

## 집중강우시 발생한 블록식 보강토 옹벽의 붕괴사례

### Geosynthetic Reinforced Segmental Retaining Wall Failure During Heavy Rainfall - A Case Study

유 충 식<sup>1</sup> Yoo, Chung-Sik

전 한 용<sup>2</sup> Jeon, Han-Yong

정 혜 영<sup>3</sup> Jung, Hye-Young

정 혁 상<sup>4</sup> Jung, Hyuk-Sang

#### Abstract

This paper presents a case history of a geosynthetics-reinforced segmental retaining wall, which collapsed during a severe 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.

#### 요 지

본 논문에서는 시공 직후 집중호우 기간동안 발생한 보강토 옹벽의 붕괴사례를 다루었다. 붕괴 원인을 파악하기 위해 현장답사를 실시하여 옹벽의 제원 및 각종 시료를 채취하였으며 뒤채움흙에 대한 공학적 평가, 설계기준에 근거한 안정성 검토를 수행하였다. 또한, 지속적으로 내린 강우와 옹벽의 붕괴 연관성을 검토하기 위해 불포화토 개념의 침투해석을 수행하고 이를 토대로 사면안정해석을 수행하였다. 연구결과 옹벽의 붕괴는 부적절한 뒤채움흙 및 설계, 장기강우 등의 복합적인 원인에 기인하는 것으로 검토 되었다. 본 논문에서는 옹벽의 설계 및 시공, 각종 조사 결과를 제시하였으며 이들을 종합하여 실무적 측면에서의 중점 고려사항을 다루었다.

**Keywords :** Geosynthetics-reinforced segmental retaining wall, Matric suction, Seepage analysis, Slope stability analysis, Unsaturated flow, Unsaturated shear strength

#### 1. 서 론

1980년대 후반에 우리나라에 보강토 옹벽 공법이 소개된 이래로 단지조성, 도로 및 교량 건설 부분에서의 시공사례가 나날이 증가하고 있는 추세이다. 현재 적용되고 있는 대부분의 보강토 옹벽은 안전하게 시공되

고 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. 특히 최근 들어 보강토 옹벽이 사면 인접부에 시공되는 경우가 늘고 있는데 이러한 설계조건에서는 설계단면이 보강토

1 정희원, 성균관대학교 토목환경공학과 교수 (Member, Prof. Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ., csyoo@skku.edu)

2 정희원, 인하대학교 나노시스템공학과 교수 (Member, Prof. Dept. of Nano-Systems Engrg., Inha Univ., hyjeon@inha.ac.kr)

3 성균관대학교 토목환경공학과 대학원생 (Graduate Student. Dept. of Civil & Environ. Engrg., Sungkyunkwan Univ.)

4 (주)대정컨설턴트 사원 (Geotechnical Engineer, Daejung Consultant Co., Ltd)

옹벽 설계기준을 만족시키는지 여부에 대한 검토와 아울러 사면안정에 대한 검토가 필요함에도 불구하고 대부분 생략되고 있는 실정이다.

본 논문에서는 2003년 7월 충남에서 시공 완료 후 여름철 집중강우로 인해 발생한 보강토 옹벽의 붕괴사례를 다루었다. 옹벽의 붕괴 원인을 파악하기 위해 먼저 현장 답사를 실시하였으며 뒤채움흙 및 보강재 시료를 채취하여 다양한 물리적, 역학적 시험을 실시하였다. 이와 아울러 옹벽의 당초설계 단면을 재구성하여 현재 적용되고 있는 NCMA(Collin 1997) 및 FHWA(Elias & Christopher 1997) 설계기준을 토대로 내·외적 안정성 검토를 수행하여 당초설계의 타당성을 검토하였다. 한편, 보강토 옹벽의 붕괴원인을 찾는 데 있어 옹벽의 붕괴를 강우로 인한 장기 침투와 사면안정 측면에서 고찰하여 붕괴 유발 인자를 분석 하였다. 즉, 보강토 옹벽이 강우로 인해 발생했다는 점에 주목하여 붕괴시점 전후로 강우이력을 조사하고 불포화 흐름을 고려한 침투해석을 실시하여 강우의 침투로 인한 보강토 구간 사면의 간극수압분포를 결정한 후 이를 고려한 한계평형에 근거한 사면안정

해석을 수행하여 붕괴유발인자(triggering factor)를 분석 하였다. 본 논문에서는 이러한 검토내용을 종합적으로 분석하여 당 옹벽의 설계 및 시공에서의 문제점 및 강우와 옹벽 붕괴의 개연성을 집중적으로 다루었다. 이와 아울러 불포화토 흐름, 전단강도의 기본이론 및 간극수압이 고려된 사면안정해석의 중요성을 언급하였다.

## 2. 현장조사 및 안정성 검토

### 2.1 옹벽 붕괴 상황 및 현장조건

붕괴된 보강토 옹벽은 2003년 4월에서 6월까지 2개월에 걸쳐 공장부지 조성을 위한 진입도로 용지 확보 차원에서 종단 방향 150m의 연장에 걸쳐 약 1~7.4m의 높이로 시공되었다. 보강토 옹벽은 다소 경사진 지형에 위치하고 있었으며 사면 전면 약 3m의 거리에 용수로가 위치하고 있는데 이 용수로는 다시 약 10m 정도 떨어진 저수지에 합류되는 것으로 조사되었다(그림 1).

보강토 옹벽의 붕괴 사고는 막바지 장마 기간이었던

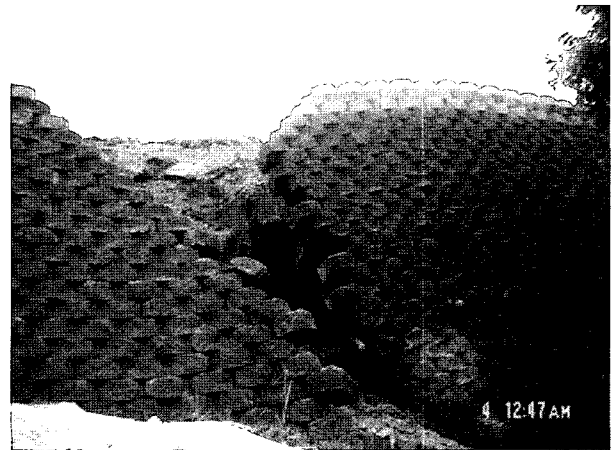
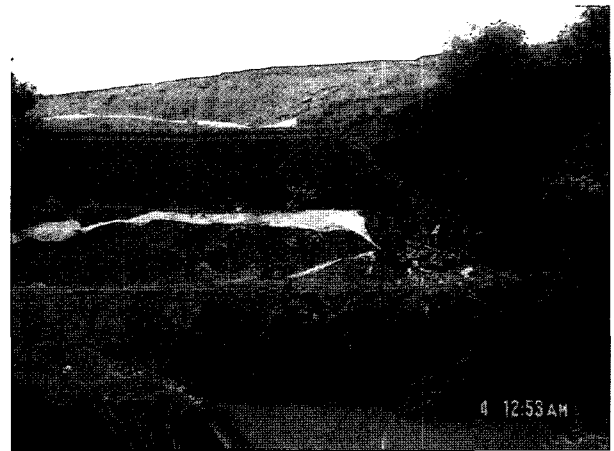
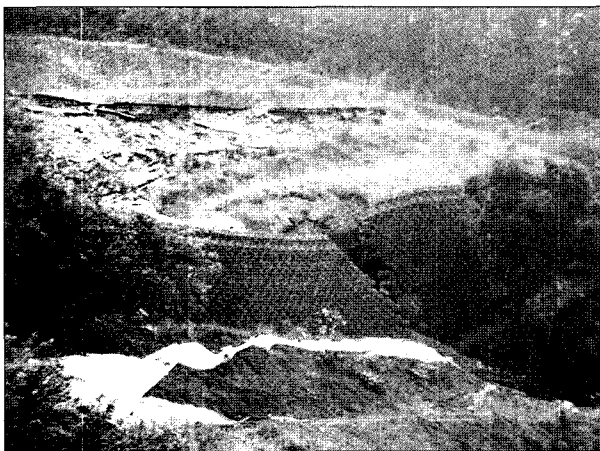


그림 1. 붕괴된 보강토 옹벽의 주변상황 사진

2003년 7월 말 경에 발생하였다. 장마기간 동안의 강수량 및 강우강도를 기상청 자료를 토대로 조사한 결과 6, 7월 두 달간 사고현장에 내린 강우량은 약 700mm, 최대 강우 강도는 39mm/hr 정도로 기록되었다. 이러한 강수량은 우리나라 평균강수량이 약 1200~1500mm 정도인 것을 감안할 때 평균을 웃도는 수치라고 할 수 있다. 그림 1은 붕괴된 보강토 옹벽의 붕괴 후 사진을 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 진입도로 및 인접 보강토 옹벽 전구간이 슬라이딩을 일으킨 것으로 관찰할 수 있다. 이러한 파괴유형 및 현장조사 결과에 근거할 때 당 옹벽의 붕괴는 외적불안정 혹은 전반 사면활동 파괴와 밀접한 관계가 있는 것으로 판단되었다.

## 2.2 옹벽 단면 및 실내시험 결과

붕괴된 보강토 옹벽의 설계도서를 수집하는데 어려움이 있어 현장조사 결과를 토대로 시공단면을 재구성하였다. 그림 2는 재구성된 높이 7.4m의 단면도를 보여주고 있는데 보이는 바와 같이 보강토 구간은 길이 5m의 HDPE 지오그리드가 0.6m의 간격으로 포설되었으며 보강토 구간 배면 상부에 높이 5m의 성토사면이 조성된 것으로 파악되었다. 특히 보강재 길이 5m에 주목할 필요가 있는데 이 길이는 보강토 배면에 성토하중이 존재하지 않는 경우 옹벽 높이의 60~70%를 보강재 길이로 채택할 것으로 요구하는 NCMA(Collin 1997) 및 FHWA(Elias and Christopher 1997) 설계 기준에 부합되는 길이로서 이로부터 당초 설계시에는 성토하중을 고려하지 않았

던 것으로 유추할 수 있다. 이는 매우 부적절한 설계로서 당 옹벽의 붕괴에 중요한 요인으로 작용했을 것으로 판단되었다. 한편, 그림 2에서와 같이 보강토 옹벽의 전면벽체는 높이 200mm의 콘크리트 블록을 사용하여 상·하단 블록의 이격 없이 연직으로 시공된 것으로 조사되었으며 상·하 블록은 전단키(shear-key)를 이용하여 연결된 것으로 파악되었다. 또한, 콘크리트 블록과 뒤채움흙 사이에는 300mm의 쇠석 배수층을 설치하여 배수를 유도한 것으로 조사되었다.

한편, 보강토 옹벽의 구성요소의 공학적 특성을 평가하기 위해 뒤채움흙과 보강재를 현장에서 채취하여 다양한 시험을 수행하였다. 먼저 지오그리드에 대한 인장강도를 평가하기 위해 리브인장강도시험(GRI-GG1 1988)을 수행한 결과 약 65kN/m의 극한 인장강도를 보유하는 것으로 나타났다. 뒤채움흙의 공학적 특성을 분석하기 위하여 기본적인 물성시험 및 전단강도 시험을 수행하였으며 그 결과가 표 1에 정리되어 있다. 뒤채움흙에 대한 체분석결과 뒤채움흙의 #200 통과량은 36%이상으로 많은 세립분을 함유하고 있으며 통일분류법(USCS)상 상당한 소성특성을 가지는 점토질 모래(SC)로 분류되는 것으로 나타났다. 이는 NCMA 및 FHWA 설계기준에서 요구하는 뒤채움흙으로서의 기준에 부합되지 않는 결과로서 뒤채움흙의 부적절함 또한 옹벽 붕괴와 무관하지 않은 것으로 판단되었다. 그림 3은 성토재의 입도분포곡선을 보여주고 있다.

한편, 시공당시 현장 뒤채움흙의 전단강도 및 투수특성을 파악하기 위해 현장 다짐시험을 수행하였는데 조

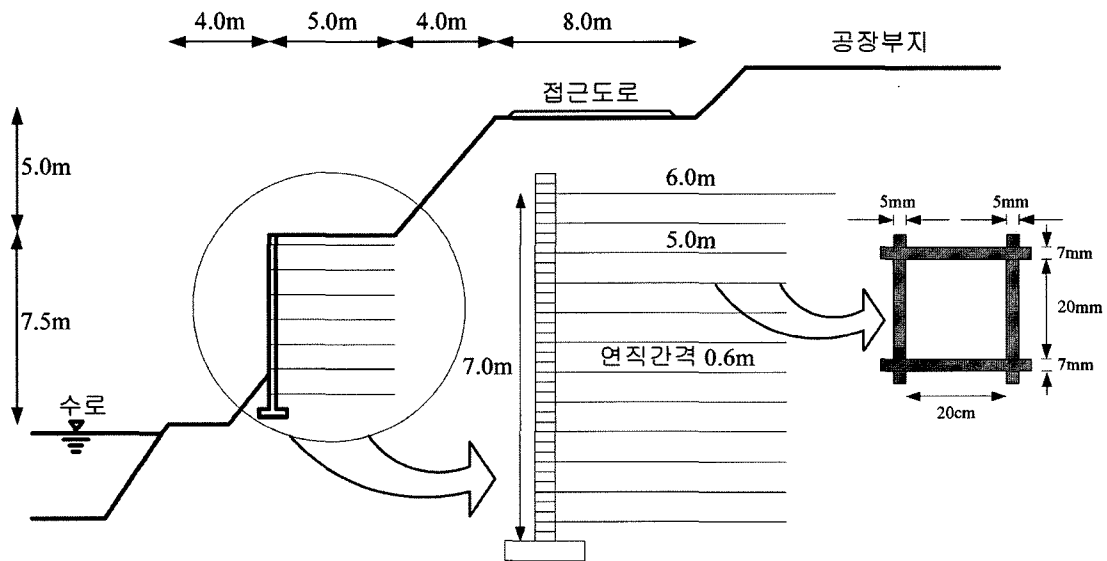


그림 2. 재구성된 옹벽 단면도

표 1. 뒤채움흙의 공학적 특성

구분	물성치	구분	물성치
비중(Gs)	2.65	통일분류법(USCS)	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

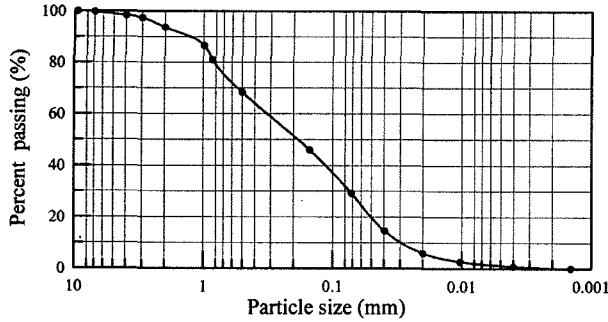


그림 3. 성토재의 입도분포곡선

사결과 다수의 자갈이 포함되어 있는 것으로 나타났으며 다짐도 역시 불량하여 85~90% 정도로 조사되었다. 이에 근거하여 뒤채움흙의 전단강도 및 투수 시험은 현장 다짐도로 다짐된 시편을 이용하여 시험을 실시하였다. 투수시험결과 포화 투수계수는 약  $5.0 \times 10^{-5}$  cm/s로 나타났으며 500×500mm 대형직접전단시험 및 압밀비배수(CU) 전단시험을 수행한 결과 포화 유효 전단강도 정수는 내부마찰각  $\phi' = 22^\circ$  점착력  $c' = 13kPa$ 로 조사되었다.

### 2.3 안정성 검토

당초설계의 타당성을 검토하기 위해 재구성된 시공 단면에 대해 NCMA 및 FHWA 기준을 토대로 안정성 검토를 수행하였다. 안정성 검토에서는 NCMA 및 FHWA 기준에 근거한 설계해석 프로그램인 SRWall(Bathurst 2001) 및 MSEW(Leshchinsky 1999)를 사용하였다. 안정 해석에 적용되는 전단강도 정수의 선정에 있어 뒤채움

흙의 점착력을 무시하도록 규정되어 있는 NCMA 및 FHWA 설계기준에 근거하여 점착력은 무시하고 내부 마찰각  $\phi' = 22^\circ$  만을 고려하였다. 보강재의 장기설계인 장강도 평가에 필요한 각종 감소계수(reduction factor)는 보강재 제조회사에서 제공한 수치를 적용하였다.

표 2는 검토 결과를 요약·정리하고 있는데 보이는 바와 같이 외적 안정성에 있어서는 저부활동 안전율이 최소안전율 1.5에 훨씬 못 미치는 1.0에 가까운 것으로 나타났다는데 이는 앞서 언급한 바와 같이 보강토체 배면 상부 성토사면을 고려하지 않았기 때문으로 판단된다. 한편, 내적 안정성의 경우 NCMA 및 FHWA 설계기준에 따라 차이는 있으나 옹벽 중간 이하에 포설된 보강재들의 파단에 대한 안전율은 1.0이하로 평가되었으며 특히 최하단부 보강재의 파단 안전율은 0.5 정도로 나타났다. 이러한 결과를 종합할 때 당초 설계는 매우 부적절했던 것으로 나타났으며 이에 대한 원인으로는 성토사면을 무시한 것과 설계시 가정된 뒤채움흙의 전단특성과 실제 사용한 뒤채움흙의 전단특성이 상이함에 따른 것으로 판단된다.

### 3. 강우침투를 고려한 사면안정해석

#### 3.1 개요

앞서 언급한 바와 같이 붕괴된 보강토 옹벽의 파괴유형이나 주변 지형 등을 살펴볼 때 옹벽의 붕괴는 전반 활동파괴의 양상이 뚜렷했으며 일정기간동안의 강우가 동반되었다는 사실에 근거하여 붕괴원인의 보다 세밀

표 2. 안정성 검토 결과

설계기준	외적안정성	내적안정성	비고
NCMA	$FS_{bc} = 14.77$ , $FS_{bst} = 0.84$ , $FS_{ot} = 2.35$	$(FS_{to})_{min} = 0.58$ $(FS_{po})_{min} = 0.97$	1. $(FS_{to})_{min}$ 발생위치는 최하단 보강재 2. $(FS_{to})_{min}$ 발생위치는 최상단 보강재
FHWA	$FS_{bc} = 18.38$ , $FS_{bst} = 1.03$ , $FS_{ot} = 2.57$	$(FS_{to})_{min} = 0.58$ $(FS_{po})_{min} = 0.97$	

주)  $FS_{bc}$  = 지지력안전율;  $FS_{bst}$  = 저부활동안전율;  $FS_{ot}$  = 전도안전율;  $(FS_{to})_{min}$  = 최소인장파단안전율;  $(FS_{po})_{min}$  = 최소인발파괴안전율

하고 현실적인 검토를 위해 강우의 침투가 고려된 사면 안정해석의 필요성이 대두되었다.

본 연구에서는 강우의 침투가 고려된 사면안정해석은 상용프로그램인 Geo-Slope International社의 SEEP/W와 SLOPE/W(GeoStudio 2004)를 연계해서 수행하였다. 즉, 유한요소해석법에 근거한 SEEP/W를 이용하여 불포화 흐름이 고려된 침투해석을 수행해 강우시간에 따른 보강토 및 인접 성토사면내의 간극수압 분포를 결정하고 이를 불포화토의 전단강도이론이 적용된 사면안정해석에 반영하여 시간에 따른 안전율 변화를 고찰하는 방법을 채택하였다.

### 3.2 불포화 침투해석

대부분의 사면이 그러하듯 성토사면 혹은 옹벽의 경우 대부분은 불포화상태에 있다고 할 수 있다. 불포화토에서의 흐름은 포화토에서의 흐름과는 달리 흙의 포화도에 따라 좌우된다. 즉, 불포화토의 포화도에 따라 모관흡수력(matrix suction)이 달라지며 이에 따라 투수특성 또한 달라지므로 불포화토의 흐름해석에서는 포화도와 모관흡수력의 관계를 나타내는 흙-수분특성곡선(soil water characteristic curve; SWCC)과 모관흡수력과 투수계수의 변화를 나타내는 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,  $\rho_w$ 는 물의 밀도,  $g$ 는 중력가속도를 의미한다. 식 (1)의 좌변은 Darcy의 법칙에 근거한 흙속에서의 물의 흐름을 나타내며, 우변은 단위시간에서의 흙 속에 존재하는 물의 체적의 변화를 의미한다.

일반적으로 불포화 침투해석에 필요한 SWCC와 투수계수 곡선은 대상 흙에 대한 시험 또는 입도분포 곡선을 이용하여 추정할 수 있다. 본 연구에서는 보강토 및 성토사면에 사용된 성토재의 입도분포곡선으로부터 SWCC를 추정하고 이를 토대로 다시 투수계수곡선을 추정하는 방법을 채택하였다. 즉, SWCC는 Arya와 Paris(1981)가 제안한 방법을 토대로 입도분포곡선으로부터 정한 후 이를 토대로 다시 Fredlund 등(1994)이 제안한 방법을 토대로 투수계수곡선을 추정하였다. 그림 4는 해석에 적용된 뒤채움흙 및 성토재에 대한 SWCC와 투수계수곡선을 보여주고 있다.

### 3.3 부정류 침투해석(Transient Infiltration Analysis)

부정류 침투해석은 붕괴 전후 당 지역에 발생한 강우와 옹벽 붕괴의 상관성을 분석하는데 필요한 시간에 따른 성토사면내 간극수압 분포를 결정하는데 주 목적을 두었다. 기상청 자료에 의하면 6월에는 약 150mm, 7월에

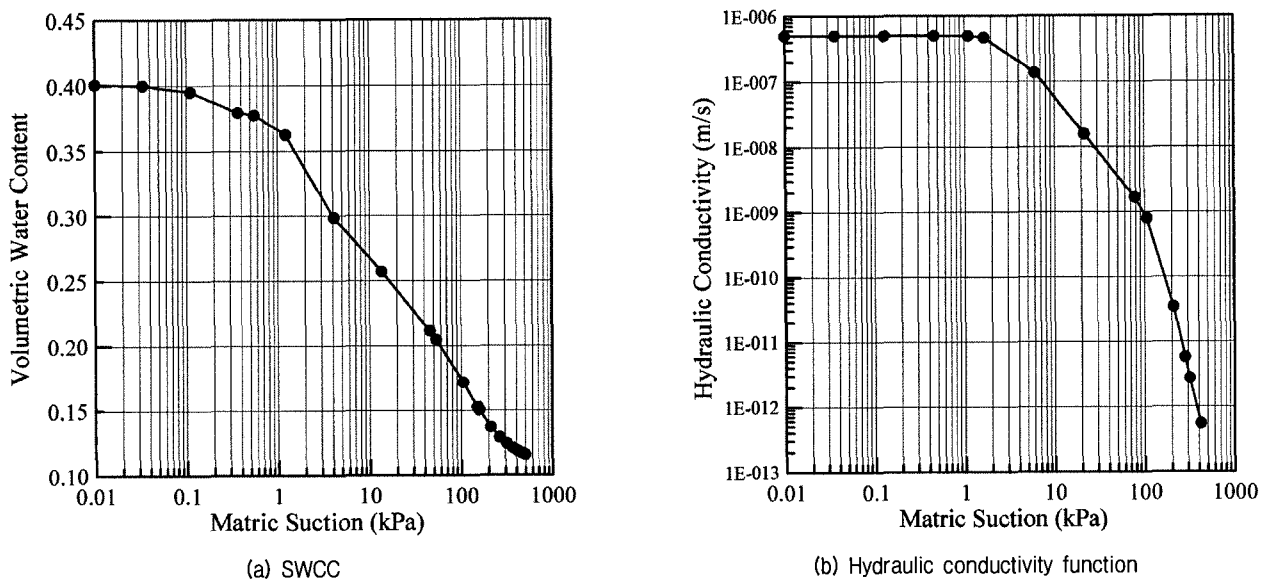


그림 4. 성토재의 SWCC와 투수계수곡선

는 560mm의 강우가 내린 것으로 분석되었으며 따라서 SEEP/W에서 제공하는 기능을 활용하여 6, 7월 강우에 대한 부정류 침투해석을 수행하였다.

그림 5는 해석에 적용된 해석모델의 개요도를 보여주고 있다. 해석 모델링에 있어 지반은 4절점 평면변형요소를 적용하였으며 총 2400 여개의 절점과 2200 여개의 요소로 이산화 되었다. 경계조건의 설정에 있어서 ED와 FC 경계면에는 지하수위를 고려하여 일정수두조건을 지정하였으며 하단 경계면에는 'No Flux'의 경계조건을 설정하였다. 한편, 보강토 옹벽의 전면벽은 옹벽배면 흙과 동일한 물성치를 적용하였다. 침투해석에서 성토옹벽 사면의 포화 투수계수는 시험결과에 근거하여 약  $5 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ 로 설정하였으며 풍화암/연암으로 이루어진 기초지반의 포화 투수계수는  $1 \times 10^{-7} \text{cm/s}$ 를 적용하였다. 한편, 초기 지하수위는 현장조사 결과에 근거하여 옹벽 수로의 연평균 수위로 간주하였다.

6, 7월 강우에 대한 부정류 침투해석에 앞서 강우 이

전의 조건을 토대로 정상류 침투해석을 통해 이후 해석에 적용될 초기 간극수압을 구현 하였다. Blake 등(2003)은 부정류 침투해석의 결과는 초기 조건에 많은 영향을 받으므로 초기 조건 설정의 중요성을 언급한 바 있다. 초기 간극수압 분포 구현은 현장토의 불포화 특성과 다짐도를 고려하여 수행하였으며 이때 보강토 및 성토구간에 최대 40kPa 정도의 모관흡수력이 발생하는 것으로 간주하였다.

그림 6과 7은 6, 7월 강우에 대한 해석결과를 각각 간극수압 등고선과 임의 단면에 대한 간극수압 분포의 형태로 나타내고 있다. 그림 6(a)에서 관찰할 수 있는 바와 같이 6월 강우로 인해 보강토 구간의 모관흡수력이 최대 10~20kPa 정도까지 감소하는 경향을 보여주고 있으며 다소의 지하수위 상승을 동반한 것으로 나타났다. 한편, 강우가 종료되는 시점(50일 경과)의 해석 결과를 보여주고 있는 그림 6(b)에서는 7월의 집중강우로 인해 보강토 구간 및 배면토 상당부의 모관흡수력이

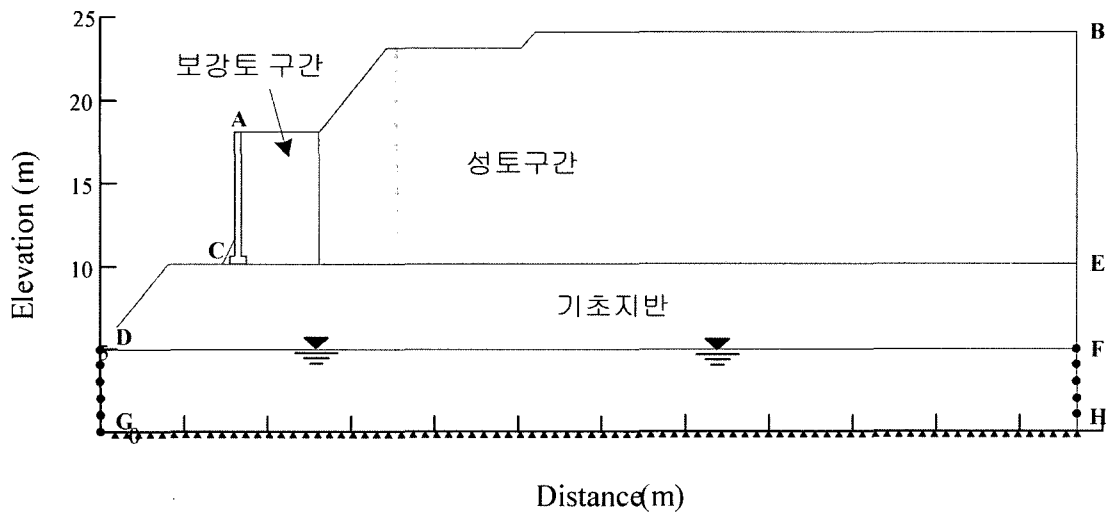


그림 5. 침투해석 모형

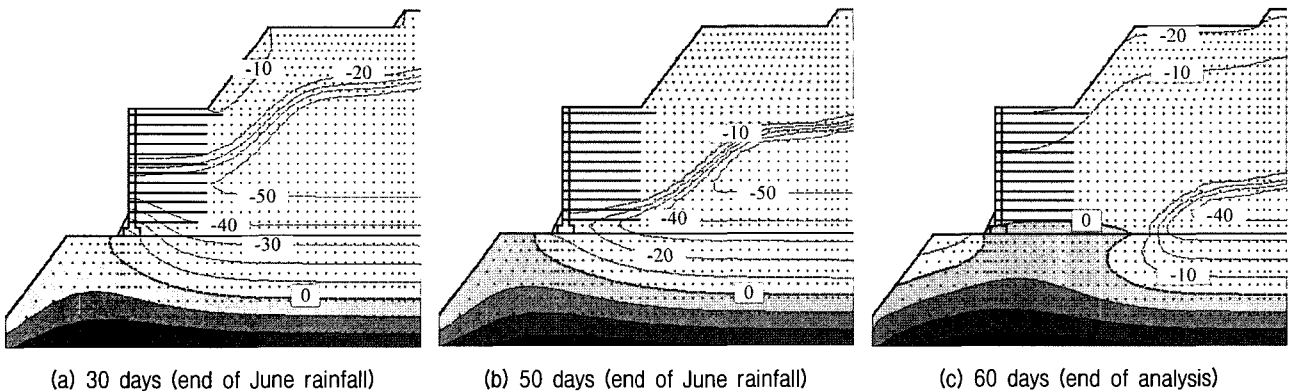


그림 6. 강우 경과시간대 별 침투해석 결과

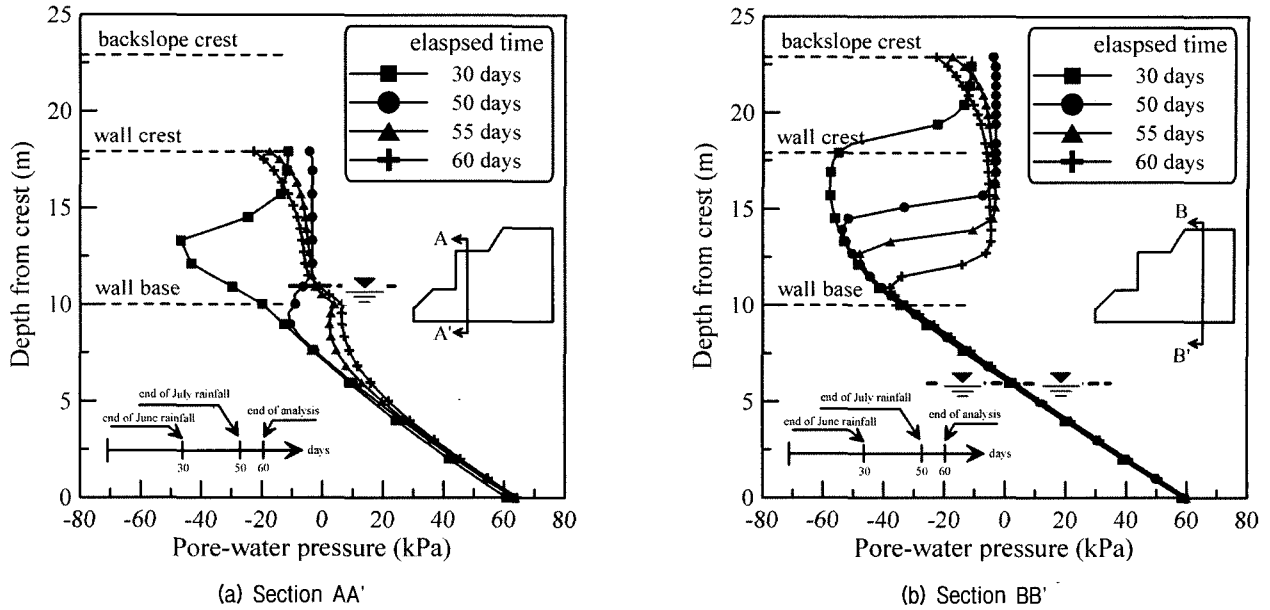


그림 7. 강우 경과시간에 따른 각 단면의 간극수압 분포

10kPa 이하로 감소하여 포화상태에 근접하는 경향을 관찰할 수 있으며 지하수위 또한 옹벽 기초부까지 상승하는 결과를 보여주고 있다. 또한 7월 강우 종료 후 20일이 경과한 해석 결과를 보여주고 있는 그림 6(c)에서는 상부에서는 모관흡수력이 다시 증가하나 지속적인 침투로 인해 지하수위가 옹벽 기초 상부 1m 정도까지 증가하는 경향을 보여주고 있다. 그림 7은 단면 AA' 및 BB'에서의 깊이 에 따른 간극수압 분포를 강우 시간대 별로 나타내고 있는데 그림 6에서의 경향을 잘 반영하고 있다.

부정류 침투해석을 종합할 때 당 구간에서의 6, 7월 강우는 강우강도가 크고 지속기간이 길었던 관계로 보강토 및 성토사면 구간의 모관흡수력을 감소시킴과 동시에 지하수위를 상승시키기에 충분했던 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 다음절에서 논의될 사면안정 관점에서 매우 중요한 의미를 갖는다고 하겠다.

### 3.4 간극수압이 고려된 사면안정해석

일반적으로 수행되는 한계평형법에 근거한 사면안정 해석에서 강우의 영향은 포화 전단강도를 사용하고 지하수위를 높이는 방법을 채택한다. 이러한 접근방법으로부터 얻는 해는 하한해(lower bound solution)로서 매우 보수적인 결과라고 할 수 있으며 이를 토대로 강우가 사면 붕괴에 직접적인 영향을 미쳤는지에 대한 정량적인 검토를 수행하는 데 있어 한계가 있다. 이러한 맥락에서 본

연구에서는 불포화토와 관련된 문제의 유효응력 해석시 토체내의 부의 간극수압, 즉 모관흡수력을 전단강도 평가에 연계시키는 불포화 전단강도 개념을 적용하였다.

불포화토의 전단강도는 Fredlund 등(1978)이 제안한 수정 Mohr-Coulomb 파괴기준(이하 MMC 파괴기준으로 기술함), 식 (2)에 근거하여 평가할 수 있다.

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

여기서  $c'$ 과  $\phi'$ 은 포화 점착력과 내부마찰각이며,  $u_a$ 는 간극내 공기압,  $u_w$ 는 간극수압,  $\phi^b$ 는 모관흡수력에 대한 전단강도 증가정도를 나타내는 마찰각을 의미한다. 또한  $(\sigma - u_a)$ 는 파괴면에서의 순응력,  $(u_a - u_w)$ 는 모관흡수력을 나타낸다. MMC 파괴 기준에 근거할 때 모관흡수력이 증가할수록 흙의 전단강도는 증가하게 되며 이러한 모관흡수력에 의한 전단강도 증가를 걸보기 점착력이라고 정의한다. 따라서 강우 이전의 성토 혹은 자연 사면은 대부분 불포화상태에 있으므로 모관흡수력에 의한 전단강도 증가로 인해 안정한 상태에 있더라도 강우 시에는 강우강도와 지속시간에 따라 침투로 인한 모관흡수력 감소로 인해 전단강도가 감소하여 경우에 따라 안정성이 감소됨을 알 수 있다.

본 연구에서는 앞 절에서 제시된 부정류 침투해석 결과를 MMC 파괴 기준이 도입된 SLOPE/W에 적용시켜 보다 현실적인 사면안정해석을 수행하여 강우가 보강토 성토 사면에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 표

3은 사면안정해석에 사용된 MMC 전단강도 정수를 보여주고 있다. 여기서 보강토 및 성토구간에 있어 모관흡수력 증가로 인한 전단강도 증가 정도를 나타내는  $\phi'$ 의 경우 불포화전단시험을 토대로 결정하는 것이 일반적이거나 본 연구에서는 유사 사례에 대한 문헌(Lu and Likos 2004)조사 결과를 토대로  $\phi' = 15^\circ$ 를 부여하였다. 아울러 보강토 구간에 포설된 보강재는 SLOPE/W에서 제공하는 'Geofabric Reinforcement' 모델링 개념을 이용하여 보강재의 인장강도와 인발 저항력을 도입하여 모델링 하였다.

불포화토 전단강도 개념에 근거한 사면안정해석에 앞서 현재 실무에서 적용하는 포화 전단강도를 이용한 Mohr-Coulomb 파괴기준에 근거한 사면안정해석을 수행하여 옹벽의 사면활동 파괴에 대한 안전율( $FS_{prac}$ )을 검토하였다. 해석 결과 안전율은  $FS_{prac}=0.92$ 로 계산되었으며 보강토 옹벽 설계시 흔히 뒤채움흙의 전단강도로 가정하는  $\phi' = 30^\circ$ 를 이용하여 수행한 해석 결과 역시  $FS_{prac}=0.94$ 정도로 나타났다. 이러한 안전율은 지하수에 대한 영향을 전혀 고려하지 않은 결과로서 당초 설계시 사면안정해석을 수행하였다면 설계단면의 부적절함이 대두 되었을 것으로 판단된다. 이러한 결과는 성토사면을 포함하는 보강토 옹벽의 설계시 사면안정해석 수행의 중요성을 지적한다고 할 수 있다.

그림 8은 6, 7월 강우의 시간대별 MMC 파괴기준에 근거한 성토사면의 안전율을 보여주고 있다. 이 그림에

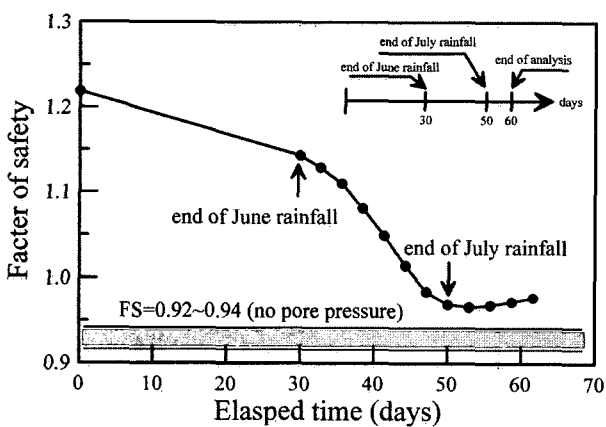


그림 8. 강우 경과시간에 따른 안전율 변화 경향

표 3. 사면안정해석에 적용된 전단특성

	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (deg.)	$\phi$ (deg.)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )
보강토 및 성토구간	13	22	15	19
기초지반	50	35	20	20

서 보이는 바와 같이 강우 이전에는 모관흡착력으로 인한 겉보기점착력의 도움으로 안전율이  $FS_{MMC}>1.2$ 이상으로 나타나 강우이전 보강토 성토구간의 안정성이 유지될 수 있었던 이유를 잘 설명해 준다고 하겠다. 그러나 강우시작과 더불어 시간이 경과함에 따라 안전율이 감소하여 7월 강우 시작후 1.0이하로 떨어져 강우 종료시 최소 안전율 0.97에 육박하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 현장조사에서 밝혀진 바와 같이 7월 강우 종료 후 수일이 경과한 후 붕괴가 발생한 것으로 조사된 결과 및 기타 정황과 잘 일치하는 것으로 나타났다.

#### 4. 옹벽 붕괴의 원인분석

본 연구에서 수행한 현장조사 및 실내시험, 안정성 검토, 그리고 침투가 고려된 사면안정해석 결과를 종합적으로 검토한 결과 당 옹벽의 붕괴는 아래와 같은 다양한 원인이 복합적으로 작용했던 것으로 추측되었다.

- 1) 부적절한 보강토 옹벽의 설계: 현장조사로부터 재구성된 보강단면을 검토한 결과 배면토 상부에 시공된 5m 높이의 성토사면을 무시하고 설계하여 이에 따른 보강재의 길이부족이 발생함
- 2) 불량한 성토재료의 사용 및 다짐 불량: 현장에서 채취한 보강토 및 성토구간 흙에 대한 시험 결과 세립분이 과다하게 포함되었으며 다짐 또한 불량하게 실시되어 소정의 전단강도가 확보되지 못하였음
- 3) 사면안정해석의 미 실시: 보강토 옹벽은 성토 사면부를 지지하는 역할을 하므로 이에 사면활동에 대한 안정성 확보여부를 검토하여야 하나 이 부분이 누락되었음
- 4) 설계/시공에 있어서의 지반공학적 원리 적용의 미흡: 보강토 옹벽의 설계/시공은 지반공학적 측면의 기본 원리와 개념에 충실하여야 하나 이에 대한 종합적이고 체계적인 접근이 미흡하였음

#### 5. 결론

본 논문에서는 공장부지 조성을 위한 진입도로 용지



확보 차원에서 시공된 보강토 옹벽의 붕괴사례를 다루었다. 옹벽의 붕괴는 시공완료 후 장마기간의 집중호우 기간 동안 발생하였다. 붕괴에 대한 원인규명을 위해 현장조사 및 실내시험, 안정성 검토, 강우 침투를 고려한 사면안정해석 등을 수행하였다. 연구 결과 당초설계에 있어서 배면토 상부 성토구간에 대한 고려가 누락되었을 뿐만 아니라 성토재가 불량하고 소정의 다짐도를 확보하지 않아 전단강도 확보가 미흡했던 것으로 분석되었다. 한편, 당 옹벽이 성토 사면부에 인접하여 시공되는 관계로 사면안정해석이 필수적이었음에도 불구하고 이를 수행하지 않아 사면 불안정성을 사전에 파악하지 못했던 것으로 분석되었다. 결국 집중강우는 단지 이러한 설계/시공상의 문제점을 표출시키는 역할을 하였던 것으로 판단된다.

당 옹벽에 대한 붕괴사례 연구를 통해 얻어진 교훈은 보강토 옹벽의 설계 시 기본적인 지반공학적 원리를 간과할 경우 본 붕괴사례와 같은 대규모 붕괴를 초래하여 막대한 경제적, 사회적 손실을 야기할 수 있으므로 보강토 옹벽 설계 및 시공은 지반공학의 기본이론을 중시하며 접근하여야 한다는 점이라고 할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 한국과학재단 목적기초연구(과제번호 R01-2004-000-10953-0)지원으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 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.
2. Bathurst, R. J. (2001), "Design Software for Segmental Retaining Walls: SRWall ver. 3.2", *National Concrete Masonry Association*, USA.
3. Blake, J.R., Renaud, J.-P., Anderson, M. G., and Hencher, S. R. (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. Collin, J. (1997), "Design Manual for Segmental Retaining Walls, 2nd Ed", *National Concrete Masonry Association (NCMA)*, Virginia, USA.
5. Elias, V. & Christopher, B.R. (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., 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. GeoStudio (2004), "User's guide for SEEP/W and SLOPE/W, Version 6.0", *Geo-Slope International*, Calgary, Canada.
9. GRI Test Method (1988), "GG-1: Single Rib Geogrid Tensile Strength, Geosynthetic Research Institute", *Drexel University*, Philadelphia, PA.
10. Leshchinsky, D. (1999), "Putting Technology to Work: MSEW and ReSlope for Reinforced Soil-Structure Design", *Geotechnical Fabrics Report*, 18, pp.34-39.
11. Lu, N and Likos W. (2004), *Unsaturated soil mechanics*, Wiley, USA.

(접수일자 2005. 4. 11, 심사완료일 2005. 6. 22)