

사면안정의 최신 연구동향과 시사점

- 2013 ASCE Geo-Congress 발표 내용을 중심으로 -



박 동 순

K-water연구원
기반시설연구소 선임연구원
(fulgent@kwater.or.kr)

1. 서론

2013년 미국 토목학회(ASCE)의 Geo-Institute에서 개최하는 Annual Geo-Congress가 3월 3일부터 7일까지 캘리포니아의 San Diego에서 열렸다. 올해의 주제는 1992년과 동일한 “사면과 제방의 안정성과 성능”이었으며, 1992년 이래로 21년만에 동일한 내용을 다루어 그간의 연구개발 동향과 앞으로 사면안정이라는 주제가 나아갈 방향을 파악하는 데에 큰 도움이 되었다.

주목할만한 점은 동기간 동안 지반공학계에 가장 유명한 세 개의 강연, 즉 Terzaghi lecture (금년은 Alfred Hendron 교수), Seed lecture (금년 Stephen Wright 교수), Peck lecture (금년 Jonathan Bray 교수)가 있었다는 점이다. 또한 사면안정 분야의 소주제 별로 최고의 석학들에 의한 plenary lecture가 있었

며, 과거로부터 현재까지의 발전사항과 앞으로의 기술들을 한자리에서 조명해 볼 수 있었다.

주요 plenary lecture 강연자와 주제는 다음과 같다.

- Michael Duncan : 사면안정의 과거와 현재
- Thomas Brandon : 전단강도의 측정, 평가, 사면 안정 해석에의 적용에 있어 발전
- John Christian : 사면안정에서 신뢰성 평가의 문제
- Richard Goodman : 토플링 - 불연속 재료에서 기본적인 파괴모드
- Francisco Silva-Tulla : 문제있는 댐들에서 배운 교훈
- Suzanne Lacasse : 해양 사면안정의 사례
- Scott Anderson : 산사태, 사면, 제방에 대한 원격 센싱 기술의 적용

- Allen Marr : 사면안정의 계측과 모니터링
- Liam Finn : 사면의 내진 안정성

세부 기술세션에서는 사면과 제방의 액상화 분석, 토사사면 모델링 : 한계평형, 유한요소, 한계 해석, 하이브리드 해석, 불포화 토질역학, 사면안정 공법 - 깊은 기초, 토사사면의 설계, 해석, 성능, 보강토 사면, 전적으로 연화된 전단강도의 측정, 위험도 평가와 신뢰성 해석, 균열과 인장강도, 흙과 암반의 조사, 침투와 사면안정성, 사면보강 공법, 팽창성 재료 사면의 조사와 지반거동, 암반사면의 설계와 해석, 지반개량, 해양 사면안정, 제방의 안정성, 원격 계측기술, 침식과 사면안정, 토류구조물의 내진 설계, 계측과 모니터링, 도로 및 철도 성토 사면 등 다양한 소주제별로 활발한 구두 발표와 토의가 있었다. 필자는 이 가운데, 사면과 제방의 액상화 해석 세션에서 “정적 전단응력과 잔류강도를 이용한 액상화로 인한 사면의 안정성과 변형 분석”이라는 주제로 논문을 제출, 발표하였으며 잔류강도(Sr)와 관입저항력(SPT N값 또는 CPT qc 값 등)을 연결시키는 전통적인 기법에 대한 대안 모색이라는 점에서 발표 이후 상당한 토의와 토론이 있어 감사하였다.

따라서 2013 Geo-Congress에서 사면안정의 대주제 아래 소주제별로 이루어진 Plenary lecture들의 주요 내용들을 본 지면을 할애하여 요약, 정리함으로써 국내 지반공학 분야의 발전과 향후 시사점들을 모색해 보고자 하였다.

2. 주요 내용

2.1 사면안정의 과거와 현재 (Duncan 교수)

Virginia Tech의 저명한 Duncan 교수(은퇴)는 1966년 이래 사면과 제방의 지반공학 분야의 다양한 발전과 변화에 대해 정리하였다(Duncan 2013). 대부분의 변화가 컴퓨터의 비약적인 발전과 더불어 일어났다. 이제는 한계평형해석 뿐만 아니라 정교한 3D 안

정 해석, 유한요소 및 유한차분 해석, 확률론적 파괴의 검토, 실내 및 현장의 전단강도 시험, 사면 모니터링을 위한 향상된 기법들, 그리고 새롭고 효과적인 다양한 사면 안정화 공법들이 대거 개발되고 있는 상황이다. 하지만 이러한 매우 정교한 도구들이 우리곁에 있을 지라도, Duncan (2013) 교수는 경험과 공학적 판단, 그리고 철저한 품질관리가 여전히 중요함을 역설하였다.

2.2 사면안정 해석에서 전단강도의 측정과 평가, 적용의 발전 (Brandon 교수)

사면안정에 대한 동일한 주제로 컨퍼런스가 열렸던 1992년에 비해 현재 사면안정에 절대적으로 중요한 전단강도의 측정과 평가, 적용은 그 기술에 있어 많은 발전이 있었다. Brandon(2013)은 이러한 기술의 발전에 대하여 개괄적인 내용들을 정리하여 발표하였으며, 추가적으로 많은 사면안정 문제에 있어 완전히 연화된 전단강도(fully softened shear strength), 비선형 강도 포락선의 적용, 전단강도의 공간적 변화에 대해서도 새로운 인식을 하고 있음을 밝혔다. Hurricane Katrina가 사면안정과 전단강도 평가에 있어서 어떠한 영향을 미쳤는지에 대해서도 설명하였다(Fig. 1).

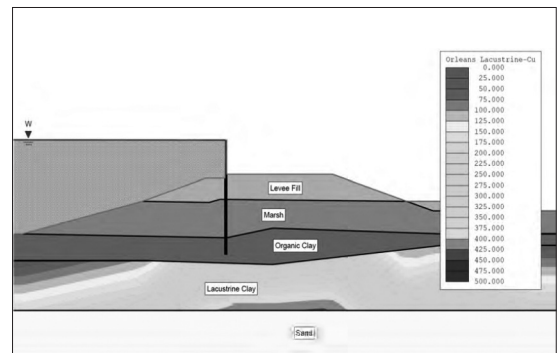


Fig. 1 호상(lacustrine) 점토층에서 비배수 전단강도의 연직과 횡방향 변화를 보여주는 l-wall 단면. 단위는 psf이며, 그림은 SLIDE 6.0에서 생성됨 (Brandon 2013)

2.3 사면안정에서 신뢰성의 문제 (Dr. Christian)

지반공학 분야에서 신뢰성 해석(reliability methods)이 널리 적용되기 시작하였는데, 이는 사면 안정 분야에도 예외가 아니다. Christian(2013)은 현재의 다양한 신뢰성 해석 계산 절차들을 소개하였다. 많은 경우, 주로 입력 정수들의 적절한 값들을 설정하기 위해, 또 소스를 식별하고 불확실성의 유형을 파악하는 데에 많이 사용되었다. 그러나 대다수의 공학자들에게 있어 이러한 신뢰성 해석의 결과로 표현되는 파괴 확률은 아직도 그 물리적인 의미를 이해하는 일이 매우 어려운 실정이다. F - N 그래프와 같은 일부 방법들은 신뢰성 결과를 표현하는 향상된 방법이나 그 의미와 내포하는 뜻을 찾는 것은 여전히 어려운 작업이어서 이 분야에 대한 많은 일들이 남아있는 실정이다(Fig. 2).

2.4 사면의 내진 안정성 (Liam Finn 교수)

Finn (2013)은 2013년 ASCE의 지반공학 분야 최

대 학술 컨퍼런스인 Geo-Congress 주요 주제 발표자로서 지난 25년간의 사면의 내진 안정성 분야에서 이루어진 연구 동향과 결과들에 대해 정리하고, 포괄적인 시사점들을 제시하였다. 사면의 내진 안정성에 대한 ASCE 컨퍼런스(Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics)는 10년을 주기로 1988년, 1998년, 2008년에 집중적으로 조명된 바 있으며, 본 2013년의 사면을 주제로 열린 ASCE 컨퍼런스에서 현재까지의 변화에 대해 총괄적인 토의가 이루어졌다.

1998년 이래로 현재까지 진행된 주요한 다섯가지 연구개발 성과들은 다음과 같다.

- 지반공학의 정적, 동적 해석을 위한 표준 계산 플랫폼으로서 FLAC을 광범위하게 받아들인 것
- 사면과 필댐의 내진성능평가 및 경제적인 보수보강 대책 수립을 위한 성능 기준으로서 변위(displacement)를 사용하게 된 점
- 해석기법을 입증하고 관련된 구성 모델의 타당성을 검증하기 위해 물리모델실험, 즉 원심모형실험을 적용하게 된 점
- 댐의 지배적인 파괴 모드 결정, 수용 불가한 손상

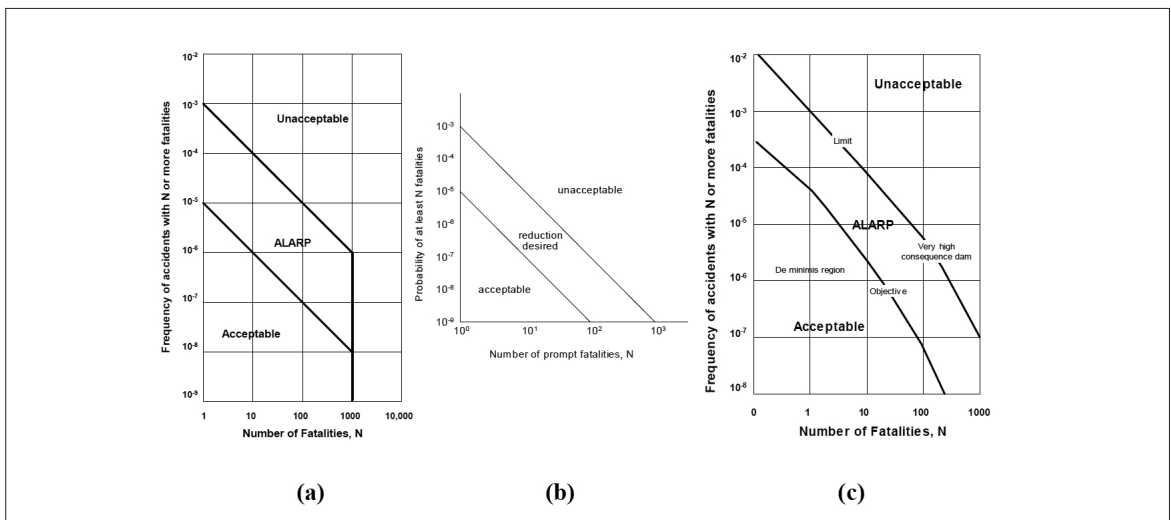


Fig. 2 세가지 유형의 F-N 그래프. (a) 홍콩 Planning Department 기준, (b) 네덜란드 위험 기준, (c) ANCOLD의 댐에 대한 기준

의 발생 확률, 그리고 관련된 인명과 재산상의 손실 확률을 결정할 목적으로 지진 위험도와 신뢰성 해석을 수행하게 된 점

- 액상화 가능성 평가, 잔류강도의 결정, 설계와 구성모델의 캘러브레이션에 있어 확률론적 지반운동을 적용하는 것과 같은 사면의 내진 안정성의 중요 요소들에 대한 기초적인 연구 프로그램 성과들이 나타난 점

Finn(2013)은 현재 사면의 전응력 및 유효응력 해석을 비선형 기법으로 수행할 수 있는 매우 다양한 프로그램들이 공존하고 있으나, 문제는 이들을 검증할 만한 충분한 현장의 사례들이 드물다는 점을 언급하였다. 따라서 해석 수행자의 철저한 배경지식과 현장상황에 대한 이해야말로 절대적으로 중요하다 할 수 있다.

성능기반의 설계 (PBD; Performance based design)는 허용 변위 기준에 기초하며 점점 더 지반 지진공학에 실무적으로 적용되고 있다. 특별히 지진하중 아래 액상화에 취약한 기초를 가진 필담에 대한 보수보강 계획을 수립할 때에 광범위하게 적용되고 있다. 이러한 성능기반의 설계에 있어 두 가지 중요한 필요조건이 있는데, 바로 허용가능한 성능 기준과 신뢰할만한 해석 기법이 그것이다. 현재까지 필담에 있어 허용가능한 성능기준은 주로 댐마루에서의 허용 변위량이었다. 댐 사면의 안전성에 있어 댐마루 침하량에 대한 기준은 충분한 여유고를 확보하는 데에 절대적으로 중요하다. 상대적으로 큰 댐마루 침하량이 활용가

능한 여유고를 고려할 때 받아들일 수 있는 수준이더라도, 큰 침하량은 댐체에 응력과 변형률을 유발하여 필터나 코어 또는 보조적인 배수 시스템과 같은 내부 구조물에 어떠한 작용을 할 수도 있다. 만족할만한 성능은 오직 해석 결과의 전체적인 스펙트럼에 기초하여 판단되어야만 한다.

비선형해석은 흙이 강진 하에서 비선형적으로 거동하기 때문에 필수적이다. 만약 지진으로 인한 간극수압이 상당하다면 해석은 유효응력으로 수행되어야 한다. 비선형 유효응력 동해석은 많은 형태를 띄고 있으며, 그것의 안전한 사용을 위해서는 선택한 구성 모델에 대한 온전한 기술적 이해를 필요로 하며, 또한 엘리먼트 시험 데이터에 기초한 검증 이력에 대한 지식도 함께 가져야 한다. 또한 어떻게 계산절차가 적용되는 지에 대한 충분한 이해를 필요로 한다.

Finn(2013)은 미국의 두 댐, 즉 미시시피에 있는 Sardis 댐과 South Carolina에 있는 Clemson Diversion 댐의 보강 대책 설계에 적용된 성능기반 설계 사례를 제시하였다.

Sardis 댐은 New Madrid 지진대 내에 위치한 물다짐(hydraulic fill) 공법으로 축조된 댐이다. 댐의 대표 단면도는 다음 Fig. 3과 같다.

Sardis 댐의 지진 위험도는 다음과 같은 설계 파라미터들로 정의되었다.

- 최대 지반 가속도 : 0.20g
- 지속시간 : 15초

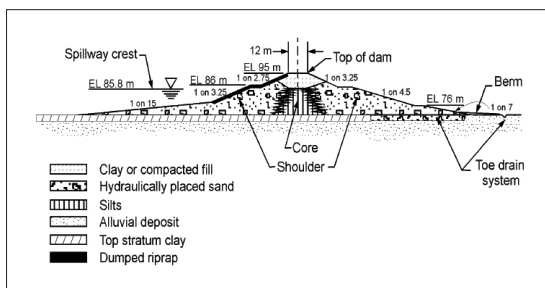


Fig. 3 Sardis 댐의 단면도

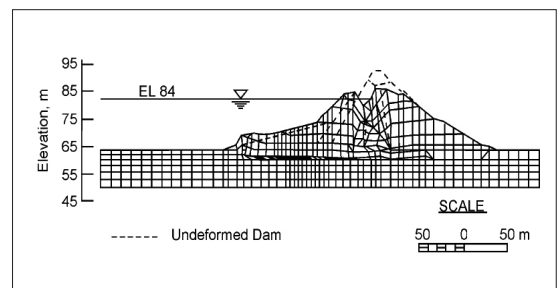


Fig. 4 Sardis 댐의 액상화 후 변형도

지진응답해석 결과 상당한 연직, 수평 변형이 예상되었으며, 연약한 얇은 기초 층에서 전단변형률이 집중되었다(Fig. 4).

결과적으로 보강대책의 검토 결과 현장 조건상 저수위를 낮추는 것이 어려웠기 때문에 어떠한 보강작업도 수중에서 이루어져야 했다. 이러한 환경에서 상류측 사면을 안정한 기초층까지 파일로 네일링하는 공법이 최종 선정되었으며, 그 개요도는 다음 Fig. 5와 같다.

다음은 Clemson 상부 및 하부 댐의 사례이다. Clemson 댐은 1960 - 1961 사이에 Clemson 대학

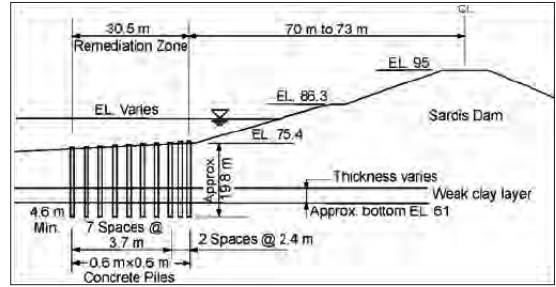


Fig. 5 Sardis 댐의 파일 보강 계획 (Stacy et al. 1994)

의 부지와 시설들을 보호하기 위해 축조되었다. 지진에 대한 위험성 조사와 평가를 통해 기초부의 잔류강도값이 낮아 설계지진시 하류 사면에 액상화로 인한

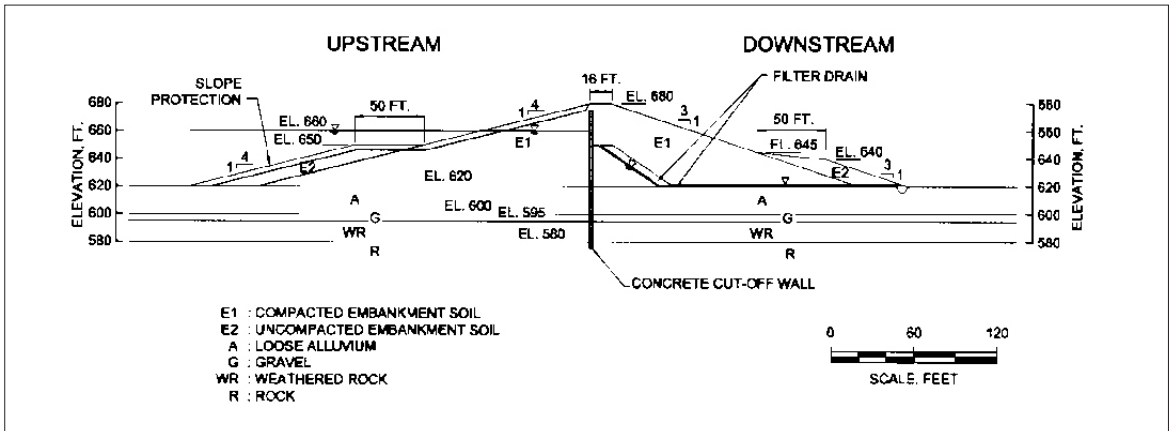


Fig. 6 Clemson Diversion 댐의 단면도 (Wooten et al. 2008)

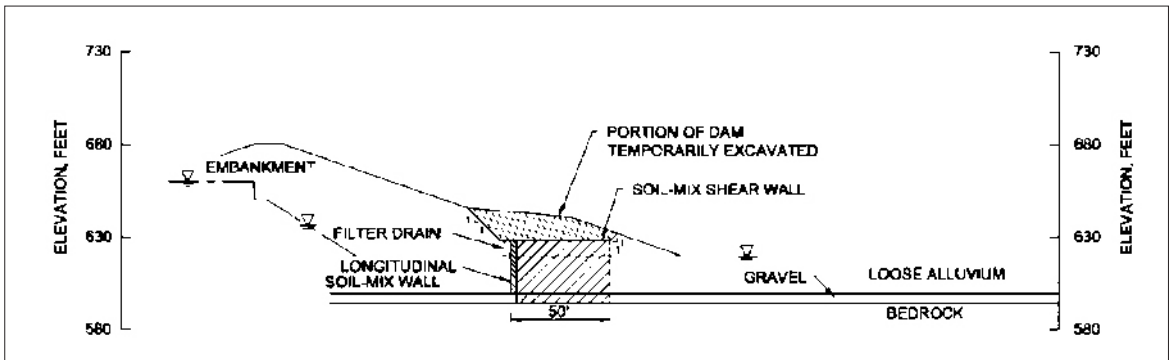


Fig. 7 Clemson Diversion 댐의 보강 단면도 (Wooten et al. 2008)

활동이 예상되었다. 따라서 제트 그라우팅, Deep Soil Mixing, Stone Column, 굴착 치환 등의 공법이 거론되었으며, 최종적으로 Deep Soil Mixing 공법을 선택하였다. 이 경우 또한 TARA-3FL 과 같은 비선형 컴퓨터 수치해석을 통하여 위험도를 평가하였고, 변위량을 검토하는 성능기반의 해석을 통하여 보강대책을 수립하였다(Fig. 7).

Finn(2013)은 또한 캐나다의 British Columbia주에서 최근에 승인된 주거지역 개발시 사면의 내진 성능 예비 검토 기준을 수립한 사례를 들어 사면의 소성 변위를 확률론적으로 적용한 예로 제시하였다. 최근 British Columbia Building Code (2006)는 지진 지반운동 설계 수준을 과거 50년에 10%의 초과 확률(연간 초과 확률 1/475)에서 최근 50년에 2%의 초과 확률(연간 초과 확률 1/2475)로 변경하였다. 그 결과로 이전 최대 지반가속도 값의 두 배가 적용되었다. 결과적으로 기존의 수많은 사면들이 지진 하에서 불안정할 것으로 문제제기 되었다. 따라서 다양한 이해관계자들의 의견을 따라 사면의 내진 안전성에 대한 태스크포스를 소집하고 그 활동의 결과로 두 종류의 새로운 사면의 내진 안전성 해석 기법을 소개하였다. 결과적으로 채택한 기법은 Bray and Travararou (2007)의 Newmark 기반의 사면 변형해석을 확률통계적으로 분석하여 제시한 회귀 모델식이었다. 그들은 활동면을 따라 지반의 전단으로 인한 사면 변위량을 추정하는 식(1cm 보다 큰 변위)을 다음과 같이 제시하였다.

$$\ln(D) = -1.10 - 2.83 \ln(k_y) - 0.333 (\ln(k_y))^2 + 0.566 \ln(k_y) \ln(S(T)) + 3.04 \ln(S(T)) - 0.244 (\ln(S(T)))^2 + 1.5 T_s + 0.278 (M-7)$$

여기서 k_y 는 항복 가속도, T_s 는 지진 전 잠재 활동토체의 주기, $S(T)$ 는 지진동 결과로 활동토체의 디그레이드된 주기(degraded period)에서의 잠재 활동토체의 스펙트럴 주기이며, $T = 1.5T_s$ 로 취해진다. M 은 설계 지진의 모멘트 규모이다.

위 식은 $0.05s < T_s < 2.0s$, 항복 가속도, k_y 는 $0.01 < k_y < 0.5$, 그리고 $4.5 < M < 9.0$ 의 범위에 대해 유효하다. British Columbia 의 위원회에서는 목조 프레임 건축물의 경험에 기초하여 Newmark 소성변위량의 허용 한계를 15cm로 추천하였다. 결과적으로 이 식을 적용하여 변위량을 산정한 결과, 모두 15cm 기준 이내에 들으므로 성능기준을 만족하였다. 이전의 안전을 계산방식의 등가정적 한계평형해석에서는 모두 1.0 미만의 안전율을 산출하였으나, 사용성 측면의 위와 같은 검토에서 안정하게 입증되었다.

Bray and Travararou (2007) 식은 특별히 광범위한 데이터베이스에 기반하였으며, 사용하기가 간편하고 액상화와 같은 특별한 경우를 제외하고는 비선형 변형 해석을 수행할 필요가 없음으로서 다양한 잇점이 있다. 보다 간편한 형태로서 Bray는 허용 변위량 15cm에 기반하는 지진계수를 다음과 같이 제시하였다.

$$k_{15} = (0.006 + 0.038M) \times S_a(0.5)$$

이 식은 $T_s = 0.33s$ 인 사면의 주기에 대하여 올바른 지진계수를 산정하며, 보다 장주기에서는 점점 보수적인 값이 된다.

Finn (2013)은 결론적으로 비선형 동해석에 대한 일반적인 가이드라인으로서 다음 사항들을 제시하였다.

- 해석 수행자는 구성모델의 메커니즘과 그것을 실행하는 데에 사용된 계산 절차의 상세에 대해 잘 이해하고 있어야 한다.
- 해석 수행자는 구성모델의 검증 이력을 고찰해야 하며, 특별히 블라인드 예측 시험에서 그 성능을 검토해야 한다.
- 해석 수행자는 모델의 가용성을 원심모형실험 데이터를 통하여 검사하여야 한다.
- 구성모델의 파라미터들은 현장의 지배적인 응력 경로와 일치하는 현장 조건들을 반영할 수 있도록 결정되어야 한다.

- 다양한 모델 파라미터들에 대한 민감도 분석을 매 개변수 연구를 통해 검사해야 한다.
- 다른 구성모델을 사용하여 결과를 검증할 수 있는 해석을 병행해야 한다.
- 해석 수행자와는 달리 설계자는 실제 지진동 동안 맴의 환경과 해석상 이상적인 환경 사이의 차이 점에서 모델이나 해석의 어떠한 요소들이 거동에 상당한 영향을 미치는지와 이러한 요소들이 신뢰할 수 있는지에 대한 물리적인 이해를 갖고 있어야 한다.
- 중요한 프로젝트에서 검토 위원회(review board)는 모델의 선택과 캘러브레이션, 데이터 해석 등 동적 응답 해석에 있어 전문가가 반드시 포함되어야 한다.

2.5 해양(Offshore) 사면안정 사례 (Dr. Lacasse)

Lacasse et al. (2013)은 해저 사면 활동이 해양 기 간시설물과 해안가 커뮤니티에 심각한 위협을 초래하며, 다양한 실제 사례들을 언급하였다. 해저 사면 활동은 주로 자연적이고 지속적인 자연현상의 과정으로, 또는 인간의 문명활동으로, 또는 지진과 같은 외적인 요인에 의해 유발되기도 한다(Fig. 8). 이러한 사면 불

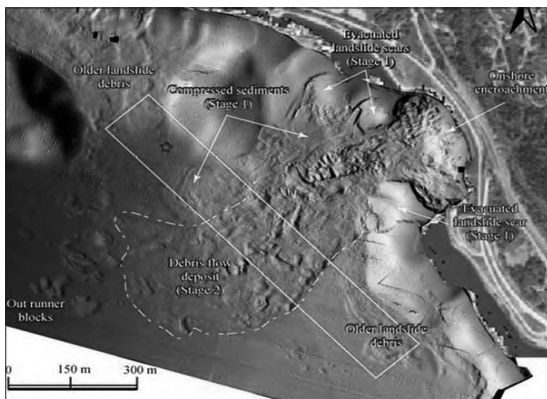


Fig. 8 1996 Finneidfjord 해저 사면 활동의 표면 지형 (Vardy et al. 2012)

안정을 평가하기 위해서는 사면활동 이벤트의 빈도와 지반 조건, 그리고 그 지역의 지형학적인 정보를 필요로 한다. 인간 문명의 활동으로 인한 사면 붕괴외에 해양 사면 불안정에 가장 흔한 영향을 미치는 것이 지진이다. 지진으로 인한 사면 붕괴에는 세가지 시나리오를 해석해야 한다. 1) 동적 응력에 의해 유발되는 과잉 간극수압이 전단강도를 저하시키는 지진시 발생하는 파괴, 2) 보다 깊은 층에서의 침투로 유발되는 과잉 간극수압의 증가로 인한 지진 후 파괴, 3) 크리프와 전단강도 저하로 인한 지진 후 파괴가 그것이다. 지진동시 사면붕괴에 가장 취약한 요소는 심각한 변형률 연화(strain-softening)를 보이는 지반이다.

Lacasse et al. (2013)은 해저 점토 사면에 대한 지진으로 인한 파괴의 연간 확률을 계산하는 절차를 제시하였다. 향상된 위험도와 평가방법에 있어 주요 어려운 점은 해양 지반공학적 위험도 분석이나 확률론적 해석 뿐만 아니라 해석에 있어 적용된 파라미터들의 불확실성을 어떻게 줄일 수 있는지에 있다.

2.6 사면안정의 계측과 모니터링 (Dr. Marr)

Marr(2013)는 지난 약 20여년간의 사면안정 분야에 있어 계측과 모니터링의 발전에 대해 설명하고 몇가지 추천할만한 점들을 제시, 토의하였다. 계측의 과정에서 능동적인 위험 관리(active risk management)는 매우 중요하다.

현재 전형적으로 사면의 모니터링에 사용되는 계측항목들로는 측량점, 침하관, 연직 경사계(inclinometer), 수평 경사계, 틸트미터, 크랙 측정기, Extensometer, 관측 우물, 피에조미터, 변형률계, 로드셀, 가속도계, 온도계 등을 들 수 있다. 이에 더하여 Marr(2013)는 사면안정의 모니터링 시스템으로 다음과 같은 새롭게 적용가능한 계측기들을 소개하였다.

또한 다음 Fig. 9와 같은 자동화된 데이터와 정보 관리 시스템은 한층 더 많은 데이터를 보다 적은 시간과 노력을 들여 가능한 한 정확하게 수집하고 평가할 수

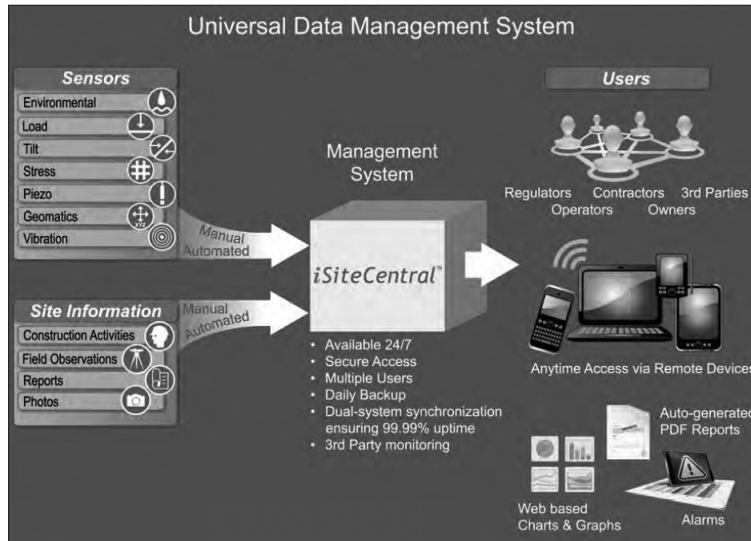


Fig. 9 통합적인 데이터와 정보 관리 시스템 구성도 (Marr 2013)

표 1. 최근 활용되고 있는 계측 기술들(Marr 2013)

계측 항목	계측 내용
시간영역 리플렉토미터 (Time Domain Reflectometry)	코액셀 케이블이 튀는 값(kink)을 찾아 측정한다. 전단면(shear plane)까지 거리를 측정한다.
음향 방출 계측 (Acoustic Emission Monitoring)	흙이나 암반 입자가 서로 미끄러지면서 방출되는 음향 에너지의 증가를 측정한다. 음향 방출의 증가는 전단면이 발달하고 있음을 말해준다.
액상 표고 게이지 (Liquid Level Gages)	수평의 액체로 채워진 파이프를 따라 설치된 측정점의 표고 변화를 정확하게 측정한다. 댐의 갤러리와 같은 침하량의 정확한 측정을 위해 사용한다.
자동 광파기, Aka 로봇 광파기	세 방향의 측량점의 변위를 정확하게 측정하기 위해 모터를 장착한 광파기를 사용한다. 보통 x, y, z 성분의 움직임을 $\pm 1\text{mm}$ 의 표준편차로 측정할 수 있다.
DGPS	인공위성을 이용해 정확한 위치를 측정한다. 고정된 참조 스테이션과 함께 사용하며, x, y, z 성분의 움직임을 $\pm 1\text{mm}$ 의 표준편차로 측정할 수 있다.
LIDAR (Light Detection and Ranging)	지구 표면의 정확한 등고선 맵을 그리기 위해 항공기상에서 빛의 반사를 사용하는 측정시스템이다. 인공위성을 사용하는 방식으로 지표면의 연직변위를 약 1.27mm의 해상도로 측정가능하며, 지면 기반의 (ground based) 해상도는 수 밀리미터 범위내에 들 수 있다.
InSAR (Interferometric synthetic aperture radar)	인공위성 기반, 또는 지표면 기반 또는 종종 항공기 레이더 시스템을 이용하여 넓은 면적에 걸쳐 지표면 표고의 변화를 센티미터 단위로 측정한다.
광섬유 센서	온도, 변형률, 압력 센서와 같은 항목들이 높은 정확도의 측정이 가능한 광섬유 케이블에 통합될 수 있다.
참조 목표물이 있는 디지털 카메라	디지털이즈드 캘리브레이션 된 이미지를 이용해 거리가 떨어진 목표물의 수직, 수평 변위를 정확히 측정한다.
Micro-seismic	흙이나 암반의 미끄러짐에서 방출되는 에너지의 x, y, z 좌표를 측정하기 위해 매우 민감한 지오폰을 사용한다.

있도록 해 준다.

전체적인 안전성 감독과 계측을 위해서는 신속한 계측값의 분석과 함께 위험을 저감할 수 있는 대처 계획(action plan)을 필요로 한다. 알람의 수준과 그에 따른 반응 계획은 모니터링 프로그램 설계의 일부로서 포함되어야 한다. 성능 기반의 모니터링 시스템을 위해서는 다음 예와 같은 알람 수준과 대처 계획의 수립이 필요하다.

- Green - 정상 : 측정값은 허용범위 내에 있으며, 따라서 어떠한 대처도 필요하지 않다.
- Yellow - 경고 : 성능이 설계에서 기대하는 범위를 초과하거나 기대하지 않았던 이상한 거동이 발생하고 있을 때, 또는 부적절한 성능을 비율이 증가하는 경향으로 나타내고 있을 때이다. 측정 시스템을 검사하고 원인을 조사하며, 경향을 평가하고, 모니터링 빈도를 증가시키며, 필요하면 추가적인 계측도 고려한다. Red 수준이 되지 않도록 조치를 취한다.
- Red - 경계 경보 : 시설물의 안전이 의문시되는 범위로 성능 발현되거나 성능이 현저히 저하되어 조절 불가할 때이다. 즉각적인 적절한 조치를 취한다. 미래에 경계 경보에 다다르지 않도록 확실한 조치를 취한다.

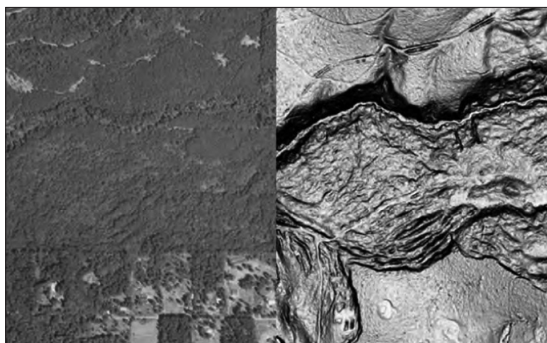


Fig. 10 Eagle Creek 산사태와 버려진 철로, 좌측은 실제 사진이며 우측은 항공 라이더 측량에 의한 순수 지각 모델이다 (출처 : Oregon Department of Geology and Mineral Industries)

2.7 산사태, 사면, 제방에서 원격 센싱 기술의 적용 (Dr. Anderson)

Anderson(2013)은 항공 기반, 인공위성 기반, 지표면 기반의 원격 센싱 기술이 산사태와 사면, 그리고 제방의 연구에 매우 귀중함을 언급하고, 다양한 최신 기술들을 선보였다. 특히 항공 라이더 측량 기술은 다양한 형태의 지표면의 변화를 종합적으로 구현해 낼 수 있는 첨단기법이다(Fig. 10). 또한 인공위성 기반의 INSAR 기술을 활용한 사면의 움직임을 모니터링하는 사례도 증가 추세에 있다(Fig. 11).

2.8 문제있는 댐 사례로부터의 교훈 (Silva-Tulla and Poulos)

미국의 National Inventory of Dams 2010년 데이터에 따르면, 약 84,000 개의 댐들이 미국내에 존재한다. The Association of State Dam Safety Officials (2012)의 발표에 의하면, 미국에서 얼마나 많은 댐이 붕괴되었는지는 아무도 모르지만, 모든 주에서 보고되어 오고 있다. 2005년 1월 1일부터 2009년 1월 1일까지 132개의 댐 붕괴와 434 건의 사고(incidents), 즉 손을 쓰지 않았다면 댐 붕괴에 이르렀을 사례를 보고

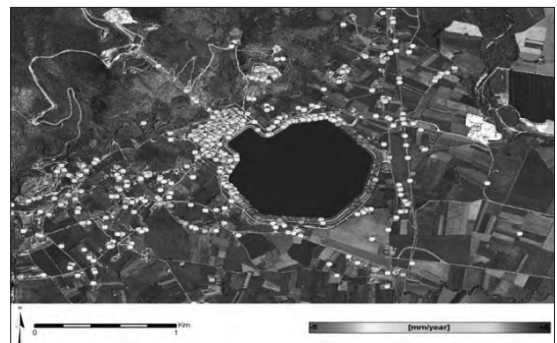


Fig. 11 Presensano 호수의 InSAR 기술 해석 결과. 가장 집중된 붉은색 지점은 연간 5mm 변화를, 다른 보다 밝은 색은 그 이하의 변위를 나타낸다 (Morgan et al, 2011)



Fig. 12 붕괴된 Fujinuma 본댐 전경 (Pradel et al. 2013)

하였다. Silva-Tulla and Poulos (2013)는 경험에서 우리나라 다양한 문제있는 댐들의 조사와 평가, 조치에서 주의할 점들을 제시하였다.

댐에 있어 특별히 중요한 것은 댐체 내부로의 물의 흐름이다. 댐이나 제방을 통한 흐름을 완전히 평가하기 위해서는 다음 네 단계를 포함하는 분석을 수행해야 한다.

- 초기 조건 (정상(steady)침투 또는 비정상(transient) 흐름)

- 초기 담수시 비배수 거동
- 비정상 흐름(transient flow)
- 정상 흐름(steady flow)

또한 댐 재료의 다짐은 강도와 균등성(uniformity), 그리고 수축 - 팽창 거동(contractive vs. dilative behavior)의 이해가 평가 및 해석에 있어 매우 중요하다.

2.9 2011 Tohoku 지진시 Fujinuma 댐의 파괴 (Dr. Pradel et al.)

Pradel et al. (2013)은 규모 9.0의 Tohoku 대지진으로 인해 붕괴된 Fujinuma 댐의 붕괴 원인을 정리하고, 동적 수치해석을 수행하여 댐의 붕괴 메커니즘을 파악하고자 하였다. 수치해석 결과, Fujinuma 본댐은 지진동으로 인한 하루 사면에서 약 5 m의 횡방향 변위가 발생하여 댐마루 표고를 저하시킴으로서 월류에 의한 댐의 붕괴를 가능하게 하였다. 추가적인 수치해석 결과에 의하면 부댐이 수위 급강하에 취약하여 본댐이 파괴되었을 때 저수지 물이 신속히 유출된 것으로 나타났다(Fig. 13).

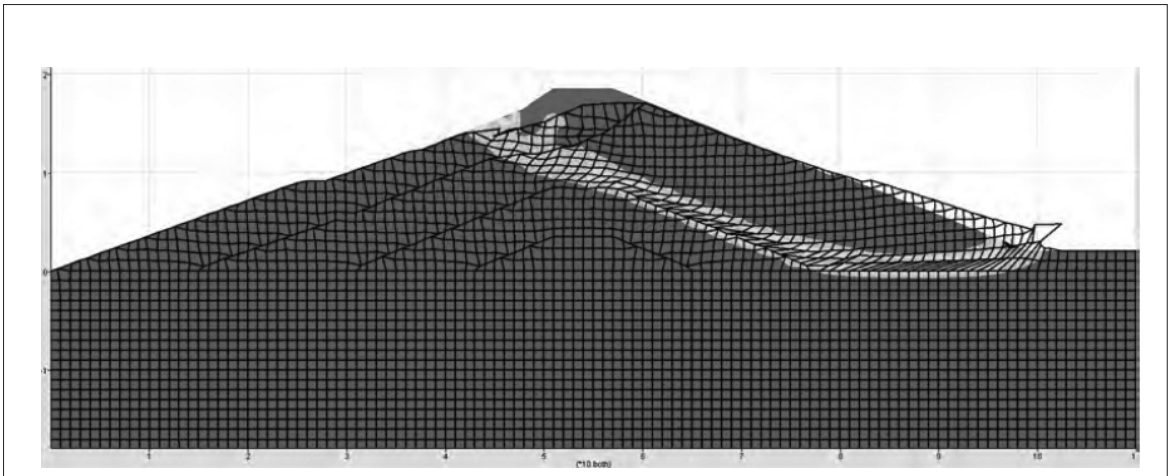


Fig. 13 예측된 붕괴 모드 사례 (Pradel et al. 2013)

3. 결론 및 시사점

올해 ASCE Geo-Institute에서 개최한 Geo-Congress의 주제는 1992년과 동일한 “사면과 제방의 안정성과 성능”이었으며, 1992년 이래로 21년만에 동일한 내용을 다루어 그간의 연구개발 동향과 앞으로 사면안정이라는 주제가 나아갈 방향을 파악하는 데에 큰 도움이 되었다. 이에 주요 Plenary lecturer들의 발표내용을 본 지면을 빌어 요약, 정리하였으며, 다음과 같은 몇가지 국내에 적용가능한 시사점들을 찾을 수 있었다.

- 댐의 노후화 진행에 따른 사면안정의 평가방법에 있어서의 정밀도 향상 노력
- 계측 및 모니터링 기술의 급격한 발전에 따른 차세대 계측관리 시스템의 적극 도입
- 사면의 물성 산정에 있어서의 신뢰성 향상 제고 노력
 - 전단강도 파라미터들의 합리적인 결정을 위한 정확한 지반조사 및 물성 실험의 연구개발이 지속될 필요가 있으며,
 - 특히 변형률 연화 거동을 보이는 사면 재료의 경우 이를 반영할 수 있는 실험과 수치모델이 필요하며
 - 불포화토의 전단강도 산정과 전단강도의 구속 압 의존성을 비선형적으로 표현가능한 조사 방법의 개선이 중요한 점으로 대두
- 위험도 평가 및 확률통계론적 안전관리 개념의 확산 필요
 - 불확실성을 저감시킬 수 있는 기술 연구개발이 절실함
- 댐 및 제방의 내진성능평가에 있어서 관련 요소기술들의 참여한 발전을 반영, 지속적 연구기술 개발 필요
 - 등가선형 해석과 더불어 비선형 동해석에 대한 표준화된 플랫폼 개발과 구성모델의 검증이 보

다 활발히 이루어져야 하며,

- 사용하는 프로그램의 정확한 이해와 검증을 병행해야 할 것으로 판단됨
- 고급화된 설계와 해석 기법에도 불구하고 근본적인 요소들에 대한 지식은 여전히 중요
- 통합적인 사면 안전관리의 개념 도입 필요
 - 사면의 조사와 평가, 보강대책, 계측 및 모니터링의 일련의 사이클을 통합적인 안전관리 개념을 도입하여 관리하는 것이 중요
- 물리모델실험의 보편화 필요
 - 원심모형실험 등을 이용한 수치해석 결과의 검증과 모호한 현상에 대한 메커니즘 파악은 해외에서 상당히 빈번히 이루어지고 있으며,
 - 국내에서도 원심모형실험을 통한 사면의 내진 안전성 평가, 새로운 공법의 검증, 수치 모델의 제한점 극복 등의 노력이 필요

참 고 문 헌

1. Anderson, S. A. (2013), "Remote sensing applications for landslides, slopes and embankments." Stability and Performance of Slopes and Embankments III, 2013 Geo-Congress, Annual Congress of the Geo-Institute of ASCE, March 3 – 7, San Diego, California
2. Brandon, T. L. (2013), "Advances in shear strength measurement, assessment, and use for slope stability analysis." Stability and Performance of Slopes and Embankments III, 2013 Geo-Congress, Annual Congress of the Geo-Institute of ASCE, March 3 – 7, San Diego, California
3. Bray, JD and Travasarou, T (2007). "Simplified procedure for estimating earthquake-induced deviatoric slope displacements." Journal of Geotechnical and Environmental Engineering, ASCE, 153(4): 381–392.
4. Christian, J. T. (2013), "Issues of reliability in stability

- of slopes." Stability and Performance of Slopes and Embankments III, 2013 Geo-Congress, Annual Congress of the Geo-Institute of ASCE, March 3 – 7, San Diego, California
5. Duncan, J. M. (2013), "Slope stability then and now." Stability and Performance of Slopes and Embankments III, 2013 Geo-Congress, Annual Congress of the Geo-Institute of ASCE, March 3 – 7, San Diego, California
 6. Finn, W. D. Liam. (2013), "Seismic slope stability." Stability and Performance of Slopes and Embankments III, 2013 Geo-Congress, Annual Congress of the Geo-Institute of ASCE, March 3 – 7, San Diego, California
 7. Hance, J.J. (2003) Development of a database and assessment of seafloor slope stability based on published literature, MS Thesis, University of Texas at Austin, USA.
 8. Lacasse, S., Nadim, F., Vanneste, M., L'Heureux, J.-S., Forsberg, C. F., and Kvalstad, T. J. (2013), "Case studies of offshore slope stability." Stability and Performance of Slopes and Embankments III, 2013 Geo-Congress, Annual Congress of the Geo-Institute of ASCE, March 3 – 7, San Diego, California
 9. Marr, W. A. (2013), "Instrumentation and monitoring of slope stability." Stability and Performance of Slopes and Embankments III, 2013 Geo-Congress, Annual Congress of the Geo-Institute of ASCE, March 3 – 7, San Diego, California
 10. Pradel, D., Wartman, J., Tiwari, B. (2013), "Failure of the Fujinuma Dams during the 2011 Tohoku Earthquake." Stability and Performance of Slopes and Embankments III, 2013 Geo-Congress, Annual Congress of the Geo-Institute of ASCE, March 3 – 7, San Diego, California
 11. Silva-Tulla, F., Poulos, S. J. (2013), "Lessons learned from troubleshooting dams." Stability and Performance of Slopes and Embankments III, 2013 Geo-Congress, Annual Congress of the Geo-Institute of ASCE, March 3 – 7, San Diego, California
 12. Stacy, S.T., T. Forrest, W. and Ledbetter, R.H. (1994). "Sardis Dam and Others in the Lower Mississippi Valley." Proceedings, 4th US-Japan Workshop on Liquefaction, Tsukuba, Japan, July.
 13. Vardy, M.E., L'Heureux, J.S., Vanneste, M., Longva, O., Brendryen, J., Steiner, A., Forsberg, C.F. and Halfidason, H. (2012). Multidisciplinary investigation of a shallow nearshore landslide, Finneidfjord, Norway. Near Surface Geophysics, 10 (4), 267–278. Special Issue, Applied Marine Geophysics (eds. J. Arthur, D. Long, M. Vannesten, N. Wardell).
 14. Wooten, L., Castro, G., Gregory, G. and Foreman, B. (2008) "Deep Soil Mixing for Seismic Remediation of the Clemson Upper and Lower Diversion Dams" Presented at USSD Annual Conference, available from GEI Consultants, Woburn, Ma.