8	27.5	22.12	22			
15.0	3.02	3.0	28.0	24.45	24			
15.5	3.25	3.2	28.5	27.09	27			

표 4. 현장시험 시공지의 공법 별 토양 경도(관입량 평균치적용)

시간	교반다짐법		고압취부법			
	혼합비 5%		혼합비 5%		혼합비 7%	
	관입량(mm)	강도(kg/cm ²)	관입량(mm)	강도(kg/cm ²)	관입량(mm)	강도(kg/cm ²)
0	평균 16.2	3.5	평균 16.2	3.5	평균 16.2	3.5
30분	평균 19.6	5.8	평균 16.7	3.8	평균 16.5	3.8
1시간	평균 21.3	7.9	평균 17.8	4.7	평균 18.9	5.4
2시간	평균 23.8	12	평균 20.1	6.3	평균 21.5	7.9
3시간	평균 25.1	14	평균 22.1	8.5	평균 23.8	12
4시간	평균 26.2	17	평균 23.0	10	평균 24.3	13
48시간	평균 29.0	30	평균 29.7	34	평균 30.8	45

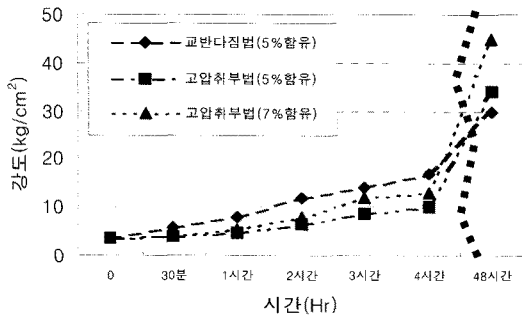


그림 2. 현장시험의 배합 별 강도증가

실제 강도효과를 알아보기 위해 직접전단강도시험과 일축압축시험을 실시하였다. 실내시험은 시험시공현장에서 채취한 현장시료를 사용하였으며 기본적인 물성 시험을 실시한 후 수화화합물질인 토사안정제와 0%, 3%, 5%, 7%로 혼합하여 공시체를 제작하고 시간경과에 따라 시험을 실시하였다.

4.1 현장시료의 기본물성시험

기본물성시험으로는 함수비시험과 입도분포시험을 실

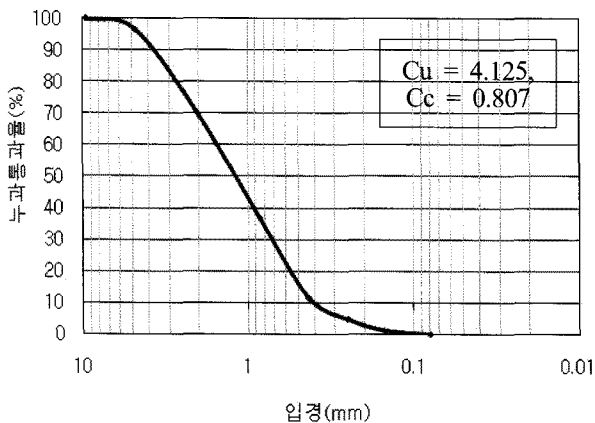


그림 3. 현장에서 채취한 시료의 입도분포 곡선

시하였다. 함수량 시험 결과 현장시료의 평균 함수비는 14%, No.200체 통과율 0.1%로 나타났고, 입도시험 결과는 그림 3과 같다.

4.2 직접전단시험

수화화합물질인 토사안정제 보강토체를 이용한 비탈면보강 효과를 검토하기 위해 실내에 반입된 시료를 KS F 규격에 따라 자동직접전단시험기로 시험을 실시하였다(그림 4). 현장시료와 토사안정제를 각각 혼합율 0%, 3%, 5%, 7% 별로 혼합 후 시간에 따라 각각 0분, 30분, 60분, 120분, 180분, 240분, 48시간이 흐른 후 직접전단 강도 시험을 실시하여 점착력과 마찰각을 구하였다. 시험결과는 아래 표 5와 같다.

흙의 점착력과 내부 마찰각을 알기 위하여 직접전단 시험을 실시한 결과 혼합율이 3%일 때 48시간의 경우 0분(초기)의 경우보다 점착력)은 약 3.4배가 개선되었으며, 마찰각은 약 1.2배가 개선되었다. 혼합율이 5%일 때 48시간의 경우 0분의 경우보다 점착력은 약 11배가 개선되었으며, 마찰각은 크게 변함이 없는 것으로 나타났

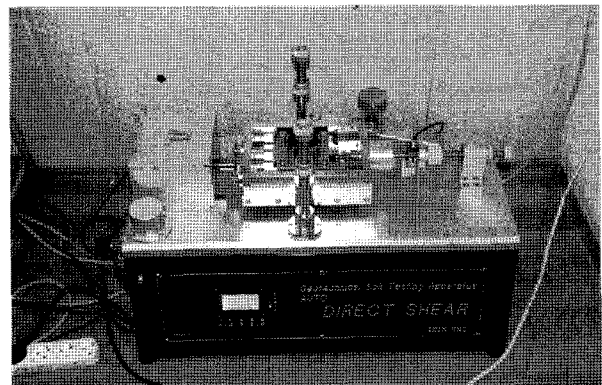


그림 4. 실내시험에 적용된 자동직접전단시험기

표 5. 직접전단실험 결과

혼합물	0%		3%		5%		7%	
	점착력 c (kgf/m ²)	마찰각 ψ (°)	점착력 c (kgf/m ²)	마찰각 ψ (°)	점착력 c (kgf/m ²)	마찰각 ψ (°)	점착력 c (kgf/m ²)	마찰각 ψ (°)
0분(초기)	0.009	20.50	0.031	19.08	0.049	21.99	0.055	17.74
30분	0.006	20.35	0.053	21.70	0.051	22.09	0.080	22.53
60분	0.005	19.54	0.064	19.23	0.054	22.73	0.083	22.44
120분	0.011	20.10	0.081	20.10	0.057	21.65	0.097	21.90
180분	0.018	19.44	0.085	21.80	0.081	23.55	0.124	21.75
240분	0.014	21.50	0.097	20.90	0.084	22.48	0.133	21.94
48시간	0.008	19.69	0.106	23.55	0.108	20.95	0.248	24.60

※ 현장시료와 토사안정제를 각각의 혼합을 별로 실내시험을 실시한 것임.

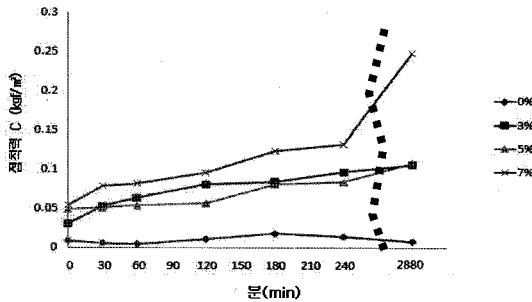


그림 5. 혼합을 별 혼합 후 시간 흐름에 따른 점착력변화

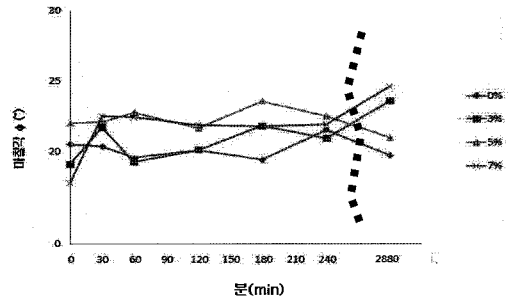


그림 6. 혼합을 별 혼합 후 시간 흐름에 따른 마찰각 변화

다. 마사토와 토사안정제의 혼합율이 7%일 때 48시간의 경우 0분의 경우보다 점착력은 약 24.8배로 크게 개선되었으며, 마찰각은 1.2배로 증가되는 것으로 나타났다. 따라서 토사안정제의 함유량이 많을수록 점착력은 크게 증가하는 경향을 나타냈고 내부마찰각의 변화량은 크게 변화를 나타내지 않음을 알 수 있었다(그림 5, 6).

4.3 일축압축강도 시험

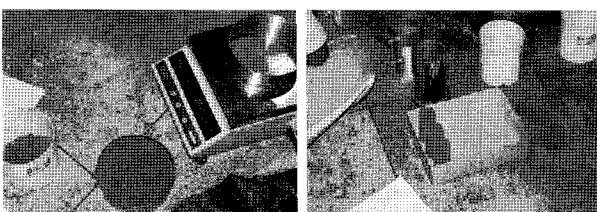
일축압축시험은 혼합율과 혼합 후 시간에 따른 실제 흙의 강도 변화 특성을 파악하기 위해, 현장시료와 토사안정제를 각각 혼합율 0%, 3%, 5%, 7% 별로 일축압축강도에 필요한 공시체를 제작한 후 혼합 후 경과시간을 각각 0분, 30분, 60분, 120분, 180분, 240분, 48시간으로

하여 일축압축시험기로 실험하였다(그림 7, 8). 그 결과는 표 6과 같다.

일축압축시험 결과 현장시료와 토사안정제의 혼합율이 3%일 때 48시간 후 일축압축강도가 0.39kgf/cm²로 0분 일 때 보다 일축압축강도가 약 2.2배 증가하는 것으로 나타났다.

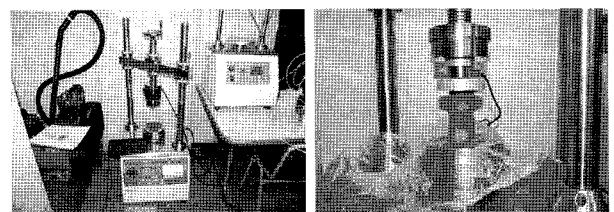
현장시료와 토사안정제의 혼합율이 5%일 경우 48시간 후 일축압축강도가 0.52kgf/cm²로 0분 일 때 보다 일축압축강도가 약 2.5배 증가하는 것으로 나타났다.

현장시료와 토사안정제의 혼합율이 7%일 경우는 48시간 후 일축압축강도가 0.60kgf/cm²로 0분 일 때 보다 일축압축강도가 약 2.9배 증가하는 것으로 나타났다. 혼합율이 많을수록 경과시간이 길수록 강도증가가 두렷이 나타났다(그림 9).



(A) (B)

그림 7. 공시체 제작과정



(A) (B)

그림 8. 일축압축시험기와 공시체 파괴 후

표 6. 일축압축실험 결과

구분	습윤단위중량(g/cm ³)	평균 함수비w(%)	간극비 _e	포화도S(%)	일축압축강도(kg/cm ²)	
0%	0분(초기)	1.61	12.5	0.62	53.8	0.17
	30분	1.58	11.9	0.81	39.2	0.16
	60분	1.64	13.2	0.78	45.2	0.15
	120분	1.63	10.3	0.82	33.5	0.19
	180분	1.65	12.1	0.71	45.5	0.18
	240분	1.62	11.8	0.76	41.5	0.16
	48시간	1.60	9.9	0.72	36.7	0.15
3%	0분(초기)	1.64	8.5	0.69	33.0	0.17
	30분	1.66	9.7	0.56	46.4	0.18
	60분	1.62	9.2	0.68	36.3	0.22
	120분	1.66	7.4	0.52	38.1	0.26
	180분	1.65	8.2	0.62	35.5	0.31
	240분	1.66	8.5	0.63	36.2	0.33
	48시간	1.64	8.8	0.55	42.9	0.39
5%	0분(초기)	1.69	9.2	0.72	34.0	0.20
	30분	1.72	8.5	0.69	32.8	0.24
	60분	1.67	7.4	0.71	27.7	0.32
	120분	1.71	9.1	0.72	33.6	0.40
	180분	1.70	8.8	0.68	34.4	0.43
	240분	1.66	8.2	0.69	31.6	0.45
	48시간	1.68	8.2	0.66	33.1	0.52
7%	0분(초기)	1.73	7.6	0.54	38.0	0.20
	30분	1.72	6.5	0.77	39.0	0.23
	60분	1.75	7.4	0.81	35.7	0.29
	120분	1.71	7.1	0.83	41.7	0.36
	180분	1.75	7.6	0.52	39.5	0.47
	240분	1.76	6.4	0.48	36.0	0.53
	48시간	1.71	6.3	0.40	42.5	0.60

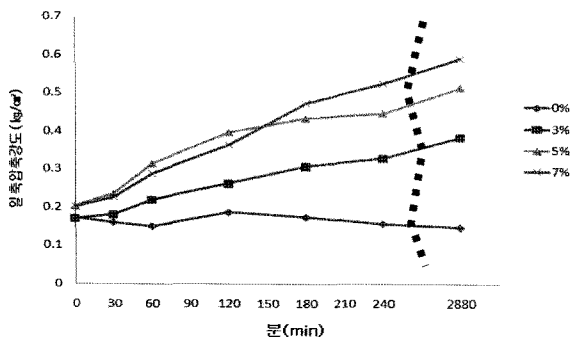


그림 9. 혼합율(0%, 3%, 5%, 7%)과 혼합 후 시간 흐름에 따른 일축 압축강도

5. 한계평형해석을 통한 토사안정제의 보강효과

5.1 검토방법

토사안정제의 안정해석은 비탈면안정에 대한 범용

한계평형 해석프로그램인 TALREN97 프로그램을 이용하였고, 안정해석 시 불안정 비탈면을 대상으로 원지반의 표면에 강도가 큰 토사안정제와 혼합한 시료로 보강하여 비탈면의 안정성을 확보하는 것으로 가정하여 해석하였다. 점성토와 사질토로 대표되는 토사비탈면에 대해 주요 인자를 변경하여 한계평형해석을 수행하였으며, 대표단면에 대하여 건기 및 우기조건 별로 검토하였다. 보강토체(토사+토사안정제)를 기존의 계단식옹벽을 대체할 목적으로 검토함으로 가정된 붕괴형상을 따라 붕괴면을 보강토체로 채운 후 비탈면 전면에 일정두께의 전면 보강부를 별도로 모델링하여 안전율을 산정하였다. 비탈면의 안정성이 확보되는 기준안전율은 건기조건 시 SF = 1.5를 적용, 전면보강부의 보강토체 두께를 증감하며 적정 보강두께를 산정하였다. 그 결과를 바탕으로 붕괴비탈면에 대하여 토사안정제로 보강 시 필요 보강두께를 산정하기 위한 간편식을 제안하였다.

이 경우 해석에 사용한 주요변수들에 대해 정리하면 다음과 같다.

5.1.1 해석에 적용된 강도정수

지반조건은 균질하다고 가정하였으며, 암반의 경우 불연속면을 따른 파괴, 토사의 경우 원호파괴로 가정하였다. 이 경우 파괴면의 강도정수는 암반은 절리면 강도정수를, 토사는 지반의 강도정수를 따른다고 가정하였다. 파괴면의 강도조건은 비탈면안정해석에 매우 민감한 변수이므로 사질토, 점성토로 구분하여 표 7, 8을 참고하여 하한치에 가깝게 강도정수를 결정하였다. 암반의 경우 국내분포비율이 가장 높은 화강암의 하한 값을 적용하였으며, 점성토의 경우 점착력은 심도에 따라 증가($\Delta c = 0.2tf/m^2/m$)한다고 가정하고 $c = 0.5 \sim 1.9tf/m^2$ 로 적용하였다. 본 해석에서 가정한 지반조건 별 강도정수는 사질토 강도정수 : $\psi = 25^\circ, c = 0$, 점성토 강도정수 : $\psi = 15^\circ, c = 0.5 \sim 1.9tonf/m^2$ 으로 적용하였다.

5.1.2 지하수위 조건

건기와 우기로 나뉘서 검토하였으며, 한국도로공사(1996)에 제시된 값(GL-3.0m에 지하수위 위치)을 적용하였다.

5.1.3 토사안정제의 강도

보강토체는 현장토사와 토사안정제를 교반하여 사용하는 것으로 강도는 현장토사의 특성 및 조건, 배합비

등에 따라 달라지므로 보강토체의 강도증가를 가정하였으며, 임의의 대표단면을 선정하여 보강토체의 두께 변화에 따른 효과를 검토하였다(보강토체의 강도 : $\psi = 30^\circ, C = 10tonf/m^2$).

5.1.4 비탈면 형상 및 파괴규모

본 검토 시 파괴면의 형상은 원호파괴로 가정하였다. 또한, 비탈면 절취구배는 표준구배인 1:1.5로 가정하였으며, 파괴면의 규모는 일반적인 계단식옹벽의 시공규모를 고려하여 H=3~7m정도로 한정하였고 안전율을 1.5로 할 경우에 필요 두께(t)를 검토하였다(그림 10).

5.1.5 민감도 분석을 위한 변수 요약

붕괴비탈면에 대한 토사안정제로 보강할 경우 필요 보강두께를 산정하기 위한 한계평형검토 시 각종 영향 변수 중 현재 일반적인 시공구배, 과거 붕괴유형, 기타 검토여건 등을 고려하여 다음과 같이 각각 주요 변동변

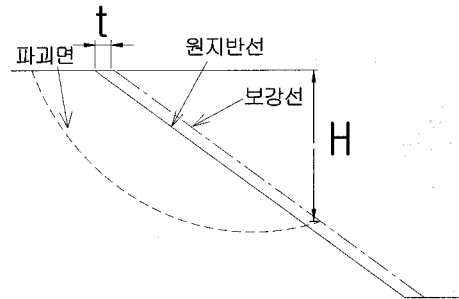


그림 10. 토사비탈면의 파괴 모식도

표 7. 자연지반의 개략적인 토질정수(한국도로공사, 2002)

흙의 종류	재료의 상태	단위중량 (t/m ³)	내부 마찰각 ψ (°)	점착력 C(t/m ²)	분류기호 (통일분류)
자갈	밀실하고 입도가 좋음	2.0	40	0	GW, GP
	밀실하지 않고 입도가 나쁨	1.8	35	0	
자갈질 모래	밀실함	2.1	40	0	GW, GP
	밀실하지 않음	1.9	35	0	
조립질 모래	밀실하고 입도가 좋음	2.0	35	0	SW, SP
	밀실하지 않고 입도가 나쁨	1.8	30	0	
세립질 모래	밀실함	1.9	30	3이하	SM, SC
	밀실하지 않음	1.7	25	0	
점성토	굳음(손가락으로 강하게 눌러 조금 들어감)	1.8	25	5이하	ML, CL
	약간 무름(중간정도의 손가락 힘으로 들어감)	1.7	20	3이하	
	무름(손가락이 쉽게 들어감)	1.7	20	1.5이하	
점토 및 실트	굳음(손가락으로 강하게 눌러 조금 들어감)	1.7	20	5이하	CH, MH ML
	약간 무름(중간정도의 손가락 힘으로 들어감)	1.6	15	3이하	
	무름(손가락이 쉽게 들어감)	1.4	15	1.5이하	

표 8. 토사비탈면의 고정변수, 변동변수(한계평형 해석 검토 조건)

구분	영향 변수	세부 사항
고정 변수	비탈면 높이	10m
	비탈면 구배	1:1.5
	지하수위	건기 시
	파괴형상	원호파괴
	토사안정제 강도	$\Phi = 30^\circ, c = 10t/m^2$
변동 변수	토사층 강도	점성토 : $\psi = 15^\circ, c = 0.5 \sim 1.9t/m^2$, 사질토 : $\psi = 25^\circ, c = 0$
	파괴구간 높이	3m, 4m, 5m, 6m, 7m

수를 두 가지로 선정하여 검토하였다(표 8).

5.2 한계평형해석 결과 분석

5.2.1 보강두께 결정을 위한 분석

안전율 1.5를 기준으로 한 만족하기 위한 보강체 두께를 결정하기 위한 해석결과, 파괴면 높이에 따른 토사안정제의 두께결정은 표 9, 그림 11과 같이 파괴면의 크기에 따라 두께도 증가하는 것으로 나타났다.

5.2.2 지반종류별 민감도 분석결과

또한 지반종류별 파괴면 높이에 따른 보강두께 민감도는 점성토 지반의 경우는 $y=0.26x-0.86$ 의 분석식을 얻을 수 있었으며 상관계수(R)는 0.899로, 사질토의 경우에

는 $y=0.26x-0.54$ 의 분석식을 얻을 수 있었으며 상관계수(R)는 0.977로 파괴면 높이에 따른 상관계수는 최소 0.899로 상관성이 매우 높은 것으로 분석되었다.

검토결과 상관도와 선형분석 시 기울기는 동일하나 절편이 다소 차이가 발생하므로(Δ 기울기 = $0.26/0.26 =$

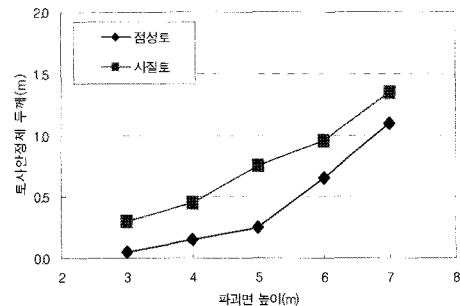


그림 11. 토사비탈면 파괴면 높이에 따른 토사안정제 보강두께

표 9. 파괴면 높이에 따른 토사안정제 두께 산정 결과

구분	H=3m	H=4m	H=5m	H=6m	H=7m
점성토 지반 : $\psi = 15^\circ, c = 0.5 \sim 1.9t/m^2$	$t = 0.05m$	$t = 0.15m$	$t = 0.25m$	$t = 0.65m$	$t = 1.10m$
사질토 지반 : $\psi = 25^\circ, c = 0t/m^2$	$t = 0.3m$	$t = 0.45m$	$t = 0.75m$	$t = 0.95m$	$t = 1.35m$

표 10. 비탈면 파괴면 높이에 따른 토사안정제 보강두께

토사안정제 보강두께 분석 결과(사질토 분석)			토사안정제 보강두께 분석 결과(점성토 분석)		
구분	50% 신뢰수준	84% 신뢰수준	구분	50% 신뢰수준	84% 신뢰수준
A	0.0343	0.0410	A	0.0009	0.00135
B	1.9562	1.9562	B	3.6222	3.6222
R	0.999	0.999	R	0.995	0.995
<p>R : 상관계수 표준오차 : 0.0701 TINV = 1.104 n(표본수) = 5</p>			<p>R : 상관계수 표준오차 : 0.1592 TINV = 1.104 n(표본수) = 5</p>		

1.0, Δ 절편=0.86/0.54=1.59) 사질토지반과 점성토지반에 별도로 토사안정제 보강 두께 식을 산정하였다. 보강 두께를 파괴면 높이에 따른 거듭제곱식으로 제시함으로써 번역 밖의 값은 외삽법에 의해 산출이 가능하다.

회귀분석 시 표본수가 30이하로 매우 적으므로 t-분포 함수에 의해 상수A와 지수B를 산정하였으며, 표준오차를 고려하여 50% 및 84% 신뢰수준식을 산정하였다. 이 경우 사질토지반과 점성토지반에 대해 각각 회귀분석 결과 상관계수 $R=0.982\sim0.995$, 결정계수 $R_2=0.964\sim0.990$ 로 매우 높은 적합성을 보여주었다(표 11).

$$\text{토사안정제 보강두께 식 : } Y = A \cdot X^B \quad (1)$$

(Y : 보강두께(m) X : 파괴면 높이(m), A : 보강상수, B : 보강지수)

사질토 : $0.0410 \cdot X^{1.9562}$, 점성토 : $0.00135 \cdot X^{3.6222}$

5. 결론

수화합물질인 토사안정제를 현장에 시험시공과 실내 강도실험을 통하여 토사안정제의 혼합율과 시간에 따른 강도 증가를 알아보았다. 또한 수치해석을 통하여 붕괴가 발생한 비탈면을 토사안정제로 보강하는 경우에 대한 적용성 검토를 하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 토사안정제 혼합율에 따른 강도증가를 검토한 결과, 마찰각과 점착력의 변화에 대한 상관성은 매우 높으나, 마찰각에 비해 점착력의 기울기가 3~20배 이상 증가되어 토사안정제의 강도변화에 따른 보강두께의 변화는 점착력에 의존함을 알 수 있었다.
- (2) 현장 시험시공을 실시하여 토양경도계를 이용하여 토양강도를 측정된 결과, 토사안정제 적용전의 원지반 토양강도 보다 현장시료에 토사안정제 5%를 혼합시켜 다짐하여 적용한 후 토양강도는 약 8.5배, 현장시료에 토사안정제 5%를 혼합시켜 고압취부기기를 이용하여 분사하여 적용한 후의 토양강도는 약 9.7배, 토사안정제 7%를 혼합시켜 분사하여 적용한 경우는 약 12.8배로 개선되었다.
- (3) 직접전단시험을 실시한 결과, 토사안정제를 적용하지 않았을 때 보다 점착력은 3.4~24.8배, 마찰각은

1.0~1.2배로 개선되어 현장시료와 토사안정제의 혼합율이 높아질수록 점착력은 크게 증가하는 것으로 나타났으며, 마찰각은 다소 증가 하는 것으로 나타났다.

- (4) 일축압축시험을 실시한 결과, 토사안정제를 적용하지 않았을 때 보다 약 2.2~2.9배로 혼합율이 높아질수록 강도가 크게 증가되는 것으로 나타났다.
- (5) 회귀분석 시 파괴면 높이변화에 따른 상관성이 매우 높게 나타났다. 지반의 종류와 파괴구간 높이를 변수로 10종류의 해석결과를 바탕으로 파괴면 높이변화에 따른 토사안정제의 보강두께에 대해 표준오차를 고려한 신뢰수준 84%의 회귀분석 식을 산정하였다. 이 경우 상관계수 $R=0.982\sim0.995$, 결정계수 $R_2=0.964\sim0.990$ 로 매우 높은 적합성을 보여주었다.
- (6) 비탈면 높이에 따른 적정 보강두께는 사질토 비탈면의 경우 : $Y = 0.0410 \cdot X^{1.9562}$, 점성토 비탈면의 경우 $Y = 0.00135 \cdot X^{3.6222}$ 임을 결정 할 수 있었다(Y : 토사안정제 보강두께(m), X : 파괴면 높이(m)).
- (7) 따라서, 토사안정제의 혼합율에 따라 강도증가가 전반적으로 2~3배가 되는 것으로 나타났으며 비탈면 보강 목적으로 설계시 적용 가능한 관계식을 제시하였다.

감사의 글

본 논문은 상지대학교 2009년도 교내 연구비의 지원에 의하여 수행되었습니다. 상지대학교 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 논문작성을 위해서 각종자료를 지원해 주신 (주) 세승(아그론) 이상정 대표께도 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김경석, 유병욱 (2002) "토사안정제를 이용한 절토사면의 침식 및 유실방지 사례", pp.1-150.
2. 건설교통부 (2006) "비탈면 설계기준", pp.117-128.
3. 한국도로공사 (1996) "도로설계실무편람", 토공 및 배수 pp.406-9~406-28.
4. 한국도로공사 (2002) "도로설계요령", 토공 및 배수, pp.129-132.

(접수일자 2009. 9. 17. 심사완료일 2010. 9. 30)