

사면붕괴 예·경보시스템 도입에 관한 연구

A Study on the Introduction of Early Warning System for Slope Failure

김 학 승* / 조 남 준**

Kim, Hak Seung / Cho, Nam Jun

Abstract

In recent years slope failure due to heavy rainfalls or local downpours usually accompanied by typhoons has increasingly occurred in Korea. Also, the damages caused by slope failure have a tendency to be more disastrous than before. This study has been conducted to prepare an early warning system for slope failure by : ① analyzing types and causes of slope failure, ② examining the published evaluation criteria for slope stability, ③ estimating slope stability by considering the properties of slope-forming materials as well as the topographical and geological properties of slopes, and ④ determining the most important variables of affecting the stability of the slope under consideration. The data on the variations of slope conditions measured by an automatic in-situ measurement system and then transmitted to the central analysis system by using an internet. The most important variables can be back-calculated in the central system and compared with the values for the first and second management criteria. These management criteria should be modified and corrected continuously in the future by accumulated data and knowledge related to the early warning system for slope failure.

Key words : slope failure, early warning system, automatic measurement system

요 지

최근 발생하는 집중호우 및 태풍을 동반한 국지성 호우로 인한 사면붕괴가 자연재해 피해의 큰 부분을 차지하고 있으며, 사면붕괴로 인한 피해가 해마다 증가하는 추세에 있다. 본 연구에서는 사면붕괴를 예지하기 위하여 예·경보시스템 도입에 대한 검토를 다음 사항에 중점을 두어 수행하였다. ① 사면붕괴의 유형과 원인을 분석한다. ② 현재 많이 사용하고 있는 사면안정성 평가기준을 검토한다. ③ 사면의 지형적 지질학적 특성뿐 아니라 사면을 구성하는 물질들의 특성을 고려함으로써 사면의 안정성을 평가한다. 그리고 ④ 사면 안정성에 영향을 미치는 가장 중요한 변수들을 결정한다. 사면 예·경보는 자동계측시스템을 이용하여 데이터를 수집하고 인터넷 기술을 이용하여 수집된 데이터를 전송하여 분석하며 관리 기준값과 비교를 통하여 예·경보가 이루어지는 시스템을 제안하였다. 이 연구에서 제안한 관리 기준값은 경보단계 산정의 기준이 되는 1차, 2차 기준값으로 구분하였는데, 측정된 계측 데이터의 분석 및 연구를 통하여 기준값의 지속적인 수정 및 보완이 필요하다.

핵심용어 : 사면붕괴, 예·경보시스템, 자동계측시스템

1. 서 론

우리나라의 지난 10년간 발생한 산사태, 낙석, 토석

류 등 사면붕괴로 인한 사망자수는 전체 자연재해에 의한 사망자수의 22.7%에 달하고 있다. 우리나라 사면붕괴는 매년 7~9월 태풍 및 집중호우가 발생하는 시기에 집중적으로 발생한다. 최근에는 기상이변에 의한

* 국민대학교 건설시스템공학부 석사과정 (E-mail: zeckimhs@empal.com)

** 정희원, 국민대학교 건설시스템공학부 부교수

집중호우가 빈번히 발생하여 사면붕괴에 대한 관심과 경각심이 더욱 고조되고 있다.

우리나라 사면붕괴의 가장 큰 요인은 집중호우 및 강우에 의한 것이라는 사실이 여러 보고서에 의해 알려져 있다(국립방재연구소, 2002).

본 연구에서는 막대한 인적·재산상의 피해를 줄이기 위한 산사태 및 사면붕괴 위험지역에 대한 예·경보시스템의 타당성을 검토하고자 한다. 우선 예·경보시스템의 타당성을 제시하기 위하여 사면의 안정성을 평가하는 계측항목의 설정, 각 항목별 적정계측기기의 배치와 데이터 수집, 위험지 선정기준, 붕괴위험성 평가방법, 경보의 발령기준 등에 대한 기존 연구자료를 참고하여 예·경보시스템의 타당성에 대하여 검토한다. 본 연구의 수행을 위하여 우선 사면의 붕괴 유형과 원인을 분석하여 국내외의 사면 평가기준을 검토하여 사면붕괴 위험지구 선정기준을 마련한다. 또한 사면붕괴 가능성 지역의 계측에 대한 관리기준치 설정을 통하여 예·경보 발령기준 및 대비방안을 제안하며 지침 작성에 대한 사항을 검토한다.

2. 사면안정 관련 이론

사면붕괴를 분류하는 방법에는 Atkinson의 분류, Skempton and Hutchinson의 분류, EPOCH(European Community Programme)에서 1993년에 제안한 분류법 등이 있다.

이상과 같이 많은 분류법이 제시되었으나, 사면붕괴의 분류는 Varnes(1978)에 의해 제안된 방법이 국제적으로 가장 널리 사용되어 왔으며, 이 분류안은 Cruden과 Varnes(1996)에 의해 소폭으로 개정되었다.

Varnes는 산사태가 발생하는 운동 즉, 사면이 이동하는 형태, 속도 등 동역학적 메커니즘에 따라 사면붕괴를 낙하, 전도, 활동, 수평피짐, 흐름의 5가지와 복합형태로 분류하였으며, 자연사면 운동 메커니즘에 따라 표 1과 같이 분류하였다.

2.1 사면붕괴의 발생요인

일반적으로 사면붕괴는 강우, 지형, 지질, 토질 등의 자연적 요인과 국토개발에 따른 절토, 성토 등 인위적인 요인에 주로 영향을 받아 발생한다. 강우조건이 산사태를 일으키는 가장 큰 요인이지만 여러 요인들이 서로 관련이 있기 때문에 어느 하나의 요인에 의하여 사면붕괴를 설명할 수는 없다. 또한 장기적인 물리·화학적 풍화작용에 의하여 사면붕괴가 일어날 수도 있다.

2.2 토사사면의 전응력 및 유효응력해석

자연사면이나 인공사면의 안정해석은 전응력 해석과 유효응력 해석법으로 나누어 생각할 수 있다. 전자는 비배수 강도시험으로 얻은 강도정수를 써서 해석하는 방법이며, 간극수압은 고려하지 않는다. 후자는 유효응력으로 얻은 강도정수와 간극수압을 이용하여 해석하는 방법이다. 이론상으로는 유효응력 해석법과 전응력 해석법은 동일한 안전율을 산정하게 되므로, 두 방법 모두 모든 문제에 적용할 수 있다.

표 1. Varnes가 제안한 사면붕괴의 분류

사면붕괴 유형	지반 구성 물질의 종류		
	암석	토사	
		조립질	세립질
낙 하	암반 낙하	낙석	토사 낙하
전 도	암반 전도	토석 전도	토사 전도
활 동	암반 활동	토석 활동	토사 활동
수평 피짐	암반 피짐	토석 피짐	토사 피짐
흐 림	암반흐름 (깊은 포행)	토석 흐름	토사 흐름 (토사 포행)
복 합	두 가지 이상의 산사태 원리의 조합		

표 2. 전응력 및 유효응력해석의 비교

전응력 해석	유효응력 해석
비배수 강도시험으로 얻은 강도정수 c_u, ϕ_u 를 써서 해석하는 방법. 특히 비배수강도만으로 안정해석을 한다면 이를 $\phi = 0$ 해석이라 한다.	유효응력으로 얻은 강도정수 c', ϕ' 으로 해석하는 방법
간극수압 고려하지 않는다.	간극수압을 고려한다.

2.3 사면안정공법

사면의 안정성 검토결과 안전율이 1이상이 되는 안전한 사면이라 하더라도 장기간에 걸쳐 강우에 노출되면 침식 및 세굴로 인한 토사유출이 발생할 수 있다. 또한, 풍화작용, 동결융해작용 등에 의해서 표면이 연약화되고 우수의 침투 및 용출수에 의하여 지

하수위가 상승하면서 사면이 점차 불안정하게 되어 붕괴할 가능성이 있다. 따라서 사면의 장기적인 안정성 유지, 미관향상, 유지관리의 편의성 도모 등을 위해 적절한 사면안정공법을 선정하여야 한다.

사면안정공법은 목적 및 활용성에 따라 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 현재 안정한 것으로 나타났지만 침식이나 풍화작용에 의해 불안정하게 되는 것을 방지하는 보호공법이다. 사면보호공법의 종류는 배수공법, 식생공법, 블록공법, 슛크리트공법, 개비온 등이 있다. 둘째는 사면의 안정성이 확보되지 못한 것으로 나타난 사면의 안정성을 증가시키는 보강공법이다. 사면보강공법의 종류는 말뚝공법, 앵커공법, 옹벽공법, 절토공법, 그라우팅공법 등이 있다.

3. 위험지 산정이론 및 적용방안

3.1 국내의 사면안정성 평가기법

국내에서는 국립방재연구소, 한국건설기술연구원 등에서 사면안정성 평가기법을 제안하고 있다.

국립방재연구소에서는 사면의 구성물질에 따라 토사사면과 암반사면으로 구분하여 사면안정성 평가기법을 분류하고 있다(국립방재연구소, 2001).

토사사면에 대한 평가기법은 흙의 분류, 연경도, 사면경사, 강우강도, 표면보호공, 침투수 및 배수상태 등 7개 평가항목으로 구분하였으며, 그 항목에 따라 점수화 하였다. 점수가 높을수록 위험도가 높았으며, 특히 사면경사도에 따른 비중이 컸다. 안정등급은 매우안정에서 매우불안정이 0~100의 범위로 나타내었다. 또한, 암반사면에 대한 평가기법은 풍화상태, 사면경사, 절리방향, 절리간격, Seam층(절리면의 틈에 협재된 점토질의 얇은 층), 강우강도, 표면보호공, 침투수, 배수상태 등 9개 평가항목으로 구분하여 각 항목에 따라 점수화 하였다.

한국건설기술연구원의 연차보고서에는 기존조사대상 도로절개면의 선정방법을 고찰해보고, 이를 보완하여 수정된 현장조사절개면의 선정방법을 제안하고 있다.

3.2 국외의 사면안정성 평가기법

국외의 사면안정성 평가기법은 홍콩, 일본건설성, 일본국철 구간의 사면평가기준, 호주 및 미국 연방도로국의 낙석위험 평가기법을 검토하였다.

홍콩의 사면 안정성 평가법은 전국의 사면을 대상으로 위험도가 높은 사면을 분류 대책우선권을 부여하여 위험사면 안정화의 목적으로 작성되었다(Wakin, A. T., 1986). 사면의 붕괴가능성과 붕괴에 따른 예상 피해정도로 구성되어 있는데 붕괴가능성은 사면을 구성하는 지반의 특성과 수리적인 조건 등 사면의 기하학적 측면을 고려한 것이다.

8,441개소의 사면에 대한 조사를 수행하면서 사면의

불안정성과 붕괴예상 피해에 영향을 미치는 인자를 비교하고 인자가 가지는 특성을 점수화 시켰다. 이는 각 사면에 대해 불안정점수로 사면이 붕괴할 위험정도를 나타내며 점수는 붕괴가 발생할 경우 예상되는 인명 및 재산피해를 나타내는 것이다. 최종적으로 사면높이, 사면경사각, 사면상태 등의 점수화한 수들을 합하여 안전의 기준을 정한다. 이들 중 총점이 높은 것에 우선대 책이 부여된다.

일본건설성의 평가방법에는 일본전역의 1,673개소의 붕괴 또는 붕괴되지 않은 절토사면을 대상으로 각종 요인분석과 수량화 해석을 통해 사면의 안정에 영향을 주는 요인을 선정하여 가중치를 배정하는 방식으로 개발되었다(일본도로공단, 1986). 사면붕괴 유형에 따라 낙석·붕괴, 산사태, 토석류 등 세 가지로 나누어 각각 붕괴의 원인을 분석하는 방법과 일본전국 국도의 절토사면을 바탕으로 분산분석, 수량화해석을 행하여 사면을 평가하는 방법이 있다.

일본 국철 구간의 경사면 중 기 붕괴 경사면 100개소와 안전 경사면 100개소에 대해서 실시한 현장 조사 자료를 이용하여 붕괴영향인자를 선정한 후 각 인자에 대한 경사면 붕괴에 대한 영향 및 상관관계를 고려하여 점수를 부여하고, 이들을 합으로 사면의 붕괴위험정도를 판단하였다(일본도로공단, 1986).

호주의 사면안정성 평가기법은 빅토리아의 한 지역을 상대로 인공사면 및 자연사면에 대하여 작성된 안정성 평가법으로 사면의 경사각, 식생 상태, 사면상태, 강우, 절리 등 9개 요소로 구분하여 점수를 정하고 이를 합산하여 안정성 평가에 이용하였다(Joyce and Evan, 1976).

미연방도로국에 의해 제안된 낙석위험 평가기법은 1989년 개발된 것으로 사면높이, 낙석흡수도랑(Ditch), 평균차량위험도, 도로폭, 지질적 특성, 암크기, 기후, 낙석 이력 등의 항목에 대해 각각 0~100점까지의 점수를 부여하였다. 이 평가법은 검증을 위해 약 3,000개 이상의 사면을 대상으로 적용성 평가를 시행했으며, 특히 암사면의 안정성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단되는 지질적 요인과 절리면의 특성을 붕괴요인으로 고려함으로써 다른평가법과 차이를 보인다 (한국건설기술연구원, 1999).

3.3 위험지 산정기준 및 적용방법 분석

위험지의 선정기준은 해당 사면에 대한 지반조사와 이론적 해석에 근거한 안전율을 고려하여 결정한다. 이때 지반조사는 사면을 구성하고 있는 토질 또는 암질에 대한 강도정수, RQD, 절리방향 등 사면안정해석에

필수적인 항목들을 조사하여야 한다. 그밖에 사면주변의 강우시 유역면적 등 지형적 특성을 조사하여 배수 시설 등에 대한 수리학적인 검토도 병행되어야 한다.

이론에 의해 산정된 안전율이 적정의 안전율 보다 작은 경우 일단 위험사면으로 간주하고 해당 사면에 대한 현장조사를 보다 면밀하게 하여 전문한 기관별로 제시한 위험사면판정기준을 적용하여야 한다. 위험지산정기준 적용시 전문한 국가별, 기관별 위험사면판정기준은 사면안정평가 목적에 따라 다소 차이가 있으므로 위험사면의 선정시 안정평가목적에 부합되는 기준을 선택하여 적용하여야 한다. 그러나 전문한 안정기준이 절대적인 것이 아니기 때문에 사면의 안정기준에 대한 지속적인 자료 축적을 통한 수정 및 보완 작업이 요구된다.

4. 사면붕괴 위험지구의 평가방법 및 선정기준 연구

4.1 사면붕괴 위험지구의 평가방법

사면붕괴에 대한 적극적인 방법은 사면붕괴가 일어날 것을 사전에 파악하여 사면이 붕괴되지 않게 보호·보강공법을 실시하는 것이다. 그러나 사면의 현장 여건에 따라 적당한 보호·보강공법을 제시하거나 시공이 곤란한 장소가 있다. 이러한 장소에는 사면붕괴를 사전에 예측하고 피해를 예방하기 위한 실시간 계측이 필요하다.

사면붕괴 현상은 대개 사면에 분포하는 연약면을 따라 발생한다. 연약면에서 발생하는 사면의 변형·붕락 등의 운동형태를 명확히 밝히기 위해서는 통상 지표면과 지중에 각종 계측기를 설치하고 절개면의 지질·지형 등을 조사하고 지질구조를 확인하여 우선적으로 지표면 이동을 계측하는 것이 필요하다.

또한 사면붕괴에 대한 예지방법으로 사면의 연약면에서 발생하는 인장 균열 및 지표의 이동을 파악하는 방법이 가장 이상적인 방법으로 평가될 수 있을 것이다. 이 방법은 실시간 변위량과 연속성을 분석하여 대책을 강구하거나 사면붕괴 경보를 발령함으로써 피해를 최소화할 수 있다.

계측 지점 및 계측기의 선정을 위해서는 사면에 분포된 절리들의 방향과 위치에 대한 데이터베이스를 구축하고 전산 절리도를 작성하여 파괴양상 및 안정성에 영향을 끼치는 블록들의 규모와 안정성을 면밀하게 해석하여야 한다. 이런 면밀한 조사의 필요성은 계측기에 대한 맹목적인 의존이 아니라 계측 결과가 반드시 절개면 활동과 연계시켜 분석되어야 하기 때문이다. 따라서 계측지점의 설정은 사면 활동성에 대한 정확한 분

석을 기초로 수립되어야 원활하고 효율적인 계측작업이 가능하며, 계측 이전의 면밀한 현장조사를 통한 사면의 안정성해석과 계측지점의 정확한 도출이 매우 중요하다.

사면의 안정성을 계측할 수 있는 내적인 항목은 크게 수평변위측정, 수직변위측정, 지하수위 측정의 3가지 요소로 나눌 수 있으며, 외적인 항목은 사면붕괴 원인에 크게 영향을 미치는 강우량이다.

4.2 토사사면 활동토괴의 계측

측량에 따른 방법을 제외하고, 현재 가장 많이 이용되고 있는 방법으로는 전기적 계기에 의한 활동토괴 이동량을 측정하는 지반 경사계에 의한 방법, 지표면 수평변위 계측에 의한 방법 활동면의 수직 및 수평변위 계측에 의한 방법 등이 있다(일본사면기술협회, 1998).

4.2.1 지표면 신축계에 의한 계측

지표면 신축계는 벼랑이나 지표면의 인장균열을 사이에 두고 설치하기도 하고 또는 하부에서 압축변형이 발생하는 위치에 사면활동 조사 축선을 따라 운동 방향에 평행하게 설치한다. 그림 1에서와 같이 인장균열 등을 사이에 두고 보통은 20m 이내의 간격으로 고정 말뚝과 이동 말뚝을 지표면에 설치하고, 고정 말뚝에 신축계를 설치 후 이것과 이동 말뚝과의 사이에 선팽창 계수가 극히 작은 인바선을 일정한 장력으로 붙여 사면계측에 이용한다.

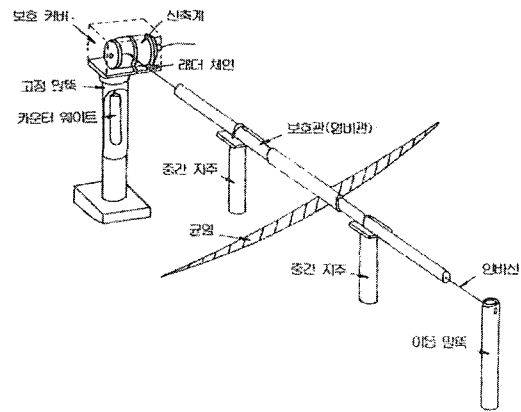


그림 1. 신축계

4.2.2 지반경사계에 의한 계측

지반경사계는 운동의 징후가 명료하지 않은 사면의 안정성 검토에 필수적인 측정기의 하나로서, 잠재적인 사면붕괴 가능성이 있는 지역 또는 활성화될 조짐이 보이는 지역 주변부에 설치된다.

지반은 기상(지열이나 강우 등)이나 조석 등의 자연 환경 변화에 의한 영향 하에 있는데 이를 보통 기저 변동이라 하며 이러한 지반 경사의 기저변동은 지역에 따라 다소의 차이는 있지만 미세하게 발생하게 된다. 이 기저 변동에는 회귀성이 인정되어 강우에 의한 변동이면 수일 내, 지온에 기초한 것이라면 24시간 내라도 돌아온다. 사용하는 경사계는 이들 기저변동도 포함하여 측정할 수 있는 정밀도를 가지고 있을 필요가 있다.

하루평균 기저변동을 상회하는 경사 변동이 나타나 이것이 누적될 경우에는 일단 그 지역에 활동이 발생하기 시작하고 있다고 판단할 수 있다. 경사 변동량은 사면의 깊이에 따라 달라서, 깊은 곳은 조금만 나타나 판정하기 곤란한 경우가 많다. 그림 2는 지반경사계 설치도이다.

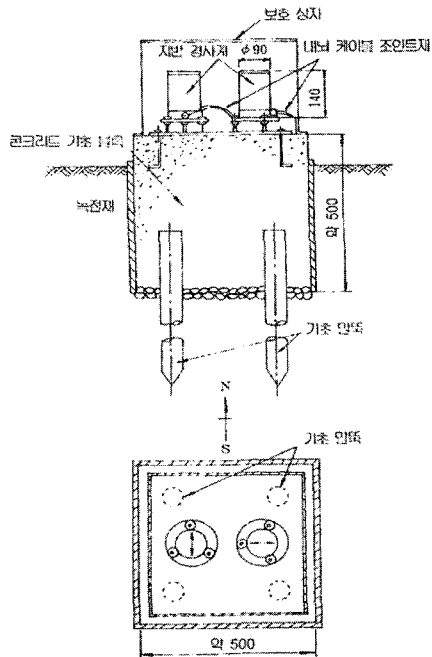


그림 2. 지반경사계

4.2.3 토사사면 활동면의 수직 및 수평변위 계측

신축계는 보통 사면의 상부와 하부사이의 균열을 갖는 두 점간의 상대 수평변위량을 계측하는 것이며, 그림 1과 같이 신축계의 말뚝 깊이 내에 균열을 가지고 있을 경우에는 활동면의 이동량을 알 수 있지만 말뚝이 활동면 외부에 존재할 경우에는 계측값이 정확한 두 점간의 변위량이 되지 않은 경우가 있다. 일반적으로 현장탐사에 있어서 사면 활동면을 확인한다는 것은 곤란하기 때문에 지표면에 설치한 신축계는 항상 정확한 변위량에 대한 정보를 제공한다고 할 수 없다.

공내 신축계는 이 결점을 보완하기 위해 고안된 것으로, 예상되는 활동면의 아래쪽까지 보링을 실시하고, 보링공 하부에 앵커를 정착후 지표면에 설치한 신축계까지 스테인리스 와이어로 끌어올려 신축계의 카운트 웨이트에 의해 적당한 장력을 부여한다.

단, 이들 사이에 침하가 있다면 이동량에 침하량도 포함한다. 보링공내 신축계는 와이어가 보링공 내에 설치되어 있기 때문에 지표 공작물의 제한을 받지 않으며 또한 적설시 등에도 유지관리가 용이하다. 그림 3은 보링공 내에 신축계의 설치도이다.

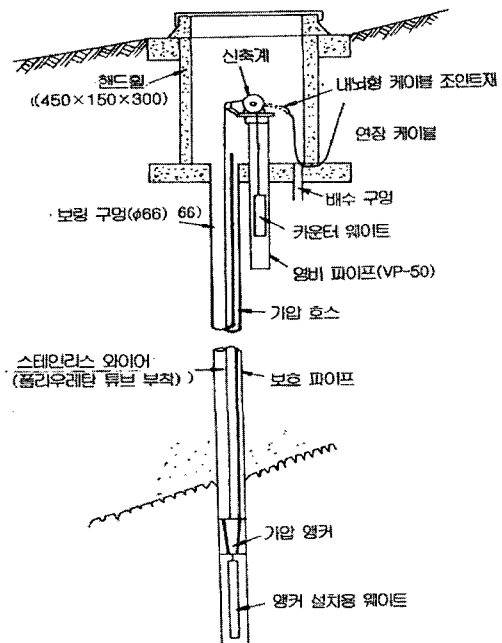


그림 3. 보링공 내 신축계 설치도

4.3 지하수위, 간극수압 및 강우량의 계측

지하수위 계측의 주된 목적은 지하수가 사면붕괴 발생의 원인 중에서도 가장 중요한 요소이기 때문이다.

사면 붕괴를 발생시키는 외부요인 중에서도 가장 큰 것은 강우나 융설 등으로 인한 지반 침투수이다. 이러한 침투수의 작용에 의해 흙이나 암반 자체의 강도가 저하한다. 지하수위의 계측방법에는 지하수위를 직접 계측하는 방법과 간극수압을 계측하는 두 가지 방법이 있다.

4.4 사면보강 구조물을 이용한 계측

역지말뚝은 토사사면의 활동토괴를 관통하여 부동지반까지 말뚝을 일렬로 설치함으로써 사면의 활동하중을 말뚝의 수평저항으로 부동지반에 전달시키는 공법이다.

역지말뚝에서 실시할 수 있는 계측항목은 변형량,

토압 및 수평 변위량이며 이러한 계측자료를 가지고 말뚝의 휨모멘트를 계산하여 보강된 사면의 안정성을 판단할 수 있다. 사면 보강공법 중에 앵커를 이용한 보강은 토사부분에 적용되는 어스앵커공법과 암반부분에 적용되는 락앵커가 있다. 앵커를 이용한 공법은 시간의 경과에 따라 정착 긴장력은 감소하며 어느 일정한 기간을 경과 한 후 감소가 정지하는 것 같은 거동을 보인다. 그러나 앵커의 정착 지반에 침하나 크립프 등의 변형이 발생하기 쉬운 지반에서 긴장력은 계속 감소한다. 또한 앵커에 설계하중 이상의 외력이 작용한 경우나 지형 자체가 변형하고 있을 경우에 정착 긴장력은 증가한다.

이와 같이 앵커의 정착 긴장력은 다양한 요인에 의해 항상 변동한다는 것을 알 수 있다. 따라서 이 변화 상황을 항상 파악하여 두는 것은 앵커의 안전성을 확인하고 사면의 거동에 관한 현상 파악과 이후의 거동 예측에도 도움이 될 수 있다.

4.5 사면붕괴 예·경보시스템의 위험지 적용방법분석
사면붕괴가 발생하는 지역에 여러 가지 계측기를 사

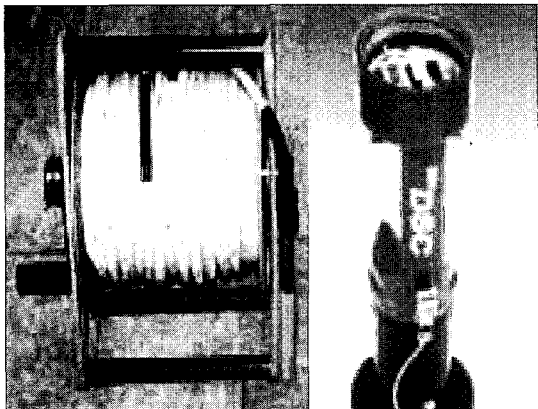


그림 4. 지하수위계

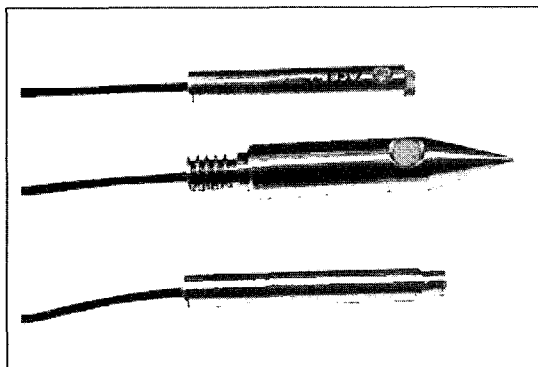


그림 5. 간극수압계

용하여 계측을 할 경우, 그 목적은 사면의 거동과 해석에 사용하는 데이터의 획득에 있는 경우가 많다. 데이터를 분석하여 획득한 정보를 기초로 하여, 사면붕괴가 발생하면 주변주민의 안전 확보 및 가옥·도로·철도·댐·농경지 등의 피해를 최소화 하기 위한 대책을 마련한다. 이러한 경우, 사면이 어떠한 거동을 하고 계측값이 변하면 어떠한 대책과 판단을 할 것인가의 기준을 미리 정해 놓으면, 빠르고 적절한 대응을 취할 수 있다. 이러한 일련의 대책과 판단을 내리는 기준을 관리기준 이라고 한다. 관리 기준값을 통한 사면의 감시 체제는 사면설계방법, 시공공법, 지형조건, 주변환경에 따라 정상관리체제(1차관리값), 주의체제(2차관리값), 경계체제(한계값)로 3단계로 관리를 한다.

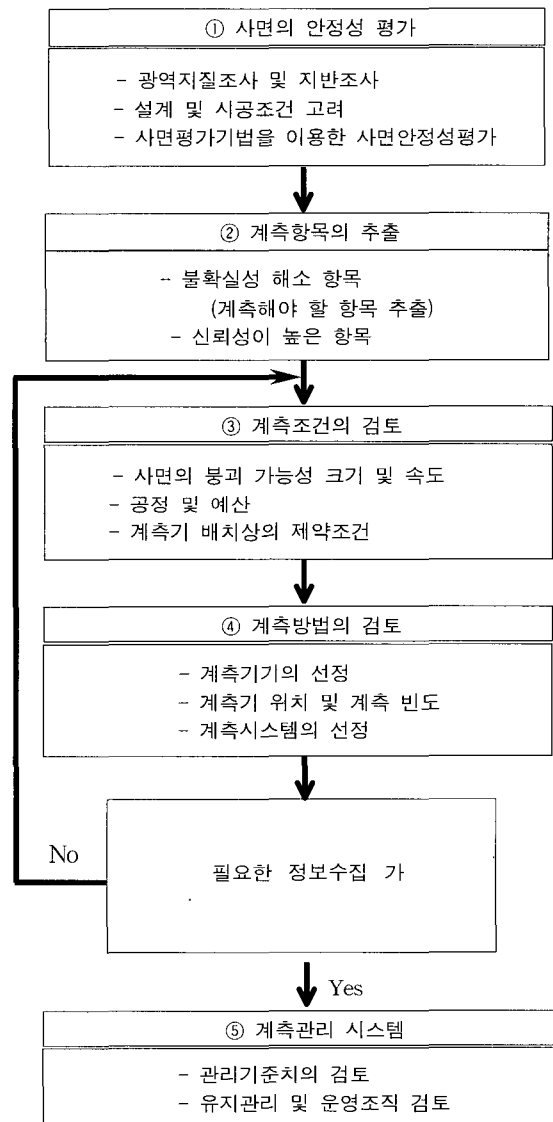


그림 6. 계측계획의 흐름도

5. 사면붕괴 예·경보시스템

5.1 사면붕괴 시스템의 국내·외 설치사례 및 시사점 도출

5.1.1 미국의 사면계측 시스템

미국에서는 사면에 대한 무인감시시스템이 도로사면 뿐 아니라 노천채굴광산의 사면 관리와 붕괴 감시에도 쓰이고 있다. 산사태 관리는 미국지질조사소(United States Geological Survey, USGS)가 중심이 되어 대학과 공동연구 과제로 지속적인 연구가 수행되고 있다. 사면 현장에 계측센서들은 지표 변위와 인장균열의 거동을 관측하기 위한 것으로, 보통 자동신축계와 자동측량기가 설치되어 있다. 자동으로 측정된 계측자료는 데이터 로거에 수집되고 분석을 위해 일정한 간격으로 중앙의 컴퓨터로 전송된다. 이 때 현장에서 측정된 변위량이 사전에 설정된 기준치를 초과할 때 경보도 함께 전송된다.

일반적으로 사면붕괴와 강우량이 밀접한 상관관계를 보이는 사면의 경우에는 우량계와 진동현식 간극수압계가 감시시스템에 포함된다. 지중경사계 또는 지표면 신축계, 하중계와 진동현식 간극수압계를 포함하기도 한다.

5.1.2 홍콩의 사면계측 시스템

홍콩에서 발생하는 붕괴의 가장 큰 원인은 강우로서 대부분의 사면붕괴가 5월에서 8월 사이에 발생하는 집중호우와 밀접한 관계가 있다. 홍콩의 토력공정처(Geotechnical Engineering Office, GEO)에서는 자동우량계시스템을 이용한 산사태 경보시스템을 개발하여 운영하고 있다. 이 경보시스템은 1963년부터 1982년까지 20년간 수집된 산사태-강우 자료를 이용하여 1980년대 초에 수행한 산사태 발생과 강우의 상관관계에 대한 연구 결과를 바탕으로 개발되었다. 산사태 경보는 24시간 강우량과 1시간 강우량에 근거하여 발령되며, 팩시밀리와 라디오 및 TV를 통하여 정부기구와 시민들에게 통보된다(Brand et. al., 1984).

홍콩의 경우 많은 사면들이 암석과 흙의 혼합으로 구성되어 있고, 사면붕괴의 조기경고를 위해서는 사면 움직임에 대한 장기적인 계측보다는 강우와 지하수위 변화에 대한 국지적인 계측이 수행된다. 한편, 사면 움직임에 대한 계측은 사면공사의 시공관리를 위해서 수행되거나 지속적으로 점진적인 변형을 일으키고 있는 사면의 장기계측을 위해 수행되고 있다.

5.1.3 일본의 사면계측 시스템

암반사면 감시시스템에 공통적으로 포함된 계측기

들은 지표면 신축계, 지표경사계, 지표균열변위계, 지중균열변위계, 지중경사계, AE(Acoustic Emission), 온도계, 우량계이다. 이외에도 일부 현장에는 간극수압계, 낙석감지센서, 풍향측정기, 풍속계, 지진계 등이 추가로 설치되었으며, 또한 전자거리측정장치와 디지털 카메라를 이용하여 특정 타겟을 감시하는 시도가 행해졌다. 이들 계측시스템의 센서 중에서 낙반예지에 특히 효과적인 것은 지표면신축계와 지표균열변위계로서 이들로부터 측정된 변위속도의 가속화 현상으로부터 낙반을 예지할 수 있는 것으로 나타났다.

5.1.4 우리나라의 사면계측 시스템

국내에서 지금까지 수행된 사면계측은 대부분 사면붕괴 발생 후 대책공사의 시공관리와 시공효과 확인을 위한 것이다. 재해방지차원에서 사전에 위험 사면의 안정성 평가를 위한 계측은 주로 수동계측에 의한 것으로 최근 자동계측시스템으로의 전환을 시도하고 있다.

최근 대규모 붕괴가 잇따라 발생하면서 붕괴정후를 사전에 감지하고 경고를 알릴 수 있는 실시간 사면 감시시스템의 개발이 요구되자, 댐 등의 중요한 시설과 접해있는 위험사면 또는 도심지에 위치한 대규모 위험사면 등과 같이 붕괴 발생시 예상 피해정도가 큰 사면에서는 점차 자동계측시스템이 도입되고 있는 추세이다. 그러나 이러한 사면 자동계측시스템은 특정 목적 하에서 특정 사면을 대상으로 설치된 것이어서 상당히 고비용이 들게 설계되어 있다. 따라서 전국에 산재된 불특정 다수 사면을 대상으로 적용하기에는 비현실적 이므로 보다 저비용으로도 같은 계측효과를 낼 수 있는 자동 계측시스템 개발이 필요하다.

국내의 사면 계측사례로는 한국도로공사에서 1990년대 후반부터 고속도로 확장 및 건설에 따라 발생한 위험 사면들과 강우로 인하여 붕괴된 고속도로변 사면들에 대해 사면 대책공을 시공하면서 시공관리와 효과 확인을 위하여 현장계측을 함께 실시한 사례와 수자원공사가 1996년 보령댐 여수로 좌안절개면 공사도중 대규모 균열이 발생하자 안전한 시공관리와 시공후의 유지관리를 위하여 97년에 사면 계측시스템을 설치하여 현재까지 가동 중인 사례가 있다.

5.2 사면붕괴 예·경보시스템의 종류 및 특성 분석

계측시스템을 구성하는 부분은 계측기기를 일컫는 각종 센서, 데이터를 수집하는 데이터로거, 데이터를 송신하는 무선송신부, 데이터를 수신 및 분석하여 사용자가 원하는 형태로 데이터를 처리해주는 Server부분으로 구성된다.

5.3 계측프로그램

계측프로그램은 실시간으로 수신이 되는 데이터를 처리하는 부분으로 핵심적인 구성부분이다. 또한 데이터의 주기별 저장, 필터링, 해석, 산술평균 및 데이터를 관리하는 부분이며 관리기준치와 비교를 통하여 특정 데이터를 선별하며 원하는 기간별 데이터를 Excel 파일 및 기타 파일형식으로 변환을 시켜주는 부분이다.

기존의 사면 계측 방법은 현장 내에 인력이 상주하여 지속적으로 계측을 실시하거나 자동화 계측을 통하여 데이터를 시간대별로 수집하였다. 사면붕괴는 특정한 시간을 정해서 발생하는 사건이 아니며, 붕괴 형태를 관측하기 위하여 인력이 상주하여 계측을 하기는 어렵다.

현재는 PCS(019, 016), 이동전화(011, 017), 무선인터넷(넷스팟)의 발달과 더불어 무선데이터 전송방식이 많은 발전을 이루고 있다. 현장에서 계측된 데이터를 수집하기 위해서 인력이 상주할 필요도 없고 유선방식을 이용하여 데이터 전송이 어려운 공간에 현재 급속한 발전을 이룬 무선데이터 전송방식을 이용하는 것이 바람직하다.



그림 7. 태양열 전지판

사면 예·경보시스템의 구성부분은 크게 센서부, 데이터 수집 및 전송부, 중앙처리부, User 부분으로 나눌 수 있다. 센서부는 사면의 안정성을 판단할 수 있도록 사면에 설치된 계측기기들을 말하며, 데이터 수집 및 전송부는 데이터를 수집하고 무선방식으로 데이터 전송이 가능하도록 칩이 탑재된 데이터 로거이다. 수집된 데이터는 기지국 및 AP(Access Point)장비로 송신이 되어서 데이터를 처리하는 중앙처리부로 이동하게 된다. 중앙처리부로 수신된 데이터는 연산처리를 통하여 데이터를 관리하는 User 부분인 관리자가 실시간으로 계측값을 파악하게 된다.

5.4 GPS를 이용한 계측

GPS를 이용한 실시간계측은 국외의 경우에는 댐 변형측정, 고층건물의 변형 및 장대교량의 변형측정에 대한 연구가 많이 진행되고 있다. 장대교량에 대한 진동 및 변형량 측정에 의한 안전성 평가에 관련한 연구는 국내에서는 전무하며 장대교량의 변형측정에 대한 예로써 1997년 영국의 Nottingham대학, Institute of Engineering Surveying and Space Geodesy (IESSG)에서 Humber Bridge (길이: 2220m, 높이 155.5m), Nottingham Clifton Bridge 및 Dee Bridge에 실시간 GPS측위에 의한 변형측정을 실시한 결과, 과대한 차량하중이 재하되었을 경우에 측방향 변형은 2~3mm, 횡방향은 14cm 및 수직방향은 최대 40cm로 15cm이상 변형이 발생되는 것으로 조사되었다.

5.5 계측관리

계측관리는 계측시스템의 효과를 극대화하고 계측시스템의 기능적 상태를 유지하며, 개선 및 보완을 통해 유지관리의 효율성을 향상시키는데 있다. 이러한 목적을 이루기 위해서 일상적인 계측관리 체계의 구축뿐만 아니라 계측시스템 및 주변기기의 관리 또한 병행할 수 있는 시스템을 갖춰야 한다.

이러한 계측관리체계를 통하여 이상이 생기면 신속하게 대처할 수 있으며, 복구기간 또한 최소화 할 수 있다.



그림 8. 무선 송신기



그림 9. Earth Fill Dam상에 설치된 GPS 수신기

6. 결 론

사면붕괴 예·경보시스템 도입의 타당성에 관한 연구결과와 추후 연구되어야 할 과제는 다음과 같다.

1. 예측 불가능한 사면붕괴의 대처방법으로 과거처럼 재난에 대한 복구사업에 전념하는 소극적인 단계에서 벗어나 예상을 웃도는 재해강도에 미리 대비하여 인명과 재산을 지킬 수 있는 예·경보시스템 도입은 충분한 필요성이 있다.
2. 사면붕괴에 관한 경보는 계측하는 항목별 기준값과 비교하여 단계별로 경보의 경중을 구분하여 실시하는 것이 바람직하다. 1차, 2차 관리 기준값과 각 계측항목별 계측값을 비교 분석하여 주의경보, 경계경보, 대피경보 등의 단계를 두어야 한다.
3. 본 연구결과 사면붕괴 예·경보시스템의 도입을 위한 계측, 데이터 전송 및 분석관련 기술의 적용성은 높다. 그러나 사면의 안정성에 영향을 미치는 인자들 및 사면의 거동과 계측 데이터의 상관성에 대한 연구가 미비한 실정이다. 이에 적극적인 사면붕괴 예·경보시스템의 도입을 위해서는 위험사면에 예·경보시스템의 도입을 통하여 측정된 자료의 피드백을 통하여 관리 기준값의 설정이 필요하다.

참 고 문 헌

- 건설교통부, 도로설계편람II, 2000.
- 김성환, “암반 절취사면의 문제점 및 개선방향”, 한국지반공학회 사면안정 학술발표회, 2000.
- 국립방재연구소(2001), “재해영향평가제 대상사업 및 적용규모 개선방향”, 보고서
- 국립방재연구소(2002), “사면붕괴의 유형별원인과 저감대

- 책연구”, 보고서.
- 노한성, 유병욱, 황영철, 김태수, 김성환, “한국도로공사의 절토사면 유지관리 시스템”, 한국지반공학회 사면안정 학술발표회, 1999.
- 박덕근, 김교원, “현장 및 실내 실험에 기초한 홍성지역 지진응답특성 평가”, 대한지질공학회, 2001.
- 박남서, “도로 절토부 암반사면의 안정성검토”, 한국지반공학회 사면안정학술발표회, 1998.
- 유병욱, 황영철, 정형식, 이승호, “절개사면의 안정성평가를 위한 점검항목 제안”, 한국지반공학회 사면안정위원회 학술발표회, 1999.
- 최정찬, “황령산 산사태에 대한 지질공학적인원인분석” 한국지반공학회 사면안정 학술발표회, 2002.
- 한국건설기술연구원, “도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용 2”, 건설교통부, 1999.
- 한국건설기술연구원, “도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용 3”, 건설교통부, 2001.
- 地すべり策技術協會, “地すべり觀測便覽”, 地すべり觀測便覽總集委員會, 1998 pp.363 ~ 395.
- Brand, E. W., J. Premchitt, and H.B. Phillipson. 1984. Relationship Between Rainfall and Landslides in Hong Kong.
- Cruden, D.M. and Varnes, D.J. (1996) Landslide types and processes. In A.K. Turner and R.L. Schuster, eds., Landslides - investigation and mitigation, National Res. Council, Wash., D.C., Transp. Res. Board, Spec. Report 247, p.36-75.
- David M. Cruden and David. Varnes. "Landslide Type and Processes" Chapter 3. LANDSLIDE INVESTIGATION AND MITIGATION.
- In Proc., Fourth International Symposium on Landslides, Canadian Geotechnical Society, Toronto, Vol. 1, pp 377-384.
- Varnes, D.J. (1978) Slope movement types and processes. In R.L. Schuster and R.J. Krizek, eds., Landslides - analysis and control, National Acad. Sciences, Wash., D.C., Transp. Res. Board Spec. Report 176, p.11-33.

- ◎ 논문접수일 : 2004년 6월 8일
- ◎ 심사의뢰일 : 2004년 6월 9일
- ◎ 심사완료일 : 2004년 8월 3일