

斜面安定(Ⅶ)

| | | |
|---|---|------|
| 洪 | 性 | 完* |
| 李 | 明 | 煥** |
| 趙 | 千 | 煥*** |

2.3 계측

2.3.1 계측개요

(1) 계측의 정의

계측이란 인간의 재능과 계측기기의 성능(capability)을 조합시켜 공학적인 정보를 수집하는 행위이다. 즉, 이론과 기법, 통찰과 경험, 측정기술과 측정기기를 이용하여 공학적 문제해결에 필요한 정량적, 정성적인 정보를 얻는 것을 말한다. 이러한 계측은 그 목적에 따라 현장에서 재료의 공학적 특성치를 얻기 위한 계측, 실험실에서 물성치 또는 모형의 거동특성을 규명하기 위한 계측, 구조물의 시공 또는 유지관리시 현장 지반과 구조물의 장단기 거동특성을 규명하기 위한 계측 등 세가지로 크게 분류할 수 있으나 일반적으로 계측이라 함은 첫째와 세번째 항에 속하는 현장계측을 의미하는 경우가 많다.

(2) 계측의 중요성

토질공학에서 다루는 대상은 자연물이기 때문에 설계에 필요한 공학적 특성치를 정확한 수치로 정하는 것이 곤란하다. 따라서 실내시험이나 현장시험의 자료를 이용하는 설계의 추정 특성치에는 많은 불확실성이 포함된다. 그러나 시공

과정의 지반거동을 계측관리한다면, 설계에서 추정한 특성치의 精度를 평가할 수 있으며, 필요시에는 추정값을 변경하고 재 설계를 할 수도 있다. 이러한 점이 각종 흙 구조물 공사에서 현장계측을 새로운 설계 방법의 하나라고 하는 이유이다.

즉, 종래의 설계개념과 현장계측에 의한 방법의 개념에는 차이가 있다. 종래의 설계개념은 최악의 상태를 가정한 비 경제적인 설계라 볼 수 있는 반면, 현장계측에 의한 방법은 가장 발생하기 쉬운 상태의 가능성에 기초해 설계하는 것이라고 할 수 있으며 이경우 설계단계에서의 정보의 부족은 시공중의 관측에 의해 보충되고, 설계는 그 새로운 정보에 의해 수정된다.

따라서 흙 구조물 공사에서 현장계측의 목적은 경제적이고 안전한 시공을 하기 위해서 정확한 토질정수에 관한 정보를 얻는데 있으며, 더 나아가서는 새로 얻어진 정보를 feed-back시켜 다음 단계에서 발생할 수 있는 지반거동을 사전에 파악해 이를 토대로 당초 설계의 타당성 판단과 대책을 강구하는 데 있다.

(3) 현장계측의 적용범위

현장계측은 그 자체가 목적은 아니고 목적을 달성하기 위한 수단으로 이는 매우 광범위하며 각종의 시설 및 구조물에 관련되어 있다.

* 正會員, 韓國建設技術研究院, 研究委員
 ** 正會員, 韓國建設技術研究院, 先任研究員
 *** 正會員, 韓國建設技術研究院, 研究員

일반적으로 토목시설 및 구조물 공사의 대부분이 사면에 관한 문제를 포함하고 있으며 특히 사면과 관련된 부분으로는 토공작업을 들 수 있는데 이에 대한 예로써 연약점토층위의 성토 작업, 굴착공사, 자연사면의 절. 성토 공사 등을 들 수 있다. 또한 사면의 분야라고 해서 계측 기기 및 방법에 있어서 특별히 다른 것이 아니므로 사면에 대한 계측만 별도로 분리하는 것은 의미가 없다. 따라서 본 강좌에서는 전반적인 계측의 내용을 위주로 설명하고 사면에 대한 간단한 계측 적용예를 소개하였으나 지면상 일반적인 내용을 다루었으므로 상세한 내용은 참고문헌을 이용하기 바란다.

(4) 계측 프로그램의 계획 및 시행절차

효율적이고 체계적인 계측수행을 위해서는 사전에 계측프로그램의 계획 및 시행절차를 수립한 후 이에따라 계측을 수행해야 한다.

계측계획을 수립하는데는 우선 대상 사면에 대한 계측목적의 설정이 선행되어야 한다. 다음으로 설정된 목적에 따라 어떠한 종류의 계측이 필요한지를 결정한 후 대상 사면에서의 계측위치, 필요한 기기수량, 매설위치 등을 결정짓고 마지막으로 얻어진 계측데이터의 평가 및 활용 방안을 수립하여 체계적으로 계측을 시행하는 것이 바람직하다.

계측프로그램의 일반적인 계획 및 수행 절차는 표1과 같다. 표에서와 같이 계측수행은 업무 내용별로 지반거동 예측 및 비상대책, 총괄계측 계획, 상세계측계획으로 나눌 수 있으며, 업무의 절차에 따라 계측개요파악, 거동예측 및 설치준비, 설치 및 측정, 자료분석 및 이용 등으로 구분할 수 있으므로 계측계획은 절차에 따라 업무내용을 조합해 가면서 순서대로 수립하는 것이 바람직하다. 그러나 계측 수행조직과 구성체계에 따라서 부분적으로 수정하여 적용하는 것이 유리하다.

표 1 계측수행 계획을 위한 흐름도

| 업무내용 업무절차 | 지반거동예측 및 비상대책 | 총괄계측계획 | 상세계측계획 |
|-------------------|--|---|--|
| 계측개요 파악 | 현장현황 지형 : 지질 : 지하수 : 응력 : 시공계획 ↓ | 계측목적 및 예산 계측목적 : 예산 ↓ | 계측인력 계측인원수 : 업무분담 : 연락 및 보고 채널 ↓ |
| 거동예측 및 설치준비 | 지반거동 예측 거동기구 : 한계 위치 : 크기 : 속도 ↓ | 계측항목 변위 : 물 : 압력 : 하중 ↓ 계측위치 중요위치 및 깊이의 확인 : 우선 순위 결정 ↓ | 계측기기 기기선정 : 기기보정 : 상세절차 계획 ↓ |
| 설치 및 측정 | 비상시 대책수립 위험경고 수준의 결정 : 경고수 준을 초과할 경우의 대책 | 계측빈도 공사기간 : 측정빈도 : 정리및 보고의 빈도 | 설치 설치위치, 수량, 절차 등의확정 ↓ 관측 상세 관측계획의 수립 ↓ |
| 자료분석 및 이용 | | | 자료분석 및 보고 데이터 스위트 및 그래프 : 계산절 차마련 : 정리 및 보고 |

2.3.2 계측 절차별 주요내용

(1) 계측개요파악

1) 현장상황

지반거동 분석, 계측여부의 결정, 계측목적의 설정 등 계측수행의 근간이 되는 사항을 파악하기 위해 현장상황을 조사한다. 조사내용은 필요에 따라 달라질 수 있으나 일반적으로 지형, 지질, 지하수, 응력상태, 설계 및 시공절차 등이 포함될 수 있다.

2) 계측목적의 설정

계측프로그램을 계획하기 이전에 명확한 계측목적이 설정되어 있어야 한다. 일반적으로 현장 계측은 다음과 같은 목적으로 수행한다.

- ① 설계 및 시공법의 적합도에 대한 평가와 설계변경 가능성의 모색
- ② 기존 이론이나 설계법의 정확도와 적용범위에 대한 평가 및 새로운 이론 또는 보다 진보된 설계법의 개발
- ③ 시공관리 및 조기경보 계통으로 사용

전술한 ①, ② 항의 목적은 주로 연구자, 설계자의 관심대상이고 ③ 항은 주로 시공자, 유지관리자의 관심대상이다. 이와 관련하여 사면에서 계측을 수행하는 목적은 크게 사면의 안정성을 평가하고 평가 결과에 따른 대책수립에 있다고 할 수 있으며, 이에 따른 세부목적은 다음과 같이 분류할 수 있다.

- a. 사면의 활동성 및 토질정수, 활동면의 깊이 및 형상 등의 계측으로 안정성 판단과 대응책 수립
- b. 사면활동의 주요 요인 및 강도정수 파악을 위한 연구목적
- c. 붕괴요인 감시계측으로 예경보체제 활용

3) 예산 및 인력

계측소요예산은 현장상황 및 계측목적에 따라 변화하므로 일정 비용을 정하는 것은 매우 곤란하다. 그러나 계측비용을 총 공사비의 1% 정도를 기준으로 하는 기관도 있다.

계측요원은 계측 책임자와 수행원으로 나눌 수 있는데 계측 책임자는 계측과 관련한 중요사

항을 직접 결정할 능력이 있어야 하며 계측수행원은 계측에 대한 단일업무를 담당하게 하는 것이 필요하다. 또한 계측업무와 관련하여 분쟁요인 제거 및 원활한 계측목적의 달성을 위해 계측요원의 책임한계를 명확히 설정하는 것도 필요하다.

요원의 구성은 예산, 현장 및 계측 상황에 따라 조절하되 최소한 기술자 1인과 보조원 1인으로 이루어져야 한다.

(2) 지반거동에측 및 설치 준비

1) 구조물 및 지반거동 예측

계측계획을 효율적으로 수립하기 위해서는 구조물과 지반의 거동특성 이해와 거동예측이 선행되어야 한다.

계측대상 구조물 및 기초지반에 대한 거동특성 이해와 예전은 계측항목, 계측위치, 계측기기 등을 합리적으로 선정하기 위해서 반드시 필요하며, 이러한 예전은 신뢰성 있는 방법으로 이루어져 효율적인 계측관리가 수행되도록 해야 한다.

2) 계측항목의 선정

계측항목은 계측계획단계에서 계측목적, 시공조건, 환경조건 등을 감안, 적정항목으로 선정되어야 한다. 사면과 관련하여 수행하는 계측은 표 2와 같이 크게 5종류로 분류할 수 있으며 계측항목을 선정하는 데 고려해야 할 주요 사항은 전술한 계측수행 목적과 거동특성 예견 결과 외에 다음과 같다.

- ① 구조물의 종류, 용도, 형태
- ② 구조물의 구조적, 재료적 특성
- ③ 지반조건

3) 계측기기의 선정 및 보정

계측기술자는 계측목적, 계측기기 특성 등을 사전에 검토하고 숙지한 후, 그 프로젝트에 적합한 계측기기를 선정하여야 한다. 계측기기 선정시 유의사항은 다음과 같다.

- ① 계측기기의 精度, 반복정밀도, 강도, 계측범위 및 신뢰도가 계측 목적에 적합한 것.
- ② 구조가 단단하고 튼튼하며 설치가 용이한 것

표 2 계측항목별 계측기기

| 계측항목 | 계 측 기 기 |
|------|--|
| 간극수압 | · 간극수압계 : 개방식, 유압식, 공압식, 전기식 · 부간극수압계 : tensiometer, psychrometer |
| 지하수위 | · 수위계 |
| 지표변위 | · 측량법, 지표면 변위계, tilt meter, inverted and hanging pendulums |
| 지중변위 | · 수평변위계 : 경사계, 파이프변위계 · 수직변위계 : 각종 침하계 · 수평 및 수직 변위계 |
| 기 | 강우량 · 우량계 : 간이우량계, 자기우량계 |
| 타 | 토 압 · 각종토압계 |

- ③ 공사의 진행과정에 미치는 지장이 최소인 것
- ④ 계측기기의 가격이 적절한 것
- ⑤ 온도, 습도 등에 대한 자체보정 또는 보정이 간편한 것
- ⑥ 측정치에 대한 계산과정이나 분석절차가 간단한 것
- ⑦ 가능한한 측정치 자체가 검증될 수 있는 것

계측기기의 경우 전 세계적으로 수많은 종류가 개발, 보급되고 있으므로 계측기기 선정이전에 계측기기들의 특성 파악이 매우 중요하다.

또한 계측기기는 운반과정 등에서 발생할 수 있는 작동불량 가능성을 작동성 검사로 판단한 뒤 제공된 보정표 등을 이용하여 필요한 영점 조정이나 보정을 행한다. 예로써 간극수압계의 경우는 수침과정을 통하여 작동성, 정확성을 판별할 수 있고 경사계와 같은 경우에는 일정한 각도로 고정된 케이싱 내부에 탐침자를 삽입시켜 간단하게 검사해 볼 수 있다.

4) 계측위치의 선정

계측위치는 구조물과 지반의 거동특성을 분석하여 최대, 최소 응력 및 변위의 발생부위, 응력 변화 및 변형형태 등의 제요소들을 명확하게 파악한 후 계측목적에 고려하여 선정하여야

한다.

계측위치는 지반상태와 설계가 변경되는 지점, 재료가 변경되는 지점, 구조물의 구조적, 재료적 취약부 및 과도한 변위가 우려되는 지점 등을 선정하는 것이 일반적이나 연장이 긴 구조물 또는 공사현장이 광범위한 경우에는 전체 시공현장의 대표적인 장소를 시험구간으로 선정하고 집중적인 계측을 수행, 그 결과를 잔여구간에도 적용할 수 있도록 하는 것이 필요하다. 이 경우 시험구간은 아래와 같은 지점에 선정하는 것이 유리하다.

- ① 비교적 단순하고 대표적인 지반상태를 갖는 지점
- ② 주변에 특수시설이 없는 지점
- ③ 설계와 시공면에서 대표적인 지점
- ④ 기기의 설치와 계측이 용이하며 공사에 지장을 적게 주는 지점

(3) 계측기기의 설치 및 측정

1) 계측기기의 설치

계측기기가 정상적으로 작동되기 위해서는 기기설치가 잘 되어야 하며 이를 위해서는 작업자의 설치방법 숙지, 사전점검과 함께 기기의 작동여부 검사 등이 선행되어야 한다.

기기의 설치에 있어서는 설치방법 숙지 외에도 제품의 특성별로 특별히 주의하거나 고려해야 될 내용 등을 제품의 매뉴얼을 통하여 사전에 파악해놓고 기기의 조립방법, 단계별 설치방법 및 표준설치 단면도 등을 숙지해야 한다. 또한 설치된 계측기기들은 주기적인 점검 및 유지관리를 통하여 소요 기간동안 기기 작동에 문제가 없도록 하여야 한다.

계측기기 설치에 있어 중요한 사항은 계측기기의 이상 및 고장, 설치의 오류 등에 대비하여 중요 위치에는 반드시 계측기기의 수효에 餘裕 (redundancy)가 있도록 배려하는 것이다.

2) 비상시 대책 수립

계측수행 중에 긴급처리를 요하는 문제가 발생할 수 있기 때문에 계측계획 단계에서 이에 대한 사전대책이 수립되어 있어야 한다.

경우에 따라서는 계측자료를 분석해가면서

향후문제를 예견하고 이에 대한 대책을 강구할 수도 있으나, 일반적으로 문제발생시에는 대책을 강구할 시간적인 여유가 거의 없기 때문에 성공적인 계측을 위해서는 계측계획단계에서 발생 가능한 문제점을 예견하고 이에 대한 단계별 추진대책을 마련해 두어야 한다.

따라서 지반거동 분석 및 과거 類似工事資料 분석으로부터 지반거동의 限界水準을 미리 설정한 후 이를 초과할 경우의 조치내용과 범위를 사전에 고려하는 것이 필요하다.

3) 측정

계측수행자는 계측의 목적을 이해하고 측정에 숙달된 기술자이어야 한다. 계측은 시공상황과 시간성을 고려하여 수행되어야 하므로 측정빈도는 시간과 경비의 과중한 부담없이 중요한 변화 현상을 감지할 수 있도록 적정규모로 이루어져야 한다.

계측기기의 초기 측정은 신뢰성 있는 기초자료로 활용될 수 있도록 시공에 의한 영향을 받기 전에 실시해야 하고, 특히 각 측정일시 사이의 공백기간에도 균열이나 큰 변형과 같은 외형적인 변화나 사고 징후 등에 대한 신호를 감지하는데 주의를 게을리해서는 안되며 이러한 징조가 보이면 既 계획된 측정빈도와 관계없이 즉시 추가의 측정을 실시해야 한다.

측정시에는 계측결과에 영향을 주는 요인 즉, 시공상황 및 기후 등의 중요한 환경상태를 기록하여 이상계측치 또는 결과 분석에 반영시키는 것이 필요하다. 또한 기기의 계측범위가 초과되지 않도록 유의하되 초과우려시는 눈금 재설치(resetting)를 할 수 있도록 유념하여야 한다.

(4) 계측데이터의 수집 및 분석

1) 데이터의 수집

현장 데이터 수집은 주로 야장, 현장데이터 스위트 등을 이용하는 수동측정 방법으로 수행되어 왔으나, 최근들어 전자장비의 개발로 자동데이터 수집시스템을 이용하는 자동측정 방법도 활용되고 있다.

야장은 바로 전단계의 측정치를 도표형태로

볼 수 있기 때문에 특정사항에 대한 비교가 용이하며 취급하기에 편리하다. 현장데이터 스위트는 계측프로그램 특성과 계측기기에 따라 준비되므로 환경변화, 시공상황 등에 대해 상세히 기입할 수 있으며, 야장보다 분실의 위험성이 적고, 복사, 보존작업이 용이한 장점이 있다.

자동데이터 시스템은 해상도의 증가, 측정횟수의 증가, 원거리 데이터 수집 용이, 측정 및 해석시간의 단축 등 다양한 장점을 갖고 있으나 환경적 변화요인이나 공사상황에 대한 세부사항 기재 불가, 과다한 소요경비, 연속적인 전원공급 등 여러가지 단점도 갖고 있다.

따라서 데이터 수집의 경우, 계측기술자가 계측목적과 현장여건, 시공조건 등을 면밀히 검토하여 적정방법을 선정하는 것이 유리하다.

2) 데이터의 분석

수집된 데이터는 즉각적인 조치를 필요로 하는 변화가 발생했는지를 판단하거나 계측된 거동과 예측된 상호비교 또는 거동특성을 분석, 파악하기 위해 도시, 요약되어야 한다.

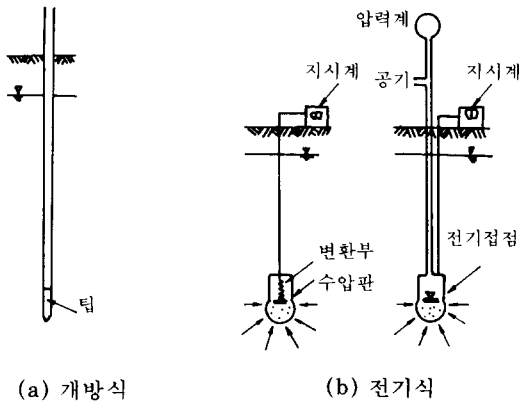
데이터 처리가 완료되면 측정자료의 정확성과 조속한 대처를 요하는 상황이 전개되고 있는가를 판단하고 설계, 시공상의 제 원인 및 영향요소와 측정자료와의 상관관계, 예견치와의 편차 등을 연구, 파악해야 한다.

2.3.3 계측수행

(1) 간극수압의 측정

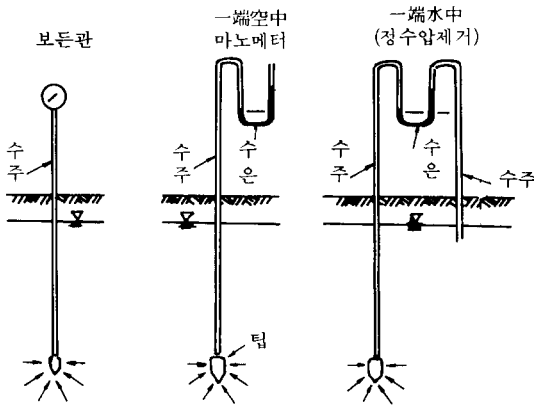
1) 용도

간극수압계는 간극수압을 측정하는 기기로 팁(tip)과 측정장치로 구성되어 있다. 간극수압의 측정대상은 일반적인 의미의 간극수압인 양의 간극수압, 압밀의 진행정도를 조사하는데 필요한 과잉간극수압, 흙댐의 제체상부 및 자연사면에서 불포화토의 압력을 측정하는 負의 간극수압(혹은 suction)으로 구분할 수 있다. 간극수압을 측정하는 기기종류는 그림 1과 같이 측정방식에 따라 개방식, 유압식, 공기압식, 전기식 등으로 대별되며 각 형태에 기초한 여러 종류의 간극수압계가 개발되어 목적에 따라 선택의 폭이 넓어지고 있다.

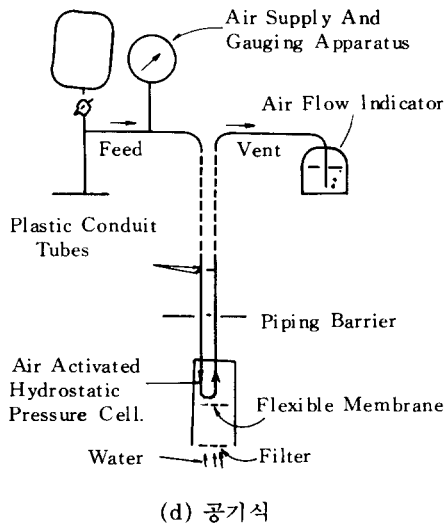


(a) 개방식

(b) 전기식



(c) 유압식



(d) 공기식

그림 1 간극수압계의 종류별 개요도

2) 설치 및 측정

간극수압계는 설치방법에 따라 압입식과 매설식이 있는데 일반적으로 사면과 관련해서는 매설식이 많이 이용된다. 매설하여 설치하는 경우는 투수팁의 막힘을 방지하는 모래채움층과 지표 및 지하수유입을 방지하는 차수층을 설치해야 하는 등 시공에 주의를 요하는 절차가 따른다. 모래채움층의 길이는 시추공 직경의 4배 이상으로 60cm에서 1m 사이가 되도록 하는 것이 일반적이고 차수층의 재료로는 벤토나이트를 물과 반죽하여 사용하거나 기성품인 벤토나이트 펠릿 (pellet) 을 편리하게 사용하기도 한다. 차수층을 만든 후에 시추공의 나머지 공간에는 시멘트, 벤토나이트, 물의 비율을 1:1:6으로 하여 그라우팅하되 차수층의 깊이에 맞추어서 그라우팅양을 계산한 후 이를 확인하면서 그라우팅하는 것이 좋다. 또한 부압을 측정하는데 많이 이용되는 tensiometer의 설치시는 정확도를 위해 팁과 흙의 접촉 그리고 기기 내부의 공기제거에 유의해야 한다.

간극수압의 측정시 측정 오차에 영향을 주는 인자로 팁 및 파이프내의 기포발생, 필터의 막힘, 반응시간(time lag)등이 있으며 이중 반응시간과 기포발생은 매우 중요하므로 별도의 대책을 세워야 한다.

3) 기기의 구비조건 및 비교

간극수압계는 다음의 구비조건을 만족하고 있는 간극수압계중에서 현장 조건과 측정목적에 따라 경제성, 측정의 빈도 등을 고려하여 선정해야 한다.

- ① 충격이나 부식등에 대한 내구성이 있고 특히 팁이 튼튼할 것
- ② 팁 및 파이프는 압력변화에 대한 용적변화가 무시될 수 있을 것.
- ③ 팁 및 파이프는 기포가 정체를 갖지 않을 구조를 갖거나 탈기장치(deairing system)가 있을 것.
- ④ 간극수압계의 설치가 주변토의 거동에 큰 영향을 주지 않을 것.
- ⑤ 부 간극수압의 측정도 가능할 것.
- ⑥ 측정목적에 대해서 확실하고 재현성있는 작동을 나타낼 것.

표 3 각종 간극수압계의 비교

| | 개방식 | 유압식 | 전기식(진동현형) | 공기압식 | tensiometer |
|---------|----------------|------------------|-----------|---------------|-------------|
| 구 조 | 간 단 | 간 단 | 복 잡 | 복 잡 | 간 단 |
| 가 격 | 저 가 | 중 간 | 고 가 | 고 가 | 저 가 |
| 반 응 시 간 | 길 다 | 중 간 | 짧 다 | 짧 다 | 보통~짧다 |
| 원거리 측정 | 특수장비 이용시 가능 | 가 능 | 가 능 | 가능하나 수두 손실 | 가 능 |
| 탈 기 장 치 | 불필요 | 필 요 | 불필요 | 불필요 | 불필요 |
| 장기신뢰성 | 양 호 | 압력측정 장치 별로 다름 | 불량(약 10년) | 불 량 | 양 호 |
| 동 결 문 제 | 있 음 | 있 음 | 없 음 | 없 음 | 있 음 |
| 연 속 기 록 | 곤 란 | 곤 란 | 용 이 | 가 능 | 가 능 |
| 부 압 측정 | 안 됨 | 가 능 | 가 능 | 안 됨 | 가 능 |
| 온도의 영향 | 적 다 | 중 간 | 크 다 | 중 간 | 작 다 |

⑦ 기계부분, 측정부분의 기능이 장기간에 걸쳐 안정성이 있을 것.

일반적으로 간극수압계의 선정시 고려할 중요 사항은 측정범위, 읽음방법, 수명, 반응시간 등으로 표 3은 각 간극수압계의 장단점을 비교한 것이다.

(2) 지하수위의 측정

피압대수층이 없는 지반의 정수위 측정을 위해 주로 사용하며 원리가 간단하여 현장에서 직접제작하여 사용하기도 한다. 구조는 구멍이 뚫린 집수부와 이와 연결된 파이프로 되어 있는데 집수부는 파이프 하부에 직경 5mm 정도의 구멍을 뚫거나 선형의 구멍을 뚫어 시추 공내에 설치하거나 별도로 제작한 후 파이프에 연결하여 설치한다. 시추공과 파이프의 사이에는 현장토로 뒷채움하고 파이프와 지표면의 접촉부는 지표수의 유입 방지를 위해 콘트리트 등으로 카바를 만들어주는 것이 좋다.

지하수위의 측정은 사면에 관측공을 설치한후 수위계를 이용하여 행하는데, 정확한 값을 얻기 위해서는 보링후 지하수위가 안정될 때까지 기다렸다가 측정하여야 한다. 수위계는 운반하여 수동측정을 하는 수동식과 연속적으로 수위를 측정할 수 있는 자동기록식이 있다.

일반적으로 많이 이용되는 수동식 수위계는 수면과 접촉시 외부로 음파나 전기적 신호를

나타내는 탐침자가 연결된 전선을 파이프내로 관입하여 탐침자가 수면과 접촉할 때의 눈금을 파이프 상단을 기준으로 읽고 파이프의 상단을 측정하여 지하수위를 결정한다. 측정후 전선을 끌어 올릴때, 전선이 파이프의 상단 모서리등과 마찰하여 피복이 벗겨지면 절연상태가 불량해져 측정오차를 유발하게 되므로 유의해야 한다.

지하수위 측정방법은 구조가 간단하고 제작비가 저렴한 장점도 있으나 피압대수층이 있거나 토층의 연속성이 없는 경우에는 측정이 곤란하고 반응시간이 긴 단점이 있으므로 이때에는 간극수압계의 이용을 검토해야 한다.

(3) 지표변위 측정

1) 측량법

측량법으로는 삼각측량, 체인측량, 지거측량, 광학수준측량 등의 일반측량법과 최근에 많이 이용되는 전자거리측정(EDM), 사진측량(photogrammetry), 레이저이용법 등이 있다. 측량법에는 측량기와 함께 참조점, 측점이 이용된다. 측량법의 사용에 있어서 가장 큰 문제점은 발생변위의 크기에 비하여 기기오차나 측정오차의 발생치가 상대적으로 크기 때문에 측정설치나 측정에 주의를 기울여야 한다. EDM 이나 사진측량의 경우는 기존의 일반측량 방법의 단점을 많이 보완하였으나 단거리 측정 오차가 크고 대기조건에 영향을 받는다는 단점

이 있다. 사진측량법은 포토 테오도라이트(photo theodolite)나 정밀카메라를 이용하여 연속적인 중첩사진을 얻은후 중첩비교장치로 사면의 움직임을 알아내는 방법으로 단시간에 전체적인 활동상황을 파악할 수 있다.

2) 지표면 변위계(crack gage)

지표면 변위계는 지표에 적당한 간격으로 나무말뚝이나 강재말뚝을 측정지점에 타입하고 그것의 상대변위를 측정하는 것으로 원리와 구조가 간단하여 성토구조물의 측방이나 사면의 안정검토를 위한 지표면의 횡방향 인장변위 또는 균열 측정기기로 널리 사용된다.

말뚝간격이 1m 정도인 경우는 강철파이프, 유리파이프 등을 두개의 말뚝상단에 한쪽은 고정하고, 다른 한쪽은 말뚝의 상단에서 움직일 수 있도록 한다. 또, 말뚝간격이 5~10m 정도가 되면 일반적으로 인바(invar)선의 한쪽을 말뚝의 상단에 고정하고, 다른 한쪽은 말뚝에 도르레

를 설치하여 추를 매달아 놓는다.

말뚝간격이 1m 정도인 경우는 다이알게이지를 이용해서 현장에서 직접 변위량을 측정하거나, 측정량을 5~10배로 확대해서 전기식계기를 이용해 원격측정 또는 기록하는 것이 보통이다.

말뚝간격이 5~10m 정도인 경우는 말뚝사이에 상대변위가 생기면 직접 또는 확대해서 자기 기록하거나 전기적 변환을 해서 원격 기록하도록 한 것이 많이 쓰이고 있다(그림 2참조).

인바선을 사용하는 경우 인바선이 바람에 직접 접촉하게 되면 계측의 정확도가 낮아지게 되므로 P.V.C 파이프 등으로 보호해야 한다. 이때 인바선이 보호파이프에 접촉되지 않도록 유의해야 한다. 또한 기록장치에도 보호상자를 설치하여 계기의 손상을 막아야 한다.

3) 逆懸垂錘 및 懸垂錘 裝置(inverted and hanging pendulum)

역현수추 및 현수추 장치는 구조가 간단하고 장기간의 측정신뢰도가 우수하여 댐의 본체나 기초의 수평변위 측정에 이용되며 그림 3에 설치 예를 나타냈다.

역 현수추 장치는 설치된 앵커의 수평 이동량을 측정하는 방법이며 설치의 측정위치까지 굴착하고, 강선으로 연결된 앵커를 굴착공의 하단까지 내린 후 그라우팅한다. 강선의 타단은 강선이 처지지 않도록 해서 浮體(float)에 연결한다.

현수추 장치는 구조나 측정원리가 역 현수추 장치와 유사하며, 단지 앵커의 위치가 측정장치보다 상부에 있다는 점이다. 이 형식을 이용하는 경우 앵커의 위치와 측정장치의 간격이 10m 이내일때는 강선에 연결된 추를 자유로운 상태로 두기도 하지만, 10m 이상인 경우는 고유진동 주기가 길어져 쉽게 안정되지 않으므로 추를 오일탱크에 넣어 두는 경우가 많다.

역현수추 및 현수추 장치의 측정원리는 동일하다. 즉 강선에 의해 앵커와 연결된 부체가 물탱크내에서 자유롭게 움직이므로 부체의 앵커에 의해서 강선은 항상 수직을 유지하게 되고 앵커가 위치한 지점의 수평변위는 강선을 기준

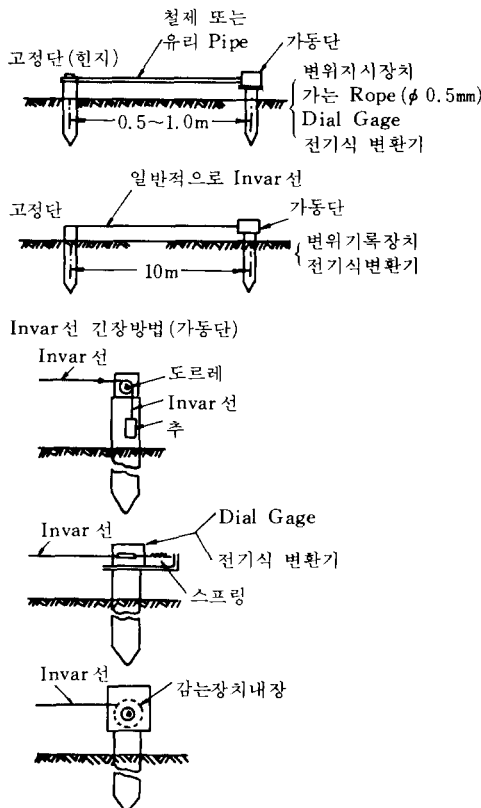
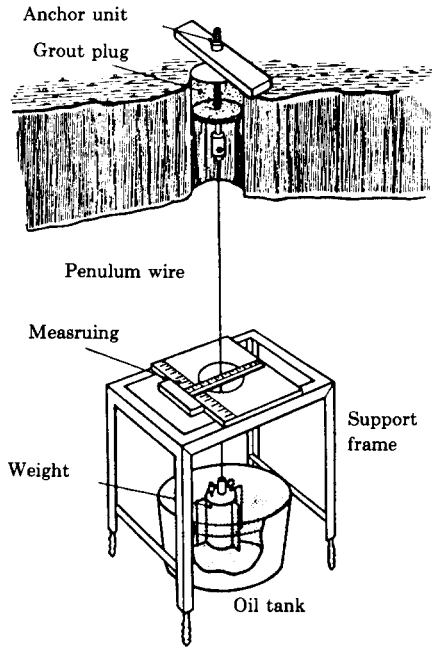
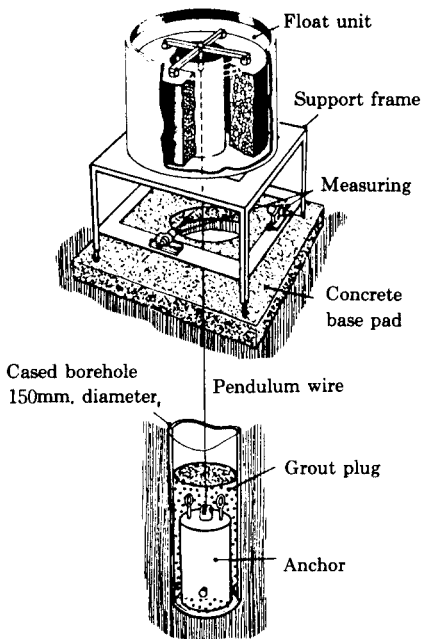


그림 2. 지표면 변위계의 종류



(a) HANGING PENDULUM



(b) INVERTED PENDULUM

그림 3 현수추 및 역 현수추 장치

선으로 해서 T-square measuring frame 으로 측정한다.

일반적으로 동 기기는 영구적으로 매설되므로 장기적인 안정성을 위해 시추공에는 케이싱을 박아 놓는데 부식이 예상되는 곳에 서는 P.V.C 파이프를 사용해야 한다. 또한 시추공의 직경과 경사도에 따라 측정범위가 제한되므로 사전에 지반의 수평변위량을 추정하고 그에 따라 굴착공의 직경을 결정해야 한다.

4) 지표면 경사계 (tilt meter)

지표면 경사계는 사면의 잠재적인 활동판정이나 활동이 진행되고 있는 사면의 활동면 주변에 설치하여 활동의 확대 가능성 유무를 검토하기 위해 사용한다.

지표면 경사계는 다종이 고안되어 있는데, 대부분이 일종의 수준기이고, 토공에서는 주로 기포관식 경사계가 사용되고 있다. 기포관식 경사계에도 자기 기록식과 수동식이 있다. 자기기록식은 전해질이 채어진 기포관에 세개의 전극이 연결되어 저항이 경사변화에 따라 변하도록 되어 있으며 수동식은 경사변화에 따른 기포의 이동량을 측정하도록 되어 있다.

설치는 지표를 약 20cm 굴착하고 직경 10cm, 길이 1m 정도의 나무말뚝이나 직경 5cm 길이 1m 정도의 강봉을 약 80cm 타입한 후 콘크리트를 타설한다. 콘크리트 타설표면에 유리판등 편평한 판을 수평이 되도록 올려놓아 기초대를 제작하고 그위에 지표면 경사계를 설치한다 (그림 4 참조).

관측의 개시는 기초대에 콘크리트를 타설한 후 최소 1주일이 경과한 다음에 실시해야 한다. 측정빈도는 대상지반의 활동정도, 중요도 등에 의해 결정되는데 통상 1주일에 1회 측정한다. 계기의 보호를 위해 보호상자를 씌운 경우, 측정을 위해 보호상자를 열면 온도변화로 인해 기포가 급격히 변화하는 일이 있으므로 주의해야 한다.

(4) 지중변위 측정

1) 경사계 (inclinometer)

경사계는 탐침자 (probe), 기록계 (indicator),

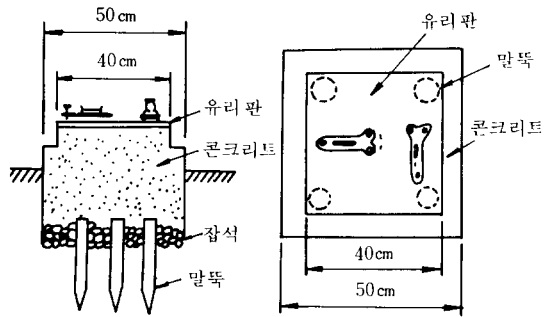
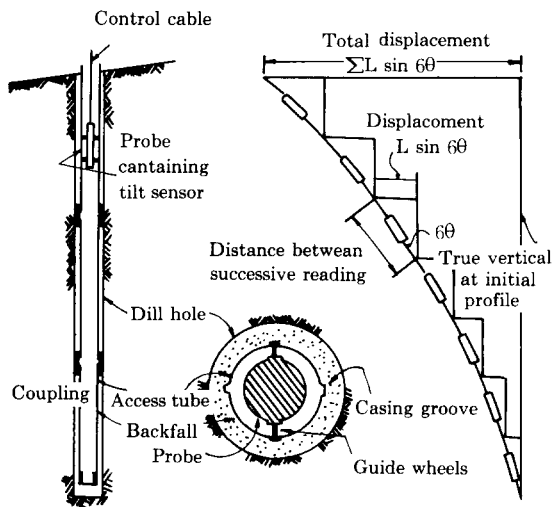


그림 4. 지표면 경사계의 설치예

케이블 및 튜브(access tube)로 구성된다. 탐침자에는 경사를 감지하기 위한 센서가 내장되어 있는데 내장되는 센서로는 전기저항 스트레인 게이지, 진동현(vibrating wire)형 변형게이지, 서보가속도계(servo accelerometer)형 게이지 등이 있다. 기록계는 센서에서 감지된 경사각을 라디안 또는 직접 수평변위량으로 나타낸다. 또 케이블은 탐침자의 중량에 의해 늘어지지 않도록 되어 있으며, 방수가 되어 있다. 튜브는 측정 대상지반과 일체로 움직이도록 연성이 좋은 알루미늄이나 플라스틱으로 제작되어 있고 탐침자를 일정한 방향으로 유도하기 위하여 4개의 홈이 만들어져 있다(그림 5참조).



i) 경사계설치 ii) 경사계 파이프 iii) 측정원리

그림 5 경사계(inclinometer)의 설치도

설치는 계측할 지점에서 지지층까지 착공한 후 튜브를 공내에 매설한다. 이때 튜브의 하단부는 지지층내로 1.0~1.5m 정도 관입시킨 후 고정한다. 튜브의 하단부는 지지층내로 1.0~1.5m 정도 관입시킨 후 시멘트로 지지층 부분을 그라우팅하고, 나머지 튜브와 굴착공 사이는 현장토로 뒷채움 하는 것이 이상적이나 현장에서 이러한 작업은 쉽지가 않으므로 전체를 콘크리트로 충전시키는 것이 좋다.

측정은 탐침자와 기록계를 케이블로 연결한 후 탐침자를 튜브의 저면부까지 내려놓는다. 하부로부터 0.5m 씩 들어올리면서 측정을 계속한다. 측정의 정확도를 높이기 위해 한 방향의 측정이 끝나면 탐침자를 180° 돌려서 반복측정한다.

측정하지 않을때는 튜브의 내부에 흙이나 오물이 들어가는 것을 막기 위해 덮개를 씌워놓는다. 측정시 덮개를 열고 즉시 측정을 하면 튜브내의 온도와 대기온도와의 차이로 인해 오차가 발생할 우려가 있으므로 5~10분간 대기

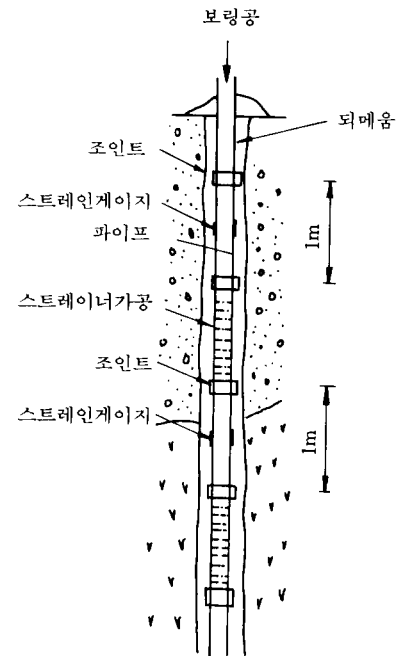


그림 6 파이프 변위계 설치도

한 후 측정을 실시한다.

2) 파이프 변위계

파이프변위계는 파이프외면에 스트레인게이지를 일정한 간격으로 부착장소당 2개 또는 4개씩 부착시켜 지중에 매설 시킨 후 지중수평변위에 따른 파이프의 변형을 스트레인게이지를 이용하여 측정하는 것이다(그림 6 참조).

종래 파이프 변위계의 스트레인게이지의 부착간격은 2m 정도로 사용되어왔으나 800여개 정도의 실시예를 검토한 결과 간격이 큰 것이 문제로 밝혀져 일본 토목연구소에서는 파이프변위계의 거동을 이론적으로 해석하여 스트레인게이지의 부착간격을 표 4와 같이 제안하고 있다.

표 4 PVC 파이프 변위계의 스트레인게이지 부착간격

| 사면종류 | N치 | 탄성계수(E:kg/cm ²) | 스트레인게이지간격 |
|----------|-------|-----------------------------|-----------|
| 점질토 사면활동 | 10이하 | 50 이하 | 90cm 이하 |
| 붕적토 사면활동 | 10~50 | 50~100 | 70cm 이하 |
| 풍화암 사면활동 | 50이상 | 300 이상 | 45cm 이하 |

현재 이용되는 파이프 변위계의 수명은 스트레인게이지의 방수가 문제되어 1~2년 정도에 불과하므로 장기간의 활동면조사를 위해서는 계속적인 파이프 변위계 설치 또는 다른 방법을 검토하여야 한다.

3) 침하계

절토 및 자연사면이나 성토의 안전관리를 목적으로 하는 경우에는 수평변위나 경사가 주요 계측항목이 되는 것이 일반적이나 연약지반에서의 성토와 같이 현저한 침하가 예상되는

현장에서는 침하의 계측이 반드시 필요하다.

침하계는 간단한 침하기구를 설치한 후 부동점으로 부터 측량하여 측정하는 변위말뚝, 표면침하판 및 심층형 침하계 등이 있으며, 여러가지 튜브 및 침하판을 설치한 후 튜브내에 탐침자를 삽입시켜 침하판의 변화를 측정하는 cross-arm 식 침하계, 소자식 침하계 등이 있다. 또한 연약지반상에 성토 구조물내의 각 단면의 침하형상을 구하기 위해 사용되는 전단면 침하계(full profile settlement gage)가 있으며, rod나 wire를 고정시킨 후 여러가지 측정장치를 이용하여 다측점의 침하를 측정할 수 있는 extensometer 식 침하계도 있다.

현장에서의 변위는 단순히 일 방향으로만 발생하는 것이 아니므로 기존의 침하계를 개량하여 수직 및 수평변위 모두를 측정할 수 있도록 고안한 지중변위계도 있는데 여기에는 전단면 침하계에 자기판 및 자기 탐침자를 추가하여 이용하는 것도 있고(그림 7 참조), 경사계의 튜브 주변에 자기판이나 스테인레스 스틸을 매설하여 이용하는 것도 있다.

(5) 기타측정

1) 강우량 측정

사면붕괴의 주요인의 하나인 강우량과 사면이동의 관계를 파악하기 위해서는 강우량 자료가 필수적이다. 강우량 자료는 현장주변의 관측소 및 측후소의 자료를 조사하거나 우량계를 이용하여 현장에서 직접 측정하여 이용할 수 있다.

우량계의 종류에는 여러가지가 있지만 많이 이용되는 간단한 기구로는 간이 수동우량계,

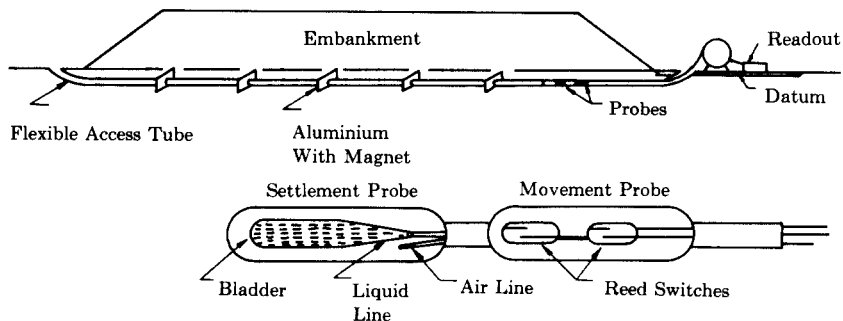


그림 7 전단면 침하계와 자기판 / 리드 스위치의 결합

사이펀식 자기우량계 등이 있다. 관측소 및 측후소의 강우자료(특히 시 강우자료)를 이용할 때는 지형차이 및 이격거리에 따라 강우형태가 달라지는 경우가 많이 있으므로 주의를 해야한다.

2) 토압

사면과 관련하여 토압을 측정하는 경우는 거의 없어 필댐이나 옹벽구조물 등의 특별한 현장에 한정되어 이용되고 있다. 실제 측정에 있어서 토압과 간극수압은 각기 독립한 것이 아니고 상호관련이 있으며, 특히 유효응력을 알고자 하는 경우에는 토압과 간극수압을 모두 측정하여야 한다.

토압계는 受壓板의 변환기 작동방식에 따라 여러 종류로 분류할 수 있는바 그 원리와 장단점을 이해하여 계측목적에 맞는 적절한 기종을 선택하는 것이 필요하다. 토압계를 설치할 경우 수압면이 직접 흙에 접해 있지 않거나, 사력층에 접하여 집중하중이 작용하게 되면 정도 높은 측정치를 얻을 수 없고, 또한 수압판의 설치로 인해 주변흙의 응력분포가 달라질 수 있으므로 수압판의 형태와 위치선정시 주의를 기해야 한다.

2.3.4 계측사례

본 절은 우리나라의 산사태 원인구명을 위해 수행한 일련의 연구결과를 요약한 것으로 계측부분의 강좌와 직접 관련이 없는 계측사례 외의 내용에 대해서도 연구의 이해를 위해 소개하였다.

(1) 서론

인위적 지형변화에 의한 것을 제외한다면 대부분의 사면붕괴는 호우시에 발생한다. 예로 과거('77-'87년) 우리나라의 산사태 발생자료 분석 결과를 보면 산사태의 98% 정도가 7~9월에 발생하고 또한 동 기간중의 강우량이 년 강우량의 56% 정도를 차지하고 있다.

그동안 사면붕괴의 주된 원인이 강우라는 사실을 기초로 강우와 사면붕괴의 관계를 분석

하는 많은 연구가 수행되어 왔는데 이들은 크게 사면붕괴 자료의 축적에 의한 통계적 해석방법 그리고 강우에 따른 사면의 변화를 측정하여 분석하는 계측에 의한 방법으로 분류할 수 있다. 또한 이러한 연구결과들은 연구방법에 상관없이 선행강우량해석과 강우강도해석으로 대별할 수 있다. 최종적으로 이러한 분석 자료들은 사면발생기구 규명에도 이용되지만 더욱 확장하여 사면붕괴 예측을 위한 예보체제로 활용되기도 한다.

'70년대의 일본, 뉴질랜드, 홍콩 등의 연구결과는 함수비 변화와 이에 따른 전단강도에의 영향을 기초로 한 선행강우량해석이 지배적이었으며 여기서 고려된 강우일수는 대략 2週가 된다. 그러나 홍콩의 경우 Lumb(1975)의 선행강우량해석이 이용되어 오다가 최근에 Brand(1985), Premchitt(1986) 등에 의해 최대 시우량 해석으로 수정되었으며, 일본은 이께다(1986), 무라야마(1988) 등의 결과로부터 최근까지도 변함없이 선행강우량 해석이 일반화 되어 있다.

이러한 연구경향은 대상지역의 수리지질 및 강우 특성에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 즉 홍콩은 사면이 비교적 투수성이 큰 지질 및 토질로 구성되어 집중호우에 의한 빠른속도의 사면붕괴가 많은 반면, 일본은 많은 사면이 세립토로 이루어지고 장마 및 융설 등에 의한 완만한 붕괴속도를 갖는 地滑形態의 사면붕괴가 많으므로 이를 해석하는 방법에 있어서도 차이가 있을 수 밖에 없을 것이다.

(2) 조사방법

우리나라 사면붕괴의 주 요인을 규명하기 위해 사면붕괴의 전형적인 지역에 대한 정밀조사 및 계측을 실시함과 동시에 既往의 사면붕괴 자료의 통계적해석을 수행하였으며, 또한 '80년대의 대규모 사면붕괴 지역에 대한 현장조사를 수행하였다.

계측에 의한 분석은 전국의 60개 사면붕괴 지역의 현장답사 자료를 토대로 우리나라의 전형적인 사면붕괴 지역을 도출하여 1개소의

표본지구로 선정하였다. 이 표본지구에 대해서는 지질조사(시추, 탄성파탐사 등), 지형조사, 실내 및 현장시험(물성시험, SPT, 투수 및 침투 시험)등의 정밀조사를 실시하고, 이곳에 계측기를 매설하거나 기존의 우물을 이용하여 강우량(우량계), 지하수위(스트레이너 및 수위계), 간극수압(진동현형 간극수압계), 사면이동(서보가속도계형 경사계)을 측정하여 분석하였다.

사면붕괴 자료의 통계해석은 과거 11년간의 산사태 발생자료 및 최근의 산사태 조사자료를 수집하여 신뢰성이 있다고 판단되는 자료를 선별한 후 이를 토대로 산사태의 발생과 강우의 관계를 선행강우량 및 강우강도 관점에서 분석하였다. 사면붕괴지역의 조사는 현장상황을 보다 정확하게 판단하기 위해 사면붕괴 발생 직후 답사를 실시하였으며 현장조사 체크리스트, 간이지구, 현장참고자료 등을 이용하여 조사하였다.

(3) 결과고찰

표본지구에 대한 계측자료의 분석 및 과거 사면붕괴 자료의 통계해석 그리고 사면붕괴지의 현장조사를 통하여 강우와 사면붕괴에 대해 얻은 결과를 고찰하면 다음과 같다.

1) 기왕의 60개 사면붕괴지역에 대한 현장답사결과를 분석하여 서울 구로구 시흥 2동 산 96번지를 표본지구로 선정하였다. 본 지역일대는 과거에 2차례의 사면붕괴가 발생하여 대규모의 인명 및 재산 피해를 초래한 곳으로 사면붕괴 尤甚地域이다. 또한 동 지구는 경사도가 $20^{\circ} \sim 35^{\circ}$ 이며 기반암이 흑운모 호상편마암으로 대보화강암과의 경계부에 인접한 지역이며 토층과 기반암(MW)의 경계는 1~4.6m로 나타났고 표토층의 토질은 SM-SC에 속한다(그림 8참조).

2) 표본지구에 대해 계측을 실시한 결과, 강우량과 지하수위의 관계는 집중호우기에 지하수의 변동이 크고 강우에 따라 지하수의 변동이 매우 예민하였으며 영향시간도 매우 짧음을 알수 있었다. 최대강우강도와 최대 지하수위의 시차는 0~18시간이었으며, 따라서 지하수위의 상승에 의해 사면붕괴가 일어난다고 가정할 경우 사면붕괴는 최대강우강도와 일치하는 시간에 발생할 가능성이 가장 크다고 볼 수 있다(그림 9참조).

경사계에 의한 사면의 이동은 지표부근이 가장 크고 이동속도는 매우 작으며(그림

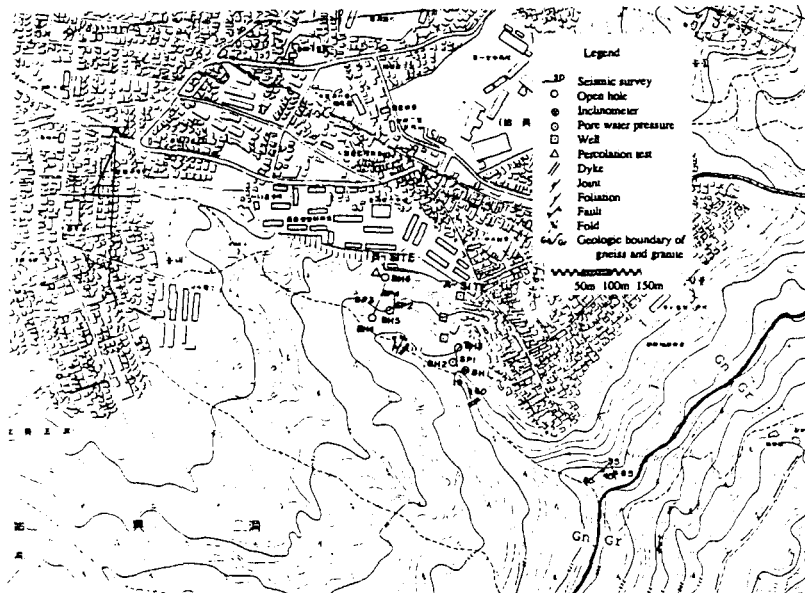


그림 8 표본지구 정밀조사 현황도

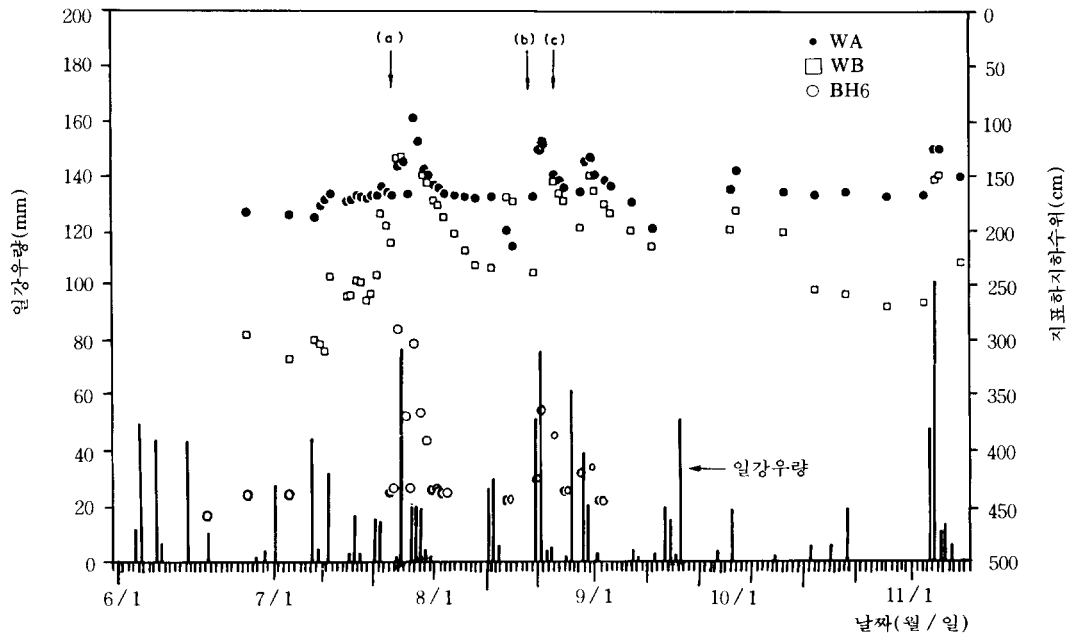


그림 9 일강우량에 따른 지하수위의 변동

10 참조) 또한 사면의 변동량(변위량의 변화량)은 강우일수의 변화량과 경향이 비슷하고 사면의 표면부에서 나무의 기울어짐 현상이 현저한 것 등으로 보아 동 지역은 季節的 葡行(seasonal creep)을 반영하는 지역으로 사료된다. 그림 10에서 알 수 있듯이 토층의 심도별 상대이동은 2.2m 부근에서 가장 크게 나타나고 있어 포행중 집중호우 등에 의해 사면붕괴가 발생한다고 가정할 경우 파괴면은 이 깊이에서 생성될 수 있을 것으로 보인다. 그러나 상기의 내용은 짧은 기간의 측정 및 분석에서 나타난 결과이므로 장기적인 측정에 의한 심층연구가 필요하다고 사료된다.

3) 강우조건과 사면붕괴의 관계를 규명하기 위해 강우강도와 선행강우량 관점에서 분석한 결과 강우강도의 경우는 제한된 자료이지만 최대 시우량 시각과 산사태 발생시각이 거의 일치하고(표 5 참조) 또한 붕괴형태 및 특징, 붕괴면의 크기 및 토질 등에 관한 현장조사 결과로 미루어 사면붕괴는 강우강도에 영향을 받는다고 가정할 수 있었다. 선행강우량과의 관계는 과거자료의

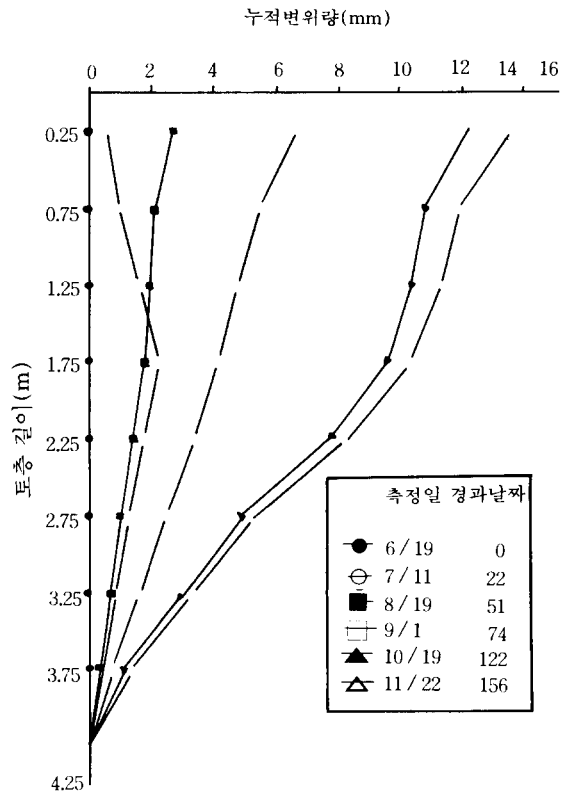


그림 10 토층 깊이별 누적변위량

표 5 최대 강우강도와 산사태발생의 시각차

| 지역 | 시간차 | -2 | -1 | 0 | + | 1+ | 2+ | 3+ | 4+ | 5+ | 6+ | 7 | 시우량 (mm) | 최 대 시우량 | 일우량 (mm) | 전일우량 (mm) | 발생 년도 |
|-------|-----|----|----|---|---|----|----|----|----|----|----|---|----------|---------|----------|-----------|-------|
| 서울·구로 | | | | | | | | | | | | | 30.1 | 60.2 | 253.4 | 81.6 | '87 |
| 경기·김포 | | | | . | | | | | | | | | 43 | 43 | 211 | 39 | " |
| 거창·신원 | | | . | | | | | | | | | | 32.1 | 34.5 | 215.2 | 15.8 | " |
| 거창·남상 | | | . | | | | | | | | | | 32.3 | 32.3 | 60.3 | 150 | " |
| 전북·익산 | | | | | | | | | | | . | | 62 | 70 | 212.2 | 0 | " |
| 산청·신안 | | | | | . | | | | | | | | 22 | 31 | 172 | — | " |
| 산청·금서 | | | | | . | | | | | | | | 49.5 | 49.5 | 238.8 | — | " |
| 포천·군내 | | | | | . | | | | | | | | 70 | 70 | 235.5 | 51 | " |
| 경기·성남 | | | | | | | | | | . | | | 45 | 59 | 327 | 57 | " |
| 충남·부여 | | | . | | | | | | | | | | 42 | 77 | 541.9 | 35.2 | " |
| 충남·부여 | | | | | | | | | | | | | 72 | 77 | 541.9 | 35.2 | " |
| 부산·사하 | | | | | | | | | | | | | 56 | 56 | 264 | 144 | '89 |
| 전남·장성 | | | | . | | | | | | | | | 68 | 68 | 429.5 | — | " |
| 전남·장성 | | | | . | | | | | | | | | 54 | 68 | 338 | — | " |

주) +1은 최대강우강도시간 1시간 이후에 산사태가 발생한 것임.

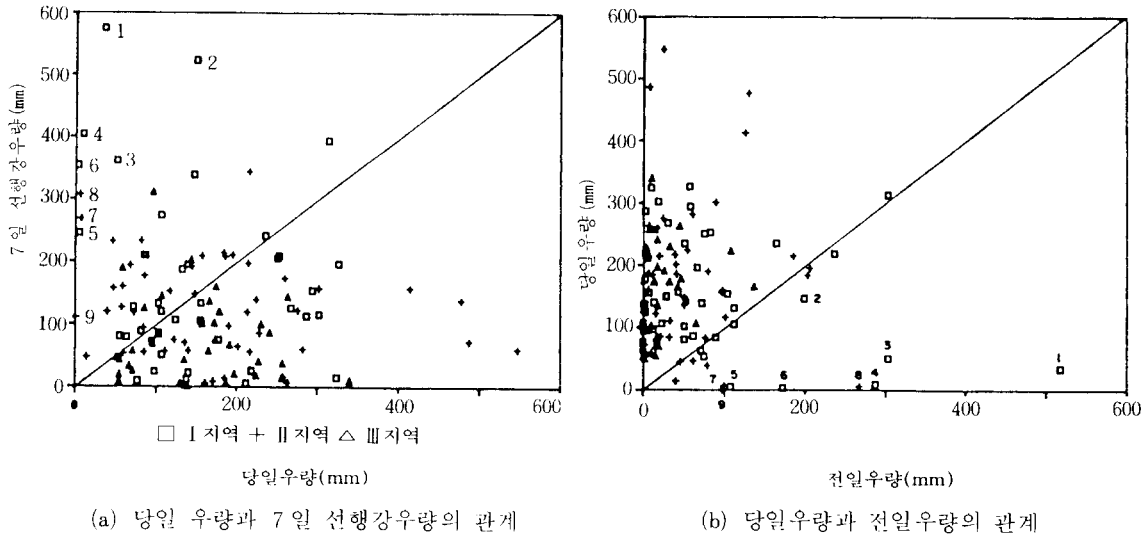


그림 11 산사태 발생 당일우량과 선행강우량의 관계(1977~1988년 자료)

미비 및 부정확성으로 인해 결과의 타당성을 증명하기가 곤란하지만 선행강우량과 당일 강우량의 관계에서 당일우량이 더 큰 영향을 주었음을 알 수 있었는데 일우량은 시 강우강도를 반영하는 최소단위이므로 상기의 가정을 간접적으로 입증할 수 있다 (그림 11 참조).

4) 사면붕괴지의 현장조사에 의하면 상부파괴면(scarp)에 土窟(natural pipe)이 생성되어 있는 경우가 많이 관찰된 것이 특징적이었다(사진 1 참조). 이러한 토굴은 사면의 안정에 양면성(배수로 역할에 의한 안정효과와 지하수 집중시 토굴의 파괴에 의한 불안정요인)을 줄 수 있는 것으로써 臨界雨

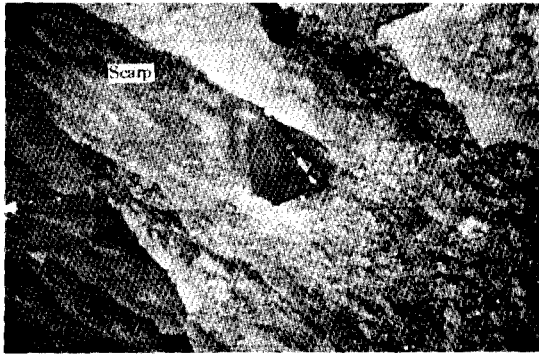


사진 1 풍화토층내의 취약부의 생성된 토굴

량 초과시 자연 사면붕괴의 주 요인이 될 수 있다. 현장조사로부터 토굴의 생성원인은 다음과 같은 위치에 지하수의 흐름이 집중될 때 발생할 수 있는 것임을 알 수 있었다.

-사면을 구성하는 재료내의礫質 사이의 큰 간극.

-崩積層과 殘留土層 또는 토층과 암반사이 등 異質層 사이의 취약부.

-殘留節理(relict joint), 들짐승의 활동 등

(4) 결론

사면 붕괴 자료의 부족 및 부정확성, 표본지구의 대표성 등 여러가지 제한이 있지만 상기의 결과로부터 우리나라의 사면붕괴는 강우강도에 영향을 받는 것으로 볼 수 있으며, 지질구조적 불연속에 의한 토굴의 생성도 강우에 의한 사면 파괴의 주 요인중의 하나인 것으로 사료된다.

參考文獻

1. 건설부, "방재종합대책 중장기 계획조사 보고서 (3권)," pp.3-361~3-701, 1988.
2. 한국건설기술연구원, "사면의 안전진단 및 보호공법," 연구보고서, 전기연 89-GE-111, 331pp., 1989.
3. 한국전력공사 기술연구원, "토목구조물의 현장계측에 관한연구," KRC-87H-TO4, pp.25~221, 1989.
4. (주)대우엔지니어링 기술연구소, "토공작업시 안정성 확보를 위한 현장계측의 활용에 관한 연구," 연구보고서, DWERI-CE-13, 493pp., 1989.
5. 홍성완, 이명환, 조천환, 구호본, 문홍득, "산사태 부문 방재종합대책 중장기 계획 조사," 건설기술연구연보, Vol. 1, pp.125~136, 1989.
6. 篠原洋司 編, "現場のための 土木計測 ハンドブック," 土木施工, Vol. 28, No.10, 臨増號, pp. 425~461, 1987.
7. 川村國夫, 佐野博昭, "降雨によるのり面崩壊," 土と基礎, Vol. 36, No.5, pp.61~66, 1988.
8. Brand, E. W., Premchitt, J. and Phillipson, H. B., "Relationship Between Rainfall and Landslide in Hong Kong," "Proc. 4th Int. Symp. on Landslides, Vol. I, Toronto, pp. 377-384, 1984.
9. geotechnical Control Office, "Geotechnical Manual for Slopes," GCO, Hong Kong. pp.123~132, 1984.
10. Ikeda, T. and Ogawa, S., "Field Investigation in Landslide Areas and Shearing Strength of Soil for Use in Stability Analysis," Natural Disaster Science, Vol. 8, No.1, pp.29-44, 1986.
11. Lumb, P., "Slope Failures in Hong Kong," Qtrly Jour. Eng. Geol., Vol. 8, pp.31~65, 1975.
12. Premchitt, J., Brand, E. W. and Phillipson, H.B., "Landslides Caused by Rapid Groundwater Change," Groundwater in Engineering Geology, pp.87-94, 1986.