

## 암반 사면공학 분야의 연구 동향 분석

정소걸, 류동우, 김형목, 전양수 (한국지질자원연구원)

정주환 (전남대학교)

### 1. 서론

암반 사면공학은 암석역학에 기초한 암반공학의 주요 테마로서 많은 연구자들로부터 관심의 대상이 되어 왔다. 특히, 최근 국내의 경우 자연재해와 관련한 사회 인프라 유지관리 측면과 해외 자원 개발과 관련한 노천광산 사면유지 등 그 중요성이 더욱 부각되고 있는 분야이다.

본 분석 연구에서는 암반 사면공학 분야에 있어서 새로운 도전의 대상이 될 수 있는 주제 발굴 및 연구 방향을 찾기 위해 ISRM Congress를 통해 최근 20년간 발표된 논문들을 중심으로 주제 분석을 통해 paper map을 작성한다.

1987년부터 2007년까지 사면 및 기초분야의 주제로 분류할 수 있는 논문 205편을 표 1의 분류기준에 따라 분석하였다. 각 분류기준은 “안정성 평가”, “실험”, “파괴 이론”, “사례 연구”, “절토 및 지보” 그리고 “계측” 등 총 6개 주제이다. 안정성 평가 주제와 관련하여 분석적 방법과 수치해석적 방법으로 다시 분류하고, 수치해석적 방법은 연속체 해석과 불연속체 해석으로 세분하였다. 또한 각각 결정론적 방법 및 확률론적 방법으로 구분하였다.

표 1. 사면 및 기초분야의 경향 분석을 위한 주주제 및 소주제.

Main topics	Sub topics		
Stability evaluation	Analytic	Deterministic	
		Probabilistic	
	Numerical	Continuum	Deterministic
			Probabilistic
Discontinuum		Deterministic	
		Probabilistic	
Testing	Laboratory		
	Field		
Case study	Mining		
	Civil		
	Others		
Monitoring	Conventional		
	IT-Fusion		
Failure Mechanism			
Excavation and support			

주요 주제인 “실험”은 각 실험실 시험과 현장 시험으로 구분하였다. 사례 연구 분야는 광

산, 토목, 여타 분야 등으로 구분하였고, 계측분야는 기존방식과 IT기술을 결합한 융합기술로 구분하였다.

## 2. 주제별 경향 분석

다수 주제들 중 비중을 비교적 크게 차지하는 안정성 해석 분야는 한계평형해석에 기초한 분석적 방법과 수치해석적 방법으로 분류하였다. 90년대 이후 컴퓨터 연산 속도 및 수치해석 기법의 급속한 발전에도 불구하고 여전히 한계평형해석에 기초한 분석적 방법의 비중이 줄어들지 않고 있는 것은 흥미롭다(그림 1). 이는 한계평형해석의 간편성으로 인해 현장 실무자들에게 여전히 인가가 있으며, 강력한 해석 도구임을 의미한다고 볼 수 있다.

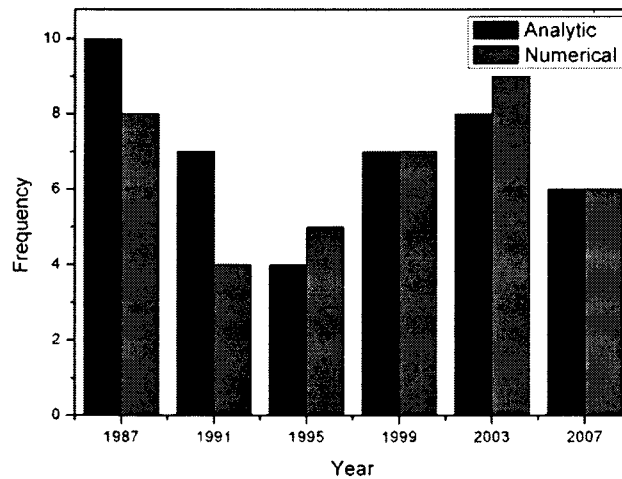


그림 1. 분석적 방법과 수치해석적 방법의 경향 비교.

수치해석적 방법에서 연속체 해석과 불연속체 해석의 경향을 살펴보면, 사면공학 분야에서 불연속체 해석에 관한 연구가 연속체해석에 비해 많이 이루어지고 있음을 알 수 있다(그림 2). 1990년대까지 연속체 해석이 안정성 해석을 위해 주로 활용되었으나, 2000년대 이후 불연속체 해석이 주를 이루었다. 암반 사면의 안정성 해석의 경우, 연속체 해석이 어느 정도 한계성을 지고 있으며, 불연속체 해석기법의 대표적인 방법인 개별요소법(DEM, discrete element method)은 강체 혹은 변형 가능한 암반 블록의 거동 및 상호작용을 잘 모사할 수 있어서 완전한 동적 모사를 실현할 수 있다는 장점으로 인해 사면공학 분야의 연구자들에게 매우 매력적인 방법으로 인식되기 시작했기 때문인 것으로 판단된다.

사면의 안정성 해석을 결정론적 접근법과 확률론적 접근법으로 구분하여 분석을 시도하였다. 1990년대에는 사면 안정성 평가와 관련하여 확률론적 접근법을 적용한 논문들이 상대적으로 많았다(그림 3). 이 당시 주로 암반 불연속면의 기하 및 그 분포에 관한 연구 성과들이 많았고, 그 결과를 사면의 안정성 평가 부분에 반영하려는 시도들이 많았던 것으로 판단된다.

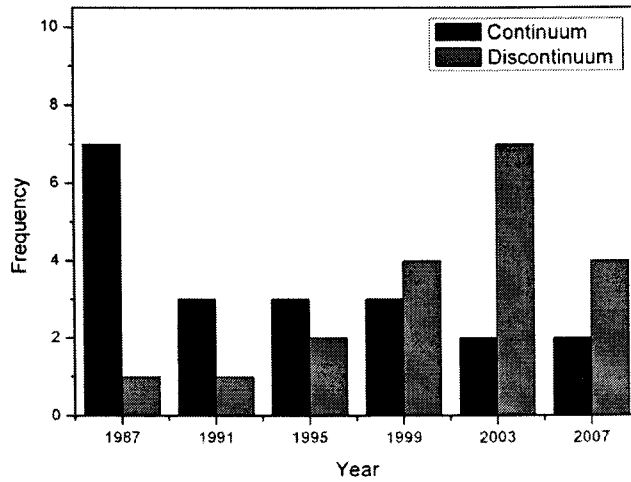


그림 2. 연속체 모델링 및 불연속 모델링의 경향 비교.

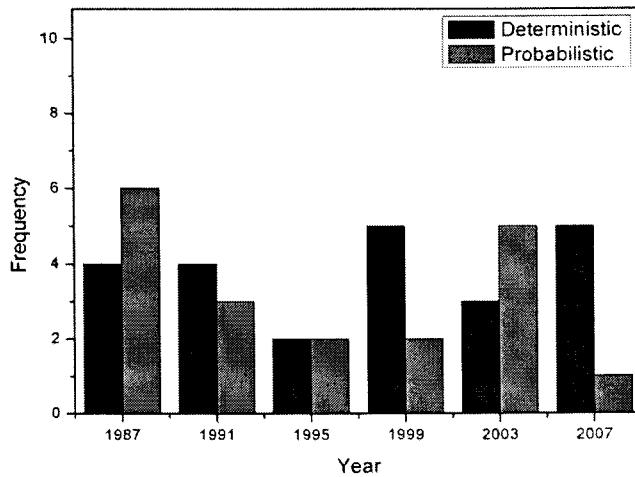


그림 3. 결정론적 접근법과 확률론적 접근법의 경향 비교.

이후 2003년도를 제외하고는 확률론적 접근법에 관한 연구들이 감소 추세를 보였다. 2003년도의 확률론적 접근법과 관련한 논문들은 주로 대상 암반의 물성의 불확실성을 반영하고자 하는 시도들이었다.

확률론적 접근법이 가지는 개념적 장점에도 불구하고, 1990년대 후반부터 확률론적 접근법과 관련한 논문의 빈도가 줄어드는 이유는 그 적용성과 관련이 있는 것으로 판단된다. 확률론적 접근법의 중요한 결과인 리스크(risk)의 개념을 실제 설계에 반영하기 위한 시방서나 규정이 마련되어 있지 않고, 기존 사면 설계시 사면의 안전율에 의해 안정성을 평가하고 있기 때문이다. 따라서, 확률론적 접근법의 개념적 장점과 합리성을 적극 활용하기 위해서는 보다 많은 적용 사례를 통해 시방서나 규정의 확립이 선결되어야 하며, 이는 리스크(risk) 혹은 신뢰성(reliability)에 기초한 설계가 가능케 할 것이다.

계측은 사면공학에서 매우 중요한 역할을 한다. 특히 사면의 변위 계측은 안정성을 평가하는데 매우 효과적이다. 경사계나 변위계를 이용한 변위 계측기술들과 관련한 논문들이 주

로 발표되었다. 최근 IT 기술의 급속한 발전은 계측분야에서 IT 융합기술의 채택을 가속화시켰다. 디지털 영상 분석 및 처리, 레이저 스캐너, GPS 그리고 미소지진파(micro seismic) 등의 다양한 기술들을 이용한 계측 기술들이 적용되고 있다. 2000년대부터 이와 관련한 논문들이 급속히 증가하였음을 확인할 수 있다(그림 4).

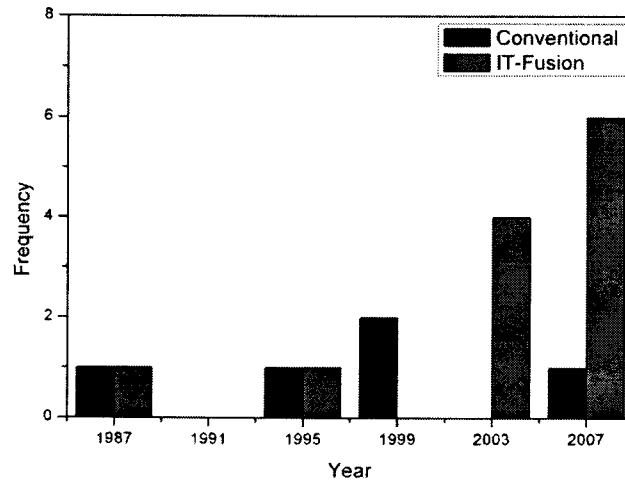


그림 4. 기존 계측 기술과 IT 융합기술 관련 계측기술 경향 비교.

이론적 연구들의 빈도는 안정성 평가와 관련한 적용 사례 논문에 비해 아주 적었는데(그림 5), 이는 사면 공학 자체가 암석역학의 응용 분야이기 때문으로 해석할 수 있다. 그럼에도 불구하고, 사면 파괴 기구와 관련한 파괴 이론은 암석역학에서 연구되고 있는 방향과 구별되는 사면 공학만의 특징을 가지기 때문에 앞으로도 비중은 적지만 꾸준한 연구 논문들이 발표될 것으로 예상할 수 있다.

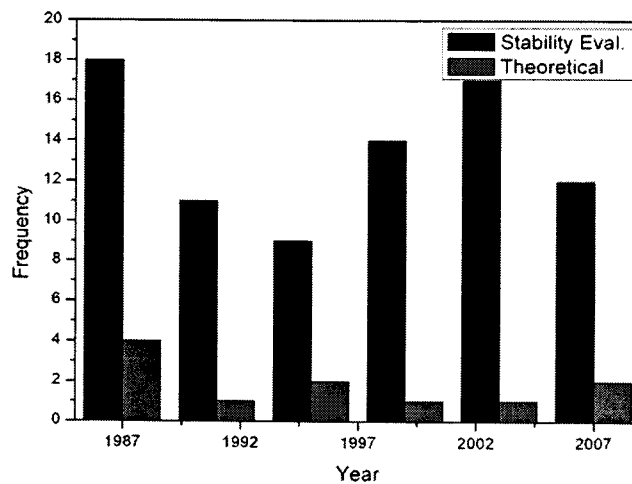


그림 5. 안정성 평가 적용 사례 연구와 이론 연구의 경향 비교.

### 3. 연구 동향

2007년에 개최된 11차 ISRM Congress에 발표된 주요 논문들을 토대로 사면 및 기초분야의 최근 기술 동향을 파악하고자 하였다.

11차 ISRM Congress에서는 “slope, foundation and dam”이라는 세션을 통해 사면 및 기초분야의 46편의 논문들이 발표되었다. 이들 논문들을 통해 조사, 안정성 평가, 절토 및 보강, 계층 등의 단계별로 최근 연구 동향을 기술한다.

#### 3.1. 조사 및 사례 연구

지반 조건을 파악하기 위한 조사는 많은 사례 연구들에서 찾을 수 있었다.

Schmitz 등은 벨기에의 카르스트 지역의 사례 2건에 대한 사례 논문을 발표하였으며, Wang은 중국 Jietai 사원의 산사태에 대한 계층과 보강에 대한 사례를, Pisonte 등은 Arrabida 절벽들에 안정성 평가에 대한 사례를 발표하였다. Arbanas 등은 상대적으로 낮은 강도 정수들에 기인하는 loosening mechanism에 대한 수치해석적 연구를 발표를 하였다. Tomas 등은 “world within world” 방법을 사용한 SMR의 매개변수들에 대한 4차원 도식화 방법을 제시하였다.

Pötsch 등은 3차원 영상을 이용한 키블록 해석을 소개하였고(그림 6), Rotonda 등과 Ferrero 등은 불연속면의 방향을 측정하기 위해 레이저 스캐너를 활용하였다. 이는 IT 융합기술 기술의 사례들로 이해할 수 있으며, 이와 관련한 연구들은 앞으로 조사 분야에서 많은 연구들이 발표될 것으로 기대할 수 있다.

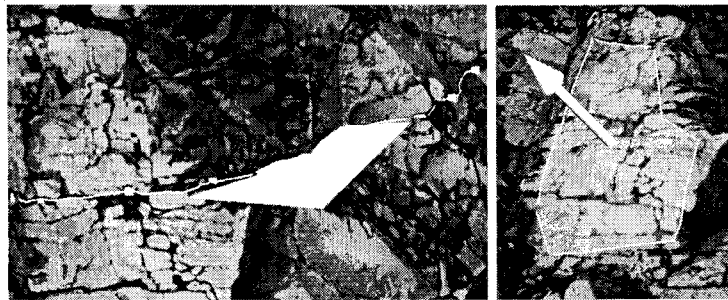


그림 6. 3차원 영상을 이용한 선형 및 면 요소의 측정(Pötsch 등, 2007).

#### 3.2. 실험

실내 및 현장 실험과 관련한 다양한 논문들이 발표된 점은 11차 Congress의 특징으로 볼 수 있다. Kramadibrata 등은 암반 사면의 시간 의존성 거동을 특징짓기 위해 전단 크리프 실내 실험을 수행하였다. Ballivy 등은 삼중 튜브 코어 시스템을 이용하여 콘크리트-암석 면에 대한 실내 전단 시험에 대한 논문을 발표하였다. Vrkljan은 암석과 콘크리트 접촉면의 전단 강도와 변형 특징을 파악하기 위해 원위치 직접 전단 시험을 수행하였다(그림 7). Saydam과 Docrat은 남아공의 kimberlite 지역에서 점착력에 대한 실험실 및 원위치 실험

결과를 소개하였다. 그 밖에도 Qian 등은 영구 동토층 지역에서 파일 기초의 안정성을 평가하기 위한 다양한 실험들을 수행하였으며, Iabichino와 Cravero는 수압파쇄법과 응력개방법에 의한 암반 응력 측정 사례를 발표하였다. Tshibangu 등은 GSI와 햄머드릴링 로깅 결과와의 관계를 이용하여 암반 성질을 평가하는 연구 결과를 발표하였다. Ito 등은 SR값(shock response value)와 변형 계수사이의 관계를 소개하였다. Manzella와 Labiouse는 암석 사태(rock avalanches)를 예측하기 위한 모델 시험을 수행하였다(그림 8).

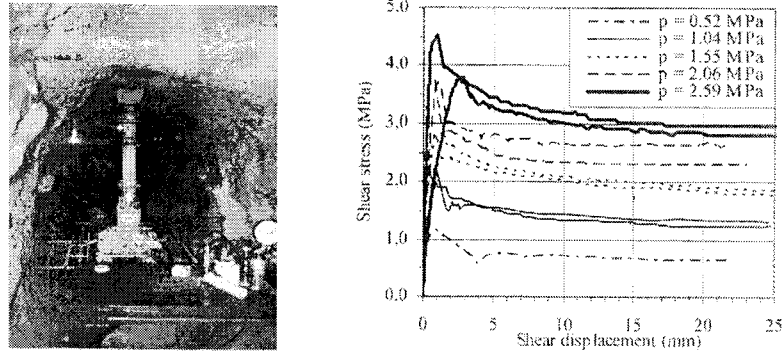


그림 7. 원위치 전단 시험 및 결과(Vrklijan 등, 2007).

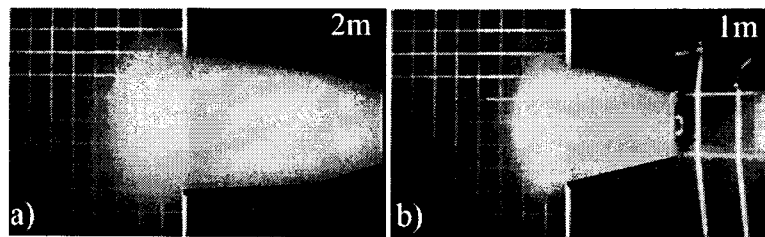


그림 8. 암석 사태에 대한 모델 실험(Manzella와 Labiouse, 2007).

### 3.3. 안정성 평가

11차 Congress에서는 안정성 평가와 관련하여 불연속체 해석기법인 DEM의 연구들이 비교적 활발하였다.

Fisher와 Eberhardt는 사면의 구배보다 경사가 낮으면서 사면에 노출된 절리가 없는 경우 사면 바닥부 선단에서 발생하는 breakout 혹은 내부의 이차 전단 파괴와 같은 복잡한 파괴 유형을 DEM을 이용한 bi-planar dip slope의 전단 강도 추정을 통해 설명하고 있다(그림 9). Franz 등은 UDEC을 이용하여 step path failure를 보이는 대규모 사면 파괴 기구에 대한 이론적 매개변수 연구를 수행하였다. Yan 등은 암반 사면의 step-paths를 특징짓기 위해 디지털 이미징 기술을 이용하였으며, step-path failure를 모사하기 위해 hybrid Finite/Distinct Element Code(ELFEN)을 적용하였다(그림 10). Ohtsuki 등은 결합력 알고리즘의 개념을 DEM에 반영시킴으로써 기존재하는 불연속면과 사면의 균열의 전파과정을 설명하였다.

또한, Tsesarsky와 Hatzor는 돌출하여 걸려있는 암반 블록의 안정성 해석을 위해 동역학적 이론과 DDA을 적용하였다. Nishimura와 Kiyama는 확률론적 rockfall 예측을 위한 3차

원 수치모델링 사례를 발표하였다. 다양한 범용 코드를 위하여 사면, 댐, 기초 등의 안정성 검토를 수행한 다양한 사례들이 발표되었다.

비록 사면 안정성 해석과 관련하여 불연속체 모델링을 이용한 수치해석적 방법이 지배적이지만, 고전적 접근법인 한계평형해석과 입체투영법에 있어서 보다 정교한 개선방안과 관련한 연구들도 발견할 수 있었다. Serrano 등은 화산암 지역의 불균질 구조를 포함하는 사면 안정성의 안전을 계산법을 제안하였는데, 이 방법은 대상 암반의 최대 및 잔류 강도 및 변형 특성을 설명할 수 있다. Maurenbrecher와 Hack은 수정된 입체투영망의 전도파괴 포락선을 제안하였는데, 이는 "spalling"에 의한 전도파괴와 "over-turning"에 의한 전도파괴를 구분할 수 있다는 장점을 가진다.

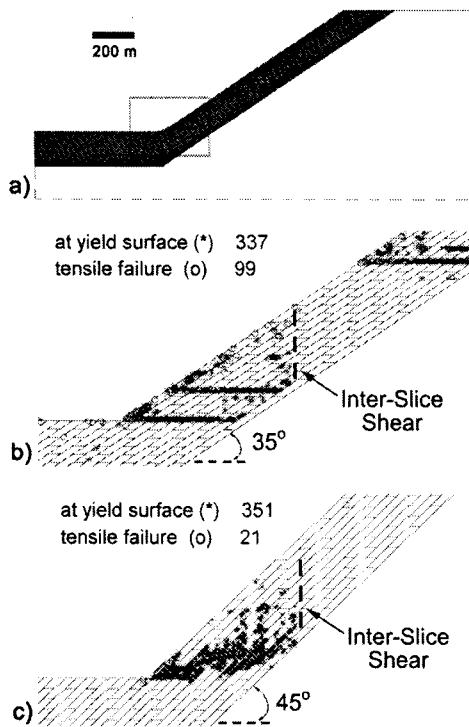


그림 9. 얇은 층리들이 분포하는 사면에서의 DEM 모델링(Fisher 등, 2007).

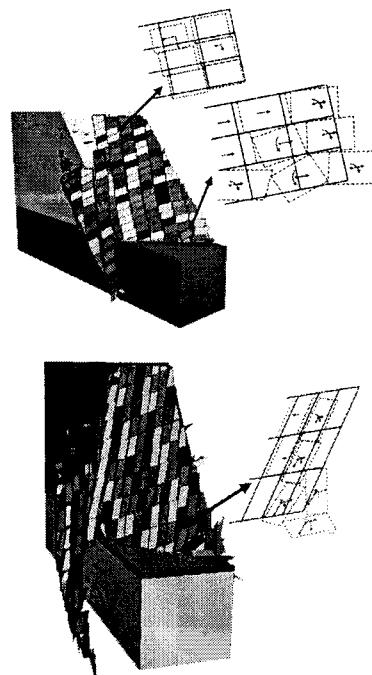


그림 10. 3DEC 모델링 결과(Yan 등, 2007).

### 3.4. 절토/보강 및 계층

Feng과 He는 사면의 안정성을 유지하기 위한 잘 정립된 방안을 제안하였다. Menezes와 Cardoso는 암반 사면의 안정성 향상에 미치는 라이너의 영향을 FLAC3D를 이용하여 평가하였다. Zhu 등은 PS 앵커 케이블(pre-stressed anchor cable)의 앵커링 메커니즘을 설명하였으며, Yang 등은 댐 하단부터의 앵커 설계를 위한 이론을 제안하였다.

Zhao 등은 공정 최적화를 위해 계층정보 활용방법에 대한 논문을 발표하였으며, Eguchi 등은 7년 동안의 장기 계층 자료를 토대로 사면 안정성을 판단한 사례를 발표하였다. Freiberg 등도 사면 변형을 예측하고 안정적인 유지를 위한 장기 모니터링 자료를 활용한

사례 연구를 발표하였다. 조태진 등은 사면 거동을 유발하는 기구를 기술하기 위해 DOM (discontinuity orientation measurement)로부터 얻은 불연속면의 정보의 활용에 대한 논문을 발표하였다.

#### 4. 결론

ISRM Congress를 통해 과거 20년간 발표되었던 논문들을 토대로 사면공학 분야의 연구 동향에 관한 결론은 다음과 같다.

- 안정성 평가와 관련하여 90년대 이래로 수치 해석적 방법의 비약적으로 발전하였지만, 여전히 분석적 방법도 폭넓게 이용되고 있으며, 실무자들에게도 효과적인 방법인 것이다.
- 수치모델링의 경우, 연속체 해석에 비해 불연속체 해석이 사면 안정성 평가에 있어서 훨씬 효과적이고 강력한 도구로 자리 잡고 있음을 확인할 수 있었다.
- 주로 불연속면 기하의 불확실성과 분포를 고려한 확률론적 접근법은 사면 안정성 평가에서 매우 합리적인 접근법일 수 있으나, 그 적용성에 있어서 아직 제도적으로 밀받침되어 있지 않은 상태이다.
- 사면의 장기 안정성과 관련하여 암반의 시간 의존적 전단 거동에 관한 연구는 매우 중요할 것으로 전망할 수 있다.
- DEM을 활용하여 사면 파괴 기구에서 step path failure와 관련한 연구들이 비교적 활발히 이루어지고 있다.
- 계측과 관련하여 사면이 파괴를 유발하는 초기 변위는 아주 작기 때문에 기존의 변위 중심 계측은 한계성을 지닌다. 따라서, 힘과 관련한 인자들을 직접 계측할 수 있는 방안들에 대한 연구들이 필요할 것이다.

#### 참고문헌

55 papers in the theme "Rock foundations and slopes", 1987, 6th International Congress on Rock Mechanics

26 papers in the theme "Stability of rock slopes", 1991, 7th International Congress on Rock Mechanics

19 papers in the theme "Near-surface excavations; Stability of slopes and foundations", 1995, 8th International Congress on Rock Mechanics

25 papers in the themes "Natural rock slope stability-Safety of the surface excavations in rocks" and "rock Foundations", 1999, 9th International Congress on Rock Mechanics

31 papers related to "Slopes, foundations and dams", 2003, 10th International Congress on Rock Mechanics

46 papers in the theme "Slopes, foundations and open pit mines", 2007, 11th International Congress on Rock Mechanics