

쏘일네일과 강재스트립으로 보강된 복합보강토옹벽 시스템의 사례연구

A Case Study on the Hybrid Reinforcement Retaining Wall System Reinforced by Soil Nail and Steel Strip

천 병 식¹ Chun, Byung-Sik

김 홍 택² Kim, Hong-Taek

조 현 수³ Cho, Hyun-Soo

도 종 남⁴ Do, Jong-Nam

Abstract

The reinforced earth wall, which is able to improve the strength of soil highly, is required in case of supporting high surcharge load such as high speed rail way, high embankment road, and massive reinforced earth wall in a mountainous area. And also, it is continuously required that the method is able to minimize the amount of excavated soil on account of environmental issue, boundary of land, etc., on excavation site. However, because the required length of reinforcement should be 60~80% of the height of reinforced earth wall for general reinforced earth wall, in fact the reinforced earth wall is hardly applied on the site of cut slope. In this paper we studied the design and construction cases of hybrid reinforcement retaining wall system combined with steel strips and soil nails, connecting the reinforced earth wall reinforcements to the slope stability reinforcements (soil nails) to ensure sufficient resistance by means of reducing the length of reinforcements of reinforced earth wall. And the feasibility of hybrid reinforcement retaining wall system, suggested by real data measured on site, is also discussed.

요 지

지반의 지지력을 증가시키는 보강토공법은 일반적으로 산악지대에서 시행되는 건설공사에 쓰여지는데, 보강토 옹벽의 높이가 일반 평지의 성토구조물보다 상당히 높아지며, 성토도로의 시공이나 고속철도 등과 같은 높은 상재하중을 지지하여야 할 경우에는 지반강성을 크게 향상시킬 수 있는 공법의 적용이 요구된다. 또한, 절토공사 현장의 환경문제 및 대지경계 등의 이유로 원지반의 절취량을 최소화 할 수 있는 공법이 지속적으로 요구되고 있으며, 이를 만족하기 위한 많은 공법들이 개발되고 있는 실정이다. 그러나, 일반적인 보강토 옹벽의 경우 옹벽 높이의 60~80%정도에 해당되는 보강재 길이가 요구되어 절토현장에 적용하는데 어려움이 있다. 또한, 근래에 들어 용지경계 확보와 성토구조물의 안정성 확보 등 제한적인 범위에서 적용되던 보강토 옹벽공법이 추가 보강재를 병행, 사용함으로써 절토공사 현장에도 점차 적용되는 사례가 증가하고 있다. 본 연구에서는 보강토 옹벽의 보강재 길이를 줄이는 대신에 쏘일네일링 공법과 같은 사면보강공과 연결하여 충분한 저항력을 확보할 수 있도록 쏘일네일과 강재스트립으로 보강된 복합보강토옹벽 시스템의 설계 및 시공사례를 소개하고 실제 현장에서 측정된 계측자료를 통해 복합보강토옹벽 시스템의 적용 가능성을 검토하였다.

Keywords : Hybrid retaining wall system, Soil nail, Steel strip

1 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

2 정회원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hongik Univ.)

3 정회원, 두산건설 토목사업본부 부장 (Member, General Manager, SOC Business Team, Doosan Construction & Engrg.)

4 정회원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ., donamtech@empal.com, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 6월 30일까지 그 내용을 확화로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

보강토 공법이 체계적인 이론으로 정립된 1960년대 후반부터 구조적 안정성, 시공성, 경제성, 우수한 내진특성 등의 장점을 가진 보강토 옹벽 공법이 전 세계적으로 널리 사용되고 있다. 영국의 BSI(1995), 미국의 FHWA(Elias 등, 2001)와 NCMA(1997), 홍콩의 GEO(2002) 등에서는 보강토 옹벽의 설계에 관한 기준을 정립하여 보급하고 있으며, 이 중 영국의 BS 코드(BSI, 1995)와 미국의 FHWA 지침(Elias 등, 1999, 2001), 홍콩의 GEO(2002) 등에서는 보강토 옹벽뿐만 아니라 보강사면에 대한 설계법도 제시되어 있다.

국내의 경우 1970년대 말에 보강토 공법이 소개되어 1980년대 중반부터 보강토 옹벽이 본격적으로 보급되기 시작하였으며, 최근에 환경문제에 대한 관심이 높아지면서 환경친화적인 토류구조물로서의 보강 성토사면의 시험시공 및 현장적용성에 대한 연구가 진행되었다(김홍택 등, 2002). 보강토 공법에 대한 연구는 대부분 보강토 옹벽에 집중되어 보강토 옹벽의 경우에는 그 설계법이 비교적 잘 정립되어 있으나, 보강 성토사면의 경우에는 다양한 설계법이 실무에 적용되고 있다. 그 예로는 Ingold(1982), Jewell 등(1984), Schmertmann 등(1987), Leshchinsky 등(1989), Jewell(1990), Leshchinsky(1997a, b) 등의 연구를 들 수 있으며, 서로 상이한 가정에 근거하여 각자의 연구결과를 제안하였다. 예를 들면, Ingold(1982), Ruegger(1986) 등은 가상 파괴면을 원호로 가정하여 모멘트 평형방정식을 사용하였으며, Schmertmann 등(1987)과 Jewell(1990) 등은 가상파괴면을 한 개 또는 두 개의 직선으로 가정하고 힘의 평형방정식에 근거하여 보강 성토사면 안정해석법을 제시하였다. 또한, Leshchinsky 등(1989, 1997a, 1997b)은 가상활동면의 형상을 대수나 선으로 가정하였다. 국내의 경우 주로 보강재의 인발 특성에 관련된 연구가 조삼덕 등(1995), 김상규 등(1996) 및 김홍택 등(1999, 2002)에 의해 수행된 바 있으며, 강그리드의 거동 특성에 대한 연구가 홍원표 등(2001)에 의해 수행된 바 있다.

Soil Nailing 공법은 1972년 프랑스에서 철도사면의 보강에 최초로 시공한 이후 그 적용이 점차 확대되어 국내에서도 적용실적이 크게 증가하고 있는 실정이다. 독일의 Stocker 등(1979)은 기존의 사면안정해석법을 수정하여 보강된 토체와 보강되지 않은 토체에 대한 활동면을 두개의 직선형태로 가정한 한계평형해석법을

발표하였으며 미국에서는 종전의 버팀굴착공법(braced cuts)대신 Shen 등(1981)에 의해 엄지말뚝과 버팀대를 사용하여 네일을 이용한 지반 보강 방식의 'Lateral Earth Support System'을 개발하고, 대규모 모형실험을 통해 파괴면의 형상이 벽체 최하단을 통과하는 곡선형태임을 밝힌 바 있다. 또한, 프랑스의 Schlosser(1982)는 보강재의 인장력, 전단력 및 휨강성 등에 대한 영향을 모두 고려한 일반적인 해석을 시도하였다. 실험적 연구로는 Schlosser(1993)가 보강재의 인발실험을 통해 보강재와 주변지반 사이에서 발휘되는 마찰계수를 측정하였고 Gassler와 Gudehus(1983)는 상재하중을 정적 및 동적으로 변화시켜 이에 대한 영향을 분석하였다. 또한, Guilloux와 Schlosser(1982)는 많은 모형실험을 통해 벽체 최상단에서 발생하는 전면판의 변위는 벽체높이의 0.3%를 초과하지 않는 것이 안전하다고 보고하였다. 국내 연구로는 김홍택 등(1995)이 실외시험과 수치해석 프로그램으로 굴착 시 최대 수평변위를 예측하는 기법을 제시한 바 있으나, 지금까지의 쏘일네일링 공법에 관련된 제안이론 등은 아직까지 검증할 만한 현장계측자료가 부족한 실정으로 제안된 해석법 자체가 극히 한정된 경우에만 적용성을 가지므로 다각적인 검증이 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 쏘일네일과 강재스트립으로 보강된 복합보강토옹벽 시스템의 현장적용성을 공학적으로 규명하기 위하여 복합보강토옹벽 시스템이 적용된 보강재의 공학적 특성 평가를 실시하였고, 실제 도로현장을 대상으로 시험시공을 실시하여 복합보강토옹벽 시스템의 거동특성을 파악하였다. 이를 위해 지중경사계, 토압계, 층별침하계 등의 각종 계측기를 매설하여, 시공 중 및 시공 후의 작용토압, 지중침하특성 등의 거동특성을 분석하였다.

2. 쏘일네일과 강재스트립으로 보강된 복합보강 토옹벽 시스템

2.1 보강토공법

보강토 공법은 압축에 비하여 상대적으로 인장에 취약한 흙의 단점을 보완하기 위하여 지반 내부에 보강재를 포설함으로써 흙과 보강재가 접하고 있는 경계면에서의 마찰특성과 보강재 자체의 인장특성에 의하여 흙과 보강재가 포함된 전체적인 전단강도 및 지반의 지지

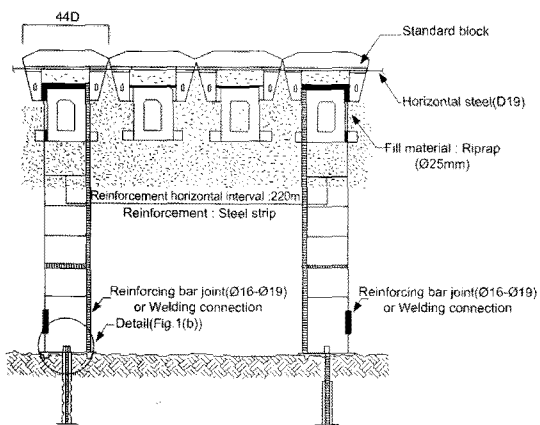
력 등을 증진시키는 공법이다. 일반적으로 보강토 옹벽의 경우, 강제 혹은 토목섬유로 구성된 보강재를 포설하여 뒤채움 흙과 함께 보강체를 구성한다. 최근 우리나라에서는 지오그리드를 포함한 연성보강재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나, 상당한 높이의 보강토 옹벽이 요구되는 산악지대 혹은 고속철도와 같은 비교적 큰 상재하중을 지지하여야 할 경우 등은 지반 지내력을 비교적 크게 향상시킬 수 있는 보강토의 적용이 요구된다. 또한, 토목섬유를 보강재로 이용한 보강토 공법의 경우 보강토 옹벽 축조과정에서 유발되는 수평력이 매우 크기 때문에 보강재와 흙 사이에서 유발되는 인발변위 및 보강재 자체의 인장변위에 의한 수평변위의 대부분이 시공 도중에 발생하고, 성토가 진행될수록 수평변위는 누적된다. 이러한 변형특성은 토목섬유 보강재의 장기적인 크리프특성 및 온도에 따른 신율의 차이 등에 기인하여 옹벽의 최종변위량이 비교적 크게 나타나는 특징을 가진다(김홍택 등, 2002). 이때문에, 일반적인 섬유형 보강재의 한계를 극복하고자 비교적 신율이 작고 강성이 큰 강재스트립(Steel strip)을 적용하는 예가 점차 증가하는 실정이다. 강제 스트립은 보강재 자체의 인장강도가 섬유보강재에 비해 우수하므로 보강재와 흙 사이에서 유발되는 인발변위에 의해 벽체변위의 대부분이 발생하게 된다. 따라서, 지지저항을 유발하기 위한 원형판을 강제보강재에 결속하는 방법이나, 혹은 보강재 자체를 돌기형으로 제작하여 보강재의 인발저항력을 증가시키는 방법 등 보강토 벽체의 발생변위량 감소를 위한 다양한 시도가 이루어져 왔다. 보강재의 인발 특성에 관련된 연구로는 조삼덕 등(1995), 김상규 등(1996) 및 김홍택 등

(1999, 2002)에 의해 수행된 바 있으며, 강제보강재의 거동 특성에 대한 연구가 홍원표 등(2001)에 의해 수행된 바 있다.

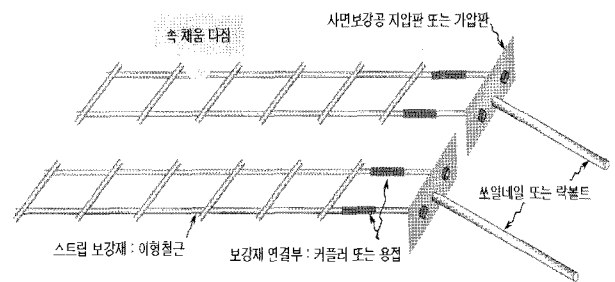
2.2 쏘일네일-강재스트립 복합시스템

복합보강토옹벽 시스템(Hybrid Reinforcement Retaining Wall System)은 기본적으로 옹벽의 역할을 수행하게 되나, 일반적인 보강토 옹벽과는 달리 보강토 옹벽의 보강재가 사면보강공과 서로 체결하는 형태로 구성된다. 보강토 옹벽의 보강재는 기본적으로 스트립의 형태로 고안하였으나, 보강재의 인발력을 높이기 위하여 보강재 내부로 뒤채움재가 채워질 수 있도록 하였다(그림 1(a) 참조). 또한, 보강재는 전면의 콘크리트 블록과 체결이 가능하도록 하여 일체화 거동이 가능하도록 하였으며, 사면보강공과 연결하여 보강재의 인발저항력을 극대화할 수 있도록 고안하였다(그림 1(b) 참조).

그림 2는 그림 1에 도시된 복합보강토옹벽 시스템의 효과를 개념도로 표현한 것이다. 일반적인 보강토 옹벽의 경우에는 시공시 비교적 많은 원지반 절취가 이루어져야 작업공간 및 구조적 안정성을 확보할 수 있으나(그림 2(a)), 본 연구에서 제안하고 있는 보강토 옹벽시스템의 경우에는 그림 2(b)에 나타난 바와 같이 원지반 절취량을 최소화하는 대신에 쏘일네일 등의 사면보강공과 체결하여 구조적 안정성을 확보하게 된다. 따라서 본 복합보강토옹벽공법의 경우에는 원지반의 절취량을 최소화 하면서도 구조적 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

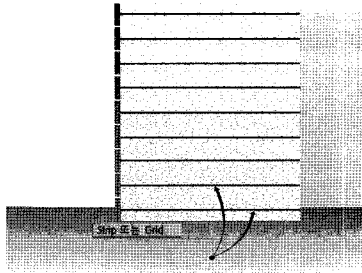


(a) 보강재 연결 상세도

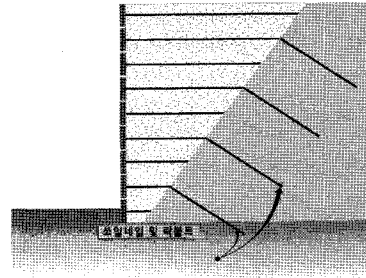


(b) 보강재 연결 개요도

그림 1. 복합보강토옹벽 시스템의 개념도



(a) 일반 보강토 옹벽



(b) 복합보강토 옹벽 시스템

그림 2. 복합보강토 옹벽 시스템의 효과

2.3 복합시스템 연결부의 인장강도

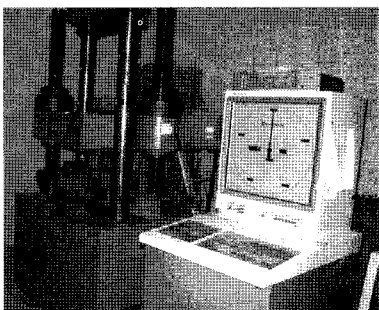
2.3.1 시험방법

복합보강토 옹벽공법의 보강토 옹벽 보강재는 사면보강공의 보강재와 서로 연결이 되어 인발저항력을 극대화 시키는 형태로 계획되어 있기 때문에 보강재에 작용되는 토압이 연결부분에서 집중되는 현상이 나타날 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 보강재의 연결방법 결정을 위하여 실내인장강도시험을 수행하여 보강재의 연결방법을 결정하였다. 실내인장강도시험은 보강토 옹벽의 보강재가 트러스 부재임을 감안하여 실시하였으며, 시험기기 및 전경은 그림 3과 같다. 연결부는 스틸스트립의 길이연장을 위한 스트립 간 연결부와 가압판을 이용한 스틸스트립과 네일 연결부가 있으며(그림 1(b) 참조), 그 중 스틸스트립의 연결은 2가지 종류의 턴버클 커플링 A(TB10-4), B(TB20-4)와 1가지 종류의 일반용접으로 총 3가지 경우에 대해 시험을 실시하였다. 또한, 보강재와 지압판 연결시스템에 대한 인장강도시험은 지압

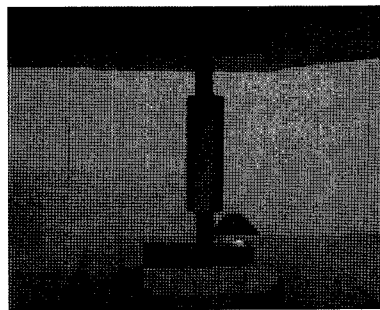
판연결1(락볼트), 지압판연결2(쏘일네일)로 구분하여 실시하였다.

2.3.2 인장강도시험결과

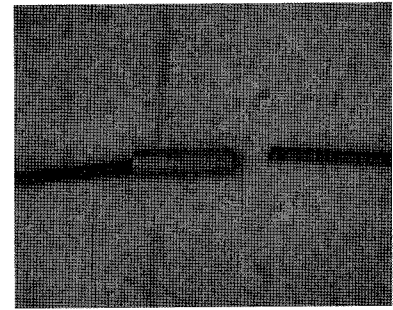
실내인장강도시험은 시편이 파단될 때까지 진행하였으며, 그 결과는 표 1과 같이 스트립의 턴버클 커플링 A의 경우에는 응력집중으로 인하여 보강재의 인장강도에 비해 작은 하중에서 파단이 일어나는 것으로 평가되었으나, 턴버클 커플링 B와 용접연결의 경우에는 비교적 큰 하중에도 파단되지 않고 강도를 확보하고 있는 것으로 평가되었다. 따라서 복합보강토 옹벽공법에서의 보강재 연결은 턴버클 커플링 B 또는 양면 용접 연결을 적용하는 경우가 구조적 안정성을 확보할 수 있을 것으로 판단되어 보강재 연결방법으로 결정하였다. 또한, 네일과 스틸스트립연결 지압판은 지압판연결2의 방법이 지압판연결1에 비해 인장강도가 1.6배 정도 크게 나타났는 바, 지압판연결2 방식으로 결정하였다.



(a) 인장강도시험기



(b) 인장강도시험 전경



(c) 인장강도시험 후 시편

그림 3. 인장강도시험 전경

표 1. 스트립 연결부 및 쏘일네일과 스트립 연결체의 인장강도시험결과

구분	스트립 연결			네일과 스트립 연결 지압판	
	턴버클 커플링 A	턴버클 커플링 B	양면 용접 연결	지압판 연결 1	지압판 연결 2
인장강도	35.0kN	104.0kN	103.2kN	74.0kN	121.0kN

3. 현장시험시공 및 계측

3.1 현장 시험시공

현장 시험시공은 제안된 복합보강토옹벽 시스템의 현장 적용성 및 안정성 확보 여부를 평가하기 위한 목적으로 강원도 삼척시 도계읍 내의 ‘○○-○○간 도로 확포장공사’ 현장에서 시행되었다. 당 현장의 복합보강토옹벽 시스템 적용 현장은 그림 4에 도시된 바와 같이 계곡부에 위치하며 총 연장이 61.82m 구간으로서 절성토부 및 편절부 시공시 하부의 1단, 2단은 쓰일네일과 사다리꼴 강보강재(Steel strip)를 일체로 한 복합보강토옹벽으로 시공하였으며, 상부 3단과 4단은 통상적인 블록식 지오그리드 보강토옹벽을 적용하였다. 그림 5는 시험시공현장에 적용된 복합보강토옹벽 시스템의 대표

단면이며, 보강재의 적용현황은 표 2와 같다. 그림 5에 도시된 바와 같이 본 현장에서 수행된 시험시공 옹벽은 다단옹벽 형태로 밑에서부터 1단 옹벽 9.12m, 2단 옹벽 7.0m, 3단 옹벽 7.0m, 4단 옹벽 7.0m 등으로 총 30.12m로 되어있다. 또한, 일반적으로 Soil nail의 연직설치간격은 1.0m 이상으로 설치되고 보강토옹벽에 연결되는 보강재는 1.0m 이하의 작은 간격으로 설치되는 특성을 고려하여, 1단과 2단의 경우 Soil nail과 Steel strip으로 구성된 복합보강재와 15T Geogrid 보강재가 연직방향으로 상호 교차하며 시공하였다.

복합보강토옹벽 시스템의 시공은 ① 원지반절취, ② 크레인을 이용한 쓰일네일링 시공, ③ 보강토옹벽 기초터파기, ④ 레벨링 패드의 설치(다짐쇄석 및 콘크리트), ⑤ 1단 블록의 설치, ⑥ 블록내 배수재 및 뒤채움 토사의 다짐 성토 및 보강재 포설, ⑦ 후속 블록의 설치, ⑧

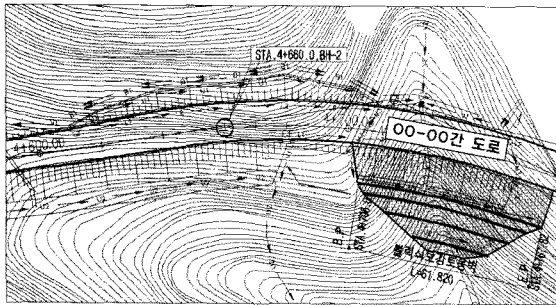


그림 4. 시험시공 현장의 평면현황

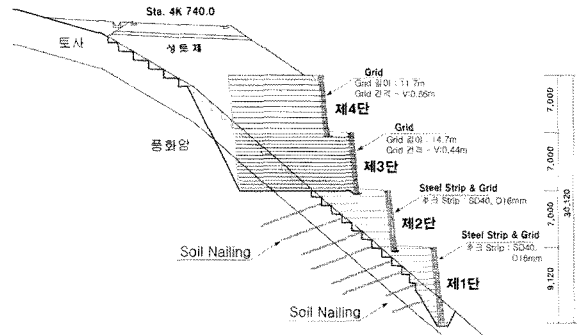


그림 5. 시험시공 현장의 횡단현황

표 2. 시험시공 현장의 보강재 적용현황

구 분	제 1 단		제 2 단		제 3 단	제 4 단	단 위
보 강 재	스트립	네일	스트립	네일	지오그리드	지오그리드	-
설계간도	15.9(2ea)	25.7	15.9(2ea)	25.7	7.5(15T)	5.4(10T)	tonf
사용강재	SD40	SD40	SD40	SD40	-	-	-
설치길이	5.7~2.2	8.0, 4.0	8.8~3.1	8.0	14.7	11.7	m
연직간격	1.32	1.32	1.76	1.76	0.44	0.66	m
수평간격	1.32	1.32	1.32	1.32	연속	연속	m
기 타	스트립 + 네일복합체 중간에 15T 지오그리드 설치				-	-	-



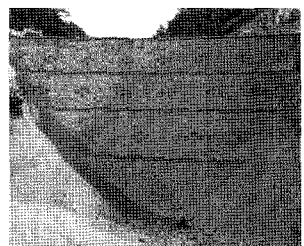
(a) 시공 전 전경



(b) 쓰일 네일링 시공



(c) 스틸스트립 시공



(d) 완성 후 전경

그림 6. 복합 보강토옹벽의 주요 시공과정

4단 블록 완료시까지 ⑥, ⑦을 반복, ⑨ 마감 블록 설치 및 마무리의 순서로 진행된다. 그림 6은 복합보강토옹벽 시스템의 시험시공 부지전경과 주요 시공과정에 대한 사진이다.

3.2 복합보강토옹벽 시스템의 계측관리

본 연구에서는 현장 시험시공이후, 장기적인 보강토 옹벽의 거동특성을 알아보기 위하여 다양한 계측을 통해 전반적인 옹벽의 거동을 살펴보았다. 복합보강토옹벽 시스템의 현장계측 항목은 표 3과 같다. 계측을 통해 평가된 주요 항목은 전면벽체에 작용하는 수평토압, 지중침하, 벽체 전면의 지중수평변위 등 이다. 현장계측에 사용된 주요 장비는 토압계 및 경사계로서 토압계의 경우 용량 3.57kg/cm^2 인 수평토압계를 사용하였다.

그림 7은 수평토압계 및 경사계 매설현황이고, 그림 8은 경사계 설치전경이다. 경사계는 보강토체의 지중수평변위를 측정하기 위해 케이싱 설치 완료 후 계측을

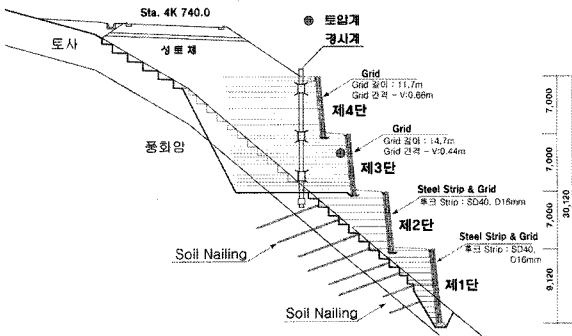


그림 7. 계측기 매설현황

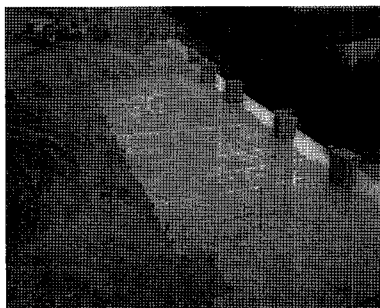


그림 8. 경사계 설치전경

수행하였으며, 경사계가 지오그리드 인장영역의 영향을 받지 않기 위해 경사계 직경의 1배 지름원을 절단하여 설치하였다. 계측구간은 시험시공 구간 중 옹벽의 높이가 가장 높은 단면을 기본적으로 결정하였으며, 보강토 옹벽 구조체의 일체화 거동 여부를 알아보기 위하여 15m 이격된 거리에서 현장계측을 수행하였다. 계측지점의 편의를 위해 옹벽의 높이가 가장 높은 계측지점을 계측점 A로 결정하였으며, 15m 이격된 거리를 계측점 B로 하였다. 계측관리에서의 계측항목은 옹벽 구조체의 전반적인 거동을 확인할 수 있도록 지중경사계, 토압계 및 층별 침하계로 결정하였다. 현장계측은 현장시험시공이 종료된 이후를 기준으로 하여 주기적으로 수행하는 것으로 하였다.

3.3 계측결과분석

3.3.1 수평토압 계측결과

시험시공현장의 계측결과 파악된 토압의 변화양상은 그림 9와 같이 현장발생토압은 일정기간 다소 크게 변화하는 경향을 보이나, 시간 경과에 따른 변화량은 미소하며 최대 1.23tf/m^2 정도인 것으로 계측되었다. 이때, 현장수직토압은 이론값의 경우 토압계의 매설깊이 12m, 단위중량 1.8t/m^2 , 형상을 고려한 토압계수 $K_0=0.139$ 를 고려하면 약 3.0tf/m^2 으로 산정되어 계측값(1.23tf/m^2)과는 2.5배 차이를 보였다. 이러한 현장 토압특성은 보강토 옹벽의 뒤채움재로 사용된 현장발생토가 어느 정도의 점착력을 가지고 있고, 지오그리드에 의한 인발 및 응력

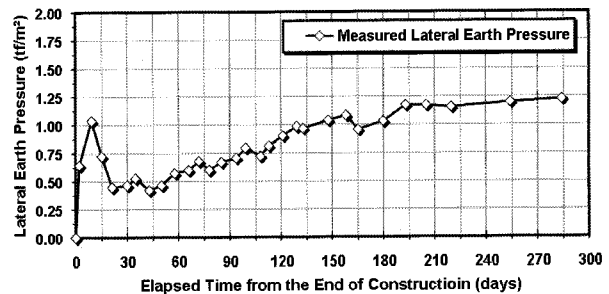


그림 9. 시간경과에 따른 보강토 옹벽 배면의 수평토압 계측결과

표 3. 계측항목 및 설치계획

평가항목	사용 장비	계측기 설치 위치
수평토압	토압계	4단 옹벽 상단으로부터 12m 지점에 총 1개 설치
지중침하	침하판	4단 옹벽 기초저면으로부터 5.8m, 11.4m, 15.6m 지점에 총 3개 설치
지중변위	경사계	옹벽 중앙부 2개소 설치

전이특성, 전면벽체의 수평변위 발생에 따른 토압 감소 효과의 영향이 클 것으로 판단되며 쏘일네일+강재스트립 복합체에 의한 작용토압 감소효과도 작용했을 것으로 사료된다.

3.3.2 지중 침하량 계측결과

일반적으로 보강토 옹벽의 설치에 따른 기초지반 및 보강토층내의 침하특성은 시공완료 초기에 약간의 침하가 진행된 후 시간경과에 따라 일정한 값으로 수렴해가는 경향을 보인다. 이러한 보강토층의 침하 경향은 흙의 인위적인 성토 및 다짐에 따른 입자 재배열 및 안정화 경향에 기인하며, 시간경과에 따라 급격히 감소되고, 그 크기는 일반적으로 성토층 높이에 대해 0.11% 정도 발생하는 것으로 알려져있다(김홍택 등, 1999).

반면에 본 연구에서 층별침하계를 통해 시간경과에 따른 보강토옹벽의 침하량 측정 결과는 그림 10과 같이 나타났으며, 통상적인 보강토 옹벽 거동과는 다소 상이한 것으로 평가되었다. 그러나, 본 현장의 경우는 계곡부에 위치한 사면에 급구배를 지니며 성토가 이루어지고, 지형상 보강토옹벽의 설치형상이 비대칭이므로 일정한 경향성을 보이지는 못하는 것으로 판단된다. 본 시

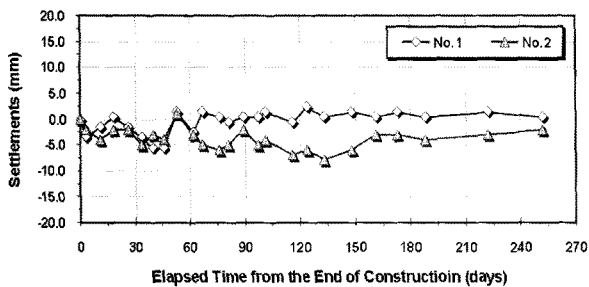


그림 10. 시간경과에 따른 보강토 옹벽의 침하량 변화

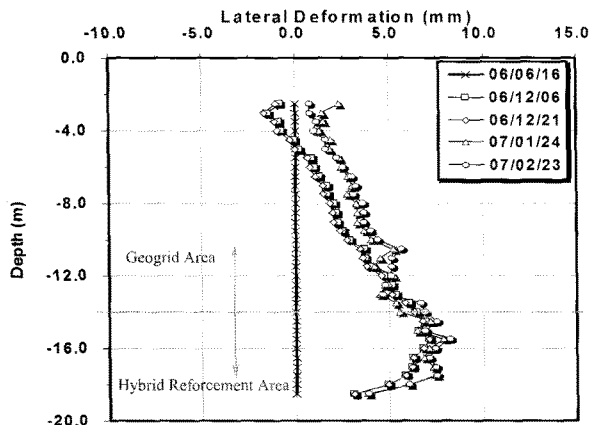


그림 11. 벽체높이에 따른 보강토체내의 지중수평변위 변화

험시공 현장의 최대침하량은 약 8.0mm 정도를 나타내는 것으로 측정되었으며, 전체적인 침하량은 옹벽 높이가 최대 30m 이상인 측면을 감안할 때 미소한 것으로 판단된다.

3.3.3 경사계를 통한 수평변위 계측결과

그림 11은 경사계를 통해 계측된 복합보강토옹벽의 시간경과에 따른 깊이별 수평변위 특성이다. 본 계측 현장의 지반구성은 토사층이 0.0~4.3m, 풍화암층이 4.3~10.0m 깊이로 분포한다. 수평변위 계측결과는 그림 11과 같이 지오그리드영역은 보강토옹벽 하단으로 내려 갈수록 수평변위가 증가하는 경향을 보였으나, 복합보강토옹벽 영역은 보강토옹벽 하단으로 내려 갈수록 수평변위가 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 보강토옹벽 전체 최대변위는 지표아래 15.5m영역에서 8.21mm로 측정되어 FHWA기준($\frac{1}{100}L$)을 만족하는 것으로 나타났다. 복합보강토옹벽 제2단의 상부에서 발생한 최대 변위는 제1, 2단 옹벽과 제3, 4단 옹벽간의 적용공법의 연속시공시 상이한 지반변위억제 시스템으로 인한 지반거동으로 사료되는바, 향후 시공시 본 연구결과를 반영이 바람직할 것으로 사료된다.

추가적으로 시간경과에 따른 벽체의 수평 변형은 2006년 6월 시공 완료후 점차 증가하다 2007년 1월 이후 그 변화량이 급격히 감소하여 현재에는 수렴상태인 것으로 나타났다. 이러한 벽체 변형은 원지반특성, 쏘일네일 + 강재스트립 복합체에 의한 수평변위 억제, 지오그리드에 의한 보강토체 일체거동 등에 의한 수평변위억제 효과에 기인한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 절토사면에 대한 보강토옹벽의 적용성 확대를 위해 제안한 복합보강토옹벽 시스템의 설계 및 시공사례를 소개하고 실제 현장에서 측정된 계측자료를 통해 제안된 복합보강토옹벽 시스템의 적용 가능성을 검토하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 실내인장강도 시험결과 스트립의 턴버클 커플링 A의 경우에는 응력집중으로 인하여 보강재의 인장강도에 비해 작은 하중에서 파단이 일어나는 것으로 평가되었으나, 턴버클 커플링 B와 용접연결의 경우

에는 비교적 큰 하중에도 파단되지 않고 강도를 확보하고 있는 것으로 평가되어 구조적인 안정성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

- (2) 시험시공 현장의 수평토압은 최대 1.23tf/m²으로 이론값인 3.0tf/m²에 비해 작은 것으로 측정되었다. 보강토옹벽의 뒤채움재로 사용된 현장발생토가 어느 정도의 점착력을 가지고 있고, 지오그리드에 의한 인발 및 응력전이특성, 전면벽체의 수평변위 발생에 따른 토압 감소효과의 영향이 클 것으로 판단되며 쏘일네일+강재스트립 복합체에 의한 작용토압 감소효과도 작용했을 것으로 사료된다.
- (3) 시험시공 현장의 최대침하량은 약 8.0mm로 측정되어 FHWA 기준($\frac{1}{100}L$)을 만족하는 것으로 나타났다.
- (4) 수평변위 계측결과 지오그리드영역은 보강토옹벽 하단으로 내려 갈수록 수평변위가 증가하는 경향을 보였으나, 복합보강토옹벽 영역은 보강토옹벽 하단으로 내려 갈수록 수평변위가 증가하다 감소하는 경향을 보였다. 보강토옹벽 전체 최대변위는 지표 아래 15.5m영역에서 8.21mm로 측정되어 FHWA 기준($\frac{1}{100}L$)을 만족하는 것으로 나타났다.
- (5) 이상의 현장계측 결과로부터 쏘일네일과 강재스트립으로 보강된 복합보강토옹벽은 벽체의 수평토압, 지중침하, 활동특성 등을 고려할 때, 안정성 측면이나 효율성 측면에서 충분한 적용성을 지니는 것으로 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 김상규, 이은수 (1996), "화강토에서의 띠 보강재의 겹보기마찰 계수", *한국지반공학회지*, 제12권 제5호, pp.137-151.
2. 김홍택, 강인규, 성안재, 방윤경 (1995), "Nailed-Soil 굴착벽체의 발취인장력 예측", *한국지반공학회지*, 제11권, 제2호, pp.79-97.
3. 김홍택, 김승욱, 전한용, 이인모 (1999), "화강풍화토 뒤채움흙 내부 토목섬유 복합보강재의 거동특성에 관한 기초연구", *한국지반공학회 논문집*, 제15권 제5호, pp.171-191.
4. 김홍택, 방윤경, 조용권 (2002), "토목섬유의 온도 및 구속효과를 고려한 보강토 옹벽의 변위해석", *한국지반환경공학회 학술발표회 논문집*, pp.199-205.
5. 조삼덕, 김진만 (1995), "토목섬유 보강토구조물의 합리적인 해석과 설계", *한국건설기술연구원 연구보고서*, 95-GE-1101.
6. 홍원표, 한중근, 김진오 (2001), "강그리드 보강재의 지지저항 산정", *대한토목학회논문집*, 제21권 제3-C호, pp.225-231.
7. BSI (1995), "BS8006 : 1995 - Code of Practice for Strengthened / Reinforced Soils and Other Fills.", *British Standard Institution*, London, UK., pp.127-212.
8. Elias, V. and Christopher, B. R. (1999), "Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines", FHWA Demonstration Project 82 Reinforced Soil Structures MSEW and RSS, Publication No. FHWA-SA-96-071, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, pp.213-325.
9. Elias, V., Christopher, B. R., and Berg, R. R. (2001), "Mechanically Stabilized Earth Walls and reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines", Publication No. FHWA-NHI-00-043, National Highway Institute, Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation.
10. Gässler, G. and Gudehus, G. (1983), "Soil Nailing-Statistical Design", *Proceedings of 8th ECSMFE*, Helsinki, Finland, Vol.2, pp.491-494.
11. GEO (2002), "Guide to Reinforced Fill Structure and Slope Design", GEOGUIDE 6, *Geotechnical Engineering Office*, Hong Kong, pp. 124-213.
12. Guilloux, A. and Schlosser, F. (1982), "Soil Nailing : Practical Applications", *Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques*, Bangkok, Thailand, pp.389-397.
13. Ingold, T. S. (1982), "An Analytical Study of Geotextile Reinforced Embankments", *Proceedings of 2nd International Conference on Geotextiles*, Industrial Fabric Association International, Las Vegas, pp.683-688.
14. Jewell, R. A. (1990), "Revised Design Charts for Steep Reinforced Slopes", *Proceedings of Symposium on Reinforced Embankments : Theory and Practice in the British Isles*, Cambridge, September, Thomas Telford. pp.1-27.
15. Leshchinsky, D. (1997a), "ReSlope - A Software to Facilitate Design of Geosynthetic-Reinforced Steep Slopes", *Geotechnical Fabrics Report*, January-February, 1997, pp.40-46.
16. Leshchinsky, D. (1997b), "Design Procedure for Geosynthetic Reinforced Steep Slopes", *Technical Report REMR-GT-23*, Prepared for Headquarters, U.S. Army Corps of Engineers Waterway Experiment Station, Washington, DC., pp.34-52.
17. Leshchinsky, D. and Boedeker, R. H. (1989), "Geosynthetic Reinforced Soil Structures", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.115, No.10, pp.1459-1478.
18. NCMA (1997), "Design Manual for Segmental Retaining Walls", *Collin, J., Editor*, Second Edition, National Concrete Masonry Association, Herndon, Virginia, USA.
19. Ruegger, R. (1986), "Geotextile Reinforced Soil Structures on which Vegetation Can Be Established", *Proceedings of the 3rd International Conference on Geotextiles*, Vienna, Austria, pp.453-458.
20. Schlosser, F. (1982), "Behaviour and Design of Soil Nailing", *Symposium on Recent Developments in Ground Improvement Techniques*, Bangkok, Thailand, pp.399-413.
21. Schlosser, F. (1993), "Recommendations Clouterre, 1991 (English Translation)", *Federal Highway Administration*, FHWA-SA-93-026.
22. Schmertmann, G. R., Chouery-Curtis, V. E., Johnson, R. D., and Bonaparte, R. (1987), "Design Charts for Geogrid-Reinforced Soil Slopes", *Proceeding of Geosynthetics '87*, New Orleans, U.S.A., pp.108-120.
23. Shen, C.K., Bang, S., and Hermann, L.R. (1981), "Ground Movement Analysis of an Earth Support System", *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.107, GT12., pp.512-374.
24. Stocker, M. F., Korber, G. W., Gässler, G. and Gudehus, G. (1979), "Soil Nailing", *C. R. Coll. Int. Reinforcement Des Sois*. Paris, pp. 469-474.

(접수일자 2007. 9. 6, 심사완료일 2008. 11. 13)