

## 강우시 보강토 옹벽의 배수여부에 따른 안정성 - 수치해석 연구

### Stability of reinforced earth wall during rainfall - numerical investigation

유충식<sup>1)</sup>, Chungsik Yoo, 김선빈<sup>2)</sup>, Sunbin Kim, 한준연<sup>3)</sup> Joonyeon Han

1) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ

2) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

3) 성균관대학교 건설환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Envir. Engrg, Sungkyunkwan Univ.

**SYNOPSIS** : This study concerns the effect of drainage in reinforced soil on its stability during rainfall. A series of finite-element analysis based transient seepage analysis were performed on a number of cases with different drainage conditions in terms of layers of geotextiles installed in the reinforced zone. The results were then coupled with the limit-equilibrium slope stability analysis to investigate the variation of global stability factor of safety with rainfall infiltration into the reinforced wall. The results were thoroughly analyzed to get insight into the mechanism of pore water pressure reduction effect of the geotextile and into its effect on overall slope stability. It is shown that layers of geotextile installed in the reinforced zone can prevent decrease in suction in the reinforced zone during rainfall, thereby reducing potential risk of decreasing shear strength of the reinforced zone. Practical implications of the findings were discussed.

**Key words** : reinforced earth wall, geosynthetics, drainage, finite element analysis, seepage analysis, transient flow, suction

## 1. 서 론

1990년도 중반 이후 국내에 널리 보급 되어 적용되고 있는 보강토 공법은 경제성, 시공성 등의 이점으로 인해 콘크리트 옹벽의 대체 공법으로 적용되고 있다. 도입 초기에는 조정, 부지조성 및 도로 성토 부 등에 제한적으로 적용했으나 영구구조물의 일부로 적용되고 있는 등 그 사용범위가 확대되고 있다. 현재 적용되고 있는 대부분의 보강토 옹벽은 안전하게 시공되고 있으나 시공 여건이 열악해 지고 장대화 되는 추세여서 다양한 시공조건에서 보다 안전하고 경제적인 보강토 옹벽의 시공을 위해서는 실무와 이론의 틈을 좁히기 위한 많은 연구가 필요한 실정이다.

일반옹벽과 더불어 보강토옹벽 등 토류구조물은 여름철 강우시에 많이 발생한다(Koerner & Soong 2001). 이러한 문제를 야기시키는 많은 원인중의 하나는 강우로 인한 토체내의 침투는 토체의 모관흡수력(suction)을 감소시키고 더 나아가 전단강도를 감소시킴으로서 전반적인 안정성을 감소시키 때문이라고 할 수 있다. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위한 근본적인 방법으로서 보강토체의 모관흡수력 감소(간극수압 감소)를 억제하는 방안이 해결책이 될 수 있다. Garcia 등 (2006)은 보강토체에 설치된 부직포가 강우시 보강토체의 모관흡수력 저하 방지 대책으로서 가능성을 실험적 연구로서 검토한 바 있어 이의 현장적용이 매우 긍정적임을 보고한 바 있다.

본 연구에서는 보강토 옹벽의 강우시 안정성 증대 방안으로서 부직포를 이용한 배수기능 확보 가능성 여부를 검토하였다. 이를 위해 불포화토 개념이 접목된 유한요소해석 개념의 부정류해석을 수행하였으며 이를 불포화토 전단강도 개념에 근거한 한계평형해석과 연계시켜 안정성에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 유한요소해석에 의한 침투해석

### 2.1 검토조건

본 연구에서는 그림 1에 제시되어 있는 높이 7.9 m의 옹벽을 대상으로 하였으며 강우시 부직포의 간극수압 저감 억제효과를 정성·정량적으로 평가하기 위해 다양한 포설조건을 고려하였다. 즉, 부직포가 포설되지 않은 경우와 일정간격 및 길이로 포설된 조건들에 대한 검토를 수행하였다. 대상 옹벽의 보강조건은 내외적 안정성이 확보되도록 허용인장장도 65kN/m의 보강재 길이 0.7H, 간격 0.6m로 포설되는 것으로 가정하였다.

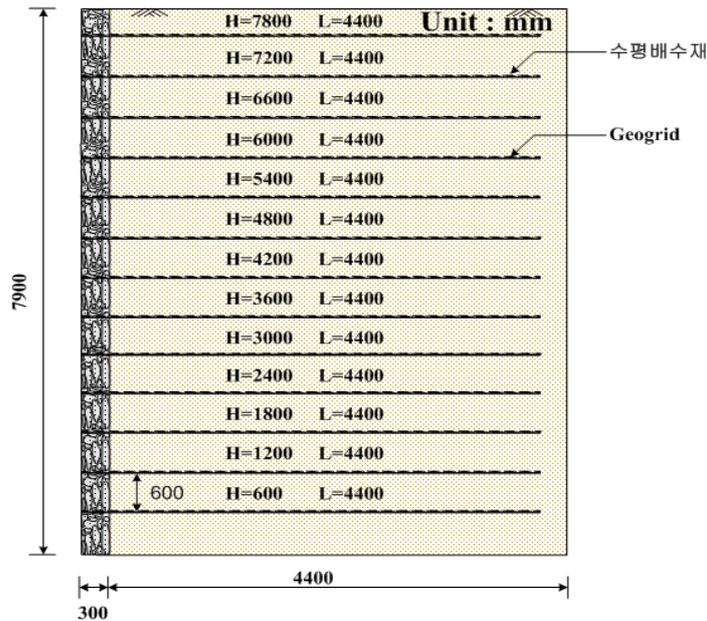


그림 1. 검토대상 옹벽 단면

본 검토에서 고려한 강우조건은 2003월 천안 현장의 보강토 옹벽이 붕괴를 야기시킨 6월 및 7월의 실제 강우를 고려하였다. 즉, 고려 대상 강우의 강수량 및 강우강도는 해당 기간의 기상청 자료에 근거하여 6, 7월 두 달간 강수량 약 700mm, 최대 강우강도는 39mm/hr 정도로 설정하였다. 이러한 강수량은 우리나라 평균강수량이 약 1200~1500mm 정도인 것을 감안할 때 평균을 웃도는 수치라고 할 수 있다.

한편, 보강토 옹벽은 앞서 언급한 붕괴현장의 옹벽 시공에 사용된 뒤채움흙이 적용되는 것으로 가정하였다. 당 현장의 뒤채움흙은 통일분류법에 근거할 때 SM 혹은 SC으로 분류되는 흙으로서 우리나라의 시공여건을 볼때 일반적으로 적용되는 뒤채움흙으로 간주할 수 있다. 뒤채움흙의 물리적 역학적 특성은 아래와 같다.

표 1. 뒤채움흙의 공학적 특성

구분	물성치	구분	물성치
비중(Gs)	2.65	통일분류법(USCS)	SM ~ SC
액성한계(LL, %)	35.5	투수계수 (cm/sec)	$5.0 \times 10^{-5}$
소성한계(PL, %)	26.0	최대건조단위중량(kN/m <sup>3</sup> )	18.4
#200 통과량(%)	36.8	최적함수비(%)	13.7

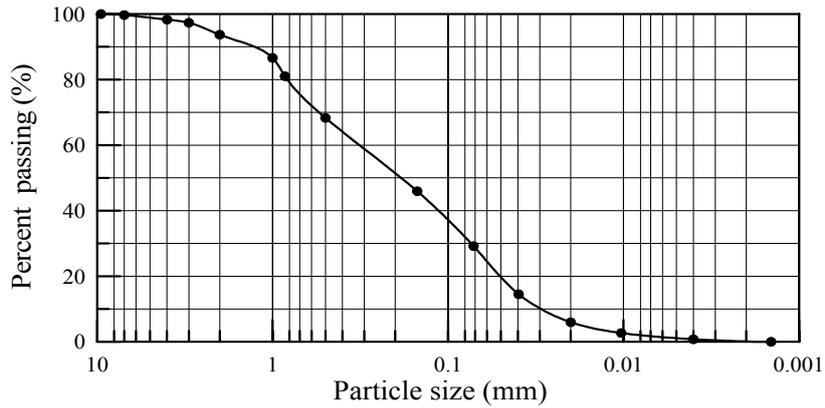


그림 2. 성토재의 입도분포곡선

한편, 붕괴 옹벽 현장에서 채취한 뒤채움흙에 대한 투수시험 및 대형직접전단시험 결과로부터 얻어진 결과를 본 검토에 적용하였으며 이에 근거하여 포화 투수계수는 약  $5.0 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$  내부마찰각  $\phi' = 22^\circ$  점착력  $c' = 13 \text{ kPa}$  를 적용하였다.

## 2.2 침투해석 모델링

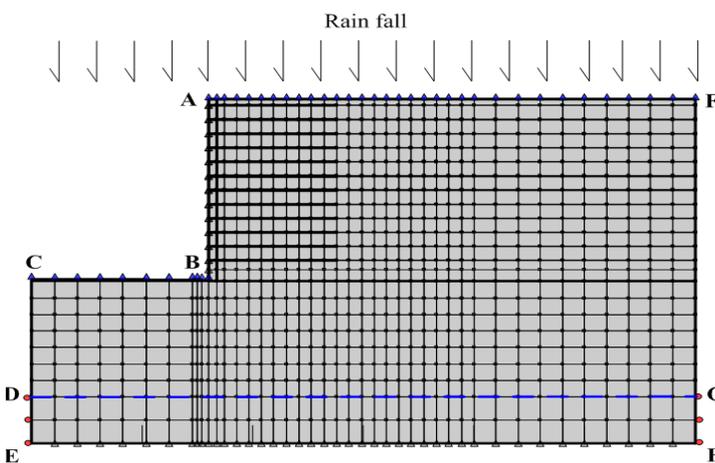


그림 3. 해석에 적용된 유한 요소망

본 연구를 위한 침투해석에서는 상용프로그램 SEEP/W를 사용하였다. 부정류 해석은 앞서 기술한 바와 같이 2006년 여름에 발생한 서울지역 강우자료를 토대로 6월(150mm/12day)과 7월(550mm/25day)에 발생한 강우에 대한 침투해석을 실시하였다. 그림 3은 해석에 적용된 유한요소 모델의 개요도를 보여주고 있다. 해석 모델링에 있어 지반은 4절점 평면변형요소를 적용하였으며 경계조건의 설정에 있어서 하부 기초지반 측면 경계면(D-E, G-H)에는 지하수위를 고려하여 일정수두조건을 지정하였으며 하단 경계면에는 'No Flux'의 경계조건을 설정하였다. 한편, 보강토

옹벽의 전면벽은 부직포에 의한 배수 효과를 나타내기 위해 쇄석의 물성치를 사용하였다.

한편, 해석에서 필요한 뒤채움흙 및 성토재에 대한 SWCC는 Arya와 Paris (1981)가 제안한 방법을 토대로 위에 제시된 입도분포곡선으로부터 추정된 후 이를 토대로 다시 Fredlund 등 (1994)이 제안한 방법을 토대로 투수계수곡선을 추정하였으며 해석에 적용한 SWCC와 투수계수 곡선은 각각 아래 그림 4와 같다. 이때 기초지반의 포화 투수계수는  $8.0 \times 10^{-8} \text{ m/sec}$ 를 적용하였고, 지하수위는 GL(-) 5m에 위치하는 것으로 가정하였다. 한편 부정류 침투해석의 결과는 해석이전 초기 간극수압 분포 결과에 좌우되므로(Blake 2003) 부정류 해석 실시이전에 6월 이전의 강우 결과를 토대로 초기 간극수압 분포를 구현하였다(그림 5). 한편, 부직포의 배수효과는 해석모델에서 두께 10mm의 얇은 층을 형성하고 조사된 기성제품의 투수계수는  $3.28 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ 를 부여하여 모델링하였다.

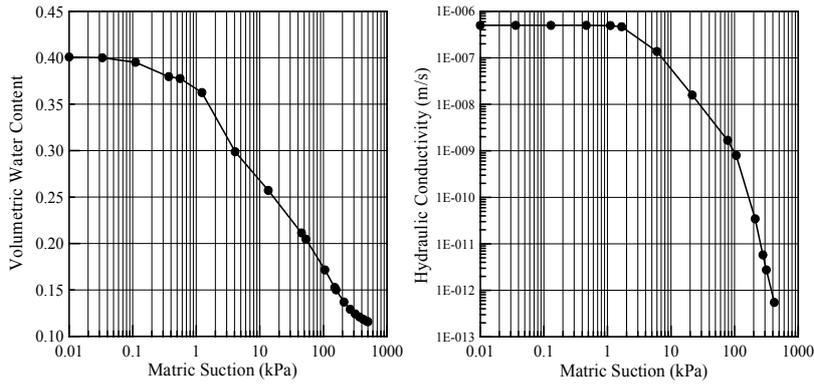


그림 4. 흡-수분 특성 곡선-투수계수 곡선

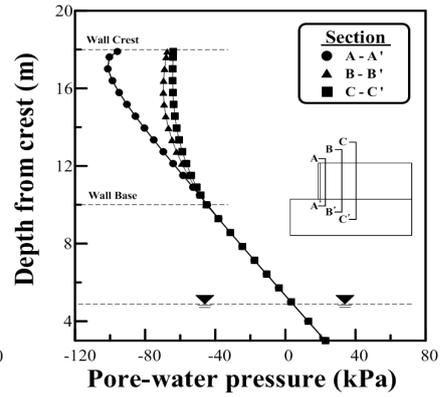


그림 5. 초기 간극수압분포

### 2.3 사면안정 해석 모델링

SEEP/W를 이용한 침투해석에서 산정된 시간대별 도메인의 간극수압의 결과를 불포화토 전단강도 개념을 도입하여 보강토 옹벽의 전반 안정성에 관한 안전율을 산정하는데 활용하였다. 사면안정해석은 SLOPE/W를 사용하였으며 해석에 적용한 뒤채움흙과 지오그리드의 강도 특성은 기 기술한 바와 같다.

한편, 불포화전단강도 평가에서 필요한  $\phi^b$  즉, 모관흡수력에 비례하는 전단강도 증가율을 나타내는 저항각은 기존 연구에 근거하여  $\phi^b = 10^\circ$  로 적용하였다. SEEP/W를 이용한 침투해석 후 도출된 수두 데이터를 이용하여 한계평형해석법 중 BISHOP법을 이용하여 사면안정 해석을 수행하였고 그림 6은 연계해석의 개념도를 나타내고 있다.

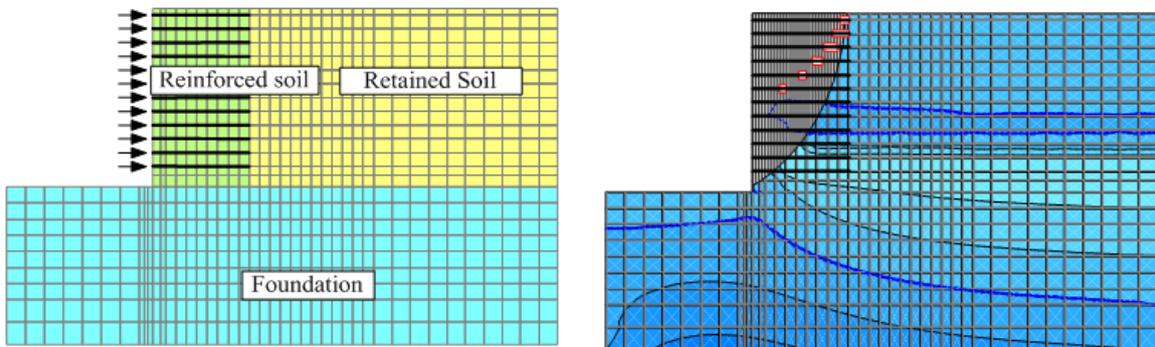


그림 6. 침투해석-사면안정해석 연계 개념도

## 3. 결과 분석 및 고찰

### 3.1 부직포 포설 여부에 따른 보강토체 간극수압 분포

그림 7과 8은 부직포 포설 여부에 따른 시간대별 해석 도메인에서의 간극수압 분포 경향을 보여주고 있다. 여기서 부직포가 포설된 조건은 기본 조건으로서 먼저 간극수압 분포 칸투어를 비교하고 있는 그림 8에서는 부직포를 포설함으로써 7월 집중 강우시 보강토체 내의 모관흡수력이 강우전의 수준으로 유지되는 경향을 관찰할 수 있다.

이러한 결과는 임의 단면(A-A', B-B', C-C')에서의 시간대별 간극수압 분포를 보여주고 있는 그림 9에서 보다 뚜렷하게 관찰할 수 있는데 전반적으로 부직포를 포설함으로써 간극수압이 미 포설

대비 50%이상 작은 수준으로 유지할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 보강토체 내 A점에서서의 시간에 따른 간극수압을 비교하는 그림 10에서 보다 상세히 관찰할 수 있다.

이러한 경향은 본 해석 대상 옹벽 조건에 있어서 보강토체 및 배면토체에 지속적인 강우 유입시 모관흡수력 저감으로 인한 전단강도 감소뿐만 아니라 배면 수압이 작용하여 작용하중도 증가하는 결과가 발생하여 결국 안전율이 현저히 감소하는 결과가 초래될 수 있음을 보여준다고 하겠다. 이는 본 해석 대상 옹벽 조건에 있어서 지속적인 강우로 인해 모관흡수력 저감으로 인한 전단강도 감소뿐만 아니라 배면 수압이 작용하여 작용하중도 증가하는 결과가 발생하여 결국 안전율이 현저히 감소하는 결과가 초래될 수 있음을 보여준다고 하겠다.

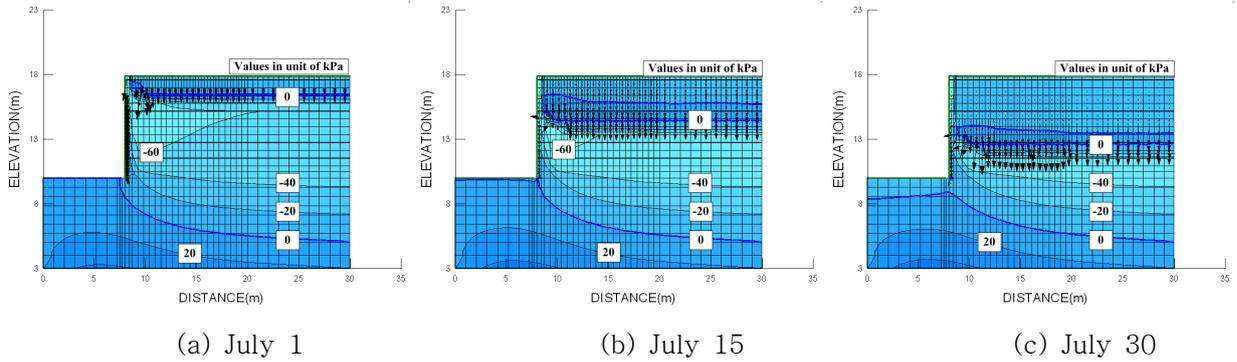


그림 7. 부직포 미설치시 보강토체 간극수압 분포

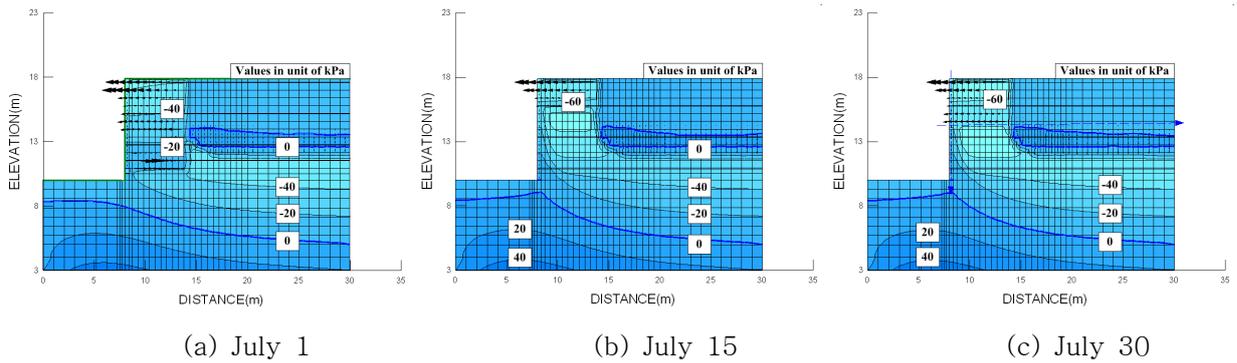


그림 8. 부직포 설치시 보강토체 간극수압 분포

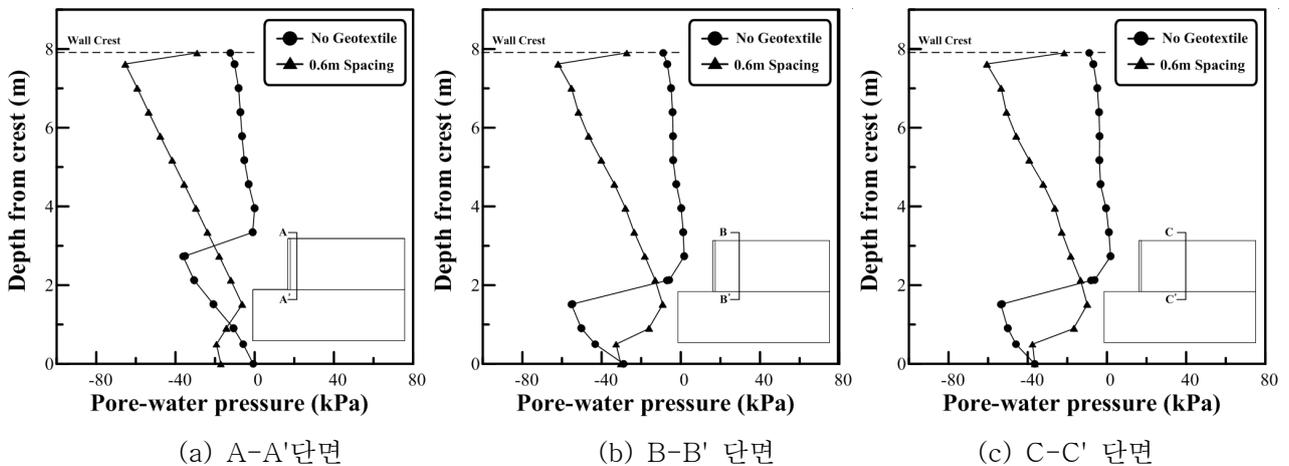


그림 9. 7월 강우 종료시 간극수압분포

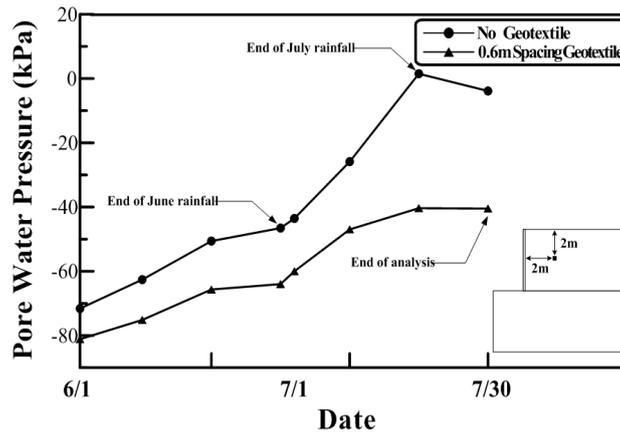


그림 10. 임의 점에서의 간극수압 변화 경향

### 3.2 부직포 포설조건에 따른 간극수압 분포

앞서 관찰한 바와 같이 보강토체내에 포설된 부직포가 배수성능을 발휘할 경우 강우시 보강토내에 간극수압 증가를 억제함으로써 결국 보강토 옹벽의 안정성을 유지하는 역할을 할 수 있는 것으로 검토되었다. 이때 부직포의 포설은 결국 추가적인 공사비 증가로 이어짐으로 포설조건에 대한 최적화가 선행되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 검토 옹벽 조건에 대해 다양한 조건에 대한 포설조건을 고려하여 최적 포설조건 산정을 위한 기초 연구를 수행하였다.

포설조건에 따라 전 구간 포설, 상부 1/3구간 포설, 상부 1/2구간 포설 세 가지 조건에 대한 결과를 비교하였다. 먼저 각 조건에 대해 7월 강우 완료시 간극수압 분포 등고선이 그림 11에 제시되어 있다.

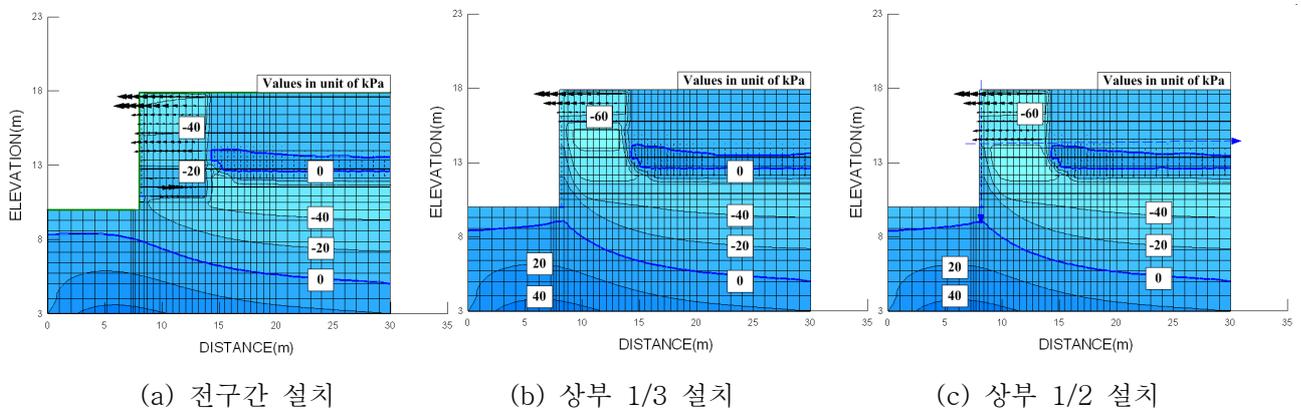


그림 11. 포설 조건에 따른 보강토체 간극수압 분포

이러한 경향은 앞서 기술한 세 단면에 대한 간극수압 분포도를 나타내고 있는 그림 12에서 보다 상세히 관찰할 수 있는데 보이는 바와 같이 상부 1/3 포설시 보강토체의 모관흡수력이 가장 크게 유지될 수 있는 것으로 나타났다. 보다 다양한 조건에 대한 검토가 필요하기는 하나 본 연구에서 고려한 조건에 있어서 경제적인 측면을 고려할 때 최적의 포설조건은 전구간 포설보다는 상부 1/3구간을 포설하는 것이 합리적인 판단일 수 있다는 결과가 나타났다.

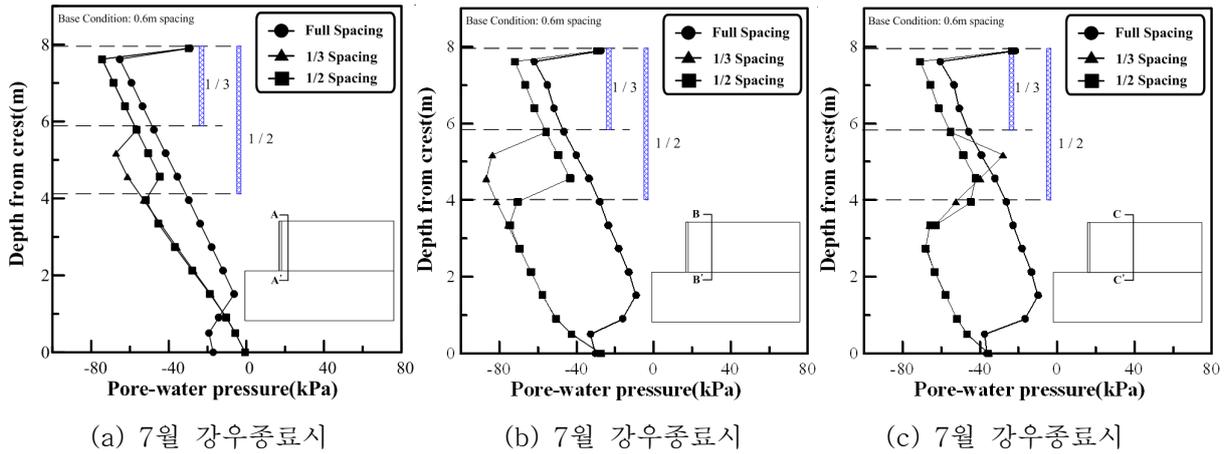


그림 12. 포설조건에 따른 간극수압 분포도

### 3.3 부직포 포설 조건별 안전율 변화

강우시 토체의 전단강도는 토체에 유발된 간극수압과 밀접한 관계가 있으므로 간극수압 유발정도에 따라 보강토 구조물의 안전율도 달라지게 된다. 이는 강우시 침투는 시간의존적이므로 안전율 또한 시간의존적 변화를 보인다고 할 수 있다. 이러한 경향을 검토하기 위해 앞서 언급한 침투해석-사면안정해석 연계 개념을 도입하여 본 연구에서 고려한 조건에 대한 강우시 시간대별 보강토 옹벽의 안전율 변화 경향을 고찰하였다. 이때 보다 객관적인 검토와 검토의 일관성을 유지하고자 파괴면이 보강토체 내부를 통과하는 파괴 모드에 대해 국한하였으며 따라서 사면안정해석시 파괴면이 보강토체 내부를 통과하도록 구속조건을 부여하였다.

그림 13은 강우시 시간대별 안전율 변화경향을 잘 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 부직포 미 포설시 강우가 보강토체에 유입됨에 따라 안전율이 강우 이전 안전율을 기준으로 최대 57.1% 이상 감소되는 경향을 관찰할 수 있다. 반면 부직포 포설로 인해 보강토체 내에 모관흡수력 감소가 억제되는 경우 안전율 감소율이 5% 이내로 유지되는 경향을 잘 나타내고 있으며 상부 1/3만 포설하는 조건이 가장 작은 안전율 감소를 보이는 것으로 분석되었다.

본 연구에서의 검토조건이 제한적이며 옹벽에 미치는 영향을 정량적으로 표현하기에는 무리가 있기는 하나 이러한 경향으로 미루어 볼 때 보강토체의 안정성은 강우시 강우 유입정도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있으며 평상시 안전율이 그다지 크지 않은 시공조건에 있어서는 사용연한 동안 충분한 안정성을 확보를 위해서는 강우시 보강토체 내에 충분한 모관흡수력을 유지하도록 하는 방안이 필요함을 보여준다고 하겠다.

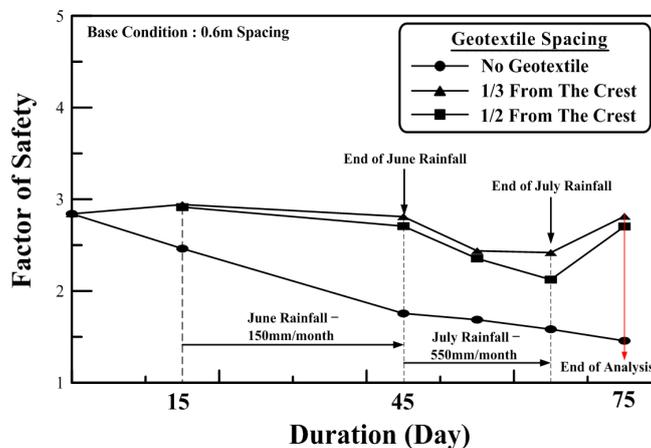


그림 13. 부직포 포설조건에 대한 시간대별 안전율

## 4. 결론

본 연구에서는 보강토 옹벽에 있어서 보강토체 내에 설치되는 배수층의 강우시 간극수압 증가 억제효과에 대한 내용을 다루었다. 이를 위해 먼저 다양한 부직포 포설 조건에 대해 유한요소해석법에 근거한 부정류 침투해석을 수행하였으며 그 결과를 토대로 부직포의 간극수압 저감 메카니즘을 고찰하였다. 또한 간극수압이 연계된 사면안정해석을 수행하여 부직포 포설조건에 따른 안전율 변화 경향을 고찰하였다.

검토 결과 보강토체에 부직포 등 배수가 가능한 배수재를 포설함으로써 집중강우로 인한 간극수압 증가를 억제함을 통해 보강토체를 불포화 상태로 유지하여 전단강도 저하를 억제할 수 있는 것으로 분석되었다. 아울러 다양한 포설조건에 대해 검토한 결과 보강토체 상부 1/3 구간에 대한 포설만으로 충분한 배수효과를 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 한편 불포화전단강도를 고려하여 간극수압이 연계된 사면안정해석을 수행한 결과 부직포 포설시 보강토체에 모관흡수력 감소를 억제하여 결국 안전율 저하를 억제할 수 있는 것으로 나타났다.

본 연구에서의 검토조건이 제한적이며 옹벽에 미치는 영향을 정량적으로 표현하기에는 무리가 있기는 하나 이러한 경향으로 미루어 볼 때 보강토체의 안정성은 강우시 강우 유입정도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있으며 평상시 안전율이 그다지 크지 않은 시공조건에 있어서는 사용연한 동안 충분한 안정성을 확보를 위해서는 강우시 보강토체 내에 충분한 모관흡수력을 유지하도록 하는 방안이 필요함을 보여준다고 하겠다.

## 감사의 글

본 연구는 한국 과학재단 기초과학연구사업 특정기초연구(과제번호 R01-2004-000-10953-0), 건설교통부가 출현한 고강도 지오그리드 보강 Stone Column 공법의 실용화 연구(과제번호 : C105A1000017-05A0300-01700) 및 (주)동양건설산업의 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 유충식, 정혜영, 정혁상(2005), 집중강우시 발생한 블록시 보강토 옹벽의 붕괴사례, 한국토지반공학회, 한국지반공학회논문집 제21권 4호, pp. 135-43.
2. 유충식, 정혁상, 정혜영(2004), 강우로 인한 보강토 옹벽의 붕괴사례에 관한 연구, 한국토목섬유학회 2004년 가을 토목섬유 학술발표회 논문집, pp. 51-59.
3. Arya, L. M. and Paris, J. F. (1981). "A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, pp. 1023-1030.
4. Blake, J.R. and Renu, J.P. (2003), Prediction of rainfall induced transient water pressure head behind a retaining wall using a high-resolution finite element model, *Computers and Geotechnics* 30, pp. 431~442.
5. Collin, J. (1997). "Design Manual for Segmental Retaining Walls, 2<sup>nd</sup> Ed." National Concrete Masonry Association (NCMA), Virginia, USA.
6. Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. and Widger, A. (1978). "Shear strength of unsaturated soils." *Can. Geotech. J.*, Ottawa, 15, pp. 313-321.
7. Fredlund, D. G., Xing, A., and Juang, S. (1994). "Predicting the permeability functions for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve." *Can. Geotech. J.*, Ottawa, 31, pp. 533-546.
8. Koerner, R. M. and Soong, T. Y. (2001). "Geosynthetic reinforced segmental retaining walls." *Geotextiles and Geomembranes*, 19(6), 359-386.
9. Oberg, A and Sallfors, G. (1997). "Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curve." *Geotech Test. J.*, 20(1), 40-48.
10. Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E., and Clifton, A. W. (1996). "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction." *Can. Geotech. J.*, 33, 379-392.