

# 지반구조물 재해 및 위험분석 연구

On Geotechnical Structure Risk & Hazards

## 토목시공

전문교육 강 의 자 료



글 |尹吉林

(Yoon, Gil Lim)

한국해양연구원 연안개발

에너지연구부 책임연구원

E-mail : glyoon@kordi.re.kr

Great concerns on geotechnical risk & hazard assessment have increased due to human and economic damage by natural disasters with recent global climate changes. In this paper, geotechnical problems in particular, landslide which is interested in European countries and North America, were mainly discussed. For these, 18 key topics on geotechnical risk and hazards which had been discussed at the LARAM 2008 workshop in Italy were analyzed after grouping by subjects. Main topic contents consisted of applications such as field measurement, early warning systems, uncertainty analysis of parameters using radar, optical data and statistical theory and so on.

### 1. 서론

21세기 지구온난화 현상으로 기후변화가 빈번히 발생하고 있는 시점에서 자연재해에 의한 피해로 기반시설물의 위험도 관리에 대한 관심이 증대되고 있다. 국내·외에서도 각종 구조물의 위험도 평가 및 관리에 관련된 연구가 시작되어 많은 관심을 가지고 있는 추세이다. 이러한 기반 시설물 공사가 이루어지는 과정에서 불가피하게 발생하는 인공사면이나 산사태 문제에서도 위험도 평가(risk assessment) 및 위험도 관리(risk management) 이론이 관계된다.

### 2. 국제적인 재해의 현황

자연재해로 인한 위험도는 향후 더욱 증가할 것이라고 예측되고 있다. 이러한 예측은 기후변화, 환경파괴나 도시화 확대와 같은 재해 효과에 영향을 미치는 불리한 요인이 증가되는 현재의 추세로도 가능하다. <그림 1>은 미래의 기후 및 환경변화

로 초래될 수 있는 자연재해를 나타내며, 산사태와 토석류 피해를 포함하고 있다. 기후변화 이외에도 산사태와 그에 관련된 토석류(debris flow) 및 이류(mud flow) 피해가 더욱 빈번해지고 광범위하게 발생하고 있다는 것이 세계적인 추세이다. 주요한 원인으로는 국토개발, 도시화 및 벌목의 증가 등이며, 재해에 대한 취약도(vulnerability)는 도시의 고지대를 선호하는 대규모 인구의 증가에 의해 더욱 불리하게 작용한다. 결론적으로 미래에 산사태 재해에 대한 영향은 현재에 비해 상당한 증가가 있을 것으로 예측되고 있다.

### 3. 사면재해 및 위험도에 관한 국제적 연구동향

#### 3.1 현장계측 및 조기경보시스템

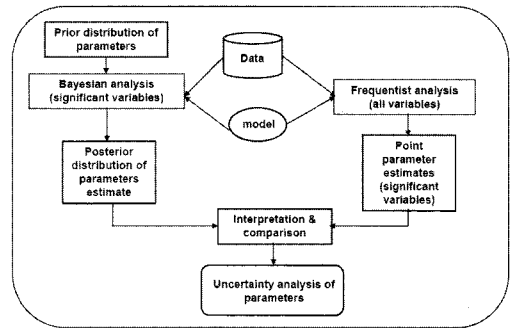
현장계측 관련한 주제는 특정지역에서 계속된 변위를 공간적으로 정량화하기 위해 지구통계학적 크리깅(Kriging) 기법을 적용한 내용이다. 이

를 통하여 산사태 구간의 경계를 탐색하고 추가적인 계측기의 최적 설치위치를 결정하는 것이 목적이다. 현장계측에서 보다 진보된 조기경보시스템(Early Warning System; EWS)은 오스트리아의 Wien 대학 등 10개 대학 및 기업에서 공동 연구한 내용이다.

국부적으로 발생하는 산사태의 조기경보에 대한 계측과 지반활동에 기반한 모델들을 CHASM 및 진행성 파괴 분석을 통하여 통합한다. 또한, 알은활동 및 토석류에 대한 민감성(susceptibility)과 강우한계 등 유발사건, 그리고 기왕의 빈도-규모 해석을 통하여 지역적 규모(regional scale)의 산사태 조기경보를 계산할 수 있다. 그리고 국부적, 지역적 EWS를 각각 통합하여 진보된 재난관리 시스템을 구축하고자 하는 연구이다.

### 3.2 자료분석 및 불확실성

재해에 미치는 요인(파라미터)을 평가하는데 있어 불확실성을 고려하기 위한 베이지안(Bayesian) 로지스틱(logistic) 회귀모델 활용 예로써 산사태의 민감도에 대한 지도작성 연구가 네덜란드 ITC(International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation)에서 수행되었다. 산사태는 불연속적인 물리적 현상으로써 불확실성이 크며, 공간적 확률을 맵핑(mapping)하기 위한 연구가 과거 20년간 계속되어 온 결과, 통계학적 방법에 기초한 다양한 빈도평가 기법이 개발되었다. 하지만 통상적으로 쓰이는 통계학적 방법이라 할지라도 불확실성에 대처하기에는 충분치 못하며, 베이지안 통계기법은 이러한 불확실성을 보다 합리적으로 정량화할 수 있다는 측면에서 활용가치가 있다.



〈그림 1〉 연구모델의 일반적 개요

〈그림 1〉은 데이터 및 모델 불확실성을 정량화하기 위한 과정을 나타낸다. 국내에서는 2000년 이후 개발된 로지스틱 회귀모델을 가지고 산사태 발생여부에 영향을 미치는 변수를 모형화하여 주요지역의 산사태 예측도 작성에 활용한 예가 있다(2006).

수리지질학적 재해에 크게 영향을 받은 지역에서 space-borne 인공위성(또는 합성구경) 레이더의 간접계 관측에 의해 활동을 탐지 및 구체화하고 모니터링 하는 인명보호 목적의 국가위성 모니터링 시스템을 개발하고자 하는 연구가 이탈리아에서 진행되고 있다. 이 레이더는 밀리미터 단위의 정확도로 변위를 평가할 수 있어 분지구모에서 특정구역을 분석할 때 지반변형으로 영향을 받은 지역을 탐지할 수 있다. 이러한 특정구역 자료를 해석함으로써 지형 및 지질학적 지도와 지층 및 지반공학적 자료 등의 통합이 가능하다. 또한, 이러한 통합된 해석을 통하여 정밀한 규모로 지반변형의 지질학적 유발요인과 지반이동의 진행을 판단할 수 있다.

### 3.3 지반 위험도 정량화 및 평가

과거 유지관리 기록을 활용하여 도로 전 노선의 산사태 확률과 위험도를 정량화 하기위한 연구가

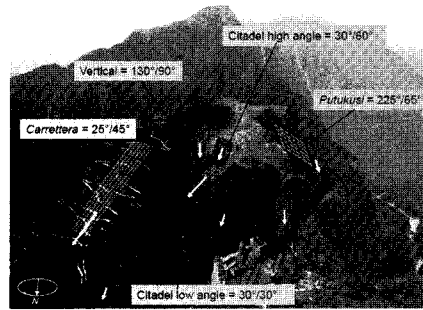
네덜란드에서 진행되고 있다. 위험도 정량화란 산사태가 어느 정도 규모로, 언제, 어디서, 얼마나 자주, 그리고 어느 정도의 피해규모로 발생할 것인가 등의 예측이다. 정확한 연대와 피해규모를 포함한 유지관리 기관의 과거 기술보고서는 위험도를 보다 정밀하게 평가하는데 유용하다.

### 3.4 사면의 불안정과 해석

대규모 복합사면의 불안정과 변위에 대한 다차원적 해석 연구가 캐나다에서 진행되고 있다. 시·공간에 따라 변화를 보이는 사면의 변위를 분석하고 사면파괴를 지배하는 지질학적 중요인자를 4차원적으로 구하고자 함이 목적이다. 이러한 조사는 정밀한 3차원 모델링의 중요성을 나타내고, 산사태 거동의 수치적 모사는 재해 및 위험도 관리에 있어 매우 중요한 가치를 지닌다. 변위의 방향은 주로 전단면(shear surface)의 3차원적 기하형상에 의해 지배되고, 변위속도는 역학적 강도 파라미터의 분포에 의해 지배되며, 시간에 따라 변동하는 사면거동은 유발조건을 변화시킴으로써 제어가 가능하다. <그림 2>는 계측과 모델링에 의한 변위양상을 비교한 것이다.

수치해석을 통하여 페루의 산 정상에 위치한 성채(Machu Picchu Inca citadel)의 산사태 안정성 평가와 그 지역에서 산사태로 인한 위험도 경감을 위한 마스터 플랜을 개발하는 연구가 이탈리아에서 수행된다. 2001년 3월, 인접한 산사태 재해 발생과 잠재적인 붕괴 가능성으로부터 성채를 보호하기 위하여 UNESCO를 비롯한 Kyoto 대학, Canadian Geological Survey, Czech-Slovak initiative 및 Italian project Interfrasi가 각각 지반모니터링과 모델링, 지구물리학적 조사, 균열

측정 모니터링과 조사, 원격탐사와 지질학적·지형학적 조사 및 평가를 실시하였다. 단일 산사태 평가의 국부적인 범위에서부터 지역적인 범위까지 실제적인 재해 위험도 수준을 정의하고자 하였으며, 결과적으로 지방정부 차원의 위험도 경감 조치를 개발함으로써 위험도를 감소시키기 위한 계획을 수립하는 것이 목적이다.



<그림 2> 대상지역의 활동방향성 파악결과

### 3.5 점토 및 사질토 지반의 파괴

러시아에서는 모스크바 지역을 중심으로 한 주라기 점토(Jurassk clays)에서 깊은 블록활동 산사태의 형성과 활성화 메카니즘이 연구되고 있다. 주라기 점토지반의 블록활동 산사태 응력해석을 통하여 연직·수평변위를 계산하고 활동 메카니즘을 분석하여 보강대책을 계획하고자 하는 연구이다. 본 연구는 2006년 주라기 점토지역에 인접한 도로를 따라 도랑형성과 함께 하수 및 얇은 지하수의 유출이 사면변위 활동 가능성을 유발시킨 데에서 시작되었다. 물의 흐름은 계속해서 깊은 활동면이 형성되는 변위층(주라기 점토)에 연직 다짐압 증가와 대수층에서 압력수두 증가를 유발시켰다. 그 지역에서 변위의 발달유형은 전형적인 다짐분출(compaction-extrusion)의 깊은 블록활동 산사태를 나타내고 있다. 그 특징 중 하나는 초

기 크리핑 단계에서 하부벤치가 사면 상부와는 무관하게 국부적으로 발생된 기저의 변위이다. 암반 내 활동면의 위치는 변위계, 경사계와 지구물리학적 탐사를 비롯한 계측으로 예측되었고 이는 이론적인 결과와 일치했다. 하부벤치 및 형성된 블록의 변위를 제어하고, 지반과 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 보강조치가 계획될 것이다. 포화 및 불포화 사질토에 대한 상대정수를 통합하여 일반화된 소성이론에 기초한 구성모델을 제시한 연구가 스페인에서 이미 수행된바 있고 추가적인 연구가 진행되고 있다. 상대밀도와 구속압에 따라 거동이 달라지는 사질토의 건조 및 포화시 유효응력과 축차응력 관계를 구명하고자 하는 연구이다.

#### 4. 결론

세계적으로 지구온난화 및 기후변화 등으로 인하여 자연재해가 증가하고 있다. 국내에서도 산사태로만 연평균 6천억원의 재산피해와 30명/년에 가까운 인명피해가 반복적으로 발생하는 추세이다. 따라서, 산사태 재해 위험도에 대한 연구는 매우 중요하다고 판단된다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 세계적인 연구 관심분야를 위주로 산사태 위험도 평가 및 저감에 대한 연구동향을 고찰하여 보았다.

최근 산사태 위험도의 검증은 과거발생 사건에 대한 위험지도 작성, 미세한 지반변형 모니터링과 통계학적 GIS 접근법에 의한 지역별 유발요인(factor) 지도 작성 등 다양한 방법으로 시도되고 있다. 위성 및 측지기술의 발달로 재해지도 작성 등에 GIS를 활용하는 일은 세계적으로 매우 일반화 되었다. 이는 산사태뿐 아니라 하천과 도시계획, 교통 등 매우 다양하게 적용되었으며, 국내의

산사태 분야에서도 상당한 연구 성과가 있다. 이와 함께 인공위성을 활용하여 지반변형을 탐지하고 모니터링 시스템과 연계하여 지반재해를 분석하고자 하는 노력도 시도되고 있다. 현재 가장 큰 관심 주제중 하나가 확률론적 기법을 통하여 산사태의 위험도를 정량화하는 것이다. 정량적 위험도 평가(QRA) 기술은 가장 명확하고 신뢰할만한 결과를 제시하므로 활용도가 매우 높다. 인명피해를 줄이기 위해서는 무엇보다도 지반의 활동이 시작되는 시간과 지점을 탐지하여 그것이 위험도 요소에 도달하기 전에 미리 경고하여 대피를 유도하는 체계가 가장 중요하다고 판단된다. 유럽뿐 아니라 홍콩, 대만 등 주변국에서도 대규모 산사태로 매년 상당한 피해가 발생되고 있는 가운데 그 저감기술에 대한 관심이 커지고 있다. 지질과 기후조건뿐 아니라 산사태 발생양상이 우리나라와 매우 유사한 대만에서는 토석류 산사태에 대비한 모니터링 시스템으로 계속된 자료를 위성을 통하여 주민들의 통신수단으로 전송되어 대피가 가능하도록 EWS를 구축한 사례도 있다. 홍콩의 산사태 예측 및 대응시스템도 국가적으로 매우 체계적으로 구성되어 운용중이다. 물론 우리나라도 현재 산사태 재해에 대비한 연구가 다방면으로 진행되고 있으며, 더불어 위험도 평가 및 관리기술에 대한 보다 심층적인 연구와 관심이 필요한 시기라 판단된다.

(원고접수일 2009년 6월 22일)

#### ※ 전국기술사대회 강의자료 일람표

- 下記の 강의자료 배열 순서대로 게재됩니다.

7월호 기획특집	1. 토목시공 2. 환경	3. 정보통신
9월호 기획특집	1. 건축시공 2. 기계설비	3. 정보처리 4. 화공안전
11월호 기획특집	1. 건축전기설비 2. 도시계획	3. 소방