현장사례를 이용한 보강토옹벽의 파괴원인 및 안정성 분석

Analysis on Failure Causes and Stability of Reinforced Earth Wall Based on a Field Case

홍기권¹, 한중근^{2*}, 이종영³, 박재석⁴

Kikwon Hong¹, Jung-Geun Han^{2*}, Jong-Young Lee³, Jai-Seok Park⁴

¹Member, Research Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Urban Design and Study, Chung-Ang Univ., 84, Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul, 156-756, Republic of Korea

²Member, Professor, School of Civil and Environmental Engineering, Urban Design and Study, Chung-Ang Univ., 84, Heukseok-Ro, Dongjak-gu, Seoul, 156-756, Republic of Korea

³Member, President, GEO Healtech Co., Ltd., #207, 71, Sangdo-ro 15-gil, Dongjak-gu, Seoul, 156-836, Republic of Korea

⁴Non-member, President, OHJU Civil Engineering, Co., Ltd., #5, 36, Yangjaecheon-ro 19-gil, Seocho-gu, Seoul, 137-891, Republic of Korea

ABSTRACT

This paper describes the global stability of the reinforced earth wall, which was collapsed by heavy rainfall. The seepage analysis was conducted to confirm the change effect of groundwater level on slope with reinforced earth wall. The seepage analysis result confirmed that the change of groundwater level is greatly influenced by rainfall. According to the change of groundwater level, the global stability analysis with reinforced earth wall was conducted based on the results of seepage analysis. The safety factor of the slope was 0.476 when the wall is collapsed firstly. The collapse cause analyzed that soil strength was weakened because the ground was saturated by continuous rainfall. Therefore, the global stability, which is considered heavy rainfall, should be conducted at design and construction of reinforced earth wall.

요 지

본 연구에서는 집중강우에 의해 파괴가 발생한 보강토옹벽의 현장사례를 바탕으로 강우가 보강토옹벽의 안정성 미치는 영향을 분석하기 위하여 침투해석을 수행하였다. 또한 침투해석 결과를 바탕으로 지하수위 변화에 따른 보강토옹벽의 전체사면에 대한 안정성을 평가하였다. 침투해석 결과, 본 연구대상 현장에 형성되는 지하수위는 강우의 영향이 민감하게 작용하는 것으로 확인되었다. 이를 바탕으로 보강토옹벽에 대한 전체사면 안정성을 평가한 결과, 보강토옹벽의 최초 파괴 당시의 안전율이 0.476으로 나타났다. 즉, 보강토옹벽의 전체사면에 대한 활동파괴는 지속적인 강우 및 집중강우로 인하여 과도한 지표수 유입에 따른 급속한 지하수위 상승이 직접적인 원인으로 분석되었다. 따라서 보강토옹벽의 설계 및 시공 시, 최근 발생하고 있는 집중강우를 대비한 설계 및 이를 고려한 다양한 안정해석을 통하여 안정성을 확보할 필요가 있음을 확인하였다.

Keywords : Reinforced earth wall, Rainfall, Groundwater, Seepage analysis, Global stability

1. 서 론

보강토옹벽은 뒤채움 흙, 뒤채움 지반 내에 포설된 보강재 및 전면벽체가 일체화되어 토압 및 외력에 저항하는 구

조물로서(Park & Lee, 2012), 우수한 경제성, 시공성 및 안정성에 기인하여 설계 및 시공이 지속적으로 증가하고 있다. 이와 같은 보강토옹벽은 과거에 비하여 시공여건이 열악해지고, 시공규모도 대규모화되어 가고 있음에도 불구하고, 대부분의 구조물은 보다 안전하고 경제적인 설계 및 시공이 이루어지고 있다(Yoo et al., 2005). 그러나 경제성 및 시공 편의성에 치중하여 주변 지반 및 환경조건을

Received 15 Feb. 2013, Revised 12 Mar. 2013, Accepted 14 Mar. 2013

*Corresponding author

Tel: +82-2-820-5253; Fax: +82-2-816-4160

E-mail address: jghan@cau.ac.kr (J. G. Han)

간과하거나 적절히 고려하지 못함으로써, 구조물의 파괴가 종종 발생하는 경우도 있다(Han et al., 2005). 국내 대다수의 보강토옹벽은 FHWA(2001) 설계기준을 근거로 설계가 이루어지고 있으며, 설계기준의 만족 여부를 평가하기 위한 안정성 검토는 내적 및 외적안정성 뿐만 아니라, 보강토옹벽 구조물을 포함하는 전체사면안정에 대한 검토가 필요하다. 그러나 다수의 설계에서는 전체사면안정에 대한 검토가 생략되고 있는 것이 사실이다(Yoo et al., 2005).

한편, 보강토옹벽의 파괴는 기초지반의 침하 및 활동, 전면벽체 블록의 균열 및 탈락과 전체사면파괴 등이 대표적이며, 이와 같은 파괴를 유발하는 다양한 원인 중에서 강우가 미치는 영향은 매우 크다고 할 수 있다. 즉, 적절한 설계가 이루어졌음에도 불구하고 구조물의 파괴가 발생하였다면, 구조물의 규모와 무관하게 앞서 언급한 바와 같이 주변 지반 및 환경조건에 대한 영향을 명확하게 분석하지 못하였기 때문이다. 이는 보강토옹벽의 역학적 거동에 대한 이해가 부족하여 발생한 것으로 확인된 바 있다(Yoo and Jung, 2006). 이에 Kwon et al.(2009)은 강우가 보강토옹벽의 거동에 미치는 영향을 분석하고, 구조물의 배수관련 설계 및 시공기준에 대한 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 집중강우가 발생한 직후에 전체사면에 대한 활동파괴가 발생한 시공이 완료된 보강토옹벽 현장 사례를 이용하여 파괴 당시의 강우이력을 바탕으로 보강토옹벽의 파괴와 강우와의 관계를 분석하였다. 또한 집중강우가 보강토옹벽의 안정성에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 침투해석을 실시하였으며, 침투해석 결과를 반영한 보강토옹벽의 전체사면에 대한 안정성을 평가하였다.

2. 현장개요

본 연구대상 현장은 대구광역시의 OO아파트 단지 내에 위치하고 있으며, 보강토옹벽의 규모는 연장 730m, 높이 1.7m~5.5m로서 그다지 크지 않은 규모이다. 파괴가 발생한 구간의 옹벽 높이는 3.4m이며, 상부에 1:1의 경사를 갖는 흙쌓기 비탈면이 4.5m 높이로 시공되어 공용중인 상태였다. 파괴구간의 연장은 약 20m로서 소규모로 파괴되었으며, 단면도와 파괴전경은 Fig. 1 및 Fig. 2에서 보는 바와 같다.

본 현장에 대한 육안 및 사진조사를 수행한 결과, 관찰된 배수지형은 강우발생 시에 흙쌓기 비탈면 상부지반에

Fig. 1. Cross-sectional view of the collapsed wall

(a) Side view

(b) Top view

Fig. 2. Foreground of the collapsed wall

서 발생하는 지표수와 침투수가 보강토옹벽의 배면으로 유입될 수 있는 조건으로 확인되었다. 특히, 보강토옹벽 배수체계는 배면 지반으로부터 유입되는 지표수를 수용하는 시스템으로 설치되어 있기 때문에, 보강토옹벽의 배수조건이 불량할 경우 안정성 저하에 큰 영향을 미칠 수 있는 것으로 나타났다.

3. 강우에 의한 영향 분석

전술한 바와 같이, 본 현장은 집중강우가 발생한 직후에 보강토옹벽의 파괴가 발생된 점을 고려하여, 사례현장 지역에 대한 파괴 당시의 강우이력을 바탕으로 보강토옹벽의 파괴와 강우와의 관계를 분석하였다.

3.1 강수량 분석

본 연구대상 보강토옹벽은 2007년 9월 1일 14시경에 1차 파괴가 발생하였으며, 동년 9월 16일 13시경에 2차 파괴가 발생되었다. 파괴시점에는 강우가 발생한 기상조건으로서, 파괴지역에 해당하는 기상청의 강우기록자료를 분석하여, 파괴발생 전후의 시간강우강도와 누적강우량과의 관계 및 일일강우량과 경과시간과의 관계를 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 8월 26일 이후에 지속적인 강우가 발생하였으며, 파괴당일인 9월 1일에는 61mm/day(최대시간강우강도 7.5mm/hr)의 집중강우가 발생되었다. 또한 9월 16일에는 기 파괴된 구조물과 인접하여 연속적인 2차 파괴가 발생하였으며, 이때의 강우량은 97.5mm/hr(최대시간강우강도 18.5mm/hr)인 것으로 확인되었다. 또한 파괴가 발생한 9월 중순까지 약 6일간(9월 10일~9월 15일)을 제외하고는 지속적인 강우가 발생한 것을 확인할 수 있었다(Fig. 4 참조). 따라서 보강토옹벽의 파괴는 지속적인 강우 및 집중강우가 원인이 된 것으로 추정되었다.

Fig. 3. Relationship between hourly rainfall and accumulated rainfall

Fig. 4. Relationship between daily rainfall and elapsed time

3.2 강우량에 따른 파괴규모

Fig. 5는 연구대상 보강토옹벽이 위치한 대구지역의 과거 5년간(2002년~2006년)과 2007년에 대한 8월 및 9월 평균강우량을 나타낸 것으로서, 5년간 8월 및 9월의 평균강우량은 각각 약 330mm와 125mm인 것으로 파악되었으며, 파괴가 발생한 2007년의 경우에는 각각 약 198mm 및 365mm인 것으로 확인되었다. 즉, 파괴가 발생한 2007년 9월은 본 연구대상 지역의 과거 평균강우량보다 약 3배가 많은 매우 큰 강우가 발생하였다. 특히, 일일강우량을 비교한 결과, 1차 및 2차 파괴가 발생한 날짜의 경우에는 과거에 비하여 매우 큰 집중강우가 발생된 것으로 분석되었다. 이를 바탕으로 Fig. 6에서 보는 바와 같이, Hong et al. (1990)이 제안한 국내의 비탈면파괴 발생규모별 최대시간강우강도와 누적강우량의 상관관계를 이용하여 파괴규모

Fig. 5. Comparison of the monthly mean rainfall during the past 5 years and monthly rainfall in 2007 at Daegu

Fig. 6. Prediction of collapse scale

예측을 수행하였다. 그 결과, 1차 파괴는 소규모의 범위에 해당하는 것으로 분석되었으며, 2차 파괴는 중규모 이상의 대규모 파괴에 근접하는 파괴가 발생할 수 있는 것으로 확인되었다. 따라서 파괴된 보강토옹벽의 배수시스템은 적절한 설계-시공이 이루어졌다 하더라도, 강우의 영향에 의해 파괴조건에 쉽게 노출될 수 있었던 것으로 판단된다.

4. 수치해석을 이용한 보강토옹벽의 안정성 평가

앞서 언급한 바와 같이, 파괴가 발생한 보강토옹벽은 지속적인 강우 및 집중강우가 파괴원인에 상당한 영향을 미쳤을 것으로 판단되었기 때문에, 지하수위 변동을 고려한 침투해석을 수행하였으며, 침투해석 결과를 반영한 보강토옹벽의 전체사면에 대한 안정성을 평가하였다.

4.1 강우강도에 따른 침투해석

4.1.1 개요

강우에 따른 침투특성 분석은 범용프로그램인 SEEP/W를 이용하였다. 이 때 사용된 강우강도는 앞서 조사된 대구지역의 강우조사 결과를 바탕으로 하였으며, Table 1에서 나타내 바와 같이, 최초 파괴 전 7일간의 강우량 변화를 일일강우량으로 환산하여 적용하였다. 지표수의 침투조건은 배면 흠쌓기 비탈면에서 옹벽상단측에 연속적으로 발

생하는 조건이며, 옹벽전면의 표면은 모두 불투수층으로 설정하였다. 또한 해석단면 모델링을 위한 지반의 물리적 및 공학적 특성은 지반조사 결과를 바탕으로 Table 2와 같이 적용하였으며, 해석단면은 Fig. 7에서 보는 바와 같다.

4.1.2 해석결과 및 고찰

Fig. 8은 해석조건에 따른 침투해석결과를 나타낸 것으로서, 지하수위의 변동은 강우강도에 민감하게 반응하는 것으로 나타났으며, 강우시작 3일후와 4일후인 8월 28일~8월 29일에는 지하수위가 지표층까지 상승하는 것으로 해석되었다. 파괴발생시점 전 3일간의 지하수위 변화를 분석한 결과, 8월 30일에는 지하수위가 보강토옹벽 상단까지 상승하는 결과를 보였으며, 강우가 일시적으로 소강된 8월 31일에는 지하수위가 옹벽저면까지 하강하였다. 이후

Table 1. Converted value of rainfall for seepage analysis

Date	Daily rainfall (mm/day)	Hourly rainfall (m/hr)
26 Aug.	4.0	4.63e-8
27 Aug.	7.0	8.10e-8
28 Aug.	28.0	3.24e-7
29 Aug.	36.0	4.17e-7
30 Aug.	6.5	7.52e-8
31 Aug.	1.5	1.74e-8
01 Sep.	65.0	7.52e-7

Table 2. Physical and engineering properties of soil

Classification	Unit weight (kN/m^3)	Internal friction angle ($^{\circ}$)	Cohesion (kPa)	Permeability coefficient (cm/sec)	USCS
Embankment	17.4	27.7	2.3	7.794E-06	CL
Backfill soil					
Reinforced soil					
Original ground	18.3	35.7	1.2	2.318E-05	SM

Fig. 7. Seepage analysis modeling

Fig. 8. Seepage analysis result

파괴당일인 9월 1일에는 많은 양의 강우로 인하여 지하수위가 다시 지표면까지 상승하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 연구대상 현장의 지반특성을 고려할 때, 8월 26일부터 지속된 강우로 인하여 지반이 장시간 포화되어 있어 파괴당일의 지반이 매우 느슨한 상태로 존재했을 것으로 판단되었다.

4.2 보강토옹벽의 전체사면 안정성 평가

보강토옹벽을 포함하는 전체사면에 대한 안정성 해석은 침투해석에 이용된 단면 및 지반의 공학적 특성을 동일하게 적용하였으며, 침투해석 결과로부터 도출된 강우강도에 의한 침윤선이 지하수위로 반영되었다. 해석에 적용된 범용프로그램은 보강토체 내 지반과 보강재 사이의 마찰저항을 고려할 수 있는 Slopile(ver.3.0)을 이용하였으며, 해석 시 지하수위 상태는 비교적 강우량이 많이 발생한 날을 기점으로 하여 8월 30일, 8월 31일 및 파괴당일인 9월 1일로 구분하여 적용하였다.

침투해석 결과를 반영한 일일강우량에 따른 지하수위 변화를 고려하여 전체사면안정성을 해석한 결과를 Fig. 9 및 Table 3에 나타내었다. 이 때, 건기시의 안정성은 기준 안전율을 만족하는 결과로 확인되어, 본 연구결과에서는 제외하였다.

본 연구대상 구조물이 위치한 대구지역에는 1차 파괴발생 7일 전까지 지속적인 강우가 발생했으며, 4일전인 8월 28일에는 28mm/day, 3일전인 8월 29일에는 36mm/day의 강우가 발생하였다. 이에 7일간의 강우기록을 조합하여 침투해석을 실시한 결과에서 파괴발생 2일 전인 8월 30일의 지하수위는 보강토옹벽 저면과 배면지반 상부 지표면 사이의 중간지점에 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 즉, Fig. 9(a)에서 보는 바와 같이, 최초 파괴발생 2일 전의 사면안전율은 0.952로서, 실제로 파괴가 발생도지는 않았지

※ Notice (rainfall applied in analysis)

- 2 ; 26 Aug.
- 4 ; 27 Aug.
- 6 ; 28 Aug.
- 8 ; 29 Aug.
- 10 ; 30 Aug.
- 12 ; 31 Aug.
- 14 ; 01 Sep.

(a) 30 Aug.

(b) 31 Aug.

(c) 01 Sep.

Fig. 9. Analysis results on global stability with reinforced earth wall

만, 지반이 강우에 의해 매우 불안정하여 파괴가 발생되기 직전인 상태인 것으로 분석되었다. 그리고 강우량이 현저히 감소한 8월 31일의 경우에는 지하수위가 급격히 하강

Table 3. Safety factor of global stability

Classification		Safety factor
Groundwater level condition	30 Aug.	0.952
	31 Aug.	1.243
	01 Sep. (Fully saturated)	0.476

※ Required safety factor : 1.3

하는 지반특성을 나타내었지만, 기준안전율을 만족하지는 못하였다(Fig. 9(b) 참조). 또한 집중강우가 발생한 9월 1일의 전체사면 안정성은 0.5 이하의 안전율이 나타났으며, 이는 불안정한 상태의 전체사면이 강우에 의해 파괴된 분석결과와 일치하는 것이다.

따라서 강우로 인한 지하수 및 지표수의 과도한 유입이 지하수위의 급속한 상승을 초래하였으며, 장시간의 강우와 지반의 오랜 포화상태로 인하여 지반이 느슨해진 상태에서 보강토옹벽의 파괴가 발생된 것으로 판단되었다. 또한 안정해석 결과에서 나타난 구조물의 파괴면은 보강토옹벽의 하부지점을 통해 발생하는 것으로 확인되었다. 이는 실제 파괴패턴과 유사한 결과로서, 시공 당시의 설계결과를 비추어 볼 때, 보강토옹벽은 지중 및 지표수 유출이 원활한 배수 시스템을 갖추고 있는 상태로 판단할 수 있다. 즉, 앞서 언급한 바와 같이, 강우에 의한 과도한 지표수 및 지하수의 유입이 본 연구대상 구조물의 안정성 저하에 큰 영향을 미친 것으로 분석되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 규모가 그다지 크지 않음에도 불구하고, 집중강우가 발생한 직후에 전체사면에 대한 활동파괴가 나타난 시공이 완료된 보강토옹벽 현장사례에 대하여 강우이력을 바탕으로 집중강우가 보강토옹벽의 안정성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 이를 바탕으로 보강토옹벽의 전체사면에 대한 안정성을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

연구대상 보강토옹벽의 전체사면에 대한 활동파괴는 지속적인 강우 및 집중강우로 인하여 배면에 시공된 흙쌓

기 비탈면 상부지반으로부터의 과도한 지표수 유입에 따른 급속한 지하수위 상승이 직접적인 원인으로 분석되었다. 또한 주변지반의 비교적 빠른 배수 특성에도 불구하고, 비탈면 상부지반의 지표수 및 지하수가 보강토옹벽 측으로 집중 발생할 경우에 대비한 배수시스템이 부족한 것으로 판단된다. 이는 집중강우 시, 지표수 및 지하수가 보강토옹벽 측에 집중적으로 발생할 경우에 대비한 추가적인 배수시스템에 대하여 고려할 필요가 있음을 의미하는 결과이다. 또한 보강토옹벽 설계 및 시공 시, 최근 발생하고 있는 집중강우를 대비한 설계 및 이를 고려한 다양한 안정해석을 통하여 안정성을 확보할 필요가 있음을 확인하였다.

References

1. 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, Federal Highway Administration, Washington, D.C., USA.
2. Han, J. G., Cho, S. D., Jeong, S. S., Lee, K. W. and Hong, K. K. (2005), "Case Study on Global Slope Failure Case of Segmental Retaining Wall", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.4, No.2, pp.47-56. (in Korean)
3. Hong, W. P., Kim, Y. W., Kim, S. K., Han, J. G. and Kim, M. (1990), "Prediction of Rainfall-triggered Landslides in Korea", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.6, No.2, pp.55-63. (in Korean)
4. Kwon, O. H., Park, Y. J. and Seo, D. H. (2009), "Design and construction criterion of MSE Wall in preparation for climatic change", *Proc. of Geosynthetics Conference Fall 2009*, Suncheon, Korea, pp.91-100. (in Korean)
5. Park, J. K. and Lee, K. W. (2012), "A Study on Practices and Troubles of Reinforced Soil Wall", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.11, No.1, pp.65-75. (in Korean)
6. Yoo, C. S., Jeon, H. Y., Jung, H. Y. and Jung, H. S. (2005), "Geosynthetic Reinforced Segmental Retaining Wall Failure During Heavy Rainfall - A Case Study", *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.21, No.4, pp.135-143. (in Korean)
7. Yoo, C. S. and Jung, H. Y. (2006), "Rainfall and Performance of Soil-Reinforced Retaining Wall - Investigation on Case Histories", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol.5, No.3, pp.17-24. (in Korean)