

## 보강된 비탈면의 파괴원인 분석 및 대책공법의 적용성 평가

### Application Evaluation of Countermeasure Method using Analysis of Failure Causes for Reinforced Slope

한 중 근<sup>1</sup> Han, Jung-Geun 홍 기 권<sup>2\*</sup> Hong, Ki-Kwon  
이 중 영<sup>3</sup> Lee, Jong-Young 정 순 국<sup>4</sup> Jung, Sun-Kuk

#### ABSTRACT

This paper described that the failure causes of reinforced slope are analyzed based on the effect of geological and rainfall. The analysis result confirmed that the rainfall has effects on the stability of reinforced slope. Therefore, it was applied to the dewatering method using collector well for slope stabilized, and then the analysis of seepage and slope stability were conducted on slope with the applied method. The results of seepage analysis are corresponded with failure cause by rainfall and the results of slope stability, which is applied to dewatering method, are satisfied with safety factor criterion. Therefore, it confirmed that the dewatering method using collector could be possible to apply in field and reasonable method for slope stabilized during heavy rainfall.

#### 요 지

본 연구에서는 비탈면 깎기 시 파괴가 발생한 후 보강공법을 적용하였지만, 집중강우 기간에 비탈면의 부분파괴와 더불어 보강공법으로 적용된 억지말뚝 및 앵커의 변위와 파손 등이 지속적으로 발생한 현상을 대상으로 파괴원인을 분석하였다. 보강된 비탈면의 파괴는 강우가 주원인으로 예측되었으며, 강우침투에 의한 지하수위 상승을 억제하기 위한 대책공법이 필요한 것으로 분석되었다. 이에 대책공법으로서 집수정을 이용한 지하수위 저하공법이 적용된 보강된 비탈면에 대하여 강우에 의한 침투해석 및 안정해석을 수행하였다. 침투해석 결과는 강우가 보강된 비탈면의 주요 파괴원인으로 분석된 결과와 일치하였으며, 대책공법이 적용된 비탈면의 안정해석 결과는 기준안전율을 모두 만족하는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구를 통하여 집수정을 이용한 지하수위 저하공법은 기존의 배수공을 이용한 공법과 병행할 경우, 현재보다 합리적이고 안정화된 대책공법으로서의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

**Keywords :** Reinforced slope, Slope stability, Dewatering method, Rainfall, Seepage analysis

#### 1. 서 론

우리나라는 국토의 약 70%가 산지로 이루어져 있기 때문에, 삶의 질 향상에 따른 가용부지의 확보를 위하여 산지개발이 급격히 증가되고 있다. 그러나 이러한 개발과정에서 안정한 상태를 유지하고 있던 비탈면이 파괴되어 산

사태가 발생함과 동시에 재산 및 인명피해가 증가하고 있으며, 그 규모도 커지고 있는 실정이다(김민석 등, 2007; 박덕근 등, 2006). 특히, 우리나라는 연평균 강우량의 대부분이 6월~9월 사이에 집중강우를 통해 발생되기 때문에, 이 때 비탈면파괴나 산사태의 발생이 빈번하다(강기천 등, 2005; 신민호 등, 2000; 정상삼 등, 2009; 홍원표 등, 1990).

1 정희원, 중앙대학교 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Chung-Ang Univ.)  
2\* 정희원, 중앙대학교 일반대학원 토목공학과 박사수로 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engineering, Chung-Ang Univ., E-mail: kkhong@wm.cau.ac.kr)  
3 정희원, 중앙대학교 공과대학 그린테크연구소 전임연구원 (Member, Researcher, Global Greenization Technology Institute, College of Engineering, Chung-Ang Univ.)  
4 비회원, 주식회사 강산 회장 (Non-member, President, Kang-San Co., LTD.)

산사태의 발생요인으로는 크게 지질 및 지형 등의 내적 요인과 강우 및 지진 등의 외적요인으로 구분할 수 있으며, 내적으로 취약한 지형 및 지질구조로 이루어진 비탈면에 강우 및 지진 등의 외적요인이 작용하게 되면 산사태 발생가능성이 증가하게 된다. 이와 같이 불안정한 비탈면의 안정성확보를 위한 적극적인 대책공법으로는 억지말뚝, 앵커, 쏘일네일링 및 옹벽 등으로 비탈면활동에 대한 저항력을 증대시키는 공법들이 주로 적용되고 있으며, 이에 대한 설계법 및 해석법 등이 제안되기도 하였다(송영석, 2003; 한중근, 1997; 홍원표, 1999). 또한 이러한 대책공법과 함께 주로 적용되고 있는 지하수위 배제공법은 일반적으로 배수관공을 이용한 시공법이 적용되고 있으나, 배수관의 길이가 길어지면 성능상의 문제가 발생하게 되어 지하수위 저하 효과를 충분히 얻을 수 없는 경우가 대부분이다(박덕근, 2003).

한편, 최근 국내에서는 예측이 불가능한 집중강우가 빈번하게 발생하기 때문에 산사태 등과 같은 재해가 더욱 많이 발생하고 있는 실정이다. 이와 같이 집중강우에 의한 우수의 침투량 증가는 지반 내의 간극수압의 증가 및 지하수면 상승을 유발시키고, 이는 유효응력과 지반의 전단강도를 감소시키게 되어, 지하수의 유출면적이 증가되면서 지반 내 지하수의 유동속도를 증가시키게 된다. 특히, 전단강도의 감소와 함께 지하수위 상승은 비탈면의 안정성에 가장 큰 영향을 미치며, 지반을 액상화 상태로 변화하게 함으로서 비탈면파괴의 주요요인으로 작용하게 된다. 따라서 비탈면의 안정을 위한 다양한 공법이 적용되어질 때, 강우 시 침투수에 의한 지하수위 상승을 억제하고 기존의 지하수위를 효과적으로 저하시킬 수 있다면 비탈면의 안정성을 더욱 증가시킬 뿐만 아니라 비탈면파괴를 미연에 방지할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 강우침투에 의한 지하수위 영향을 고려한 대책공법이 적용된 현장사례를 대상으로 비탈면파괴 주요인을 재분석하고 강우에 의한 시간의존적 지반거동을 분석하였다. 본 연구대상 현장은 비탈면 깎기 시 파괴가 발생한 후 대책공법으로 억지말뚝과 앵커를 병행 시공하였지만, 이후 비탈면의 부분파괴와 더불어 보강시공된 억지말뚝 및 앵커의 변위와 파손 등이 지속적으로 발생한 현장을 채택하였다. 따라서 보강된 비탈면의 파괴가 집중강우 직후에 발생한 점을 고려하여 강우실측치에 의한 시간의존적 지하수위 상승 및 대책공법 적용에 대하여 침투해석 및 비탈면 안정해석을 통한 대책공법의 적용성을 평가하였다.

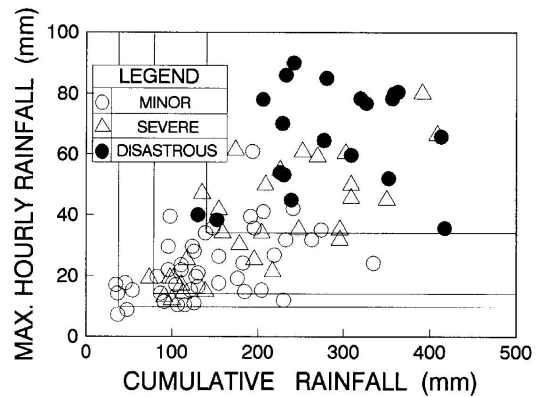


그림 1. 최대시간 강우강도와 누적강우량의 상관관계(홍원표 등, 1990)

## 2. 집중강우에 따른 비탈면파괴 발생 영향

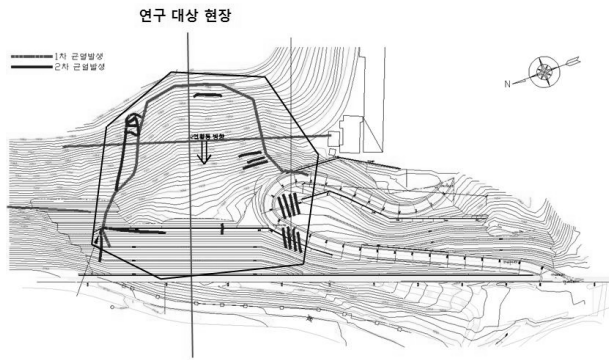
전술한 바와 같이 집중강우는 비탈면파괴 발생에 매우 큰 영향을 미치게 된다. Brand 등(1984)은 홍콩에서 1982년에 발생한 비탈면파괴를 중심으로 강우 기간과 3회 이상의 비탈면파괴가 발생한 경우의 최대 시간 강우량의 관계를 분석하여 시간 강우량의 크기가 비탈면파괴에 미치는 영향을 연구한 바 있다. 또한 1963년부터 1982년까지 20년간 최대 시간 강우량이 나타난 이후 비탈면파괴가 발생한 시간을 통하여 대다수의 비탈면파괴가 최대시간 강우량이 나타난 후 단시간에 발생한 것으로 분석하였다.

홍원표 등(1990)은 비탈면파괴 발생규모별 최대시간 강우강도와 누적강우량의 상관관계를 분석하였으며, 이를 이용하여 그림 1에서 보는 바와 같이 전국에서 발생한 비탈면파괴의 발생회수에 따라 파괴규모를 소규모(minor), 중규모(severe), 대규모(disaster)로 구분하여 연구한 바 있다. 그림에서 보는 바와 같이 소규모 파괴는 최대시간 강우강도가 10mm 및 누적강우량이 40mm를 초과하면 발생되기 시작하고, 중규모는 최대 시간 강우강도가 15mm 및 누적강우량이 80mm를 초과하면 발생되기 시작하는 것을 확인할 수 있다. 또한 대규모 파괴의 경우에는 최대 시간 강우강도가 35mm 및 누적강우량이 140mm를 초과하면 발생되는 것을 알 수 있다.

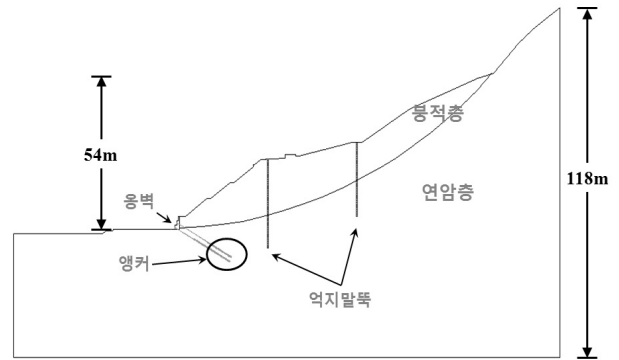
## 3. 비탈면 파괴원인 분석

### 3.1 현장 개요 및 비탈면 파괴 현황

본 연구대상 현장은 강원도 태백시 일원의 도로 확장공



(a) 활동지역 현황



(b) 단면도

그림 2. 연구대상 비탈면 개요



(a) 인장균열



(b) 강재 버팀띠장 파손



(c) 비탈면파괴 현장 전경

그림 3. 비탈면파괴 발행 현황

사 구간으로서, 비탈면 깎기 중에 지반의 인장균열 및 침하가 지속적으로 발생하여, 그림 2와 같이 대책공법으로서 역지말뚝, 앵커 및 옹벽의 병행 시공을 통하여 비탈면의 안정화를 유도하였다. 이후 안정을 유지하던 비탈면은 집중강우가 발생하던 6~7월 사이에 그림 3에서 보는 바와 같이 약 10cm 이상의 인장균열이 진행되어 활동파괴가 발생하였으며, 상부의 말뚝 및 지반 변위방지의 목적으로 기존에 보강한 역지말뚝 일부분에서 파손에 의해 30cm 이상 이격되었으며, 두부는 약 1.5m 이상 거동되었다. 또한 옹벽의 변위를 방지하고자 강재 버팀띠장을 설치하였으나, 연결철관이 균열에 의하여 절단되었고, 시공된 앵커는 부분적으로 파손상태가 관찰되었다.

한편, 사례현장은 연암층과 붕적층으로 이루어져 있으며, 비탈면 안정해석을 위해 선정한 단면의 전체높이는 118m이다(그림 2(b) 참조). 또한 연암층은 중립질~세립질의 사암, 셰일 및 퇴적암의 구조로 이루어져 있으며, 퇴적암의 특성상 층리면과 지층 경계면의 절리가 발달하였다. 그리고 중생대 지각운동으로 인한 심한 습곡과 단층활동으로 인한 지층의 교란과 파쇄가 매우 발달되어 있는

것으로 나타났다(한중근 등, 2009). 붕적층의 경우에는 세립분이 다량 함유되어 있어, 지하수가 지반의 강도에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다.

### 3.2 비탈면파괴 원인 분석

#### 3.2.1 지형 및 지질학적 원인 분석

본 연구대상 지역은 심한 습곡과 단층활동으로 인한 지층의 교란 및 파쇄가 매우 발달되어 있으며, 퇴적암의 특성상 층리면과 지층경계면에 절리가 발달하였고, 이와 직교하여 절리가 형성되어 간극수의 유입 시 급격한 풍화가 진행되는 것으로 판단되었다. 그리고 지층교호로 인한 파쇄대의 발달 및 급속한 풍화가 활동의 원인으로 작용되었을 것으로 추정된다. 또한 지표면의 붕적층 피복으로 인하여 노두의 관찰은 불량하나 파괴 활동면의 사암과 협층인 셰일의 경계부로 단층 경계면이 관찰되었다.

#### 3.2.2 강우에 의한 영향 분석

본 절에서는 연구대상 비탈면이 위치한 인근의 태백시

강우기록 자료를 바탕으로 강우에 의한 비탈면파괴 원인을 분석해 보기 위해 시간강우강도와 일강우강도 및 누적강우량과의 상관관계를 조사하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 파괴발생 전월인 6월의 평균강우량은 과거 5년간의 월평균 강우량에 비하여 약 100% 이상의 많은 강우량을 기록하였고, 파괴발생 당월인 7월의 경우에도 과거 5년간 월평균 강우량에 비하여 약 55%정도가 증가했음을 확인할 수 있었다.

한편, 그림 5는 파괴발생 전월과 당월 사이의 강우발생 이력과 파괴시기를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 파괴 당일까지 약 5주간에 걸쳐 발생한 강우량은 533mm 이었고, 7월 12일부터 7월 13일까지는 지속적인 강우량이 발생하여 7월 13일에 파괴가 발생하였다. 이는 6월 18일~20일까지의 최대일강우량 141mm/day, 최대시간 강우량 33mm/hr에도 안정을 유지하던 비탈면이 그림 6에서 보는 바와 같이 7월부터 10mm/hr 이상의 최대시간 강우량이 세번 이상 반복되는 집중강우로 인해 지반내 응력 증감이 지속적으로 발생되어 지반상태가 안정되지 못한 상태로 전이된 것으로 판단되고, 파괴시기인 7월 12일~13일의 강우량은 112mm, 파괴당일의 강우량과 최대시간 강우량은 각각 56.5mm/day, 14mm/hr로 집중강우가

발생된 상태였다.

따라서 본 현장은 7월에 지속된 집중강우의 반복에 의해 지반은 불안정한 상태를 유지하고 있었고, 파괴 당일 2일 전에는 집중강우에 의한 우수가 봉적토층으로 상당수 유입되어 지하수위 상승이 급격히 지반을 포화상태에 이르게 한 것으로 추정되었다. 즉, 지속적인 강우가 지반 내에 누적되어 지하수위 상승에 의해 증가된 간극수압 및 지반의 봉적층내 포함된 점토성분의 응집에 따른 포화단위 중량 증가를 유발시켰다. 이는 기존에 시공된 역지말뚝이 활동하중을 증가시킴으로서 비탈면의 활동을 유발시킨 것으로 추측된다.

앞서 언급한 내용을 바탕으로 본 연구대상 비탈면에 있어서 최대시간 강우강도와 누적강우량의 상관관계(홍원표 등, 1990)를 분석한 결과, 그림 7에 나타난 바와 같이 7월 12일 강우에 의해서 이미 소규모 활동이 발생할 가능성이 있었음을 확인할 수 있었다. 또한 최대시간 강우강도와 파괴당일 및 전일의 누적강우량의 관계를 바탕으로 중규모 이상의 대규모 파괴규모에 가까운 파괴가 발생할 수 있는 것을 알 수 있다. 그리고 파괴 후에도 지반의 지속적인 침하와 변위가 발생하고 있는 것으로 미루어 더 큰 규모로서

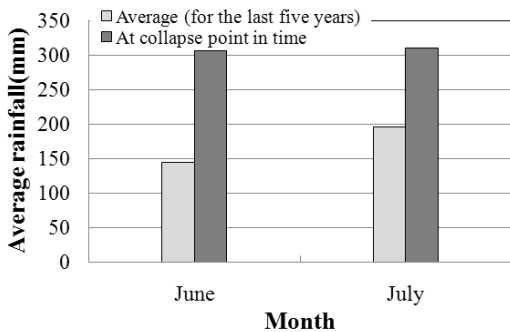


그림 4. 태백지역의 5년간 6~7월 월평균 강우량 및 파괴당시 6~7월 평균강우량

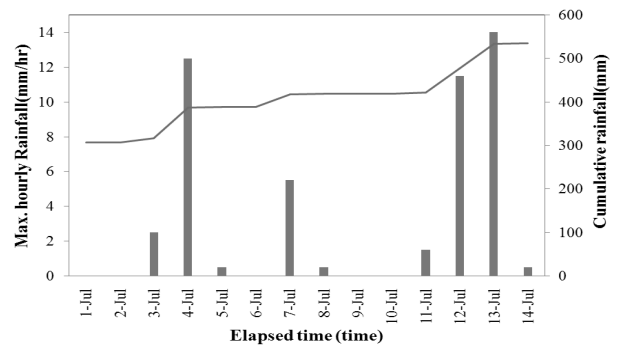


그림 6. 최대시간 강우강도와 누적강우량의 관계

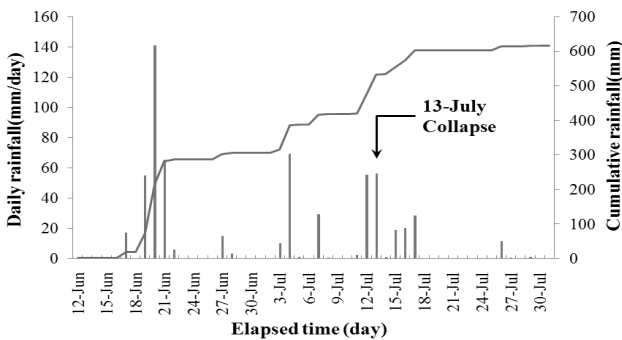


그림 5. 일일강우량과 누적강우량의 관계

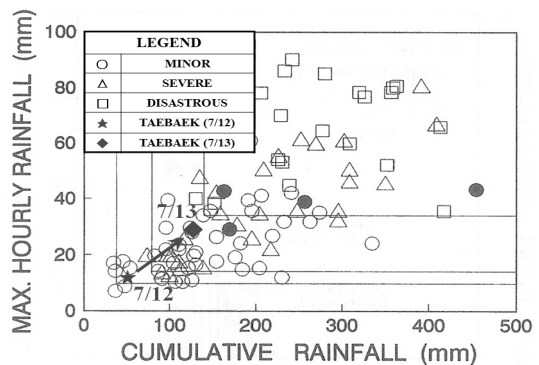


그림 7. 최대시간 강우강도와 2일(당일+전일) 누적강우량과의 관계를 이용한 파괴규모의 선정

의 파괴가 발생 가능할 것으로 판단되어, 이에 대한 장기적인 안정대책이 필요할 것으로 예측되었다.

#### 4. 보강된 비탈면의 안정성 검토

본 연구대상 비탈면은 이미 원지반의 보강을 위해 그림 2(b)와 같이 보강된 상태에서 7월 13일 파괴가 발생되었다. 따라서 본 절에서는 파괴가 발생한 연구대상 비탈면에 대하여 기존의 원지반 및 보강된 비탈면에 대한 각각의 안정성 검토를 수행하였다. 비탈면 안정해석은 Slopile ver.3.0 프로그램을 이용하여 원호활동해석법으로 수행하였으며, 일반적으로 많이 사용되고 신뢰성이 검증된 Bishop법을 적용하였다. 또한 지하수위 조건은 건기시와 우기시로 구분하여 수행하였으며, 수위조건은 현장여건 및 안정측면을 고려하여 집중강우 시 지표 및 지하수위로 부터의 상하 침투조건을 고려하여 지표에 수위가 있는 것으로 가정하여 해석하였다. 이 때 안정성 기준이 되는 소요안전율은 도로설계요령(한국도로공사, 2002)을 참조하여 건기시 1.5, 우기시 1.2를 적용하였다.

한편, 안정해석에 적용된 지반의 강도정수는 실내시험

을 바탕으로 표 1에서 보는 바와 같이 적용하였다.

#### 4.1 원지반 비탈면의 안정성 해석

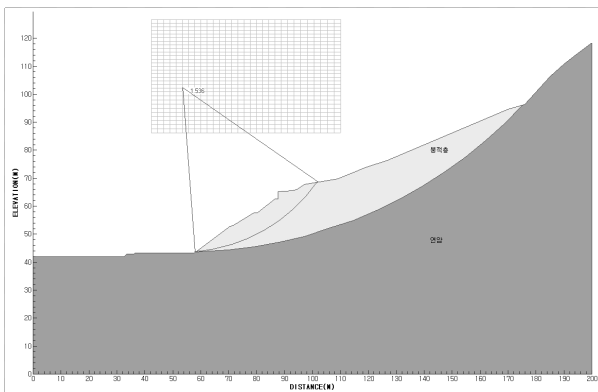
원지반 상태의 비탈면 안정해석 결과, 그림 8 및 표 2에 나타난 바와 같이 건기시는 1.536으로 기준안전율을 만족하는 것으로 나타났으나, 우기시에는 0.884로 기준안전율을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 이는 강우발생 정도에 따라 활동파괴의 가능성을 뜻함과 동시에 보강대책을 적용하여 더 이상의 추가적인 활동을 방지해야 함을 의미한다. 실제로 파괴가 발생한 비탈면은 앞서 언급한 활동방지를 위하여 보강공법이 적용이 되어 있는 상태였으며, 이는 원지반의 비탈면 깎기 중에 인장균열에 의한 지반변형이 발생하여 보강대책안을 적용한 것이다. 따라서 본 해석 결과는 연구대상 비탈면의 보강 전 상태와 동일한 결과임을 확인할 수 있다.

#### 4.2 보강된 비탈면의 안정성 해석

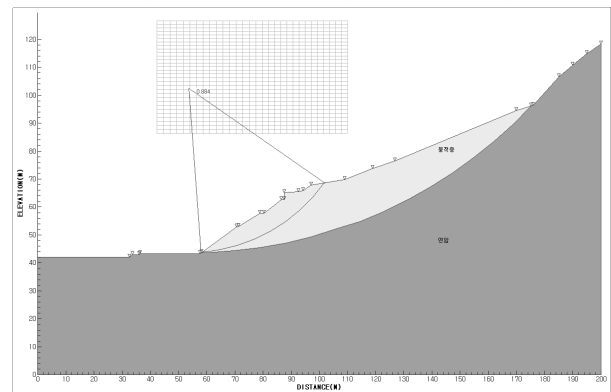
본 연구대상 비탈면은 일부 절리면을 따라 파괴의 흔적이 관찰되었고 부분적으로 파쇄대가 존재하여 장기적인

표 1. 비탈면안정 해석 시 적용된 지반강도정수

구분	단위중량 ( $kN/m^3$ )	점착력 ( $kN/m^2$ )	내부마찰각 ( $^{\circ}$ )
봉적층	19	25	28
연 압	23	130	33



(a) 건기시

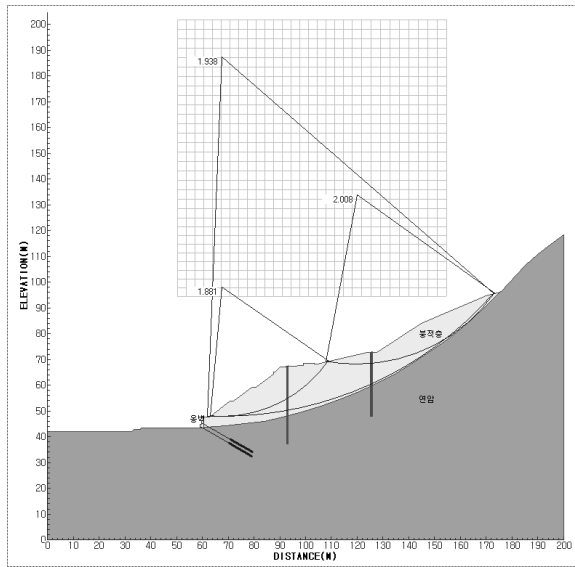


(b) 우기시

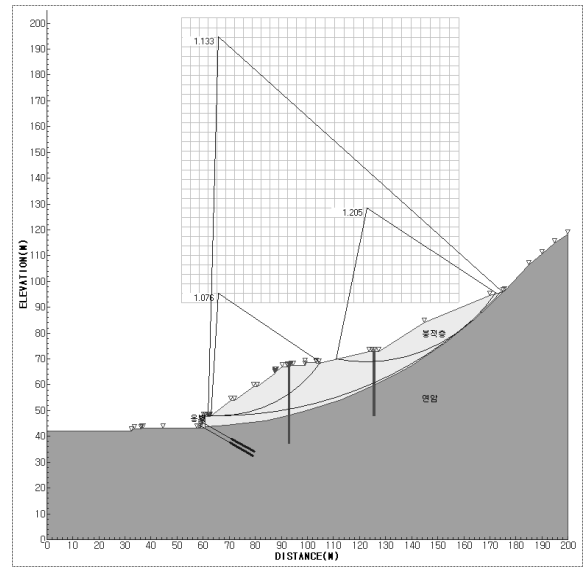
그림 8. 원지반 비탈면 안정해석

표 2. 원지반 비탈면 안정해석 결과

지하수조건	F.S	안정성 판단
건기시	1.536	O.K
우기시	0.884	N.G



(a) 건기시



(b) 우기시

그림 9. 보강된 비탈면의 안정해석

표 3. 보강된 비탈면의 안정해석 결과

지하수 조건	구 분		F.S	안정성 판단	기준 안전율
건기시	전체 활동		1,938	O,K	건기시 : F.S≥1,5
	부분 활동	상부 말뚝 포함한 경우	2,008	O,K	
		하부 말뚝 포함한 경우	1,881	O,K	
우기시	전체 활동		1,133	N,G	우기시 : F.S≥1,2
	부분 활동	상부 말뚝 포함한 경우	1,205	O,K	
		하부 말뚝 포함한 경우	1,076	N,G	

풍화에 따른 안정성이 문제가 되었다. 따라서 원지반의 전반적인 안정성 확보를 위한 대책안이 필요한 것으로 판단되어, 비탈면안정 대책공법으로서 억지말뚝, 앵커 및 옹벽 공법의 복합 시공이 이루어졌다. 따라서 본 절에서는 파괴 발생 시 비탈면에 적용된 보강공법을 동일하게 반영하여 안정해석을 실시하였고, 해석결과를 바탕으로 기 분석한 파괴원인과 함께 고찰하였다.

최초 인장균열이 발생한 원지반 비탈면에 대하여 안정성을 확보하기 위한 보강공법 적용 시의 안정해석 결과, 그림 9 및 표 3에서 보는 바와 같이 건기시에는 기준안전율을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 우기시에 억지말뚝의 변위가 발생하는 경우, 억지말뚝에 대한 지반저항은 거의 무시될 정도이기 때문에 지반반력을 고려할 수 없는 상태가 된다. 따라서 이러한 우기시에는 전체 활동파괴 및 부분 활동파괴의 가능성이 존재하는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구대상 현장에서 발생한 보강된 비탈면의 파괴는 강우에 따른 지하수위 상승이 가장 큰 영향을 미친 것으로 추정된 파괴원인 분석결과와 일치하는 것으로 해

석될 수 있다. 즉, 보강된 비탈면의 안정성 확보를 위하여 강우에 의한 지하수위 상승을 억제시킬 수 있는 대책공법이 반드시 필요한 것으로 판단된다.

## 5. 대책공법이 적용된 비탈면의 안정성 검토

보강공법이 적용된 비탈면의 파괴원인은 지질특성 뿐만 아니라 지중에 설치된 기존 수평배수관의 효율이 낮아져 강우에 따른 우수침투가 지하수위 상승을 유발시킨 것이 가장 큰 원인으로 작용한 것으로 확인되었다. 또한 이미 발생된 파괴 때문에 억지말뚝에 대한 지반반력을 기대할 수 없는 것도 한 원인으로 확인되었다. 따라서 파괴가 발생한 비탈면에 대하여 지하수위를 저하시키기 위한 추가적인 보강대책이 필요한 것으로 분석되었다.

### 5.1 비탈면안정을 위한 지하수위 저하공법

연구대상 비탈면에서 수행한 지하수위 계측결과를 이

용하여 지하수위 관리대책을 분석한 결과, 최저 지하수위는 건기시에 지표로부터 18.05m로 확인되었으며, 최고 지하수위는 우기시에 지표로부터 7m에 위치하는 것으로 나타났다. 따라서 지하수위는 건기시와 우기시에 약 11m 정도의 변화를 나타내는 것으로 확인되었다. 즉, 강우에 의한 지하수위 영향이 크게 작용할 것이 예측되며, 건기시의 비탈면 안정성은 문제가 없었기 때문에 우기시에 건기시와 동일한 지하수위를 유지하게 되면 비탈면의 활동은 더 이상 발생하지 않을 것으로 판단된다. 이를 위하여 지하수위 저하공법으로서 효율성의 문제가 있는 일반적인 수평배수관만의 추가 시공은 배제하고, 지하수를 집수하여 도로면으로 자연유수가 이루어질 수 있도록, 그림 10에서 보는 바와 같이 비탈면 중간부에 집수정을 설치하였다. 또한 집수를 위한 집수관은 수평착정기를 이용하여 방사형으로 배치시키는 방식을 적용하였다.

## 5.2 강우침투 및 지하수위 저하를 고려한 비탈면 안정

본 절에서는 지하수위 저하를 위하여 적용된 집수정의

강우 전·후의 지하수위 변화양상에 대하여 침투해석을 통한 비탈면의 안정성 및 공법의 적용성을 분석하였다. 표 4에서 보는 바와 같이 집중강우가 시작된 파괴 10일 전부터 파괴 당일의 강우강도에 의한 지반침투해석을 수행하였다. 강우강도는 일일강우량(mm/day)을 각 강우발생일의 평균 최대시간 강우강도(mm/hr)로 환산하여 적용하였다. 그리고 지반강도정수는 비탈면 안정해석에 적용된 값과 동일하며, 붕적층의 투수계수는  $4.3 \times 10^{-6} m/sec$ 로 적용하였다. 그림 11에서 보는 바와 같이 집수정과 수평배수관을 추가적으로 모델링하였다. 침투해석은 범용프로그램인 SEEP/W를 이용하였으며, 해석 시 사용된 강우강도는 태백지역의 강우조사 결과를 바탕으로 하였다. 그리고 초기 지하수위 조건은 계측결과를 바탕으로 건기시를 적용하였다.

집중강우 시작 후 비탈면파괴 시까지의 누적강우량은 226.5mm로서 그림 12(a)에서 보는 바와 같이 강우기간 동안 지하수위 저하공법 적용 전에는 지하수위가 붕적층 지반의 최대 깊이(약 22m)에서 약 50%까지 상승·유지하

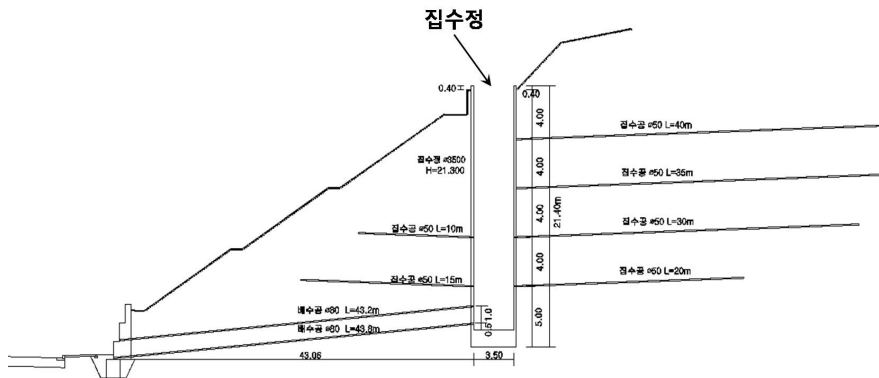


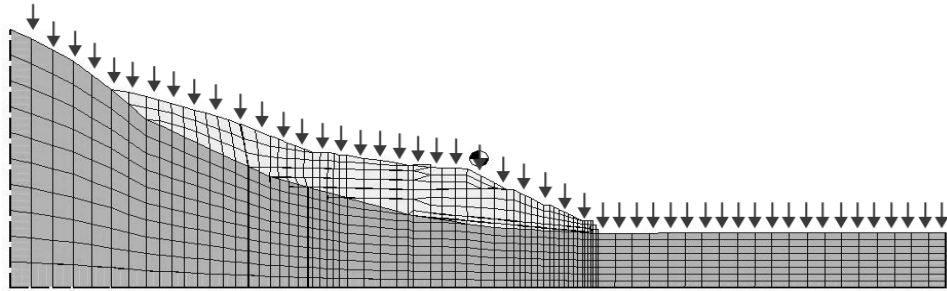
그림 10. 집수정을 이용한 지하수위 저하공법 시공 단면도

표 4. 일일강우량의 평균 최대시간 강우강도 적용치

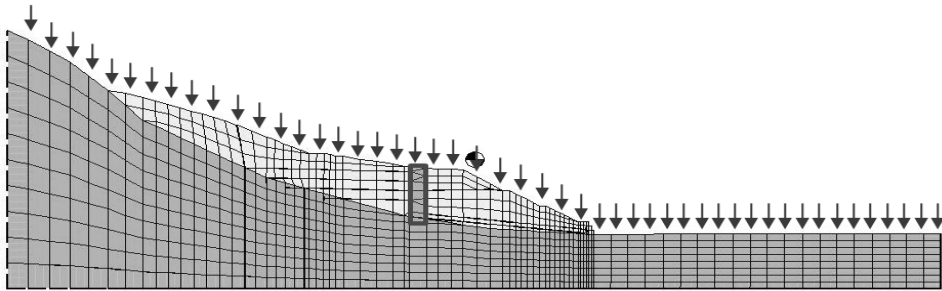
일시	1일강우량 (mm/day)	초당강우량 (m/sec)	침투해석 시 지하수위 상승 단계
파괴발생 10일 전	10.5	1.21e-07	1
파괴발생 9일 전	69.5	8.04e-07	2
파괴발생 8일 전	1.5	1.70e-08	3
파괴발생 7일 전	0	0.00e+00	4
파괴발생 6일 전	29.5	3.41e-07	5
파괴발생 5일 전	1	1.10e-08	6
파괴발생 4일 전	0	0.00e+00	7
파괴발생 3일 전	0	0.00e+00	8
파괴발생 2일 전	2.5	2.80e-08	9
파괴발생 1일 전	55.5	6.42e-07	10
비탈면파괴 발생	56.5	6.53e-07	11

는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구대상 현장의 지하수위 변동은 강우에 민감하게 반응하는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과로 미루어 볼 때, 비탈면파괴는 지반 내 침투된 강우가 붕적층에서 지속적으로 정체함으로써 지하수위가 상승하고, 장시간 포화되어 있어 지반의 간극수압의 증가가 원인이 된 것으로 판단되며, 이는 앞서 고찰된 파괴원인 분석결과와 일치하였다. 그러나 그림 12(b)에 나타

낸 바와 같이 동일한 조건 하에서 지하수위 저하공법을 적용한 후의 지하수위 변동을 살펴보면, 지하수위가 거의 건기시 초기 수위, 즉 지하수위가 집수정 하단부까지 저하되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 집수정 및 배수공 설치 이후 지하수위 저하에 의한 비탈면안정 효과가 나타난 것으로 분석되었다.

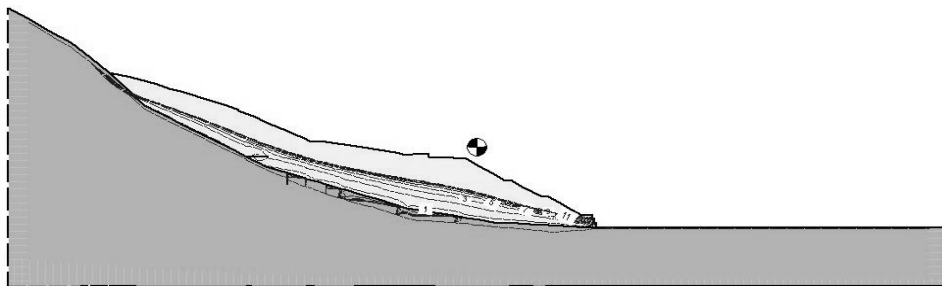


(a) 지하수위 저하공법 적용 전

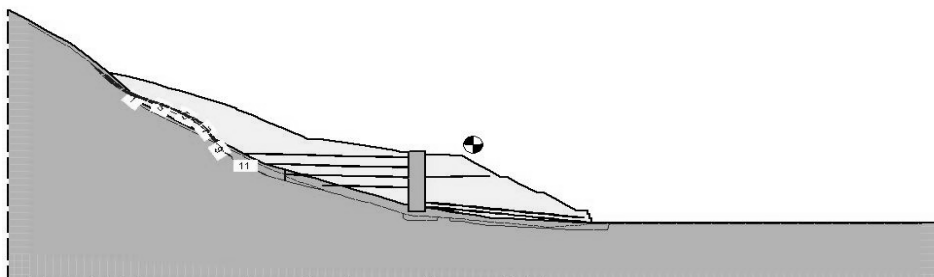


(b) 지하수위 저하공법 적용 후

그림 11. 지반침투해석을 위한 지반의 모델링



(a) 지하수위 저하공법 적용 전



(b) 지하수위 저하공법 적용 후

그림 12. 파괴발생 10일 전 ~ 파괴발생 당일의 지반침투해석 결과

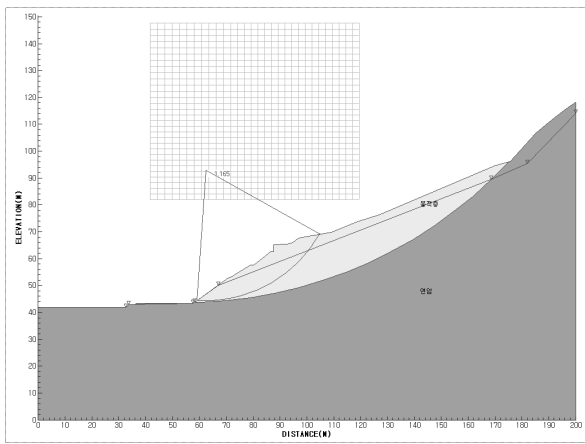


### 5.3 지하수위 저하공법 적용에 따른 비탈면 안정해석

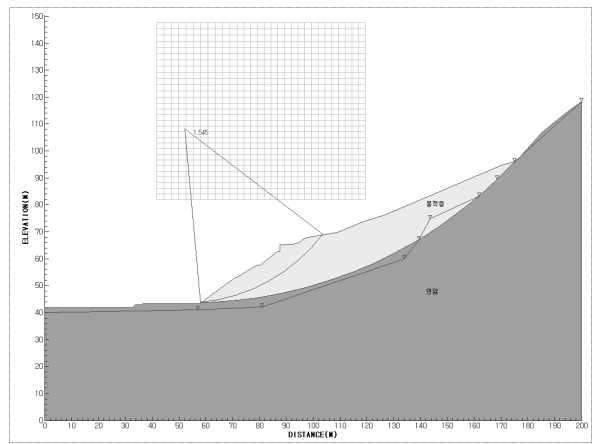
본 연구대상 현장과 같이 집중강우 시 지하수위가 급상승하는 지역에 대해서는 기존의 수평배수공법을 획일적으로 적용할 경우, 비탈면보강을 위하여 설치되었던 보강공법(역지말뚝, 앵커 등)의 효과가 떨어질 수 있다. 따라서 평상시에는 물론 갑작스러운 폭우 및 집중강우에도 지하수위 변화량을 일정하게 유지 할 수 있는 공법으로 집수정을 이용한 지하수위 저하공법을 적용하였으며, 지반침투 해석을 통한 비탈면의 안정성을 판단하였다. 본 절에서는 집수정 설치여부에 따른 침투해석결과를 통하여 지하수위의 상승 및 저감효과를 고려한 비탈면 안정해석을 수행하였다. 이 때 해석조건은 앞서 실시한 원지반 및 보강공법

적용 후의 안정해석 조건과 동일하게 하였으며, 우기시의 지하수위만을 고려하였다.

그림 13 및 그림 14에서 보는 바와 같이 최초 비탈면각기 시 활동이 발생한 원지반 및 보강공법이 적용된 비탈면에 대하여 집수정 설치에 따른 안정해석을 수행하였으며, 결과는 표 5에 나타난 바와 같다. 집수정 설치 전의 원지반 안정해석 결과는 기준안전율을 만족하지 못하는 것으로 나타났지만, 집수정 설치 시에는 원지반 및 보강공법이 적용된 비탈면의 안정성이 기준안전율을 만족하는 것으로 확인되었다. 이는 집수정이 지반 내 우수침투에 의한 지하수 상승을 억제함으로써 비탈면의 안정성 확보에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 판단된다. 즉, 지표 및 지반내 지하수위 배제를 위한 공법이 선행된 경우에는 현재보다

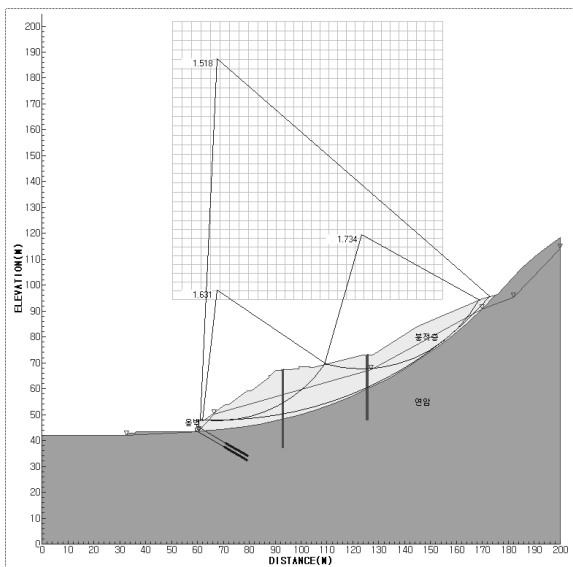


(a) 집수정 설치 전

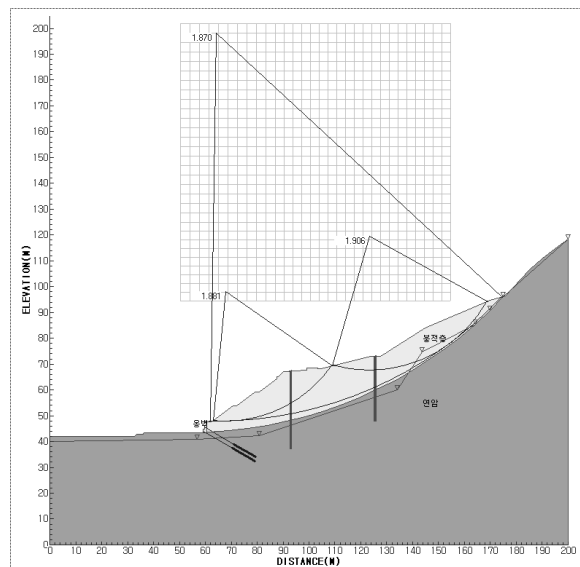


(b) 집수정 설치 후

그림 13. 집수정 설치여부에 따른 원지반의 비탈면안정 해석



(a) 집수정 설치 전



(b) 집수정 설치 후

그림 14. 집수정 설치여부에 따른 보강공법 적용 시 비탈면안정 해석

표 5. 원지반 및 보강공법 적용 시 집수정 여부에 따른 지하수위 상승저감효과를 고려한 비탈면안정 해석 결과

지하수조건	구 분	집수정 설치 여부	F.S	안정성 판단	기준 안전율
우기시	원지반	미설치	1,165	N.G	우기시 : F.S≥1.2
		설 치	1,545	O.K	
	보강공법 설치 시	미설치	1,518	O.K	
		설 치	1,870	O.K	

매우 경제적인 안정화 공법의 시공이 이루어 졌을 것으로 판단된다. 따라서 집수정을 이용한 지하수위 저하공법은 설계·시공사례가 많지 않지만, 강우에 의한 지하수위 변화가 큰 비탈면에 지하수 조절공법으로의 현장 적용성을 확인할 수 있었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 도로확장을 위하여 비탈면 깎기 후 불안정해진 지반의 안정화를 위하여 대책공법을 적용하였음에도 불구하고, 파괴가 발생한 사례현장을 대상으로 파괴원인을 규명하였다. 또한 파괴원인 분석결과 및 원지반과 보강된 비탈면의 안정해석 결과를 바탕으로 강우 시에도 지하수위를 억제시킬 수 있는 지하수위 저하공법을 연구대상 현장에 적용한 후, 강우침투를 고려한 비탈면안정성 검토를 수행하였고, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

연구대상 현장은 심한 습곡과 단층활동으로 인하여 지층의 교란 및 파쇄와 절리가 매우 발달되어 있어 간극수의 유입시 급격한 풍화가 진행될 수 있음을 확인하였다. 따라서 주위 지형·지질학적 환경요소와 집중강우시 지하수의 상승 등이 지반활동의 주요 원인으로 판단되었다. 즉, 강우에 의한 영향을 고려하여 우수의 지중침투에 따른 지하수위 상승을 억제함으로써 비탈면안정이 유지될 수 있음을 확인하였다. 이를 바탕으로 집수정을 이용한 지하수위 저하공법을 사례현장에 적용하여 침투해석 및 비탈면 안정해석을 수행한 결과, 집수정이 지반내 우수침투에 의한 지하수 상승을 억제하여 안정성 확보에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구를 통하여 적용된 집수정을 이용한 지하수위 저하공법은 설계·시공사례가 많지 않지만, 지반조건을 고려하여 지표 및 지반내 지하수위 배제를 위한 공법으로서 기존의 배수공을 이용한 공법과 병행하여 적용할 경우, 현재보다 안정화된 공법으로서의 적용이 가능할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 강기천, 안남규, 오재일, 김태형 (2005), “석탄광산에서 발생된 대규모 폐광석 더미에 대한 안정성 검토”, *대한지질공학회지-지질공학*, 제15권, 제2호, pp.133-144.
2. 김민석, 사공명, 김수삼 (2007), “다중 파괴면을 이용한 강우시 사면의 안정성 해석”, *한국지반환경공학회논문집*, 제8권, 제2호, pp.11-18.
3. 박덕근 (2003), “사면붕괴의 유형별 원인과 저감대책 연구”, *방재연구*, 제5권, 1호, pp.115-118.
4. 박덕근, 오정립, 김태훈, 박정훈 (2006), “우리나라 사면재해 피해현황과 대책”, *한국지반공학회논문집*, 제22권, 제6호, pp.6-18.
5. 송영석 (2003), *활동역지시스템으로 보강된 사면의 설계법*, 박사학위논문, 중앙대학교.
6. 신민호, 박영곤, 김현기 (2000), “강우시 철도 성토사면의 안정성 평가에 관한 연구”, *한국철도학회논문집*, 제3권, 제4호, pp.203-212.
7. 정상섭, 최재영, 이재환 (2009), “지속강우특성에 따른 불포화 풍화토사면의 안정성분석”, *대한토목학회논문집*, 제29권, 제1C호, pp.1-9.
8. 한국도로공사 (2002), *도로설계요령*, pp.129-130.
9. 한중근 (1997), *역지말뚝을 이용한 사면의 안전해석 및 설계*, 박사학위논문, 중앙대학교.
10. 한중근, 신주옥, 홍기권, 정순국, 이양규, 김병수 (2009), “사면안정성 확보를 위한 지하수위 저하공법 적용사례 연구”, *한국토목섬유학회 논문집*, 제8권, 제1호, pp.61-66.
11. 홍원표 (1999), “말뚝이 설치된 사면의 안정해석 프로그램”, *한국지반공학회 사면안정위원회 학술발표회 논문집*, pp.33-66.
12. 홍원표, 김상규, 김마리아, 김윤원, 한중근 (1990), “강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측”, *대한토질공학회지*, 제6권, 제2호, pp.55-63.
13. Brand, E. W., Premchitt, H. B. and Phillipson, H. B. (1984), “Relationship between Rainfall and Landslides in Hong Kong”, *Proc. Of 4<sup>th</sup> Inter. SYMPOS. Landslides*, Toronto, pp.377-384.

(논문접수일 2011. 1. 19, 심사완료일 2011. 3. 19)