

사면안정측면에서의 보강토 옹벽 붕괴 요인 분석 Analysis of Triggering Events of a Geosynthetic Wall Slope Failure within Slope Stability Perspective

유충식¹⁾, Chung-Sik Yoo, 정혜영²⁾, Hye-Young Jung, 정혁상³⁾, Hyuk-Sang Jung

¹⁾ 성균관대학교 토목공학과 교수, Professor Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan Univ.

²⁾ 성균관대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Sungkyunkwan Univ.

³⁾ 대정건설턴트 터널부 사원, Tunnel Design Dept. Daejung Consultant Co.,Ltd

SYNOPSIS : This paper presents a case history of a geosynthetics-reinforced segmental retaining wall, which collapsed during a sever rainfall immediately after the completion of the wall construction. In an attempt to identify possible causes for the collapse, a comprehensive investigation was carried out including physical and strength tests on the backfill, stability analyses on the as-built design based on the current design approaches, and slope stability analyses with pore pressure consideration. The investigation revealed that the inappropriate as-built design and the bad-quality backfill were mainly responsible for the collapse. This paper describes the site condition including wall design, details of the results of investigation and finally, lessons learned. Practical significance of the findings from this study is also discussed.

Key words : geosynthetics-reinforced segmental retaining Wall, Unsaturated flow, Matric suction, stability analysis, seepage analysis

1. 서론

1990년대 초 Henry Vidal에 의해 근대식 보강토 옹벽의 역학적 개념이 구체화 된 이래 전 세계적으로 토목섬유를 보강재로 이용한 보강토 구조물의 건설이 나날이 증가하고 있는 추세이다. 현재 적용되고 있는 대부분의 보강토 옹벽은 안전하게 시공됨에도 불구하고, 많은 지역에서 열악한 환경 조건하의 보강토 옹벽의 역학적 거동에 관한 깊은 이해와 연구가 필요한 실정이다. 또한 한계평형에 근거한 현실계기준(Collins 1997, Elias and Cristoper 1997)은 극히 보수적인 결과를 초래함에도 불구하고, 시공 중 혹은 시공 후 크고 작은 구조적 문제점들이 발생하고 있다. 이는 보강토 구조물이 지반공학적 측면에서 다루어져야 한다는 대 명제를 간과하기 때문으로 사료된다. 특히 최근 들어 보강토 옹벽이 장대화 되고 사면 인접부에 시공되는 경우가 늘고 있는데 이러한 설계조건에서는 설계단면이 보강토 설계기준을 만족시키는지 여부에 대한 검토와 아울러 사면안정에 대한 검토가 필요함에도 불구하고 대부분 생략되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 2003월 7월 충남에서 시공 완료 후 여름철 집중강우로 인해 붕괴된 보강토 옹벽의 사고 사례를 강우로 인한 장기 침투와 사면안정 측면에서 다각적으로 분석하여 붕괴요인을 분석 하였다. 즉, 보강토 옹벽이 강우로 인해 발생했다는 점에 주목하여 붕괴시점 전후로 강우이력을 조사하고 불포화 흐

를 고려한 침투해석을 실시하여 강우의 침투로 인한 보강토 구간 사면의 간극수압분포를 결정한 후 이를 한계평형에 근거한 사면안정해석을 수행하여 붕괴유발인자(triggering factor)를 분석하였다. 본 논문에서는 이러한 분석 결과를 토대로 보강토 옹벽의 설계적 측면에서 사면안정검토의 중요성과 사면안정해석 측면에서 불포화 흐름이 고려된 침투해석의 중요성을 언급하였다.

2. 붕괴된 보강토 옹벽의 설계 및 현장조건

2.1 보강토 옹벽 붕괴 상황 및 현장조건

붕괴된 토목섬유 보강의 보강토 옹벽은 2003년 4월에서 6월까지 2개월에 걸쳐 공장부지 조성을 위한 진입도로 용지 확보 차원에서 종단 방향 150m의 규모로 약 1~7.4m의 높이로 시공되었다. 그림 2에서 보듯이 보강토 옹벽은 약간 경사진 사면에 위치하고 있으며, 주변 상황으로 10m 떨어진 곳에 저수지가 위치하고 있고, 폭 2m인 저수지의 용수로는 옹벽 전면과 불과 4m 떨어진 곳에 위치하고 있다.

보강토 옹벽의 붕괴 사고는 2003년 7월 말에 발생하였다. 붕괴시점의 강수량 및 강우강도를 조사한 결과 6, 7월 두 달간 사고현장에 내린 강우량은 약 500mm, 최대 강우 강도는 39mm/hr를 기록하고 있었다. 그림 1은 붕괴된 보강토 옹벽의 현장 상황을 나타내는 사진으로, 진입도로 및 인접 보강토 옹벽 전구간이 미끄러져 내려 붕괴되었음이 육안으로 관찰되었다. 이러한 파괴유형의 관찰 및 현장조사로 사면의 불안정성 및 외적 불안정성과 연관된 붕괴사고로 판단할 수 있다.



그림 1. 붕괴된 보강토 옹벽의 주변상황 사진

2.2 보강토 옹벽의 설계 단면 및 실내시험 결과

그림 2는 7.4m 보강토 옹벽의 단면도를 보여주고 있다. 붕괴된 보강토 옹벽의 현장조사를 토대로 시공 단면에 대한 보강조건을 유추한 결과 길이 약 5m의 HDPE 지오그리드가 0.6m의 균일한 연직간격으로 포설된 것으로 나타났다. 이러한 보강재 포설 조건으로 살펴볼 때 본 시공단면은 NCMA (Collins 1997) 및 FHWA (Elias and Christopher 1997) 설계법을 만족하지 않는 것으로 나타나 부적절한 설계 또한 붕괴요인 중의 하나로 간주할 수 있을 것으로 판단되었다. 길이 5m의 포설조건은 배면토 상부약 5m 높이의 상부사면을 고려하지 않을 때 설계기준에서 요구하는 최소보강재의 길이 0.7H를 만족하는 것으로서 설계 시 배면토 상부사면을 무시한 것으로 판단된다.

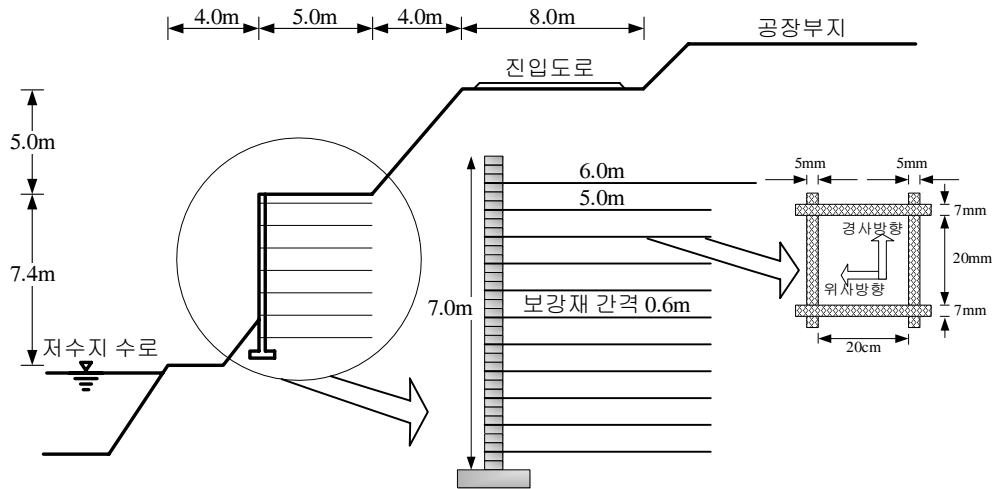


그림 2. 붕괴된 보강토 옹벽의 대표단면

그림 2에서와 같이 보강토 옹벽의 전면벽체는 높이 200mm의 콘크리트 블록을 사용하여 시공하였으며 현장조사 결과 상, 하단 블록의 수평간격(Set-back)을 두지 않고, 상하 블록은 전단키(shear-key)를 이용하여 연결된 것으로 조사되었다. 또한 콘크리트 블록과 뒤채움 흙 사이에는 300mm의 쇠석 배수층을 설치하여 배수를 유도한 것으로 조사되었다.

현장에서 채취된 지오그리드에 대한 리브인장강도(GRI-GG1) 시험을 수행한 결과 약 65kN/m의 극한 인장강도를 보유하는 것으로 나타났다. 한편, 뒤채움 흙의 공학적 특성을 분석하기 위하여 기본적인 물성시험을 실시하였으며, 이에 대한 결과를 표 1에 나타내었다. 체분석결과 뒤채움 흙의 #200 통과량은 36%이상으로 많은 세립분을 함유하고 있으며, 통일분류법(USCS)상 상당한 소성특성을 가지는 점토질 모래(SC)로 분류되는 것으로 나타났다. 뒤채움 흙의 변수위 시험 결과 투수계수는 약 5.0×10^{-5} cm/s로 나타났다. 또한 뒤채움흙의 전단특성을 파악하기 위해 현장다짐도에 준하는 시료에 대한 500×500mm 대형직접전단시험 및 간극수압을 측정하는 압밀비배수(CU) 전단시험을 수행한 결과 내부마찰각은 포화 전단강도정수로 내부마찰각 22°, 점착력 13kPa로 분석되었다.

표 1. 붕괴된 보강토 옹벽 뒤채움 흙의 공학적 특성

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

3. 장기강우의 침투로 인한 응벽 사면 간극수압 분포

3.1 불포화 침투해석 기본이론

대부분의 사면이 그러하듯 본 연구에서 다루는 응벽의 경우와 같이 인위적으로 형성된 사면을 이루고 있는 흙의 경우 불포화상태에 있다. 불포화토에서의 흐름은 포화토에서의 흐름과는 달리 흙의 포화도, 즉 Suction의 크기에 좌우된다. 이러한 불포화토에서의 흐름은 흙-수분특성곡선(soil water characteristic curve; SWCC)으로 불리는 흙의 체적함수비와 Suction의 관계를 고려하여야 하며, 투수계수 또한 Suction의 크기에 좌우되므로 이를 고려할 수 있도록 Suction의 크기에 따른 투수계수의 변화 정도를 투수계수곡선(hydraulic conductivity function)을 이용하여 고려하여야 한다. 불포화 흐름의 2차원 지배방정식은 식 (1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_w \frac{\partial h_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_w \frac{\partial h_w}{\partial y} \right) = m_w \rho_w g \frac{\partial h_w}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, k_w 와 h_w 는 각각 흙의 투수계수 및 수두, m_w 는 흙의 함수특성을 나타내는 SWCC의 경사, r_w 는 물의 밀도, g 는 중력가속도를 의미한다. 식 (1)의 좌변은 Darcy의 법칙에 근거한 흙속에서의 물의 흐름을 나타내며, 우변은 단위시간에서의 흙속에 존재하는 물의 체적의 변화를 의미한다. 즉, 간극수압의 변화량과 SWCC 경사의 곱은 단위시간당 간극수압변화에 대한 물의 체적 변화량과 같다. 따라서 불포화 침투해석에서는 대상 흙의 SWCC와 투수계수곡선이 필요하며, 이는 실험을 수행하거나 입도분포 특성을 토대로 추정할 수 있다.

본 현장에 대한 불포화 침투해석에 필요한 SWCC와 투수계수곡선은 입도분포곡선으로 SWCC를 추정하고 이를 토대로 다시 투수계수곡선을 추정하는 방법을 채택하였다. 즉, SWCC는 Arya와 Paris (1981)가 제안한 방법을 토대로 현장에서 채취한 입도분포곡선을 이용하여 추정된 후 이를 토대로 다시 Fredlund 등 (1994)이 제안한 방법을 토대로 투수계수곡선을 추정하였다. 그림 3은 응벽 배면토에 대한 SWCC와 투수계수곡선을 보여주고 있다.

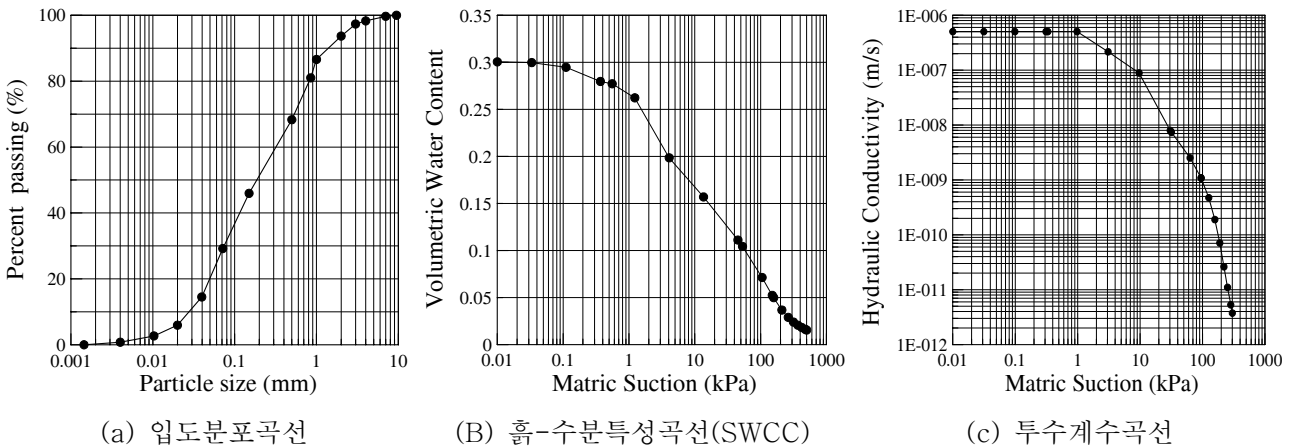


그림 3. 응벽 배면토에 대한 입도분포곡선 및 SWCC와 투수계수곡선

3.2 부정류 침투해석 (Transient Infiltration Analysis)

본 연구의 목적이 응벽붕괴이전 6, 7월에 있었던 강우가 응벽의 붕괴에 어떠한 영향을 미쳤는지에 대한 검토에 있으므로, 6, 7월 강우 시 시간에 따른 응벽 사면 내 간극수압의 분포와 사면안정성의 관계를 분석하기 위해서는 시간개념이 도입된 부정류 침투해석이 필요하였다. 즉, 대상 응벽 사면을 이루고

있는 흙의 투수특성과 6, 7월의 강우를 고려할 때 지하수 상승으로 인한 수압증가가 붕괴의 요인인지, 아니면 지하수 상승 보다는 Suction 감소로 인한 전단강도 저하가 주원인인지를 파악하는데 본 연구의 주안점을 두었다. 본 연구에서는 정상류 및 부정류 조건하의 포화도 및 불포화도 흐름을 모사할 수 있는 유한요소해석 상용프로그램인 SEEP/W를 이용하였다.

그림 4는 해석에 적용된 유한요소모델을 보여주고 있다. 해석 모델은 총 2400개의 절점과 2295개의 요소로 구성되었으며 지반은 4절점 평면변형요소를 적용하였다. 경계조건의 설정에 있어서 ED와 FC 경계면에는 지하수위를 고려하여 일정수두조건을 지정하였으며 하단 경계면에는 'No Flux'의 경계조건을 설정하였다. 한편, 보강토 옹벽 전면벽은 옹벽배면 흙과 동일한 재료로 간주하였다.

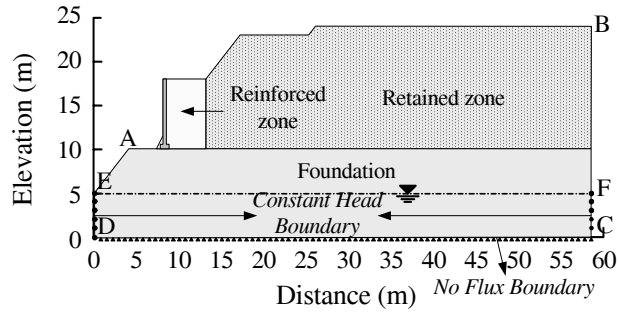
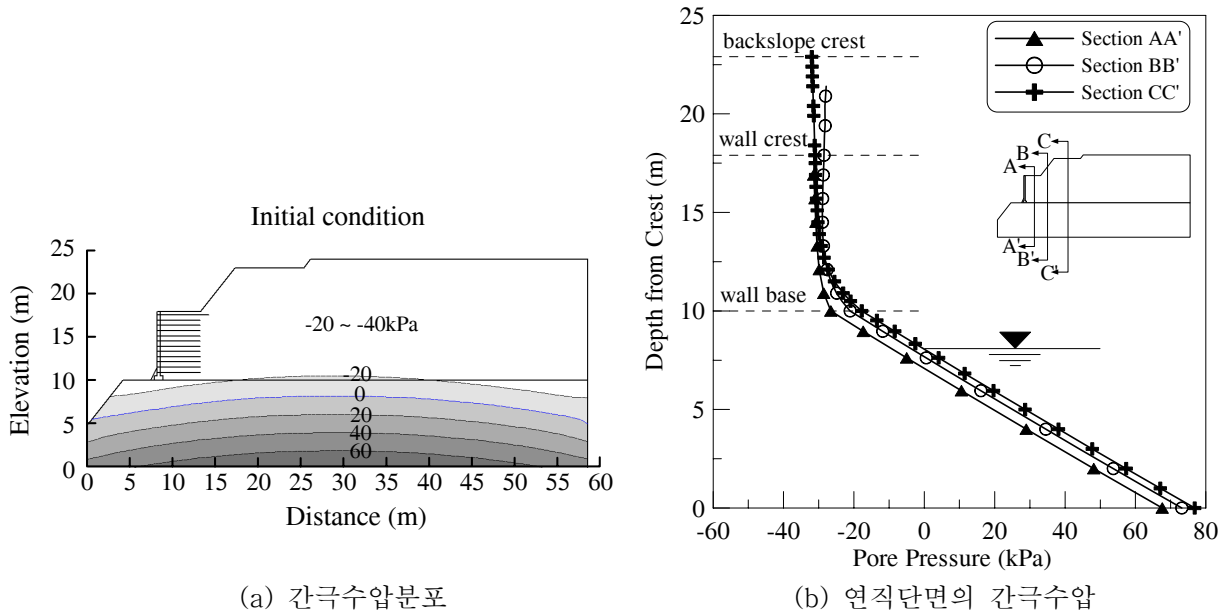


그림 4. 해석에 적용된 유한요소모델

6, 7월 강우에 대한 부정류 침투해석에 앞서 첫 번째 단계로 강우 이전의 조건을 토대로 정상류 침투 해석을 통해 이후 해석에 적용될 초기 간극수압을 구현 하였다. Blacke (2003)은 부정류 침투해석의 결과는 초기 조건에 많은 영향을 받으므로 초기 조건 설정의 중요성을 언급한 바 있다. 초기 조건 설정 후에는 6월 강우(150mm/30day)와 7월(500mm/20day) 강우를 적용한 부정류 침투해석을 실시하였다. 옹벽 사면 흙의 포화 투수계수는 약 $5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 로 설정하였으며 풍화암으로 이루어진 기초지반의 포화 투수계수는 $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 를 적용하였다.

먼저 그림 5에서는 각각 강우이전 사면 내 간극수압 분포도를 보여주고 있다. 그림 5(a)에서는 보이는 바와 같이 최대 약 30~40 kPa의 Suction이 유발되는 것으로 나타났으며 Section AA 및 BB에 대한 깊이에 대한 간극수압 분포가 그림 5(b)에 제시되어 있다.



(a) 간극수압분포

(b) 연직단면의 간극수압

그림 5. 초기 간극수압 분포

한편, 6, 7월 강우에 대한 해석결과를 보여주고 있는 그림 6과 7을 관찰해 보면 강우로 인해 Suction이 감소하는 경향을 관찰할 있다. 즉, 6월 강우 후에 대한 결과를 간극수압 등고선 형식으로 보여주고 있는 그림 6을 관찰하면 6월 강우는 그 정도가 그다지 크지 않아 상부 약 4m 깊이까지의 Suction을 20 kPa 미만으로 감소시키는 것으로 나타났다.

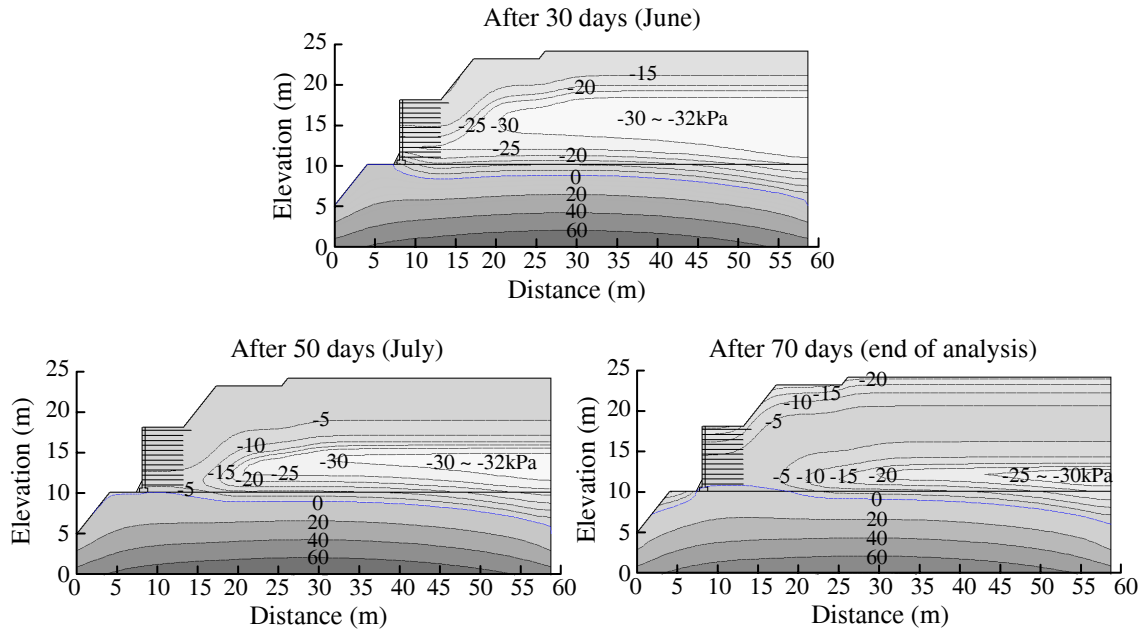


그림 6. 시간에 따른 간극수압 분포

그림 7에서는 7월 강우의 영향을 시간에 따라 보여주고 있는데 장마기간이 이 기간 동안에 많은 양의 강우가 발생하여 7월 강우 최종단계에서는 사면 대부분 영역에서의 Suction이 소멸되는 경향을 볼 수 있다.

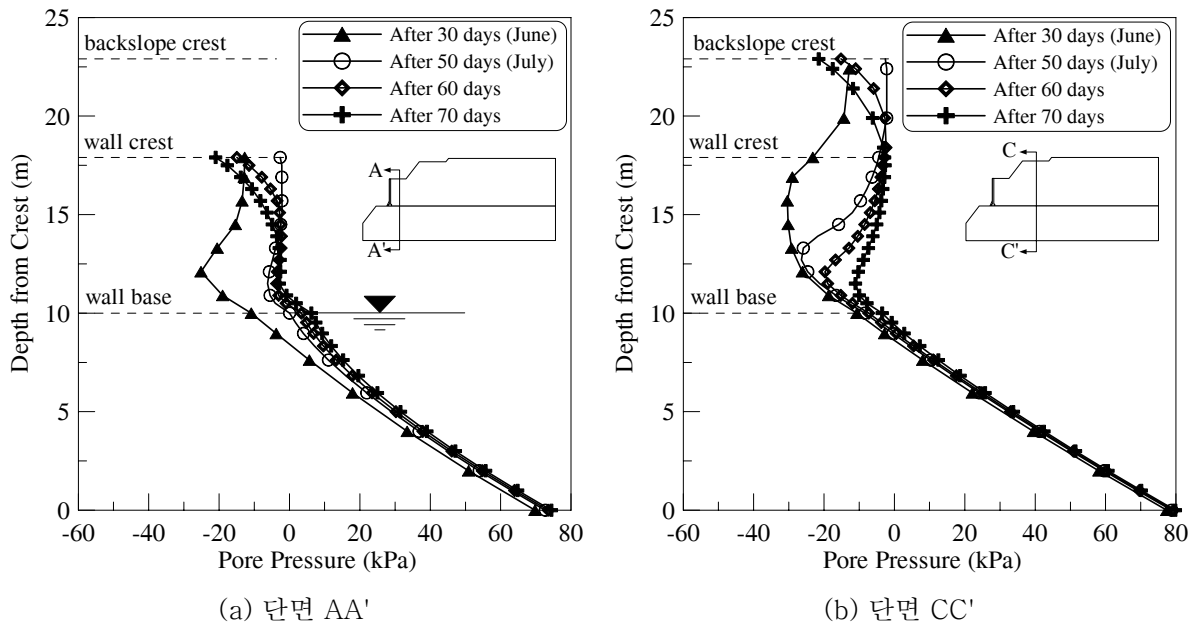


그림 7. 시간에 따른 각 단면의 간극수압 분포

한편, 본 검토대상 옹벽 사면을 이루는 흙의 흙-수분 관계 특성상 많은 양의 강우에도 불구하고 지하수의 상승으로 인해 양의 간극수압이 발생하지 않는 것으로 나타나 일반적인 포화토 흐름의 개념을 적용할 경우 매우 보수적인 결과를 주므로 불포화 투수특성을 고려한 침투해석의 중요성을 보여준다고 하겠다.

4. 한계평형해석에 의한 사면안정 검토

4.1 Suction을 고려한 한계평형해석 기본 개념

본 검토에서는 불포화토내의 Suction을 지반의 전단강도에 반영할 수 있는 Fredlund 등 (1978)이 제안한 수정 Mohr-Coulomb 파괴기준 식 (2)에 근거하여 한계평형해석을 수행하였다.

$$\tau_f = c' + (\sigma - u_a)\tan\phi' + (u_a - u_w)\tan\phi^b \quad (2)$$

여기서 c' 과 ϕ' 은 포화 점착력과 내부마찰각이며, u_a 는 간극내 공기압, u_w 는 간극수압, ϕ^b 는 Suction에 대한 전단강도 증가정도를 나타내는 마찰각을 의미한다. 또한 $(\sigma - u_a)$ 는 파괴면에서의 순응력, $(u_a - u_w)$ 는 Suction을 나타낸다.

위 수정 Mohr-Coulomb파괴 기준에서 암시하는 바와 같이 Suction은 흙의 전단강도 증가에 많은 영향을 미치며 강우 시 양의 간극수압증가로 인해 유효응력이 감소하지 않더라도 Suction 감소로 인한 겉보기 전단강도 감소로 인해 사면이 붕괴하는 경우가 있을 수 있다. 본 해석에서는 위의 Suction 효과를 고려할 수 있는 SLOPE/W를 적용하였다.

4.2 한계평형해석 결과 분석

선행된 침투해석으로 획득한 간극수압 분포를 고려하여 한계평형에 근거한 사면안정해석을 수행하였다. 해석에 적용된 뒤채움 흙 및 배면토의 내부마찰각은 전단시험 결과를 토대로 포화내부마찰각 22° , 점착력 13 kPa을 적용하였다. 한편, Suction 증가로 인한 전단강도 증가정도를 나타내는 ϕ^b 의 경우 불포화전단시험을 토대로 결정하는 것이 일반적이나 본 연구에서는 유사 사례에 대한 문헌조사 결과를 토대로 $\phi^b = 15^\circ$ 를 부여하였다.

그림 8은 6, 7월 강우의 시간대별 간극수압을 고려한 사면의 안전율을 보여주고 있다. 이와 아울러 이 그림에서는 Suction이 고려되지 않은 해석결과도 함께 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 Suction이 고려되지 않은 경우는 해석결과의 하한치로서 약 FS=0.948로 나타나 본 옹벽사면의 붕괴는 옹벽을 이루고 있는 배면토에 대한 적절한 전단특성 파악을 통한 사면안정해석을 수행했다면 사전에 방지할 수 있었을 것으로 판단된다. 한편, Suction이 고려된 해석결과를 분석할 경우 강우의 역할이 보다 구체적으로 드러나는데 보이는 바와 같이 강우 이전에는 Suction의 도움으로 안전율을 FS>1.0이상으로 유지할 수 있는 것으로 나타났는데 이는 강우이전 옹벽의 안정성이 유지될 수 있었던 이유를 잘 설명해 준다고 하겠다. 그러나 강우로 인한 안전율은 시간이 경과함에 따라 감소하여 7월 강우시작 12일 이후에 1.0이하로 감소되어, 강우 종료 3일 후에 최소 안전율 0.965로 나타났다. 이러한 경향은 현장조사에서 밝혀진 바와 같이 7월 강우 종료 후 수일 경과 후 붕괴가 발생한 것으로 조사된 결과 및 기타 정황과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

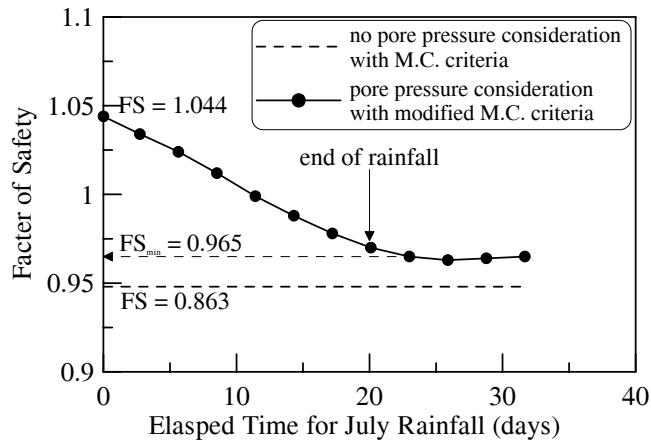


그림 8. 시간에 따른 안전율의 변화(2003년 7월)

5. 결론

본 논문에서는 공장부지 조성을 위한 진입도로 용지 확보 차원에서 시공된 7.4m 높이의 토목섬유 보강토 옹벽으로 이루어진 옹벽사면의 붕괴사태에 대한 연구내용을 다루었다. 이 옹벽의 붕괴는 시공완료 후 하계 집중호우 기간 동안 발생하였다. 붕괴 원인 규명에 대한 연구의 일환으로 붕괴 현장 조사 및 현장에서 채취한 뒤채움 흙의 물리, 역학적 실내 시험을 실시하였으며, 간극수압을 고려한 사면안정평가를 수행 하였다. 연구 결과 상재하중으로 작용할 수 있는 옹벽 상부 사면 등 현장상황이 제대로 반영되지 않은 부적절한 설계와 불량한 뒤채움 흙의 사용, 이와 더불어 단기간의 집중호우로 인한 전단강도의 감소와 같은 외적 환경요인의 복합작용에 의해 붕괴가 발생한 것으로 나타났다.

이러한 붕괴사태 연구를 통해 보강토 옹벽의 설계 시 다음과 같은 교훈을 얻을 수 있다.

- 1) 본 사례와 같은 외적 불안정 요인을 포함한 보강토 옹벽의 설계 시 지하수위 조건 및 간극수압 분포를 고려한 사면활동안정성 평가를 수행하여 설계의 적합성 여부를 판단해야 한다.
- 2) 뒤채움 흙의 잠재적인 역효과를 피하기 위해 반드시 양질의 뒤채움 흙을 사용해야 한다.
- 3) 보강토 옹벽의 설계 시 기본적인 지반공학적 원리를 간과할 경우 본 붕괴사태와 같은 대규모 붕괴를 초래하고, 막대한 경제적, 사회적 손실을 야기할 수 있다. 따라서 보강토 옹벽 설계 기술자는 기본적인 지반공학의 기본이론을 중시하며 보강토 옹벽 설계에 접근하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 한국 과학재단 기초과학연구사업 특정기초연구(과제번호 R01-2004-000-10953-0) 및 성균관대학교 산학협력단 연구지원팀의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 유충식, 정혁상, 이성우(2004), “보강토 옹벽의 사고사태에 관한 연구”, 한국지반공학회 봄학술발표회
2. Brian, D.C and Dobroslov,Z.(2004), “Stability Analyses of Rainfall Induced Landslides”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol 130. No 4., pp. 362~372.
3. 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.
4. Elias, V. and Swanson, P.(1983), “Cautions of Reinforced Earth Residual Soils”, *Transportation*

Research Record 919, pp.21~26.

5. FHWA(1997), Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, Design and Construction Guidelines, *FHWA Demonstration Project 82*, FHWA, Washington, DC, FHWA-SA-96-071.
6. Fredlund, D. G. and Anqing Xing(1994), "Equations for the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No.4, pp. 521~532.
7. Fredlund, D.G., Anqing Xing and Shangyan Huang(1994), "Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 31, No.4, pp. 533~546
8. Fredlund, D.G. and Rahardjo, H.(1993), *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, Inc.
9. Leong E. C. and Rahardjo, H.(1997), "Review of soil-water characteristic curve equation", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 123, No. 12, pp. 1106~1117.
10. GRI Test Method GG1(2004), "Geogrid Rib Tensile Strength", Geosynthetic Research Institute.
11. NCMA(1997), *Design Manual for Segmental Retaining Walls*, Second Edition, pp. 20~115.