개량토 벽면공을 활용한 보강성토사면에 관한 기초적 연구

A Fundamental Study on Reinforced Soil Slope with Improved Soil Facing

방인황¹, 서세관², 김광렬³, 김유성^{4*}

In-Hwang Bhang¹, Se-Gwan Seo², Kwang-Leyol Kim³, You-Seong Kim^{4*}

¹Member, Doctor Candidate, Department of Civil Engineering, Chonbuk National Univ., 567, Baekje-Ro, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 561-756, Republic of Korea

²Member, Doctor Candidate, Department of Civil Engineering, Chonbuk National Univ., 567, Baekje-Ro, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 561-756, Republic of Korea

³Member, Doctor Candidate, Department of Civil Engineering, Chonbuk National Univ., 567, Baekje-Ro, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do, 561-756, Republic of Korea

⁴Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chonbuk National Univ. 567, Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju-si, Jeollabuk-do 561-756, Republic of Korea

ABSTRACT

This paper presents the slope wall technique using soil improvement material for reinforced soil slope through laboratory scale model tests, and verifies the experimental results comparing with numerical analysis. In addition, case study in field has performed to investigate the deformation of reinforced soil slope for 6 months. As a result of laboratory scale model test, numerical analysis, and case study, the reinforcement effect of the slope wall technique using soil improvement material is sufficient to be constructed as reinforced soil slope. The technique shows the stable ratio (0.4%) of horizontal to vertical deformation in the surface loading.

요 지

본 연구에서는 개량토 벽면공을 활용한 보강성토사면의 거동에 대하여 실내모형시험 및 수치해석을 통해 분석하였다. 또한 수해발생현장에 이 연구에서의 방법을 이용하여 시험시공으로 보강성토사면을 구축한 후 약 6개월간 전면변위를 측정하여 실제 거동을 분석하였다. 실내모형시험, 수치해석, 현장시험 등을 통해 개량토 벽면공의 강성은 보강성토사면에서 충분한 벽면공의 역할을 수행할 수 있는 것으로 나타났고, 시험시공 후의 전면변위 측정결과 사면높이에 대한 수평변위의 비율은 최대 약 0.4%로 매우 안정적인 것으로 조사되었다.

Keywords : Soil improvement material, Slope wall technique, Laboratory scale model test, Numerical analysis

1. 서 론

급경사 보강성토 또는 보강토벽 구조물의 장점에 대해 과거에는 토압이 거의 작용하지 않아 콘크리트옹벽에 비해 벽면공을 간단하게 제작할 수 있다는 점과 벽면공에 기

초지반의 변형에 대응할 수 있는 변형성이 있기 때문에, 일체성이 큰 중력식 옹벽 등에서는 필수적인 말뚝기초가 불필요하다는 점을 강조하였다. 이러한 장점에 의해 공사 비용 및 공사기간이 대폭 경감 및 단축될 수 있는 것으로, 각종 토목건축공사에서 각광을 받기 시작하였다. 그 후 벽면공의 역할에 대한 다수의 연구와 보강토옹벽 등에 대한 연구에 의해 위의 장점은 다음과 같은 내용으로 바뀌어 인식되기 시작하고 있다. 무보강의 경우에 발생하는 주동

Received 17 Sep. 2013, Revised 29 Nov. 2013, Accepted 3 Dec. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-63-270-2420; Fax: +82-63-270-2421

E-mail address: yusung@jbnu.ac.kr (Y. S. Kim)

Fig. 1. Load to facing structures (Tatsuoka, 1993)

토압과 같은 정도 크기의 토압이 벽면공에 작용하면, 뒤채움 흙에 상당히 큰 구속압이 더해져, 변형성은 작게 되고 강도는 커지게 된다. Fig. 1(a)에 나타난 것과 같이 벽면공에 큰 토압이 작용하더라도, 일체의 강성 벽면공을 이용하는 경우는 다층의 보강재에서 지지되는 다지점 연속보와 같이 되어 있기 때문에 벽면내의 응력은 작게 되고, 벽면공 하부에서의 모멘트, 전단응력, 축력도 작게 된다. 따라서, 보강토 구조물은 자립성이 큰 구조물이라고 할 수 있다. 판넬식 벽면공에서는 전체강성이 없기 때문에, 보강토 구조물의 안정성에 대한 공헌도는 감소하나, 벽면내 응력은 보다 작게 된다. 이와 같은 이유로 보강토벽의 벽면공을 종래의 철근콘크리트옹벽에 비해 상당히 간단한 구조로 가능하게 된다. 이에 비해 콘크리트옹벽에서는 Fig. 1(b)에 나타난 바와 같이 외팔보(Cantilever)가 되기 때문에 벽면구조물 내부에 큰 모멘트와 전단력이 작용하고, 그 저면에서의 모멘트저항력, 전단저항력으로 토압에 저항하게 된다. 그러나, 보강토벽의 벽면공은, 시공 중에는 기초지반과 뒤채움 흙의 변형에 대응하기 위하여, 될수록 유연할수록 좋으나, 완성 후에는 될수록 강성이 클수록 좋다. 이와 같은 모순점을 해결하기 위하여 일본에서 개발된 RRR공법(Reinforced Railroad with Rigid facing method, Tatsuoka, 1993)에서는 우선 보강성토를 건설하고, 보강

성토의 지반, 뒤채움 흙의 변형이 종료된 후 강성의 벽면공(비교적 얇은 콘크리트벽)을 설치하는 시공법을 제안하였고, 고속철도의 노반공 등에 활용되고 있다. 이 연구에서는 위에서 언급한 모순점을 지반개량재로 강성을 충분히 크게한 개량토 벽면공을 이용하는 것으로, 위에서 기술한 모순점을 해소할 수 있고, 시공순서에도 제한이 없다는 장점이 있을 것으로 판단되고 있다. 벽면공의 효과에 대하여 여러 가지 다른 벽면과의 비교연구가 수행될 필요가 있으나, 이 연구에서는 보강성토사면에 국한하여 개량토 벽면공의 타당성에 대한 기초적 연구에 대한 결과를 기술하였다.

2. 뒤채움 흙 및 지반개량토의 특성

2.1 뒤채움 흙

전북 전주시 만성동, 장동, 중동 일대에서 채취한 시료를 뒤채움 흙으로 사용하였다. 실내 물성시험(Table 1, Fig. 2) 및 다짐시험(Fig. 3)을 실시한 결과, 통일분류법상 SM으로 분류되었고, 최적함수비는 11.2%, 최대건조단위 중량은 $19.0kN/m^3$ 으로 나타났다.

Table 1. Physical and compaction properties of backfill material

Backfill soil properties	$\omega(\%)$	G_s	LL (%)	PL (%)	D type compaction		USCS
					γ_{dmax} (kN/m^3)	$\omega_{opt}(\%)$	
	16.08	2.745	30.41	N.P	19.00	11.2	SM

Fig. 2. Particle size distribution curve

Fig. 3. Compaction test result

2.2 벽면공으로 이용한 개량토

뒤채움 흙과 같은 흙에 제지회가 주재료인 지반개량재 (Lee, et al., 2002, Bhang, 2007)를 혼합하여 개량토를 제작하였다. 개량토의 혼합비율은 일축압축시험을 통해 충분한 강성을 나타낼 수 있을 정도의 혼합비 6%(중량비)로 결정하였다.

2.3 뒤채움 흙 및 벽면공 개량토의 일축압축강도

뒤채움 흙 및 벽면공 개량토의 공학적 특성을 분석하기 위하여 일축압축강도 시험을 실시하였다. 일축압축시험을 실시하기 위하여 D 다짐에너지를 기준으로 시료를 제작하였으며, 양생 7일에 대하여 지반개량재 혼합비 0(뒤채움 흙), 3, 6, 9%의 시료를 2개씩 제작하고, 시험을 실시하여, Table 2와 Fig. 4에 시험 결과를 정리하여 나타내었다. 혼합비별 일축압축강도의 증가를 나타낸 Fig 5를 살펴보면 혼합비 6%까지는 거의 직선적으로 강도가 증가 경향을 보이고 있으나, 혼합비 6%이상일 때는 강도 증가 경향은

다소 감소하는 것으로 나타나고 있고, 혼합비 6%를 기준으로 대상토의 다짐시료보다 4배 이상의 강도를 나타내고 있어, 대상토의 개량효과는 뚜렷이 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4. Unconfined strength test result
(*note:N-soil is soil improvement material)

Table 2. Unconfined strength test result

Curing time	Mixing ratio(%)			
	0	3	6	9
	q_u (kPa)	q_u (kPa)	q_u (kPa)	q_u (kPa)
0 day	196.4	—	—	—
	185.2	—	—	—
7 day	196.4	535.1	818.3	906.4
	185.2	519.0	824.8	913.1

Fig. 5. Unconfined strength according to mixing ratio

3. 실내모형시험

3.1 실내모형시험장치 구성과 시험방법

실내모형시험을 위하여 폭 0.5m, 높이 1.5m, 길이 2.0m 의 모형토조를 제작하여 시험을 수행하였다. 개략적인 모 식도는 Fig. 6과 같고, 크게 하중재하부, 모형토체부, 측정

Fig. 6. Diagram of laboratory model test apparatus

부분으로 나누어진다. Fig. 7은 모형토조의 외관을 나타내 고 있고, 모든 데이터는 Control box와 Data logger를 이용 하여 자동측정하였다.

실내모형시험은 Fig. 8에 나타난 바와 같이 무보강(Case1), 지오그리드보강(Case2), 개량토전면벽+지오그리드보강(Case3) 의 3종류에 대하여 시험을 실시하였다. 시험에 사용한 지 오그리드는 국내에서 생산한 제품이며, PET를 PVC로 코팅한 제품으로 인장강도는 $100kN/m$, 인장신도는 12%, 단위중량은 $470g/m^2$ 인 연성 지오그리드이다.

모형토체 제작방법은 1층 다짐 체적에 함수비를 맞춘 대상토의 중량을 계량하여 진동다짐기와 목재틀을 이용하 여 다짐을 실시하였으며, 총 6층을 다짐하여 모형토체를 제작하였다. Case2와 Case3의 경우 총 3단의 보강 성토층 을 형성하여 시험을 실시하였고, 각층의 지오그리드에 Strain gauge를 설치하여 지오그리드의 변형률을 각 하중 단계마다 측정하였다. 모형토체의 변위측정은 LVDT를 이용하여 수직, 수평변위를 측정하였다. 설치위치는 수직 변위의 경우, 하중이 재하되는 재하판에 설치하였고, 막대 자를 이용하여 측정범위를 넘어서는 변형에 대비하도록 하였으며, 수평변위는 상단, 중단, 하단으로 나누어 각 단

Fig. 7. Laboratory model test apparatus

Fig. 8. Diagram of laboratory model test cases

Fig. 9. Model soil wall preparation

Fig. 10. Attach of strain gauge

Fig. 11. Input of weighted soil

Fig. 12. Install of LVDT

Fig. 13. Final stage of Case1 (failed)

Fig. 14. Final stage of Case2 (failed)

Fig. 15. Final stage of Case3 (not failed)

의 가운데 LVDT를 설치하여 변위를 측정하였다. 하중재하는, $14.7kPa$, $29.4kPa$, $49.0kPa$, $98.0kPa$, $147.1kPa$, $196.1kPa$, $245.2kPa$ 의 단계별로 재하하여, 10분이 경과하

여도 침하가 지속되지 않으면, 다음단계의 하중을 재하하는 방법으로, 토체가 파괴될 때까지 시험을 진행하였다. Fig. 9~12에 모형토체 제작방법을 나타내었다.

3.3 실내모형시험 결과

3.3.1 하중강도의 비교

Case1의 경우 하중단계 49kPa에서 상부의 파괴가 발생하여 시험을 종료하였고, Case2의 경우 196.1kPa에서 파괴가 발생하였고, Case3의 경우 245.2kPa까지 시험을 실시하고 종료하였다. 수직침하량을 기준으로 무보강에서 파괴가 발생하기 시작한 침하량 10cm에서의 각 Case의 하중강도는 Case1의 경우 44.5kPa, Case2 122.9kPa, Case3의 경우 236.4kPa를 보이고 있어, Case3의 경우 Case1에 비해 약 5배, Case2에 비해 약 2배의 보강효과를 보이는 것으로 나타났다. 즉, 성토체에 지오그리드 보강효과 만으로 하중강도가 약 3배 정도 증가하는 것으로 나타나고 있고, 개량토 벽면공 구축에 의해 하중강도가 다시 2배정도 증가하는 것으로 나타나고 있다.

3.3.2 수직변위의 비교

파괴가 발생한 Case1의 하중단계에서의 수직변위량을

Fig. 16. Results of vertical displacement

비교하면, Case1은 11.59cm에서 Case2의 경우는 1.7cm, Case3는 0.5cm 로 뚜렷한 보강효과가 나타나고 있음을 알 수 있다. 특히, Case3의 경우는 Case1에 비하여 파괴하중이 5배 정도 크나, 수직변위는 파괴하중에서 오히려 Case1에 비해 작게 나타나고 있다. Fig. 16에 각 Case별 하중단계별 수직변위 경향을 나타내었다.

3.3.3 수평변위의 비교

상단, 중간지점, 하부의 수평변위를 측정한 결과 각 Case 모두 상단의 변위량이 가장 크고 하단의 변위량은 거의 없거나 매우 작게 발생하고 있다. 또한, 보강효과가 증대될수록 하부까지 변위가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 전형적인 보강토 구조물에서 시공 후 발생하는 최대수평변위는 벽 높이의 0.9~1.5%로 조사되고 있다(Christopher, et al., 1990). Case2의 경우는 벽 높이의 2.7%로 위 값에 비해 2배 정도 크게 나타나고 있으나, Case3의 경우는 이 값의 약 1/2로 나타나 보강성토공법으로서의 타당성을 보여주고 있다. Case1의 경우도 이 값과 유사한 값을 보이고

Fig. 17. Results of horizontal deformation

Fig. 18. Results of horizontal displacement

Fig. 19. Results of strain in geogrid

Table 3. Material properties using in numerical analysis

Type	Unit weight (kN/m^3)	c (kN/m^2)	ϕ ($^\circ$)	Cross-section area(m^2)	E (kN/m^2) $\times e^4$	ν
Backfill soil	17.98	12.0	27	—	2.0	0.35
Improved soil facing	17.80	98.0	24	—	8.0	0.30
Geogrid	—	—	—	0.0005	43	—
Block facing	24.0	—	—	—	10	0.25

있으나, 이 경우는 이미 수직변위의 증대로 더 이상의 구조체로서의 기능이 상실되어 의미는 없는 것으로 판단된다. Fig. 17에 각 Case별 하중단계별 및 위치별 수평변위 경향을 나타내었다. Fig. 18에는 각 위치별 수평변위 경향을 나타내었다. 보강재 최대인장강도에 해당하는 하중강도($98kPa$)에서의 수평변위(Fig. 18에서 Case2($98kPa$), Case3($98kPa$))는 Case2에서 0.7%, Case3에서는 0.4%로 매우 작은 값을 보이고 있다.

3.3.4 지오그리드의 변형률 비교

Case2와 Case3에 설치한 스트레인게이지의 변화를 Fig. 19에 나타내었다. 변형률 측정 결과, 상단에서 가장 큰 변형률이 발생하고, 하부로 내려갈수록 변형률이 작게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 전면보강을 한 Case3의 경우 상단과 중단에서 Case2에 비해 변형률이 작게 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 경향은 위에서 분석한 수평변위의 경향과 유사한 경향을 보인다.

4. 보강토옹벽 수치해석

4.1 수치해석 모델링 및 방법

본 연구에서의 보강성토사면의 변형을 해석하기 위하여 Canada Geo-Slope사의 GeoStudio 2007의 SIGMA/W를 이용하였다. 수치해석 모델링(Fig. 20)은 실내모형시험을 참고하여 토질 층의 두께 및 크기, 재하하중 및 재하시간 등을 동일하게 적용하여, 개량토 벽면공+지오그리드보강(Case3)과 비교를 위해 블록 벽면공+지오그리드보강(Case4)에 대하여 해석을 실시하였다. 원지반토와 지반개량 혼합토의 경우 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였으며, 전면블록은 Elasto-Plastic 모델을 사용하여 해석을 실시하였고, 적용한 원지반토, 지반개량 혼합토, 지오그리드, 전면블록의 재료특성은 실험 결과값 및 기존문헌(Han et al.,

Fig. 20. Cross-section of numerical modelling

2006, Kim et al., 2013, Kim, 2008)을 참고하여 적용 (Table 3)하였다.

4.2 수치해석 결과

수치해석 결과를 Fig. 21~22에 나타내었다. 수직침하의 경우 작은 하중에서는 실내모형시험과 다소 차이를 보이고 있으나, 전체적으로 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 또한 Case3와 Case4의 10cm 침하시 하중강도는 $234.1kPa$, $253.6kPa$ 로 Case4의 보강효과가 약간 큰 것으로 나타났다. 수평변위의 경우 정량적인 차이는 있으나, 실내모형시험 결과와 같이 상부에서 변위가 크고 하부로 내려갈수록 변위가 작아지는 경향을 보이고 있다. 실내모형시험에서의 보강재 허용인장강도에 상응하는 하중강도($98kPa$)에서의 수평변위는 Case3(Model test)에서 약 0.4%, Case3(Analysis)에서는 0.11%, Case4(Analysis)에서는 0.08%로, 모형시험 값이 다소 크게 나타나고 있으나, 시공후의 보강토 구조물의 일반적 변위값 1.5%(Christopher, et al., 1990)에 비해 작은 값을 보이고 있다.

Fig. 21. Numerical analysis result of vertical displacement

Fig. 22. Horizontal displacement in load 98kPa

5. 현장 시험시공

5.1 현장조건과 시험시공

현장 시험시공을 실시한 장소는 행정구역상 전라남도 순천시에 위치하고 있고, 집중호우로 인하여 사면 붕괴가 발생한 지역이다. 현장현황을 살펴보면 지반조사결과(Fig. 23) 토층의 상태는 붕적토, 풍화암, 연암으로 구성되어 있

다. 파괴지역의 상부는 Fig. 24와 같이 유실면적이 넓고, 유실 토사층의 심도가 깊고, 일부구간의 경사가 급하여 강우 등의 외부요인에 의한 추가적인 사면파괴의 우려가 있는 것으로 판단되었다.

현장 시험시공은 현장 상부지역에 Fig. 25와 같이 시공하였으며, 시공순서는 지하수 배수를 위한 쇠석층을 설치하고, 그 위에 Fig. 26~27과 같이 본 연구에서의 개량토 벽면공+지오토크보강 성토사면공법으로 시공하였다. 시

Fig. 23. Geological section

Fig. 24. Slope failure state (upper)

Fig. 25. Cross-section of field test

Fig. 26. The first construction stage for field test

Fig. 27. The last construction stage for field test

공이 완료된 뒤 전면녹화를 위한 종자를 포설한 후 시험시공을 마무리 하였다.

5.2 시험시공후 전면변위 측정결과

현장 시험시공 종료후 6개월간 초기치, 1개월, 3개월, 6개월 후 총 4회에 걸쳐 급경사지 보강토체에 대한 전면변위를 측정하였다. 측정방법은 토탈스테이션(Sokkia SET 330RK)을 이용하여, 3개 단면(STA. 5, STA. 20, STA. 30)의 대한 No.1~No.12의 좌표를 측정하여 발생변위를 Fig. 28에 나타내었다. 전 구간에서 4~15mm의 변위가 발생하였으며, 3개 단면 모두 발생변위가 하부에서는 작고 상부에서는 크게 나타나고 있다. 사면높이에 대한 수평변위의 비율은 약 0.4%로 모형시험 결과 및 유한요소해석 결과와 유사한 값이 측정되었고, 현재 까지 매우 안정한 상태를 유지하고 있다. 이상과 같은 일련의 실내, 현장 시험과 수치해석 결과에 의해 개량토 전면 벽면공을 이용한 보강성토 사면은 유용한 것으로 판단된다. 향후 여러 가지 벽면공과의 비교분석을 통해 그 효용성 및 내구성에 관한 보강연구가 필요한 것으로 판단된다.

6. 결 론

일련의 실내모형시험, 현장 시험시공 및 수치해석을 통해 지반개량 벽면공을 이용한 보강성토사면의 적합성 검증에 대해 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 혼합비 6%를 기준으로 7일 양생된 개량토의 일축

Fig. 28. Field test result (horizontal displacement)

압축강도는 뒤펅 흙에 비해 약 4배 정도 증가하는 것으로 나타나, 충분한 강성이 발휘되는 것으로 판단된다.

- (2) 모형시험결과 개량토 벽면공을 이용한 보강성토사면은 지오텍스만으로 보강하였을 경우에 비해 2배 이상의 보강효과를 나타내고 있고, 수치해석 결과 블록 벽면공과 유사한 보강효과를 나타낸다.
- (3) 현장 시험시공 후 6개월간의 변위측정 결과, 전 구간에서 4~15mm의 미소한 변위가 발생하였고, 사면높이에 대해 최대 약 0.4%의 변위가 발생하여, 일반적으로 보강토 구조물에서 나타나는 0.9~1.5%에 비해 매우 안정적인 것으로 나타났다.
- (4) 개량토 전면 벽면공의 활용은 벽면공의 시공시 유연성과 완공 후 충분한 강성이 발휘될 수 있고, 전면녹화의 장점이 있어, 활용도가 클 것으로 판단된다.

이 연구는 개량토 벽면공의 타당성에 대한 기초적 연구로 향후 추가적인 개량토 벽면공의 장기 내구성의 검증 및 다른 벽면공과의 비교 연구가 추가적으로 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work (Grants No.1201000607) was supported by Business for Cooperative R&D between Industry, Academic, and Research Institute funded Korea Small and Medium Business Administration in 2012.

References

1. Bhang, I. H., (2007) "A Study on the technology related to the control and rehabilitation of slope surface erosion", Master Thesis, Chonbuk National University.
2. Christopher, B. R., Gill, S. A., Giroud, J. P., Juran, I., Nitchell, J. K., Schlosser, F. and Dunncliff, J. (1990) "Reinforced Soil Structures Volume I. Design and Construction Guidelines and Reinforced Soil Structures Volume II. Summery of Research and System Information", *Federal Highway Administration. FHWA-RD-89-043.*, Washington, D.C., Vol.1, 283p., Vol.2. 158p.
3. Han, J. G., Kim, J. S., Hong, K. K., Cho, S. D., and Cho, G. S., (2006) "Behavior of the tired-reinforced soil walls having the high embanked slope", The Fall 2006 Geosynthetics Conference, pp.115-120.
4. Kim, Y. M., (2008), "The Study of Numerical Analysis on Failure Behavior of Reinforced Soil Wall", *Journal of Korean Geosynthetics Society*, Vol.7, No.3 pp.9-16.
5. Kim, Y. S., Kim, J. H., Bhang, I. H., and Seo, S. G. (2013) "A Study Rainfall-induced Erosion of Land Surface on Reinforced Slope Using Soil Improvement Material", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.29, No.1, pp.49-59.
6. Lee, Y. A., Lee, H. J., and Kim, Y. S.,(2002) "A Study on the Application of Paper Fly Ash as Stabilization/Hardening Agent", *Korean Geo-Environmental Society*, Vol.3, No.2, pp. 23-33.
7. Tatsuoka, F., (1993) "Roles of facing rigidity in soil reinforcing." Theme Lecture, Proc. Int. Symp. on Earth Reinforcement Practice (IS Kyusu '92). pp.831-870.