

사면안정성 확보를 위한 지하수위 저하공법 적용사례 연구

A Case Study on Application of Dewatering Method for Slope Stability

한 중근 ¹	Han, Jung-Geun	신 주옥 ²	Shin, Ju-Oek
홍기권 ^{3*}	Hong, Ki-Kwon	정순국 ⁴	Jung, Sun-Kuk
이양규 ⁵	Lee, Yang-Kyu	김병수 ⁶	Kim, Byung-Soo

ABSTRACT

This paper presented that the causes on failure of reinforced slope are analyzed which based on the analyzed result. It had been applied that a method of lowering the groundwater using deepwell for sump. For the stability analysis on applied method, a series of numerical analysis were carried out. Therefore, it could be confirmed that slope stability was affected the dewatering ability of groundwater by the rainfall and this method which was confirmed very reasonable and suitable methods for slope stability, during heavy rainfall, in field.

요 지

본 연구에서는 파괴가 발생한 보강사면의 파괴원인을 분석한 결과, 지하수위 관리대책으로 사례현장에 집수정을 이용한 지하수위 저감공법을 적용하였으며, 적용된 공법이 사면안정성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 사면안정해석을 수행하였다. 그 결과, 적용된 공법의 우수처리능력에 의해 사면안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 따라서 본 연구에서 적용된 집수정을 이용한 지하수위 저하공법은 집중강우 시에도 지하수의 상승을 억제함으로써 사면의 안전율을 높여주는 것을 확인할 수 있었다.

Keywords : Slope stability, Underground water level, Dewatering method, Seepage

1. 서 론

최근 급속한 산업화로 인해 각종 교통시설, 수리시설 등의 토목 구조물 및 아파트, 주택과 같은 건축 구조물의 시공이 산지에서도 많이 이루어지고 있다. 이에 따라 안정한 상태의 자연사면은 구조물의 시공으로 인해 불안정한 상태가 되면서 사면보강이 이루어짐에도 불구하고 종종 보강된 지반의 변형이 발생하는 경우가 있다.

한편, 우리나라의 연평균 강우량은 대부분이 6월~9월 사이에 편중되어 있고 이 시기에 집중호우로 인한 사면파괴나 산사태의 발생이 빈번한 것으로 나타났으며, 주원인은 강우인 것으로 확인된 바 있다(홍원표 등, 1990; 강기천 등, 2005). 이와 같이 강우 및 외력 등에 기인한 불안정한 사면의 안정성을 확보하기 위한 대책공법으로 기존에는 사면에 식생공법 등을 적용하여 강우에 의한 표층을 보호하는 소규모의 공법이나, 사면의 구배를 완만하게 하는 단

- 1 정회원, 중앙대학교 공학대학 건설환경공학과 부교수 (Member, Associate Professor, Dept. of Civil & Environmental Engr., Chung-Ang University)
- 2 학생회원, 중앙대학교 일반대학원 건설환경공학과 석사과정 (Student Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engr., Chung-Ang University)
- 3 학생회원, 중앙대학교 일반대학원 건설환경공학과 박사과정 (Student Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engr., Chung-Ang University, E-mail: kkhong@wm.cau.ac.kr)
- 4 비회원, 주식회사 강산 회장 (Non-Member, President, Kang-San Co., LTD.)
- 5 비회원, 대림대학 공학계열 토목환경과 정교수 (Non-Member, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engr., Dae-Lim College)
- 6 비회원, 경북대학교 이공대학 토목공학과 조교수 (Non-Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engr., Kyungpook National University)

순한 공법이 많이 사용되었다. 그러나 이와 같은 기존 공법으로는 사면의 안정성 확보에 한계가 있으므로 최근에는 억지말뚝, 앵커, 쓰일네일링 및 옹벽 등으로 사면의 저항력을 증대시키는 공법들이 많이 적용되고 있으며, 이에 대한 설계법 및 해석법 등이 제안되기도 하였다(송영석, 2003; 한중근, 1997; 홍원표, 1999). 그러나 사면의 안정성 확보를 위한 다양한 공법들이 적용되고 있음에도 불구하고 사면파괴가 빈번히 발생하고 있다. 특히, 토사층의 깊이가 깊을 경우에는 지하수위 저하를 위한 배수관공을 이용한 시공법이 적용되고 있으나, 배수관의 길이가 길어지면 성능상의 문제가 발생하게 되어 충분한 효과를 얻을 수 없는 것이 현실이다.

따라서, 본 연구에서는 강우에 의한 지하수 효과를 검토하기 위해 지하수위 저하공법이 적용된 현장에 대하여 사면안정 해석을 수행하여 지하수위 저하공법이 사면 안정성에 미치는 영향을 분석하고자 하였다. 본 연구현장은 사면안정을 위해 억지말뚝 및 앵커공법이 적용되었으나, 강우에 의해 지속적으로 지반변형과 사면붕괴가 발생한 현장으로 사면안정을 위한 가장 적합한 방법으로 지하수위 저하공법이 채택되어 시공된 곳을 대상으로 하였다.

2. 기존 지하수위 저하 공법

절·성토사면의 안정성 확보를 위해 적용되는 배수공법은 지표수 및 지하수 배수공법으로 나뉘며, 지하수위 저하를 목적으로 하는 지하수 배수공법은 표 1에 나타난 바와 같다.

지하수 배수공법 중 사면 내 지하수위 저하를 위해 가장 많이 적용되는 수평배수공법에는 주로 PVC 원형배수공과 다발관이 사용되고 있다. 원형배수공은 PVC 원형공간

표 1. 지하수 배수공법

구분	특징	
지하수 배수공법	수평배수공	· 지하수 용수가 빈번한 장소에서 강제적으로 흡수기 비탈면 내부에 유로를 형성함으로써 상시 지하수위의 증가를 억제시킬 필요가 있을 때 설치 · 수평배수공의 길이는 2m 이상이 바람직 · 규모가 큰 지반활동지대에서는 배수 터널이나 여러 본의 보정공을 조합하여 처리
	지하배수구	· 비탈면으로의 지하수, 침투수를 배제
	돌망태공	· 지하배수구와 병용하여 비탈끝을 보강
	수직배수공	· 비탈면내의 침투수를 집수정에서 배제
	수평배수층	· 흩날기내 또는 자연지반으로부터 흩날기로의 침투수를 배제

이 있어 천공심도 확인이 용이하고, 강우 시 지하수만 배수하여 배수기능이 양호(180° 유공관 기능)한 편이다. 또한 PVC관을 사면에 삽입할 경우 천공 깊이까지 삽입가능하고, 깊이 확인이 용이하며 반영구적으로 사용 할 수 있다. 시공 후 배수관 내부 청소도 가능하여 유지관리가 용이하며 자재관리 및 시공이 용이한 편이다. 그러나 이러한 공법의 장점은 일부 현장에서의 사례에 의한 것이며 타당성 있는 설계에 의한 시공이 아닌 단순 부대시설로서 경험자에 의한 임의적 설계, 시공이다. 따라서 일부 현장의 경험을 토대로 신뢰성을 확보하는 것이 문제시 되고 있다.

한편, S다발관을 이용한 수평배수공은 다발관 묶음으로 원형내부가 차서 천공심도 확인이 불가하고 다발관 외측으로 둘러쳐진 부직포에 양금이 축적 예상되어 시공 후 토사 퇴적으로 기능의 급격한 저하가 우려되며, 유지관리에 어려움(360° 유공관 기능)이 있는 것으로 나타나고 있다. 또한 다발관을 사면에 삽입할 경우 다발관 외측으로 둘러쳐진 부직포가 천공내부 돌기부 등에 걸려서 천공심도까지 들어가지 못하는 사례가 발생하여 배수기능의 불량사례가 종종 발생하고 있다. 배수기능 회복을 위해서는 재시공이 불가피하며, 소규모 자재묶음으로 자재관리 및 연결시 문제가 발생하고 있다.

3. 사례 현장

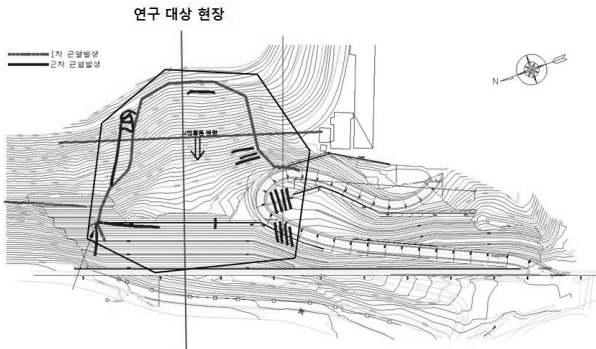
3.1 현장개요 및 붕괴현황

본 연구대상 현장은 도로 확장공사 구간으로서, 사면 절취 중 인장균열 및 지반의 변형이 우려되어 억지말뚝공과 앵커공을 병행 시공함으로써 사면의 안정을 유도하였다. 그러나 사면보강 완료 단계에서 강우기간 동안에 그림 1 및 그림 2에서 보는 바와 같이 사면에 인장균열이 진행되어 활동면 외각으로 파괴가 발생하였다.

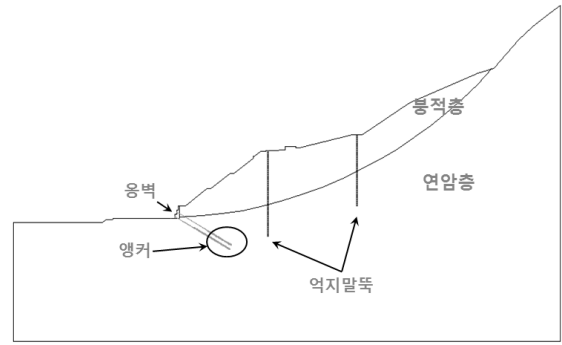
한편, 연구대상 지역의 지층은 퇴적암 지대로 사암, 셰일 및 석탄층으로 이루어져 있어 층리면과 지층 경계면의 절리가 발달하였다. 또한 중생대 지각운동으로 인한 심한 습곡과 단층 활동으로 인한 지층의 교란과 파쇄가 매우 발달되어 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 사면 붕괴 원인 분석

연구대상 현장의 사면붕괴 원인을 분석한 결과, 크게 두



(a) 사면의 활동 파괴 현황



(b) 단면도

그림 1. 연구대상 현장 개요



(a) 인장 균열 및 침하



(b) 사면 붕괴 현장 전경

그림 2. 보강사면의 파괴 발생 현황

가지로 요약할 수 있다.

먼저, 지형 및 지질학적 원인으로서 본 현장은 3.1절에서 언급한 바와 같이 심한 습곡과 단층활동으로 인한 지층의 교란 및 파쇄가 매우 발달되어 있을 뿐만 아니라 지층 경계면에 절리가 발달되어 있음을 확인하였다. 이와 같은 불안정한 사면의 절개로 인하여 사면활동이 촉진되었을 것으로 판단되며, 이는 사면보강 후에도 지속적인 영향을 미친 것으로 확인되었다.

그리고 강우에 의한 원인으로서, 본 현장은 사면붕괴가 발생하기 전 약 1달 동안의 누적 강우량이 533mm를 기록하였다. 이와 같이 지속적인 강우로 인하여 불안정한 상태의 사면이 붕괴가 발생한 것으로서, 강우기간 동안 우수가 붕적토층으로 상당수 유입되어 지하수위 상승에 의한 간극수압의 증가와 지반의 전단강도 감소로 인하여 사면붕괴를 가속화 시킨 것으로 분석되었다.

4. 보강사면의 안정해석

본 연구대상 사면은 그림 1과 같이 역지말뚝, 앵커 및 옹벽에 의해 사면이 보강되어 있음에도 불구하고 집중호우

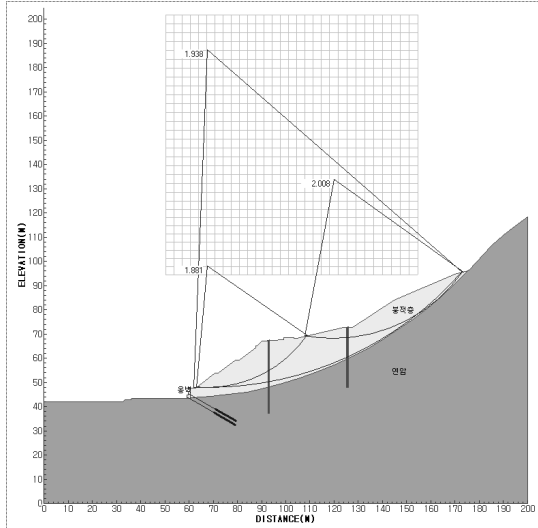
표 2. 사면 안정해석 시 적용된 지반강도정수

구 분	단위중량 (tf/m^3)	점착력 (tf/m^2)	내부마찰각 ($^{\circ}$)
붕적층	1.9	2.5	28
연 암	2.3	13	33

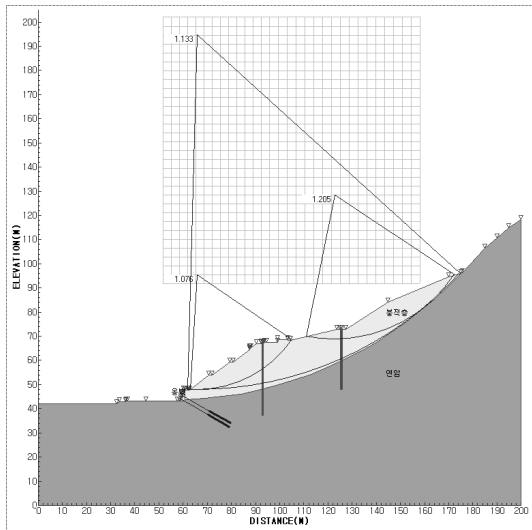
기간에 사면붕괴가 발생하였다. 따라서 본 절에서는 파괴 발생 시 사면에 적용된 보강공법을 동일하게 반영하여 기존 보강사면의 안정해석을 수행하였으며, 그 결과를 토대로 사면파괴 원인도 고찰하였다. 사면안정해석 시 적용된 지반의 강도정수는 실내실험결과를 바탕으로 표 2에서 보는 바와 같이 적용하였으며, 사면의 역지말뚝의 효과를 고려할 수 있는 Slopile ver3.0 프로그램을 사용하였다. 아래 강우 조건은 가장 위험한 상태를 고려하여 지표까지 포화된 것으로 고려하였고 해석 결과는 그림 3에서 보는 바와 같다.

보강사면의 안정해석 결과, 표 3에서 보는 바와 같이 건기시에는 기준안전율을 만족하는 것으로 나타났다. 그러나 우기시에는 전체 활동파괴 및 부분 활동파괴의 가능성이 존재하는 것으로 확인되었다. 즉, 본 연구대상 현장에서 발생한 사면파괴는 3.2절에서 언급한 바와 같이 본 현장의 경우는 강우에 따른 지하수위 상승이 가장 큰 영향을

미친 것으로 판단되며 사면붕괴원인의 주위 지반환경조사 결과와 일치하는 것을 알 수 있다. 따라서 본 현장은 보강 사면의 안정성 확보를 위하여 다른 일반적인 사면안정 대책공법들보다도 강우에 의한 지하수위 상승을 억제시킬 수 있는 대책공법이 적절할 것으로 판단되었다.



(a) 건기시



(b) 우기시

그림 3. 보강사면의 안정해석 결과

표 3. 보강사면의 안정해석 결과

지하수 조건	F.S		안정 여부	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	

5. 지하수위 저하공법의 적용

5.1 집수정을 이용한 지하수위 저하공법

연구대상 사면의 지하수위 계측결과를 이용하여 지하수위 관리대책을 분석한 결과, 표 4에서 보는 바와 같이 최저 지하수위는 건기시에 지표로부터 18.05m로 나타났으며, 최고지하수위는 우기시에 지표로부터 7m로 확인되었다. 즉, 건기시와 우기시의 지하수위 변화는 최대 약 11m의 차이를 보였다.

따라서, 사면에서 지하수위 영향이 크게 작용할 것이 예상되며, 보강사면의 안정성은 건기시에는 문제가 없었기 때문에 우기시에 건기시와 유사한 지하수위를 유지하게 되면 사면의 활동은 발생하지 않을 것으로 판단되었다. 이를 위해 연구대상 사면의 중간부에 그림 4와 같이 집수정을 설치하고 집수정 주위에 방사형태로 배수공을 설치하여 유입되는 배수거리를 줄임으로서 집중강우 시에도 지하수위 상승을 억제할 수 있도록 하는 지하수위 저하공법을 적용하였다. 적용된 공법은 우기시 지하수 함양량을 전량처리할 수 있도록 설계하여 앞서 언급한 지하수위 관리대책 분석결과와 같이 지하수위를 건기시, 즉 지표로부터 약 18m로 유지할 수 있도록 적용하였다. 집수정을 이용한 지하수위 저하공법의 시공 모습은 그림 5에서 보는 바와 같다.

5.2 지하수위 저하공법을 고려한 보강사면의 안정성 검토

본 절에서는 집수정을 이용한 지하수위 저하공법이 적용된 연구대상 사면에 대하여 지하수위의 저감효과가 고려된 사면안정 해석을 수행하였다. 지하수위 조건은 집수

표 4. 붕괴사면의 지하수위 계측 현황

계측일	계측결과(m)	비 고
파괴발생 111일 전	10.62	건기시
파괴발생 104일 전	10.73	건기시
파괴발생 33일 전	18.05	건기시
파괴발생 19일 전	17.15	건기시
파괴발생 4일 전	10.52	우기시
파괴발생 9일 후	9.88	우기시
파괴발생 24일 후	7.0	우기시
파괴발생 38일 후	7.35	우기시
파괴발생 51일 후	9.79	우기시
파괴발생 65일 후	9.62	건기시
파괴발생 86일 후	9.82	건기시

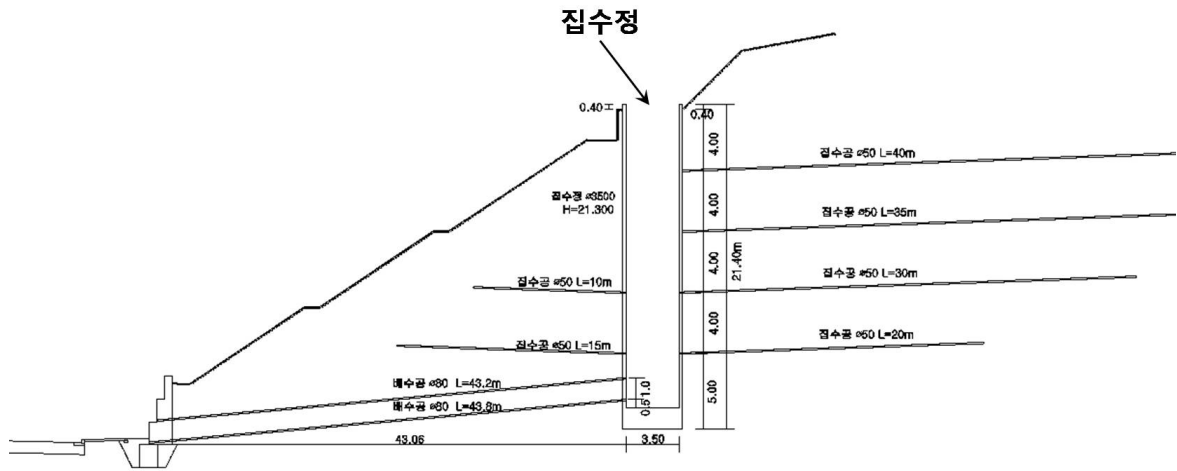


그림 4. 집수정 단면도

정의 우수처리능력을 반영하여 붕적층 지반의 최대깊이에서 지표로부터 약 18m를 고려하였으며, 지반조건은 보강사면 안정해석 조건과 동일하게 적용하였다.

집수정을 이용한 지하수의 지하공법의 우수처리능력을 고려한 보강사면의 안정해석 결과, 표 6에서 보는 바와 같

이 전체 및 부분 활동에 대한 안정성은 모두 기준 안전율을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 집수정 설치 전 우기시의 보강사면 안정해석결과가 기준 안전율을 만족하지 못한 것으로 미루어 볼 때, 이는 집수정이 지반내 침투하는 우수의 처리능력에 의해 사면의 안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 또한 지하수위 지하공법의 설계·시공사례가 많지 않지만, 집중강우에 따른 지하수위 변화가 큰 사면지반에 집수정에 의한 지하수의 조절공법으로



(a) 시공중



(b) 시공완료

그림 5. 지하수위 지하공법 시공 전경

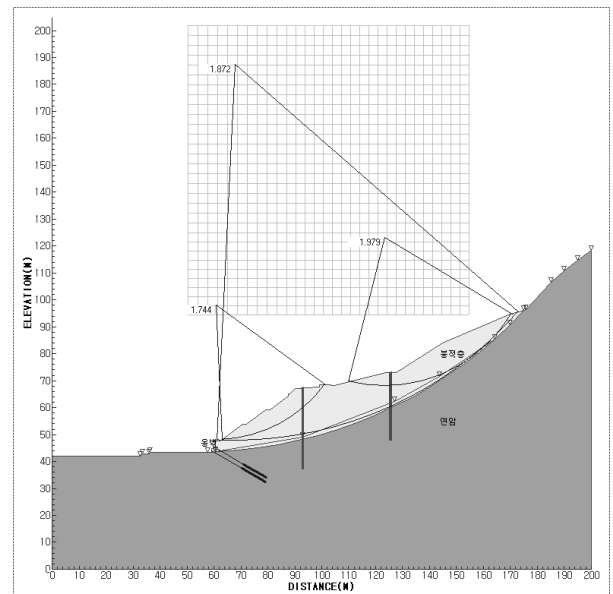


그림 6. 집수정 설치에 따른 보강 사면안정 해석

표 6. 지하수위 지하공법을 고려한 사면안정 해석 결과

지하수 조건	F.S		안전 여부	기준 안전율	
	전체 활동	부분 활동			
우기시	상부 말뚝 포함한 경우		1,872	O.K	우기시 F.S≥1.2
	하부 말뚝 포함한 경우		1,979	O.K	
	상부 말뚝 포함한 경우		1,744	O.K	

서의 현장 적용성을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 강우에 의해 붕괴가 발생한 보강사면의 대책공법으로서 지하수위 저하공법을 적용한 사례현장에 대하여 사면안정 해석을 수행하였다. 또한 결과 분석을 통하여 지하수위 저하공법이 사면안정에 미치는 영향을 고찰하였다.

연구대상 사면의 붕괴는 강우기간 동안 우수가 붕적토층으로 상당수 유입되어 지하수위가 상승함으로서 간극수압의 증가와 지반의 전단강도 감소가 주원인으로 분석되었으며, 이는 붕괴된 사면과 동일한 조건을 적용한 우기시의 사면안정해석 결과와 일치하는 것을 알 수 있었다. 그리고 보강사면의 안정성은 건기시에는 문제가 없는 것으로 확인되었기 때문에 우기시에 건기시와 유사한 지하수위를 유지하게 되면 사면의 활동은 발생하지 않을 것으로 판단되어, 이에 대한 지하수위 관리대책으로서 집수정을 이용한 지하수위 저하공법을 적용하였다. 적용된 공법의

우수처리능력을 고려한 사면안정해석 결과, 우기시 기준 안전율을 만족하지 못한 붕괴시 보강사면에 비해 매우 큰 안정성을 확보하는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 적용된 집수정을 이용한 지하수위 저하공법은 집중강우 시에도 지하수의 상승을 억제함으로써 사면의 안정성 확보에 매우 긍정적인 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 강기천, 안남규, 오재일, 김태형 (2005), “석탄광산에서 발생된 대규모 폐광석 더미에 대한 안정성 검토”, *대한지질공학회*, 제15권, 제2호, pp.133-144.
2. 송영석 (2003), *활동역지시스템으로 보강된 사면의 설계법*, 박사학위논문, 중앙대학교 대학원.
3. 한중근 (1997), *역지말뚝을 이용한 사면의 안전해석 및 설계*, 박사학위논문, 중앙대학교 대학원.
4. 홍원표, 김상규, 김마리아, 김윤원, 한중근 (1990), “강우로 기인되는 우리나라 사면활동의 예측”, *대한토질공학회지*, 제6권 제2호, pp.55-63.
5. 홍원표 (1999), “말뚝이 설치된 사면의 안정해석 프로그램”, *한국지반공학회 사면안정위원회 학술발표회 논문집*, pp.33-66.

(논문접수일 2009. 3. 15, 심사완료일 2009. 3. 25)