

## 옹벽파괴에 의한 사면붕괴 사례연구

### A case study on the landslide resulted from earth retaining wall failure

김형우<sup>1)</sup>, Hyung-Woo Kim

<sup>1)</sup> 케이티 중앙연구소 부장, Research Director, Central R&D Laboratory, KT Corporation

**SYNOPSIS** : This paper presents the example of landslide triggered by the failure of earth retaining wall. Close examinations such as visual inspections and non-destructive testings revealed that the earth retaining wall does not have enough strength to resist active earth pressure and ground water pressure. This fact is proved to be a direct initiation of landslide. Numerical studies including slope stability analyses and seepage analyses were performed with material properties obtained by geophysical explorations and laboratory tests. The results of numerical studies show that the overturning of the earth retaining wall affects the slope stability, leading to landslide consequently.

**Keywords** : landslide, earth retaining structure, slope stability, active earth pressure

## 1. 서론

지난 2003년 9월 제14호 태풍 매미가 우리나라에 상륙한 지 약 3일 만에 전국적으로 10~450mm의 기록적인 비가 내렸으며 이 결과 132명의 인명피해 및 4.8조원이라는 막대한 재산피해가 발생하였다(이종태, 2003). 본 논문은 이 기간 중에 발생한 옹벽 및 사면붕괴를 다루고 있으며 특히 옹벽의 부실시공으로 말미암아 옹벽 배면의 사면이 붕괴한 사례를 보고하고 있다. 본 논문에서는 최근 부지를 보다 많이 확보하기 위하여 높은 옹벽을 시공할 때 정확한 설계 및 시공이 얼마나 중요한 지를 실제 사면붕괴 사례를 통하여 제시하고자 한다.

## 2. 현장 개요

### 2.1 지반조사

옹벽 기초 및 옹벽 배면의 지반 상태를 파악하기 위하여 시추조사를 3곳 실시하였으며 지층의 구조 상태 및 지층의 특성 등을 파악하였다. 조사 결과 지층의 분포상태는 매립토층, 붕적토층, 풍화토층 및 기반암인 풍화암층 순으로 구성되어 있으며 지층분포 상태를 표 1에 제시하였다.

#### 2.1.1 매립토층

이 층은 옹벽 구조물을 시공하기 위해 산을 깎은 후 다시 되메우기를 시행한 지층으로 1.2 ~ 7.5m 두께로 분포하고 있다. 소량의 실트 및 세립 내지 조립의 모래로 구성되었으며, 부분적으로 잔자갈 내지 왕자갈, 호박돌 크기의 전석 등이 함유되어 있으며, 표준관입시험에 의한 N치는 2 ~ 11회 정도로 매우 느슨 내지 보통 조밀한 상태의 상대밀도를 나타내고 있다. 매립토층의 상대밀도를 참조할 때 옹벽 뒷채

움의 다짐상태는 비교적 불량한 상태를 보이고 있다.

### 2.1.2 봉적토층

이 층은 두께가 1.2 ~ 3.0m 정도로서 실트 섞인 중립 내지 조립질 모래층으로 구성되어 있으며, 표준 관입시험 결과 N치는 20 ~ 30정도로 보통 조밀 내지 조밀한 상태의 상대밀도를 나타내고 있으며, 습한 상태의 습윤도를 나타내고 있다.

### 2.1.3 풍화토층

이 층은 기반암이 장기간에 걸쳐 심한 풍화작용을 받아 형성된 층으로 구조 및 조직은 잔류하고 있으나 화학적 조성 및 역학적 성질을 완전히 상실하고 실트 섞인 세립 내지 조립의 모래로 분해되어 원위치에 남아있는 토층이며 두께는 1.0 ~ 3.0m 정도이다. 표준관입시험 결과 N치는 19/30 ~ 50/18 정도로 보통 조밀 내지 대단히 조밀한 상태이며, 암갈색의 색조를 띠고 있고 습한 상태의 습윤도를 나타내고 있다.

### 2.1.4 풍화암층

이 층은 1.2 ~ 3.0m의 두께로 분포하고 있으며, 기반암의 구조 및 조직은 남아 있으나 풍화가 암석 내부까지 진행되어 풍화잔류토로 변해가는 과정에 있다. 입자간의 결합력을 대부분 상실한 상태이며 타격에 의해 실트질 모래로 분쇄되어 채취된다. 표준관입시험에 의한 N치는 50회 이상의 범위로 대단히 조밀하며 갈색의 색조를 띠며, 풍화암층은 잔류토층과의 구분을 위하여 50/10 (회/cm) 이하를 기준으로 하였다.

표 1. 지반조사 결과

구분	매립토층(m)	봉적토층(m)	풍화토층(m)	풍화암층(m)	비고
BH-1 (상부)	0.0 ~ 2.5	2.5 ~ 5.1	5.1 ~ 8.4	8.4 ~ 10.5	시추 종료 10.5m
	N치 15	N치 36 ~ 38	N치 37 ~ 49	N치 50 이상	
BH-2 (중양)	0.0 ~ 1.2	1.2 ~ 3.0	3.0 ~ 4.8	4.8 ~ 9.0	시추 종료 9.0m
	-	N치 20 ~ 48	N치 50 이상	N치 50 이상	
BH-3 (하부)	0.0 ~ 7.5	-	7.5 ~ 8.5	8.5 ~ 9.8	시추 종료 10.8m
	N치 2 ~ 11	-	N치 19	N치 50 이상	

## 2.2 현장조사

### 2.2.1 비파괴시험

슈미트햄머에 의한 콘크리트 추정 압축강도는 180 ~ 222 kgf/cm<sup>2</sup>로서 본 구조물의 설계기준강도( $\sigma_{ck}$ )가 210 kgf/cm<sup>2</sup>를 감안할 때 콘크리트 압축강도는 다소 미흡하지만 초음파 탐사에 의한 콘크리트 표면의 펄스 전달 속도는 3.97km/sec의 분포로서 본 옹벽의 콘크리트 품질상태는 비교적 양호한 것으로 조사되었다. 또한 RC-Radar에 의하여 콘크리트 내부의 철근을 탐사하였으며 탐사결과 옹벽 전면의 연직 철근 간격은 설계기준치인 200mm보다 작은 간격인 167~190mm의 간격으로 조사되었고, 배력 철근은 설계기준치인 200mm보다 큰 값인 265mm로 조사되었다. 또한, 붕괴된 옹벽배면에 측정된 상단부 연직철근은 설계기준치인 250mm보다 큰 간격인 360mm 간격으로 배근된 것으로 조사되었으며, 배근 간격도 일정

하지 않은 것으로 확인되었다.

### 2.2.2 지하수위 측정

지하수위 분포현황을 알기 위하여 시추작업 완료 후 시추공 내에 잔존하는 작업용수의 영향을 고려하여 시추작업 완료 48시간 이상 경과 후 안정된 지하수위를 측정하였다. 각 시추지점에서 측정한 최종 지하수위 분포현황을 표 2에 제시하였다.

표 2. 지하수위 분포현황

시추공 번호	표고 (GL. m)	지하수위 (GL. m)	분포지층
BH-1	17.1	12.4	붕적토층
BH-2	16.7	12.2	풍화토층
BH-3	8.0	-1.0	풍화암층

지하수위는 지형적인 영향 및 계절적인 변화에 따라 다소 차이가 있을 수 있으나, 본 옹벽 배면 사면의 지하수위는 다소 높게 분포하고 있는 것으로 확인되었다.

### 2.2.3 옹벽 배면 배수시설 조사

옹벽의 설계 및 시공에서 뒷채움재 및 배수층 설치는 옹벽 구조물에서 매우 중요한 요소이다. 뒷채움재는 옹벽 바로 뒷면에 물이 접할 경우 수압이 작용하지 못하도록 배수관을 통하여 즉시 배출시키는 역할을 하는 것이며, 배수층의 경우 옹벽 뒤 미립의 토사라도 계속해서 배출될 경우 옹벽 뒷면에 공동현상이 발생되므로 이를 막기 위해서 설치하는 것이다. 또한, 뒷채움 재료로 세립토를 사용하는 경우 옹벽에 작용하는 토압이 사질토에 비해 매우 커지므로 가능한 이를 사용하지 않아야 한다(김상규, 1991).

현장조사 결과 붕괴된 옹벽 배면에 잡석이 전혀 시공되어 있지 않았으며 배수층도 누락된 것으로 확인 되었다. 옹벽 배면의 물을 배수시키기 위하여 옹벽 하단부에는 약 2m 간격으로 직경 65mm의 PVC관이 설치되어 있으나 장기간 사용 및 관리소홀로 막힘(clogging)현상이 발생한 것으로 조사되었다.

## 3. 안정성 검토

### 3.1 옹벽

#### 3.1.1 해석 기본 자료

해당 옹벽은 역 T형 옹벽 구조물로서 높이가 7m 이며 연장은 54m 이다. 붕괴 당시 옹벽 구조물은 준공 후 약 9년이 경과한 상태였으며 구조물의 결함을 검사하기 위하여 정밀안전진단을 수행하였다. 콘크리트 강도를 측정하기 위하여 코어 샘플을 채취하였으며 철근의 배근 간격과 철근 피복 두께를 측정하기 위하여 철근탐사를 실시하였다. 정밀안전진단으로부터 얻은 콘크리트 강도, 철근 배근 간격, 그리고 철근 피복 두께를 참고로 하여 실제 시공된 단면에 대한 안전성 검토를 수행하였으며, 옹벽의 전도, 활동, 지지력에 대한 안정성 검토는 지반조사 결과를 참고로 하여 검토하였다. 옹벽 구조물의 안전성 검토에 사용한 값을 표 3에 제시하였다.

표 3. 옹벽 구조물 사용재료 및 해석단면

사용재료		설계 값	실제 측정 값	비고
콘크리트	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	210	336	적용 210
철근	항복강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	3,000	3,000	적용 3,000
	간격(cm)	10.0	16.68	벽체 하단
	피복두께(cm)	7.0	27.0	벽체 하단

### 3.1.2 옹벽 안정성 검토

옹벽 구조물의 안정성을 검토하기 위하여 토압을 산정하였는데 이때 상시 주동토압계수를 계산하기 위하여 뒷채움흙의 내부마찰각( $\phi$ )은 30°를 적용하였고 뒷채움흙의 경사각( $\beta$ )은 33.69°도를, 그리고 뒷채움흙의 벽면마찰각( $\delta$ )은 28.949°를 적용하였다. 옹벽 안정해석을 위하여 옹벽 콘크리트의 자중, 재하 토사의 자중, 주동 토압 및 과재 하중을 계산하였으며 이를 토대로 옹벽의 전도, 지지력, 활동에 대한 안정성을 검토하였다. 검토 결과 옹벽은 전도와 지지력에 있어서는 안정한 것으로 분석되었으나 활동 측면에 있어서 불안정한 것으로 나타났다.

또한, 옹벽 구조물 사용재료 및 해석단면을 가지고 구조해석을 실시하였는데 옹벽 구조물 벽체, 저판 압굽 및 뒷굽에 대한 구조해석 결과를 표 4에 제시하였다.

표 4. 구조해석 결과

구분	안전성 체크	작용 단면력	공칭 단면력	사용 철근량 (cm <sup>2</sup> )	필요 철근량 (cm <sup>2</sup> )	비고
벽체	휨	93.886 t·m	35.365 t·m	30.524	91.296	N.G
	전단	45.798 t	45.709 t	-	-	N.G
압굽	휨	35.260 t·m	114.016 t·m	64.240	18.834	O.K
	전단	40.432 t	46.083 t	-	-	O.K
뒷굽	휨	93.886 t·m	70.822 t·m	38.710	52.136	N.G
	전단	44.154 t	46.083 t	-	-	O.K

표 4에서 보는 바와 같이 옹벽 구조물 벽체의 철근배근은 설계치인 D25@100 간격보다 D25@166.8 간격으로 배근하고, 피복두께도 설계치인 7.0cm 보다 27.0cm로 시공하여 작용 단면력에 대한 저항단면력이 매우 부족하여 휨파괴가 발생하는 것으로 나타났으며, 또한 기초판의 경우에도 배면토의 하중이 크고, 주동 토압이 당초 설계 시 보다 크게 작용하여 휨에 대한 안전성이 확보되지 않는 것으로 나타났다.

## 3.2 사면

### 3.2.1 해석 기본 자료

사면의 안정성을 평가하기 위하여 캐나다 GEO-SLOPE사가 개발한 GeoStudio™를 사용하였다(Krahn, 2004). 사면안정 및 침투해석을 수행하였으며 해석에 사용한 물성치를 표 5에 제시하였다.

표 5. 해석 물성치

토질	단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	내부마찰각 (°)	점착력 (t/m <sup>2</sup> )	포화투수계수 (m/sec)	탄성계수 (t/m <sup>2</sup> )	포와송비
매립토	1.8	30	0.5	5.0E-07	1,000	0.35
붕적토	1.8	30	0.5	1.0E-07	1,000	0.35
풍화토	1.9	33	3.0	1.0E-07	5,000	0.35
풍화암	2.1	33	5.0	3.0E-08	20,000	0.30
연암	2.3	35	7.0	7.0E-10	50,000	0.25

### 3.2.2 사면 안정성 검토

일반적으로 사면파괴의 원인은 내적 요인과 외적 요인의 두 가지로 크게 나눌 수 있다. 내적 요인으로는 지질, 토질, 지질구조, 지형 등의 취약성과 같은 자연적 요인과 절토 등과 같은 인위적 요인을 열거할 수 있다. 사면 파괴는 이러한 내적 요인과 외적 요인이 서로 구비되었을 때 발생하기가 쉽다. 즉, 내적으로 취약한 구조를 가지고 있는 사면에 강우나 절토 등의 외적 요인이 가하여 질 경우 사면 파괴는 발생되기 쉽다(한국지반공학회, 1997). 또한, 사면 선단에 위치한 옹벽 구조물이 침하, 전도 및 활동하는 경우에도 사면붕괴가 발생할 수 있다(Cheng, 2002).

해석은 건조한 상태의 지반, 포화 상태의 지반, 그리고 포화 상태의 지반에 비가 내릴 때의 경우로 각각 나누어 수행하였다. 강우조건은 강우강도를 변화시켜 가면서 홍수경보 발령기준인 10분당 5mm까지 단계적으로 증가시켰으며 각 단계별로 침투해석 및 사면안정해석을 수행함으로써 안전율의 변화를 살펴 보았다. 사면안정해석 결과 경사면이 건조한 상태인 경우 안전율이 1.754로서 안정하였고, 강우가 시작되어 경사면 내부의 지하수위가 서서히 상승하는 단계에서 안전율이 조금씩 감소하였으며 지하수위가 경사면 지표면과 일치하여 완전포화 상태에서는 안전율이 1.267 인 것으로 나타났다.

해석결과 지하수위가 존재하는 경우 사면의 파괴면은 역T형 옹벽 설계 시 가정하는 주동파괴포락선 내부에 존재하는 것으로 파악되었으며, 원호활동토괴에 의한 활동력은 당초 옹벽 설계시의 주동토압 보다 작은 것으로 분석되었다. 따라서 옹벽 배면의 사면 활동에 의해 옹벽이 붕괴되었을 가능성은 거의 없는 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 논문은 사면 붕괴의 여러 가지 원인 가운데서 특히 부실 옹벽의 선행 파괴에 의해 촉발된 사면 붕괴 현상을 다루었다. 즉, 옹벽 파괴로 인하여 옹벽 배면의 포화된 토괴가 무너지고 이어서 사면 선단부가 1차적으로 국부적인 원호활동 파괴를 일으키며, 이러한 사면 선단부의 파괴가 점진적으로 사면 상부로 전달되는 진행성 파괴(progressive failure)가 발생한 것으로 판단된다.

이 사례에서 보는 바와 같이 옹벽 구조물 자체의 강성이 옹벽 배면에 작용하는 주동토압 및 수압에 저항하지 못하는 경우 사면 붕괴가 발생할 수 있음을 파악하였으며, 또한, 옹벽 뒷채움 작업 시 양질의 되메움 토사로 다짐을 철저히 해야 하고 옹벽의 배수시설 설치 및 관리가 사면안정에 매우 중요한 요소임을 확인하였다.

## 참고문헌

1. 이종태(2003), “우리나라 홍수재해의 특성과 태풍 ‘매미’의 교훈”
2. 김상규(1991), **토질역학**, 청문각, pp.260~264.
3. 한국지반공학회(1997), **지반공학시리즈 5 사면안정**, 구미서관, pp.245~269.
4. Krahn, J.(2004a), Stability Modeling with SLOPE/W<sup>®</sup>, An Engineering Methodology, GEO-SLOPE/W International Ltd.
5. Krahn, J.(2004b), Stability Modeling with SEEP/W<sup>®</sup>, An Engineering Methodology, GEO-SLOPE/W International Ltd.
6. Cheng, Min-Yuan and Ko, Chien-Ho(2002), "Computer-aided decision support system for hillside safety monitoring," *Automation in Construction*, Vol.11, pp.453~466.