

## 절개사면에서의 보강단계별 사면안정성에 대한 해석적 연구 An Analytical Study of Slope Stability to Reinforcement Stage in Cut Slope

강기천<sup>1)</sup>, Ki-Chun Kang, 송영석<sup>2)</sup>, Young-Suk Song, 홍원표<sup>3)</sup>, Won-Pyo Hong, 김태형<sup>4)</sup>, Tae-Hyung Kim

- 1) 국립 한국해양대학교 대학원 토목환경공학과 석사과정, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime Univ.
- 2) 한국지질자원연구원 지질환경재해연구부 선임연구원, Senior Researcher, Geological & Environmental Hazards Division, Korea Inst. of Geoscience and Mineral Res.
- 3) 중앙대학교 건설환경공학과 교수, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang Univ.
- 4) 국립 한국해양대학교 건설환경공학부 조교수, Assistant Professor, Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime Univ.

**SYNOPSIS** : The purpose of this study is to estimate a landslide using the SLOPILE program from the slope reinforced by slope stability systems such as soil nailing and pile. To do this, cutting slope located at Donghae-Highway in Kwangwon-Do was considered. The behavior of slope was monitored for a long term by using instrumentation according to the reinforcement stages. The sequence of reinforcement stages was followed as pile installation, boring, soil nailing installation, anchoring and embankment. The result from this case study shows that the safety factor of slope depends on the reinforcement stage more or less.

**Key words** : Landslide, Slope stability, Monitoring, Instrumentation, Reinforcement

### 1. 서론

지난 수십 년간 우리나라는 각종 산업의 발달과 이에 따른 인구의 도시집중화, 구조물의 대형화가 이루어짐으로써 토지이용의 효율을 높이기 위해 자연사면을 절취하거나 원 지반을 매립하여 부지를 확보해 왔다. 과거에는 사면붕괴가 인적이 드문 오지에서 주로 발생하였으나, 최근에는 인구가 밀집되어 있는 지역으로 확대되어 사면붕괴 발생시 인명피해가 발생하는 경우가 빈번하게 일어나고 있는 실정이다. 이에 산사태 발생기구에 대한 연구는 현재에도 지속적으로 진행되고 있으며 그 결과에 의거하여 사면안정해석법이 제안되고 있다. 산사태 방지를 위해 사면안정대책으로 이용되는 활동억지시스템들의 특성에 관한 연구는 많이 진행 되었지만 활동억지시스템 적용 단계별 해석에 대한 연구는 아직 미약한 실정인데 이 부분에 대한 연구는 사면붕괴 예측에 있어 반드시 필요하다.

따라서, 본 연구에서는 사면안정해석 프로그램인 SLOPILE을 이용하여 절개사면의 안정대책 공법인 상하부억지말뚝, 굴착 후 쏘일네일링, 상부말뚝에 1단앵커, 성토의 총 6단계의 보강순서에 대해 사면의 안정성을 평가하고 거동을 파악하고자 한다. 또한, 산사태 방지대책의 일환으로 억지말뚝공법을 채택한 경우의 현장실험과 말뚝해석프로그램을 통해 말뚝이 설치된 사면과 말뚝의 상호작용에 대해 확인하고 사면내 활동억지시스템의 장기거동 및 사면 안정효과를 확인 규명하고자 한다.

## 2. 현장개요

### 2.1 현장현황

본 연구대상 현장은 강원도 강릉시 옥계면 일원에 시공된 동해고속도로 동해~주문진간 4차로 확장공사(제3공구)구간이다. 낙풍 1교의 P2(주문진방향) 기초시공을 위한 사면절토시 공사차량 진입도로 및 사면상부에 총 3개소의 인장균열이 발생되었다. 그림 1에서 보는 바와 같이 3개소의 인장균열을 하부에서부터 각각 Crack 1, 2 및 3으로 나타내었다.

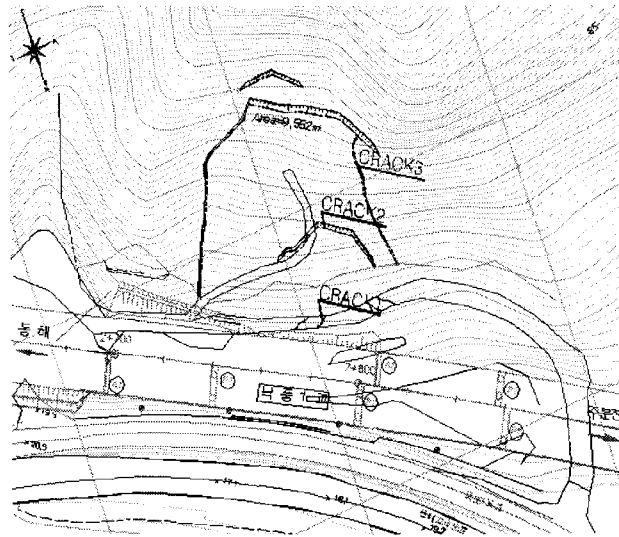


그림 1. 현장 평면도

표 1. 현장 사면의 개요

구 간 범 위		사면폭(m)	사면높이(m)	사면경사(°)	활동면	
시점	종점				폭(m)	면적(m <sup>2</sup> )
2+730	2+830	100	87	20~45	100	9550

## 2.2 지반조건

### 2.2.1 지층구성

총 14회의 시추조사를 실시하였다. 시추조사를 통하여 지층분포현황을 파악하였으며, 실내시험을 위한 시료채취도 실시하였다. 1.5m깊이 별로 표준관입시험도 실시하였다. 시추조사 결과 연구대상지역의 지층은 상부로부터 붕적토층, 풍화잔류토층, 풍화암층 및 연암층으로 구성되어 있다. 이들 지층에 대한 특성은 다음과 같다.

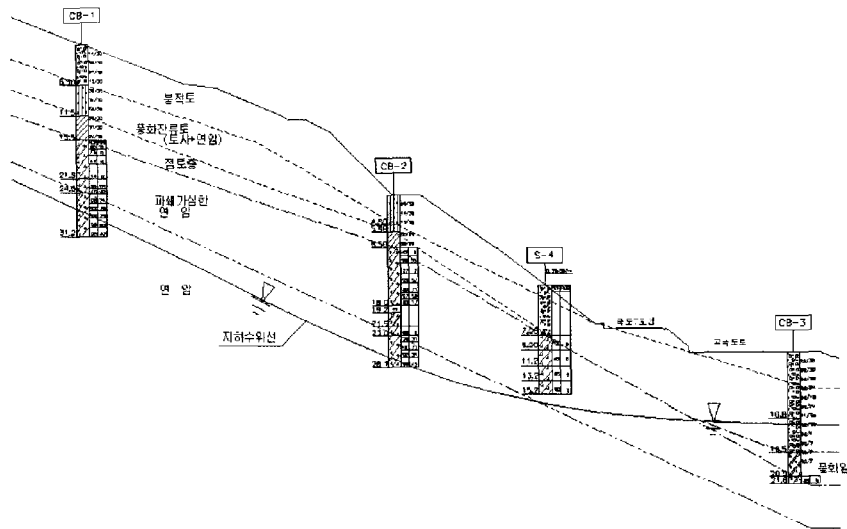


그림 2. 현장 대표단면 주상도

가. 불적토층

최상부층 지층으로서 지표아래 1.3~6.7m까지 분포하며, 상부사면이 붕괴 또는 침식되어 쌓인 층으로 전석, 모래, 암편, 점토 등으로 구성되어 있다. 습윤상태이며, 갈색~회색을 띠고 있다. 상대밀도는 보통 조밀~매우 조밀한 상태이다.

나. 풍화잔류토층

지표아래 1.3~13.2m에서 4.2~7.8m의 층후를 가지고 있으며, 토사와 연암이 교호하는 층으로서 이 층은 천매암의 차별 풍화에 의해 형성되었다. 연직투수성은 크지 않을 것으로 판단되나 수평방향으로는 파쇄가 심한 연암층의 영향으로 투수성이 매우 큰 것으로 나타났다. 상대밀도는 보통 조밀~매우 조밀한 상태이다.

다. 풍화암층

편암으로 구성되어 있고 지표하 9.8~17.5m까지 분포하며 습윤, 회색의 천매암이 상부 풍화대로 모래, 실트 및 암편 등으로 이루어져 있으며, 상대밀도는 매우 조밀한 상태이다.

라. 연암층

지표하 9.8~15.0m 하부에 분포하며, 편암 편상화강암이 심도별로 반복되어 나타나고 있다. 공별로 매우 심한 파쇄구간이 다수 반복되어 나타나고 있어 지반상태가 매우 불량한 상태이다.

**2.2.2 지하수위**

본 연구대상 지역에 대한 지하수위 측정은 시추작업이 완료된 후 24~48시간이 경과된 후 안정된 지하수위를 얻을 수 있도록 관찰하였으며, 측정된 지하수는 조사지역의 지하수위 분포현황을 파악하기 위한 자료로 이용한다. 측정 결과 지하수위는 지표면으로부터 G.L(-)11.65~23.65m에 위치하는 것으로 조사되었다. 지하수위는 상부사면부의 경우 연암층에 분포하며 하단부의 경우에는 자갈층내에 분포하고 있다.

### 3. 현장시험

#### 3.1 사면안정대책공법

본 사면의 보강공법으로는 상부사면에는 1열의 억지말뚝과 말뚝두부는 영구앵커로 고정시키고, 하부사면의 보강토 시공구간에서는 도로성토시 사면의 안정성 확보를 위하여 하부 억지말뚝 2열 아래의 사면부에 쏘일네일링을 설치하였다.

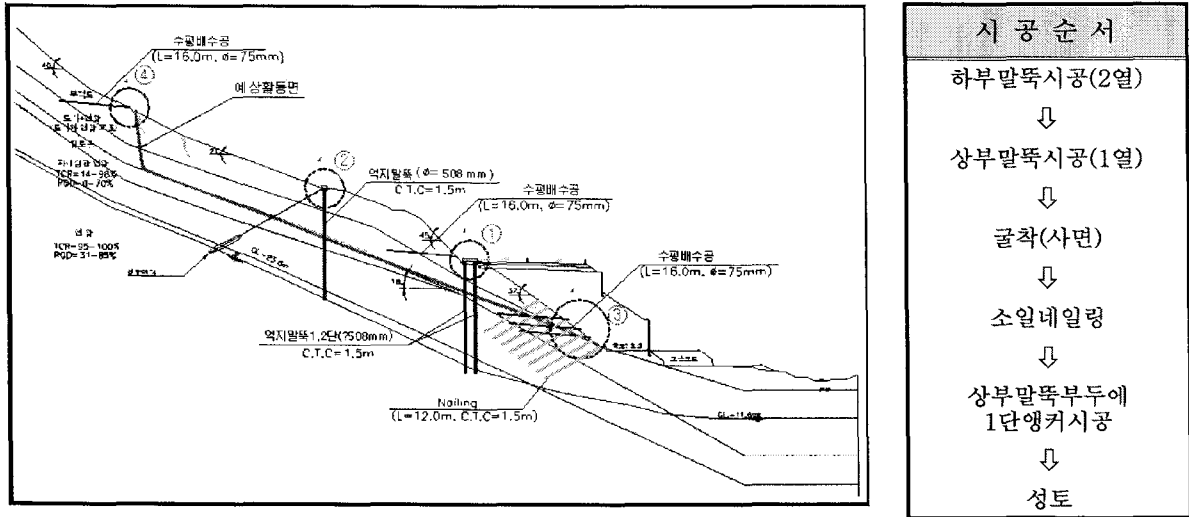


그림 3. 현장 사면안정공법 및 시공순서

### 4. 사면안정해석 및 고찰

#### 4.1 사면안정해석

해석에 사용한 지반의 토질정수는 토사층의 경우에는 실내실험결과와 역해석 및 일반적으로 제안된 값을 참조하였고 암반의 경우에는 Hoek & Bray 경험치, Hoek & Brown 경험치, 도로설계실무편람 등에 제안된 강도정수를 비교 검토하여 적용하였다. 또한 사면안정 해석기준(한국도로공사)에 제시된 값으로 수정하여 사용하였다. 해석에 적용된 토질정수는 표 2와 같다.

표 2. 해석단면의 토질정수

토질	물성	$\gamma_t$ (t/m <sup>3</sup> )	$c$ (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (Deg.)
성 토		1.90	1.5	25
붕 적 토		1.85	0.5	27
풍화간류토		1.9	1.0	30
점 토		1.7	1.5	20
파쇄심한 연암		2.2	5.0	35
연 암		2.5	10.0	40

## 4.2 해석결과

그림 4는 사면안정해석을 위하여 SLOPILE 프로그램을 이용하여 대상사면을 모델링한 것이다. 대상사면의 경우 사면안정해석은 상부사면과 하부사면으로 구분하여 실시하는 것이 바람직하다. 왜냐하면, 상부사면의 안정을 위해 1열의 말뚝과 앵커가 보강되었고, 하부사면의 안정을 위하여 2열의 말뚝과 앵커가 보강되었기 때문이다.

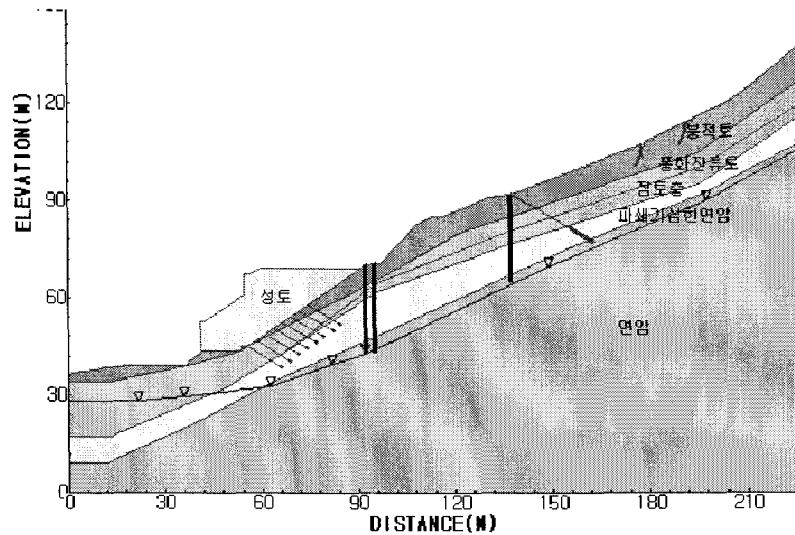


그림 4. 해석단면

표 3. 해석결과

보강순서	안 전 율			
	보강전		보강후	
	하부	상부	하부	상부
하부말뚝 시공(2열)	1.076	1.332	1.498	1.332
상부말뚝 시공(1열)	1.076	1.332	1.498	1.607
굴착(하부사면)	1.091	1.303	1.539	1.578
네일시공(하부사면)	1.091	1.303	1.655	1.578
상부말뚝 1단앵커시공	1.091	1.303	1.655	1.524
성토(하부사면)	1.362	1.316	1.679	1.538

사면안정해석 결과는 표 3 및 그림 5와 같이 나타낼 수 있다. 표 3에서 보는 바와 같이 하부사면의 경우 2열의 말뚝 보강으로 인하여 사면안전율이 0.422정도 증가하며, 상부사면의 경우 1열의 말뚝보강으로 인하여 사면안전율이 0.275정도 증가하였다. 하부사면의 네일시공을 위한 일부 굴착시 하부사면은 활동도파의 하중경감으로 인하여 안전율이 0.041정도 증가하지만, 상부사면은 굴착으로 저항력이 감소되므로 안전율이 0.029정도 감소함을 알 수 있다. 하부사면의 네일시공시 하부사면의 안전율은 0.116정도 증가하지만, 상부사면의 안전율은 변화가 없는 것으로 나타났다. 한편, 하부 성토사면 조성시 상부사면 및 하부사면에서 모두 안전율이 증가함을 알 수 있다. 이와 같이 사면보강으로 인하여 사면안전율은 증가하며, 사면보강에 따른 상부사면 및 하부사면에서의 사면안전율은 일부 영향이 있으나 서로 독립적으로 변화됨을 알 수 있다.

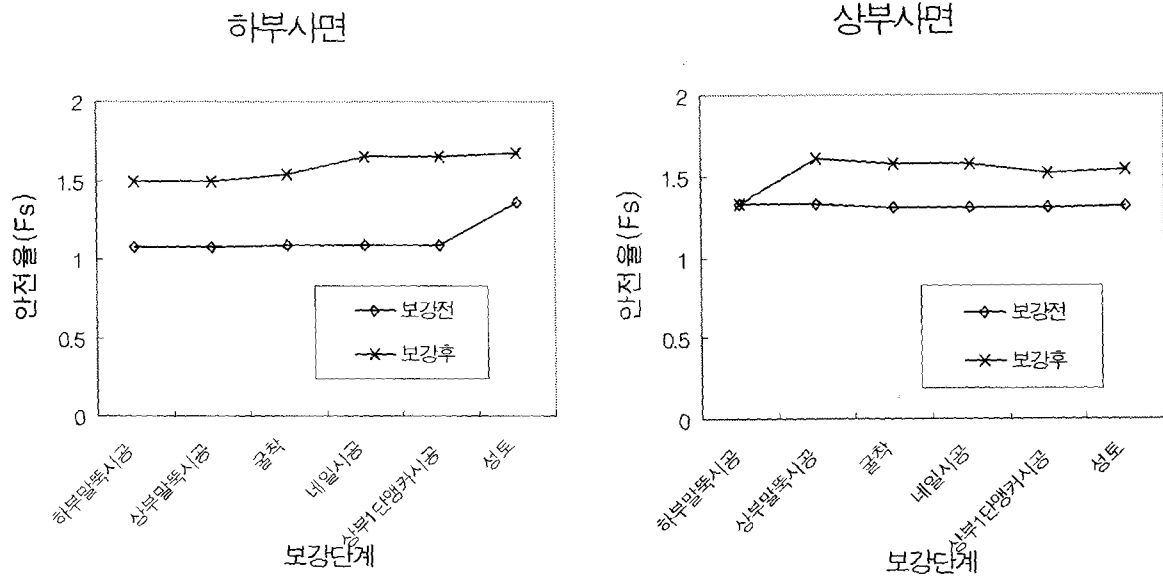
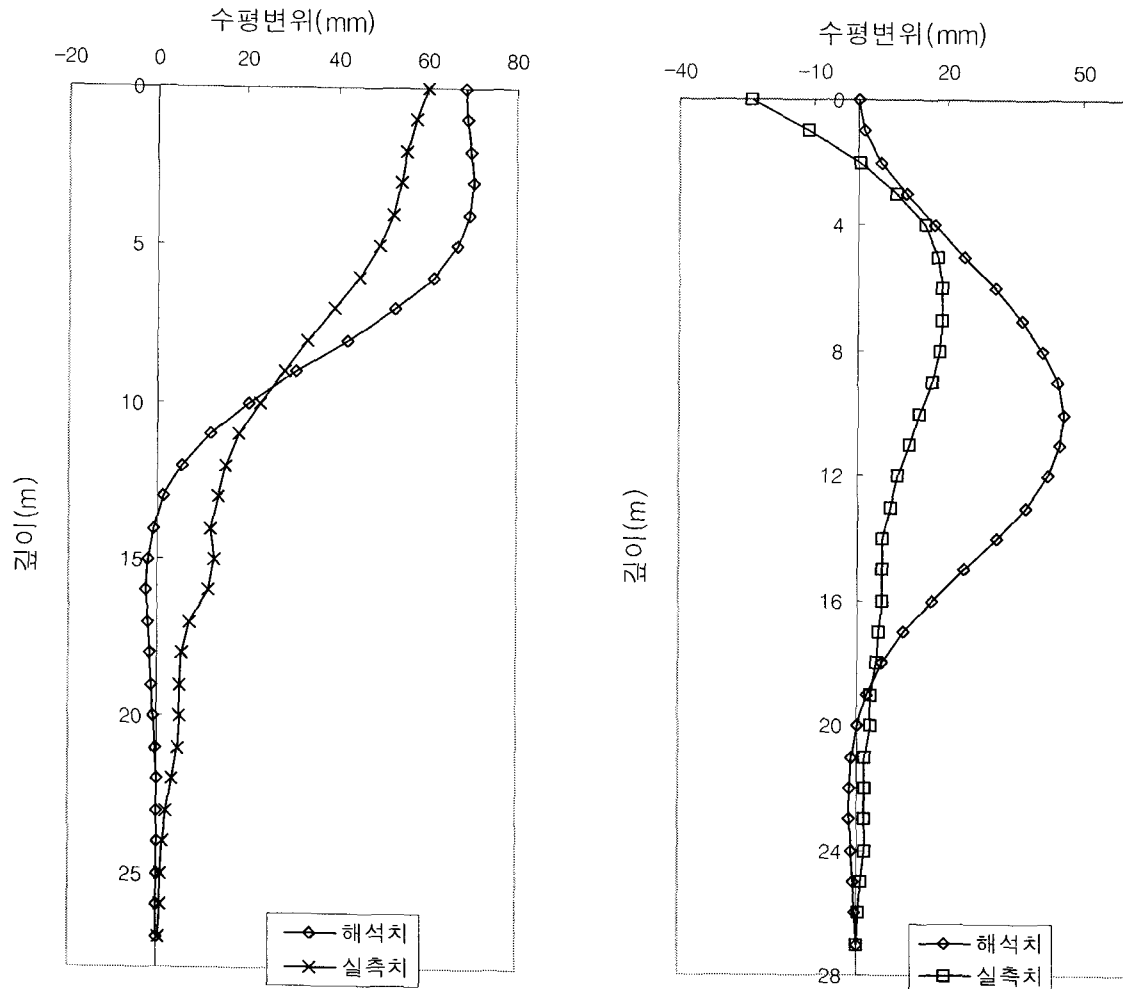


그림 5. 해석결과

### 4.3 실측결과와의 비교

대상현장의 경우 각종 계측장치를 이용하여 시공기간동안 각종 보강재 및 사면의 안정성과 거동을 측정하고 이에 대한 유지관리를 실시하였다. 사면보강이 완료된 후 2003년 9월경의 하부 및 상부말뚝에서의 실측변위와 SLOPILE을 이용한 보강완료 후 말뚝변위에 대한 해석결과를 서로 비교하였다. 그림 6은 상부 및 하부말뚝의 해석치와 실측치를 비교한 것이다. 그림 6(a)는 하부말뚝을 나타낸 것으로 실제 계측된 말뚝 변위와 사면안정해석을 통하여 얻어진 말뚝변위는 지표면으로부터 10m 깊이까지 해석치가 실측치보다 크게 나타나며, 10m 깊이이하에서는 실측치가 해석치보다 크게 나타남을 알 수 있다. 그리고, 말뚝에서 발생하는 최대 수평변위는 모두 말뚝두부에서 발생하는 것을 볼 수 있다. 한편, 그림 6(b)는 상부말뚝을 나타낸 것으로 전체적인 변형양상은 유사하나 해석치가 실측치보다 말뚝변위가 크게 나타났다. 사면안정해석시 앵커설치로 인하여 말뚝두부는 고정상태가 되므로 말뚝변위는 발생하지 않는 것으로 나타난다. 그러나, 실제 말뚝두부의 앵커인장시 말뚝의 변위는 원래 말뚝변위보다 더 크게 회복하게 된다.

한편, 상부말뚝 및 하부말뚝의 변형양상은 해석치와 실측치가 매우 유사한 것으로 나타났다. 따라서, 본 연구에서 수행된 사면안정해석 및 말뚝의 거동분석은 합리적으로 이루어졌음을 알 수 있다.



(a) 하부말뚝 수평변위 (b) 상부말뚝 수평변위  
 그림 6. 말뚝변위에 대한 비교분석

## 5. 결론

본 연구에서는 보강단계별 안정성을 분석하기 위해 사면안정 프로그램인 SLOPILE을 이용, 말뚝변위에 대한 계측치를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 상부사면과 하부사면으로 구분하여 보강단계별 안정성에 대한 해석결과, 사면보강으로 인하여 사면 안전율은 증가하며 사면보강에 따른 상부사면 및 하부사면에서의 사면안전율은 일부 영향이 있으나 서로 독립적으로 변화한다.
2. 하부 및 상부말뚝에서의 실측변위와 SLOPILE을 이용한 보강완료 후 말뚝변위에 대한 해석결과를 비교한 결과, 말뚝에서 발생하는 최대 수평변위는 모두 말뚝두부에서 발생되었고 전체적인 변형양상은 유사하다.
3. 사면 안정해석 프로그램인 SLOPILE을 이용하여 억지말뚝에 작용하는 사면안정 효과를 평가할 수 있고 이를 바탕으로, 본 연구에서 수행된 사면안정해석 및 말뚝의 거동분석은 합리적으로 이루어졌다.

## 참 고 문 헌

1. 송영석(2003), “활동역지시스템으로 보강된 사면의 설계법”, 중앙대학교 대학원 박사학위논문
2. 한국도로공사(2002), 낙풍1교 상부사면 보강대책 보고서.
3. 한국도로공사(1998), 사면안정 해석기준(안).
4. 한국지반공학회(1997), 그라운드앵커 기술협회
5. Bowles, J. E.(1982), Foundation Analysis and Design, 3rd Ed., McGraw-Hill, Tokyo, pp.66~70.