옹벽에 보강되는 보강재의 효율적 설치방법에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Efficient Installation Method of Reinforcement for Reinforced Retaining Wall

황성필* · 임종철** · 홍수관*** · 송윤석***

Hwang, Sungpil*, Im, Jongchul**, Hong, Sugwan***, Song, Yoonseok***

Abstract

The paper proposes the efficient installation method of reinforcement reinforced retaining wall. Stability of retaining wall is increased by installing reinforcement between soil. Optimal height and optimal length of reinforcement were determined by the laboratory model test. Optimal height of reinforcement is a point of application of total force on the retaining wall. Optimal length of reinforcement is 500/700(reinforcement length / height of retaining wall). Effect of fixing reinforcement to the retaining wall is increased by increasing lateral displacements.

Key words : Reinforcement, Laboratory model test, Optimal height, Optimal length, Reinforced retaining wall

요 지

본 연구는 옹벽에 보강되는 보강재의 효율적 설치 방법을 제안하고 있다. 옹벽 배면에 설치되는 보강재는 흙의 인장 저항력을 증가시켜 안정성을 높여 준다. 보강재의 최적 설치위치 및 최적 설치길이를 찾기 위해 실내모형실험을 수행하였다. 보강재의 최적설치 위치는 토압 합력의 작용점이다. 보강재의 최적설치 길이는 옹벽 높이에 대한 길이의 비 500/700이다. 또한 보강재를 옹벽에 고정시킬 경우, 하중이 증가하여 변위가 커질수록 고정효과가 커지는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 보강재, 실내모형실험, 최적 설치 위치, 최적 설치 길이, 보강토옹벽

1. 서 론

성토 및 절토를 위해서 흙막이 구조물이 필요하다. 흙막이 구조물은 배면에 작용하는 토압을 견딜 수 있도록 설계된다. 하지만 구조물 배면에 작용하는 토압(상재하중포함)이 지지할 수 있는 범위를 초과하게 되면 앵커, 네일, 보강재 등으로 보강을 하게 된다.

보강재는 전단력에 대한 저항력은 있지만, 인장력에 대한 저항력이 부족한 흙의 성질을 이용하여 인장력에 대해 보강을 하는 방법이다. 따라서 보강재는 설치위치와 설치길이 등에 따라서 보강효과가 달라진다. 보강재의 길이에 대한 인발 시험 결과 보강재의 길이가 길수록 인발마찰각이 작아지는 경향을 보였다(Ju *et al.*, 2010). 또한 보강토 옹벽은 보강재의 연직간격이 작을수록, 보강재의 포설길이가 길수록 더욱 안정

을 유지하지만, 안전율이 1일 때의 포설면적의 크기와 관련한 경제성에 있어서는 포설길이를 길게 하고, 연직간격을 줄이는 것이 유리한 것으로 밝혀졌다(Ju *et al.*, 2003). 보강길이를 증가시켰을 때 사면경사와 성토재의 내부마찰각에 따라 비 보강 사면에 비하여 최대 50~150% 정도의 안전율이 증가되었으며 그 효과는 성토재의 내부마찰각이 작을수록, 사면의 경사가 클수록 높게 나타났다. 또한 보강간격을 0.6 m에서 0.3 m 까지 감소시켰을 때 안전율은 약 6~32% 정도의 증가를 나타냈으며 사면의 경사가 크고 성토재의 마찰각이 클수록 크게 나타났다(Lee *et al.*, 2001).

본 연구에서는 옹벽배면에 Geogrid와 Geomat를 1열만 설치하는 경우, geogrid의 위치와 길이를 달리한 실내모형실험을 진행하였다. 실험 결과를 이용하여 geogrid의 최적 설치위치와 최적 설치길이를 파악하여 효율적인 보강재 사용방법을

*교신저자. 정회원. 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 박사과정(Tel: +82-51-510-1543, Fax: +82-51-515-1541, E-mail: hsp@pusan.ac.kr)

Corresponding Author. Member. Graduate Student, Department of Civil Engineering, Pusan National University

**부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 교수 Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National University

***부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 석사과정 Graduate Student, Department of Civil Engineering, Pusan National University

제시하고 있다. 또한 보강재의 옹벽 배면 고정효과를 알아보았다.

2. 보강토의 인발저항력

보강토체의 내적안정성은 보강 재료의 인장강도와 흙과 보강재 사이의 결속력에 의존하며, 보강 재료의 인장강도는 보강재 파단파괴에 대한 안정성에 영향을 미친다. 보강토 옹벽의 내적안정성 해석에서는 Fig. 1에서와 같이 보강토체를 두 개의 영역 즉, 활동(주동)영역(active zone)과 저항영역(resistance zone)으로 나누어서 생각하며, 이들 두 영역은 보강토체 내부의 가상파괴면을 기준으로 나누어진다. 여기서, 가상파괴면은 이론상 보강토체 내부의 각 층별 보강재의 최대인장력 발생위치를 연결한 가상의 선으로 대수나선의 형태를 가지는 것으로 알려져 있으나, 설계에서는 계산의 편의를 위하여 일반적으로 하나 또는 두 개의 직선으로 가정한다. 수직 또는 수직에 가까운 토류구조물의 경우 벽면에 가까운 영역은 토체로부터 떨어져 나가려는 경향이 있으며, 이러한 영역을 활동영역(active zone)이라 한다. 이러한 활동영역은 가상파괴면 뒤쪽의 저항영역 속으로 연장된 보강재의 저항력에 의하여 평형을 유지하게 된다. 따라서 보강재의 인발저항력은 전체 보강재 길이에 대하여 고려하는 것이 아니라 저항영역 속에 묻힌 보강재의 길이에 대해서만 고려하며, 이 때 저항영역 속에 묻힌 보강재의 길이를 유효길이(effective length) L_e 라고 한다.

흙 속에 묻힌 보강재의 인발저항력은 흙과 보강재 사이의 상호작용에 의하여 발생하며, 만약 보강재가 Fig. 2와 같은 그리드 형태라면, 보강재의 인발저항력 T_{pull} 은 파괴췌기가 활동면을 따라 미끄러지는 순간의 보강재와 주변 흙 사이의 마찰력 T_{fric} 과 횡 방향 부재의 수동지지저항력 T_{bear} 의 합으로 나타난다. 즉,

$$T_{pull} = T_{fric} + T_{bear} \quad (1)$$

$$T_{fric} = 2a_s L_e b \sigma_v \tan \delta \quad (2)$$

Fig. 2. Pull Out Resistance Structure of Grid Type Reinforcement.

$$T_{bear} = \left(\frac{L_e}{S_t} \right) b a_b h_a \sigma_b \quad (3)$$

여기서, L_e : 보강재의 유효길이, S_t : 지지부재의 간격, a_s : 보강재 전체 표면 중 흙과 접하는 면적 비, a_b : 전체 폭에 대한 지지부재의 유효지지 폭의 비율, b : 보강재의 폭, h_a : 지지부재의 단면두께, σ_b : 지지부재의 지지저항응력, σ_v : 보강재 위에 작용하는 수직응력, δ : 흙과 보강재 사이의 마찰각

그러나 보강재의 마찰저항력 T_{fric} 과 수동지지저항력 T_{bear} 을 구분하여 적용하기는 매우 까다롭기 때문에 일반적으로 인발시험을 통한 포괄적 의미인 인발저항계수를 설계에 적용하여 사용하게 된다. 식은 다음과 같다.

$$T_{pull} = 2L_e b \sigma_v f^* \quad (4)$$

$$f^* = \tan \delta_i = C_i \tan \phi_r \quad (5)$$

Fig. 1. Justice of Reinforcement Effective Length.

여기서, C_i : 인발시 상호작용계수, L_e : 보강재의 유효길이, b : 보강재의 폭, f^* : 흙/보강재 인발저항계수, σ_v : 보강재 위에 작용하는 수직응력, δ_i : 인발시 흙/보강재 사이의 마찰각, ϕ_r : 흙의 내부마찰각

위 식에서 $2L_e b$ 는 흙과 접촉하는 보강재의 면적을 나타내며, 인발시의 상호작용계수 C_i 는 흙 속에 묻힌 보강재의 인발 시험으로부터 얻을 수 있다. 시험결과가 없는 경우, 지오톱드 또는 지오텍스타일과 같은 토목섬유 보강재의 마찰계수 f^* 는 $\frac{2}{3} \tan \phi$ 를 사용할 수 있다(Elias, 2001). 또한 돌기가 없는 강재 보강재의 경우에는 $f^* = 0.4$ 를 사용할 수 있다(French Mot, 1980).

3. 실내모형실험

3.1 실험장치 및 지반재료

3.1.1 모형토조

Fig. 3은 본 연구에 적용된 평면변형률 모형토조를 나타내며, 지반은 주문진 표준사를 사용하여 조성하였다. 사질토는 밀도에 따라 역학적 특성이 매우 민감하게 변하기 때문에, 밀도를 일정하게 유지하여 지반을 조성하여야 한다. Fig. 4는 주문진 표준사의 낙하고에 따른 건도밀도의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 3에서 낙하고 0.9 m부터 밀도가 수렴하는 경향을 나타내었고, 본 연구에서는 토조 및 모래뿌리기 장치의 높이를 감안하여 낙하고 1.2 m에서 강사법(Ko *et al.*, 1996; Park, 2003; Son *et al.*, 2003; Bautista *et al.*, 2006)으로 지반을 조성하였다.

3.1.2 모형옹벽

모형옹벽은 AER옹벽(Cho *et al.*, 2013; Hwang *et al.*, 2013)의 형태로 제작하였으며, 재료는 목재를 사용하였다. 옹벽의 폭은 토조의 폭(410 mm)에서 마찰의 발생을 제거하기

Fig. 4. Variation of the Dry Density of Jumunjin Standard Sand with Drop Height (Park, 2003).

Fig. 5. Properties of Model Wall.

Fig. 3. Schematic Diagram of Plane Strain Soil Tank.

(a) Rigid Body Combined with Reinforcement

(b) Direct Shear Test Device

Fig. 6. Material of Direct Shear Test.

위해, 양쪽 1 mm씩 줄인 408 mm로 제작하였다. 옹벽은 수직으로, 배면은 10°의 기울기로 제작하였다. 제작된 모형옹벽 및 제원은 Fig. 5와 같다.

3.1.3 보강재

보강재는 Geogrid와 Geomat를 사용하였으며, 보강재와 모형지반의 전단특성을 알아보기 위하여 직접전단시험을 실시하였다. Fig. 6(a)와 같이 나무로 제작된 블록에 보강재를 결합시키고, Fig. 6(b)와 같이 전단상자 하부에 고정하였다. 이후 실제 지반조성과 같은 방법으로, 1.2 m에서 표준사를 낙하시켜 지반을 조성하였다. 실험결과와 Table 1과 같다. 사용된 보강재의 특성은 Table 2와 같다.

3.1.4 상재하중

옹벽 배면 상부에 재하하는 하중은 폭과 높이가 20 mm인 블록(Fig. 7)을 사용하였다. 하중의 재하는 옹벽과 직접 접촉되는 것을 방지하기 위하여, 옹벽의 배면 상단에서 20 mm의 간격을 두고 배면 전체에 재하하였다. 하중은 파괴 시 까지 재하 하였고, 하중은 1열 당 1.3 kN/m²이 작용한다.

Table 1. Shear Strength of Direct Shear Test

Test type	Shear strength			
	Saturated		Unsaturated	
	Cohesion <i>c</i> (kPa)	Angle of internal friction ϕ (deg)	Cohesion <i>c</i> (kPa)	Angle of internal friction ϕ (deg)
Sand - Geomat	0.72	31.1	0.83	31.5
Sand - Geogrid	0.82	30.3	0.95	30.7

Table 2. Shear Strength of Direct Shear Test

Type	Tensile strength (kN/m)	Tensile elongation (%)
Geomat	100	25(maximum)
Geogrid	78.5	13(maximum)

Fig. 7. Block for Load.

3.2 실험방법

모형토조에 모형옹벽을 거치하고, 옹벽 배면을 뒤채움 하면서 변위를 측정하였다. 변위는 상부 2곳과 하부 1곳을 다이얼 게이지를 이용하여 측정하였다. 변위의 측정은 뒤채움 100 mm마다 실시하였으며, 1/100 mm까지 측정이 가능한 다이얼 게이지를 이용하였다. 뒤채움 700 mm 완료 후, 블록을 이용하여 하중을 재하 하였다. 보강재는 뒤채움 과정에서 해당되는 높이, 길이에 맞게 위치시켰다.

3.3 실험종류

실험은 보강재 설치 최적위치를 알기 위하여, 바닥면부터 100 mm의 높이에 보강재 설치를 시작으로 상부로 100 mm씩 이동시키며 각각의 실험을 수행하였다. 또한 보강재 설치 최적 길이를 알기 위하여, 최적위치에서 보강재의 길이를 100 mm씩 줄여가며 각각의 실험을 수행하였다. 보강재의 최적 위치 및 길이를 찾는 실험은 보강재와 옹벽을 연결하지 않고 실험을 진행하였다. 이후 보강재와 옹벽을 연결한 실험을 진행하여, 보강재의 고정효과를 확인하는 실험을 진행하였다. 실험의 종류는 Table 3과 같다.

4. 실험 결과 및 분석

보강재의 효율적 위치 및 길이를 찾기 위한 실험을 진행하였고, 결과는 다음과 같다. 결과 중 보강재의 설치위치는 모형 옹벽의 높이(700 mm)로 나누어 보강재 높이 비(Ratio of

Table 3. Types of Test Condition for AER-wall Reinforced Reinforcements

Reinforcement type	Wall's installed angle (°)	Back support's installed angle (°)	Fix a reinforcement to the wall	Reinforcement height (mm)	Reinforcement length (mm)
Geomat	0	10	Free	100	700
				200	700
				300	700
				400	700
				500	700
				600	700
				Optimal height	600
					500
					400
					300
Geogrid	0	10	Free	100	700
				200	700
				300	700
				400	700
				500	700
				600	700
				Optimal height	600
					500
					400
					300
Geomat	0	10	Fix	Optimal height	Optimal length
Geogrid	0	10	Fix	Optimal height	Optimal length

Height of reinforcement)로 나타내었다. 또한 보강재의 설치 길이는 모형옹벽의 높이(700 mm)로 나누어 보강재 길이 비 (Ratio of Length of reinforcement)로 나타내었다.

4.1 보강재 최적 설치 위치

보강재의 최적 설치 위치를 찾기 위해 보강재가 설치되지

않은 실험을 기준으로 보강재 높이 비에 따른 수평변위를 나누어 수평변위비로 표현하였고, 뒤채움 과정의 결과는 Fig. 8 과 같다. 보강재 높이 비 200/700일 때 Fig. 8의 타원 안에 나타난 결과처럼 수평변위비가 가장 작은 것을 확인할 수 있다. 따라서 보강재의 최적 설치 위치는 같은 보강재 길이를 설치 하였지만, 수평변위비가 가장 작은 보강재 높이비가 200/700

Fig. 8. Optimal Location of Reinforcement During Backfill.

Fig. 9. Optimal Location of Reinforcement During Surchage.

이라고 할 수 있다. 이는 옹벽의 토압이 작용하는 작용점인 바닥면에서부터 1/3지점(Fig. 8의 점선부분)과 거의 일치하는 것으로, 보강재의 최적 설치 위치는 토압의 합력이 작용하는 지점으로 판단 할 수 있다.

Fig. 9는 하중재하과정에서 보강재 높이 비에 따른 수평변위 비를 나타내고 있다. 보강재 높이비가 500/700 이후는 수평변위비가 줄어드는 경향이 나타나지만, 이전의 높이 비에서는 수평변위비가 일정한 결과를 나타내고 있다. 이는 상재하중의 영향이 높이 비 400/700의 이하에는 직접적으로 미치지 못했기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 보강재 최적 설치 길이

보강재의 최적 설치 길이를 찾기 위해 보강재 높이 비 200/700위치(뒤채움 과정의 최적위치)에서 보강재 길이비가 700/700만큼 설치된 실험을 기준으로 각 보강재 길이 비 별 수평변위를 나누어 수평변위 비를 나타내었다. 결과는 Fig. 9의 결과와 같이, 하중재하에 따른 영향이 보강재 설치위치까지 미치지 못하기 때문에 뒤채움과정의 결과만 표시하였고, 결과는 Fig. 10과 같다. 결과는 Fig. 10의 점선으로 표시된 보강재 길이 비 500/700을 기준으로 보강재의 길이가 짧아지는 경우 수평변위가 급격하게 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 보강재의 최적 설치 길이는 설치에 따른 효과는 거의 같지만, 보강재의 길이가 가장 짧은 보강재 길이 비 500/700이라고 할 수 있다.

4.3 보강재의 고정 효과

보강재의 최적 설치 위치 및 최적 설치 길이를 파악하기 위한 실험은 보강재와 옹벽을 고정시키지 않고 실험을 진행하였다. 보강재를 고정시키지 않는 경우 Fig. 2와 같이 가상활동면을 넘어가는 부분만 보강력을 발휘한다. 하지만 보강재를 고정시키면 옹벽이 거동 할 경우, 가상활동면 안쪽의 보강재도 보강력을 발휘하게 되어 좀더 효율적으로 보강재를 활용

Fig. 10. Optimal Length of Reinforcement During Backfill.

Fig. 11. Fixed Effect of Reinforcement.

할 수 있다. 이 효과를 확인하기 위해 보강재를 고정된 상재하중 재하과정의 실험의 결과를 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11은 보강재가 고정되지 않았을 때를 기준으로 보강재가 고정된 실험의 수평변위를 나누어 수평변위비로 나타낸 결과이다. Geomat와 Geogrid 모두 상재하중이 증가하면서 고정의 효과가 커지는 것을 알 수 있다. 이는 옹벽의 변위가 증가하면서, 보강재의 보강력이 점차 발휘되어 나타나는 결과로 해석 할 수 있다. 두 보강재 모두 최대 약 30%의 수평변위가 감소하는 것으로 나타났다. 이 결과는 상재하중, 흙의 종류 및 보강재의 종류에 따라 달라지겠지만, 보강재를 옹벽에 고정하면 옹벽의 안정성을 향상 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4.4 거동분석

보강재의 유무에 대한 거동분석을 위해, 지반내 발생하는 최대전단변형률(γ_{max})로 파괴면을 비교하였다. Fig. 12(a)는 보강재가 없는 경우의 거동을, Fig. 12(b)는 보강재가 있는 경우의 거동을 나타내고 있다. 파괴면의 각도는 거의 유사하지만, 12(b)의 보강재가 설치된 위치를 직접 확인 가능할 정도로 변형률이 변하는 지점을 찾을 수 있다. 이는 보강재의 효과가 발휘 되어 지반의 거동이 보강재 상·하를 기준으로 다소 변경되는 것으로 분석할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 옹벽 배면에 설치되는 보강재의 효율적인 사용을 위해, 최적 보강 위치 및 최적 보강 길이를 알아보기 위하여 실내모형실험을 진행하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 옹벽높이에 따른 보강재의 높이 비 200/700의 위치(옹벽 합력의 작용점)에서 수평변위가 가장 적게 발생하였다. 보강재의 최적 위치는 옹벽 합력의 작용점이다.

Fig. 12. Contour Map.

- 2) 옹벽 높이에 따른 보강재의 길이 비 500/700 길이보다 길이가 늘어나더라도 수평변위의 변화는 거의 없었다. 보강재의 최적 길이는 보강재 길이 비 500/700일 때이다.
- 3) 보강재를 옹벽에 고정하는 경우, 고정하지 않은 경우 보다 수평변위가 최대 30% 줄어들었다. 보강재를 옹벽에 고정하면 옹벽의 안정성을 향상 시킬 수 있다.

References

- Bautista, F.E., Park, L.K., Im, J.C., and Lee, Y.N. (2006) Variation of Earth Pressure Acting on Cut-and-Cover Tunnel Lining with Settlement of Backfill. *J. of the Korean Geotechnical Society*, Vol.22, No.6, pp. 27-40.
- Cho, H.J., Im, J.C., Hwang, S.P., Baek, S.M., and Joo, I.G. (2013) An experimental study on the area ratio of back support of Assembled Earth Retaining wall. *KGS Fall National Conference*, pp. 923-930.
- Elias, V. and Christopher, B.R. (2001) Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines. Publication No.FHWA-NHI-00-43, U.S. Dot, FHWA., pp. 120-123.
- French MOT (1980) Reinforced Earth Recommendations and Rules of the Art, French Ministry of Transport, pp. 39-47.
- Hwang, E.A., Im, J.C., Hwang, S.P., Lee, W.J., and Kim, J.S. (2013) An experimental study on the effect of back support of Assembled Earth Retaining wall. *KGS Fall National Conference*, pp. 931-938.
- Ju, J.W., Kim, S.T., Park, H.S., Jang, Y.C., and Cho, S.D. (2003) Stability of Reinforced Earth Wall due to the Variation of Length and Vertical Distance of Reinforcement. *KSCE Conference*, Vol.2003, No.10, pp. 3234-3240.
- Ju, J.W., Lim, W.S., Lee, G.D., Park, J.B., and Kim, J.H. (2010) Pullout Characteristics According to the Change of Reinforcement Length in Pullout Test. *The Fall 2010 Geosynthetics Conference*, Seoul, Vol.2010, No.11, pp. 81-93.
- Ko, H.S., Im, J.C., Park, L.K., and Oh, M.L. (1996) Model tests on the behaviour of sandy ground during tunneling. *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.1996, No.2, pp. 371-374.
- Lee, H.M., Yoo, H.K., Suh, Y.C., and Park, U.S. (2001) Stability Analysis of Road Embankment Reinforced by Geogrid. *J. of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol.2, No.4, pp. 39-50.
- Park, L.K. (2003) *A Study on the Characteristic of Ground Behaviour and Settlement Restraining effect of Micropile during Shallow Tunnel Construction in Soft Ground*, Ph D. Thesis, Pusan National University, pp. 134-145.
- Son, J.H., Im, J.C., Park, L.K., and Lee, T.H. (2003) A Study on the Group effect of Micropiles installed beneath Shallow Foundations. *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.2003, No.10, pp. 3354-3357.

Received December 20, 2013

Revised December 23, 2013

Accepted January 29, 2014