

# 사면안정 연구 및 기술동향

사면안정기술위원회

## 1. 서론

우리나라의 경우, 국토 면적은 제한되어 있고 특히 밀집한 도심지 인근 공사 시에 사면 경사를 결정하는 것은 쉬운 일이 아니다. 또한 주어진 조건 내(부지의 부족, 환경고려 등)에서 이미 결정되어진 사면경사를 어떻게 유지하느냐 하는 것이 사면에 종사하는 기술자들의 임무인 것이다.

지금까지의 사면분화에 대한 접근 이론들이 너무 고전적인 방법에 치우쳐있는 경향이 없지 않았다. 또한 기술자들의 보수주의적 경향으로 새로운 이론의 접촉을 멀리한 것도 부인할 수 없다. 본고를 계기로 새로운 이론을 현장에 접목하고 왕성한 연구의 수행으로 사면해석이론과 기술발전이 한 단계 높아지기를 기대해 본다.

## 2. 최근 사면안정 이론 및 연구동향

### 2.1 토사사면

#### 2.1.1 개요

최근 토사사면에 대한 최근 연구동향을 미국토목학회(ASCE) 주관으로 개최된 Slope Stability 2000에 발표된 논문을 바탕으로 살펴보면, ①유한요소법 또는 유한차분법에 의한 사면안정해석, ②3차원 사면안정해석, ③한계해석법(Limit Analysis)에 의한 사면안정해석, ④쓰레기 매립사면 및 초연약 점토사면 등에서의 사면안정해석, ⑤지진시의 사면안정해석, ⑥말뚝 등으로 보강된 상태에서의 사면안정해석, ⑦파괴확률이론을 이용한 사면의 안정해석 등으로 요약할 수 있다.

또한 지난 1997년 5월에 홍콩에서 개최된 “Slope Engineering in Hong Kong”이라는 주제의 학술대회 내용 중 초청강연 내용(Koo, 1998)을 간략히 정리하면 다음과 같다.

(1) 잔적토의 경우에는 풍화도의 평가가 중요한 요소이며, 우리나라의 경우에 있어서도 토사사면의 상당부분이 풍화잔적토에 해당하므로 이에 대한 지반 특성치 및 풍화도의 평가방법 등에 대한 연구가 필요하다고 생각된다.

(2) 풍화잔적토의 경우 전단강도는 응력수준에 따라 다르므로 현 상태의 응력수준에 맞게 결정하는 것이 바람직하다. 또한 비교적 가파른 자연사면의 풍화잔적토층에 있어서 장기간의 강우나 집중호우 시 천층파괴가 발생하는데, 이러한 현상은 “soil suction”에 의한 문제로 평상시 표층부근에서

는 음의 간극수압이 발생하여 사면의 안정성을 유지하고 있다가 강우로 표층부근이 점차 포화되면서 음의 간극수압이 소멸되어 전단강도가 저하되기 때문으로 알려져 있다(Fredlund 등, 1995; Ng 등, 1998). 홍콩에서는 이와 같은 “soil suction” 문제와 관련하여 1978년부터 1997년까지 20년간의 현장계측자료를 바탕으로 분석한 내용(Shen, 1998)을 소개하고 있으나 아직까지는 실제시 반영할 수 있는 내용은 없으며, 앞으로도 많은 연구가 필요한 것임을 시사하고 있다.

본 절에서는 토사사면의 안정해석과 관련하여 비교적 국내문헌에 잘 소개되어 있는 일반적인 내용은 생략하고, 국내·외 각 기관별 최소안전율 기준과 전단강도감소(Shear Strength Reduction, SSR) 기법을 이용한 사면안정해석의 특징을 간략히 정리하였다.

### 2.1.2 안정성 평가

사면의 안정성 평가는 ① 전단강도측정, 사면의 기하학적 조건 및 기타조건에 대한 불확실 정도, ② 사면의 경사를 완화시키거나 높이를 감소시키는데 소요되는 비용, ③ 사면파괴시 피해액의 정도, ④ 사면이 영구 구조물인가 일시 구조물인가의 판단에 따라 좌우되며, 국내·외 각 기관별 절·성토사면의 최소안전율을 정리하면 표 1과 같다.

### 2.1.3 SSR(Shear Strength Reduction) Technique

사면의 안정성은 일반적으로 2차원 한계평형해석법(LEM)을 사용하여 평가하고 있다. 그러나 이들 방법들은 복잡한 지형조건이나 대규모 사면에서의 안정성을 평가하는 데에는 약간의 문제가 있으며, 최근 컴퓨터 공학의 발전과 계산기법의 향상으로 종전에는 계산시간 때문에 쉽게 접근할 수 없었던 유한요소법(FEM) 또는 유한차분법(FDM)을 이용한 사면의 안정성 평가방법이 개발되고 사용되고 있다.

유한요소법에 의한 사면안정해석시 안전율의 평가방법은 그림 1과 같이 여러가지 제안된 방법이 있으며, 이 중에서 파괴시까지 지반의 전단강도를 감소시켜가면서 계산하는 방법을 전단강도감소기법(SSR)이라 부른다. SSR 기법은 Zienkiewicz 등(1975)이 처음으로 사용한 이후 Naylor(1982), Donald & Giam(1988), Matsui & San(1992), Ugai(1989), Ugai & Leshchinsky(1995), Dawson 등(1999) 많은 학자들에 의해 소개된 바 있다. SSR 기법은 사면안정해석에 있어서 일반적으로 사용하고 있는 절편법에 비해 많은 이점이 있다. 그 중에서도 가장 중요한 것은 파괴면과 파괴 메커니즘을 자동적으로 찾아 준다는 것이다(Dawson 등 2000).

한계평형해석법에 의한 사면안정해석결과와 최근 개발된 FLAC-2D 프로그램을 이용하여 SSR 기법을 적용한 사면안정해석결과를 비교해 보면, 그림 2와 같이 지층조건 및 사면의 형상이 단순한 경우에는 거의 비슷한 안전율이 계산되었으나 지층구조 및 사면의 형상이 복잡한 경우에는 SSR 기법을 이용한 경우가 좀 더 신뢰성 있는 결과를 나타내었다(Cala & Flisiak, 2001).

표 1. 국내·외 각 기관별 절·성토 사면의 최소 안전율

구분	내용	최소 안전율	
		성토사면	절토사면
건설교통부	구조물기초 설계기준	$F_s \geq 1.3$	$F_s \geq 1.3$
한국도로공사	도로설계요령	$F_s \geq 1.3$	$F_s \geq 1.5$
일본 토질공학회	가설구조물, 건설중의 사면안정 등의 일시적인 안정에 적용	$F_s \geq 1.0 \sim 1.2$	-
	일반적인 구조물인 경우	$F_s \geq 1.3$	-
	중요 구조물인 경우	$F_s \geq 1.5$	-
	지속하중이 작용할 경우	-	$F_s \geq 1.5$
	구조물 기초의 경우	-	$F_s \geq 2.0$
	일시적인 하중작용 및 시공시	-	$F_s \geq 1.25 \sim 1.3$
일본 건설성	표준적인 계획안전율	$F_s \geq 1.1 \sim 1.3$	$F_s \geq 1.1 \sim 1.3$
일본 도로공단	도로설계요령	-	$F_s \geq 1.5$
일본 항만협회	항만시설 기술상의 기준, 동해설	$F_s \geq 1.5$	$F_s \geq 1.3$
미국 Federal Register (1997)	시공 직후	-	$F_s \geq 1.3$
	침윤을 고려할 때	-	$F_s \geq 1.5$
	지진을 고려할 때	-	$F_s \geq 1.0$
영국 National Coal Board (1970)	Peak시 전단강도(UU test)	-	$1.5 \geq F_s \geq 1.25$
	Residual 전단강도 (CD test)	-	$1.35 \geq F_s \geq 1.15$
	c=0 인 CD Test 인 경우	-	$1.2 \geq F_s \geq 1.1$
NAVFAC-DM7	하중이 오래 작용할 경우	-	$F_s \geq 1.5$
	구조물 기초인 경우	-	$F_s \geq 2.0$
	시공시만 하중을 받는 경우	-	$F_s \geq 1.3$ or $1.25$
	지진하중이 작용하는 경우	-	$F_s \geq 1.2$ or $1.15$

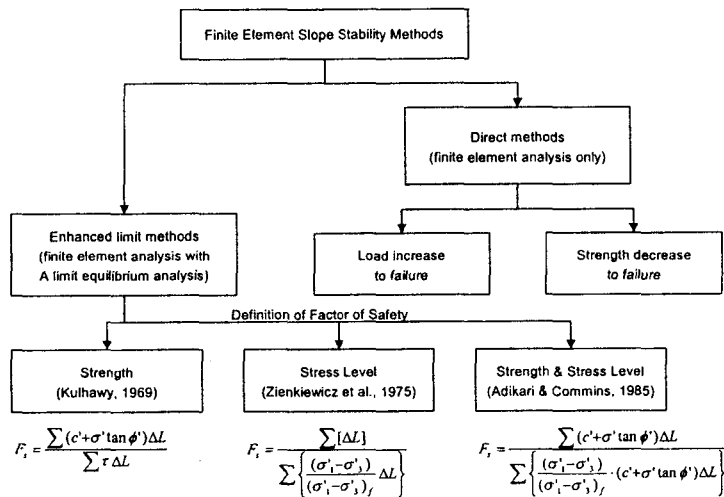
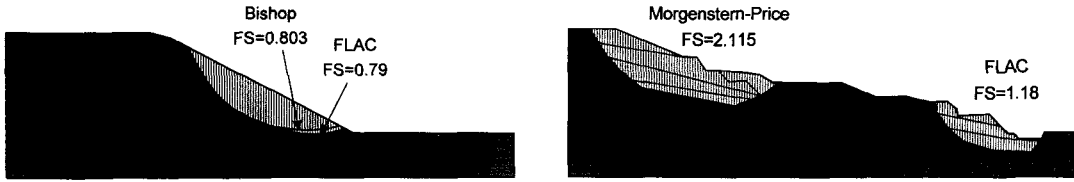


그림 1. 유한요소법에 의한 사면안정해석시 안전율의 평가방법(Fredlund 등, 1999)



(a) 소규모 사면의 경우(사면높이=10m)

(b) 대규모 사면의 경우(사면높이=170m)

그림 2. LEM과 SSR과의 비교

## 2.2 암반사면

### 2.2.1 개요

암반사면은 토사사면과 달리 그 파괴형태가 다양하며, 원호파괴는 물론 평면파괴(Plane failure), 썰기파괴(Wedge Failure) 및 전도파괴(Toppling Failure) 등이 발생된다. 파쇄가 심하고 불연속면이 불규칙하게 많이 발달된 암반사면에서는 원호파괴가 발생한다

암반사면에서의 파괴는 암석자체의 강도보다는 암반 내에 존재하는 불연속면의 발달상태가 중요한 요인이 된다. 불연속면의 특성에는 불연속면의 방향, 간격, 연속성, 강도, 틈새, 충전물질 및 지하수상태 등이 있으며, 이 중 불연속면의 방향(경사방향 및 경사각)과 불연속면의 마찰각이 암반 절취사면의 방향(경사방향 및 경사각)에 따라 암반사면의 안정성에 중요한 역할을 한다.

본 고에서는 암반사면 안정성 해석을 위한 종래의 기술인 암반분류, 평사투영법, 한계평형해석, Block 이론 및 낙석 수치모형 해석 등과 최근의 기술인 확률론적 사면안정해석, Fuzzy 이론 및 동적 해석 등에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

### 2.2.2 종래의 기술

#### (1) 암반분류

암반분류란 암반의 공학적 특성을 파악하기 위해, 암반을 구성하는 암석의 강도, 풍화 및 변질 정도, 암반 틈새의 상태, 암반의 불균질성과 불연속면의 속성 등에 관한 사항을 일정한 기준에 따라 암반을 등급으로 나누어 구분하는 것이다. 이러한 암반분류 방법은 Terzaghi(1946), Lauffer(1958), Deere(1967), Wickham (1972), Bieniawski(1973), Barton(1974) 등 많은 사람들에 의해 개발되고 수정되어 왔으며, 현재 국내에서 가장 많이 사용되는 것은 Bieniawski의 RMR 분류법이다. 그러나 RMR법은 터널설계를 위해 제안된 방법이므로 단순히 암반을 평가하는 목적으로 사용하기에는 모순이 있다는 주장이 있다.

Hoek(1995)은 일반적인 암반의 평가 시 발생하는 이러한 모순점을 해결하기 위해 GSI(Geological Strength Index, 1995)란 분류법을 제안하였다. GSI분류는 기존의 RMR(1976)을 사용하여 평가하나, 지하수 상태 항목은 10점(dry), 절리 방향성의 보정 항목은 0점(very favourable)으로 할당하여 암반을 평가한다(Hoek, E., 1998).

SMR(Slope Mass Rating)은 암반사면에 대해 1차적으로 안정성을 평가하는 방법으로 일반 암반의 평가법인 RMR(Bieniawski, 1989)을 근거로 하여 사면에 대한 요소들을 보정하는 방법으로 Romana

(1993)에 의해 제시되었으며 분류 등급에 따라 예상되는 파괴형태와 지보대책에 대한 방법도 제시하고 있다.

## (2) 평사투영법

평사투영법은 불연속면의 주향과 경사 및 내부마찰각, 사면의 주향과 경사 등을 이용하여 암반사면의 안정성을 검토하는 방법으로 한계평형해석이나 수치해석 등에 앞선 개략적이고 신속한 1차 해석의 용도로 암반사면의 경사 결정, 파괴현상의 예측 및 원인규명, 파괴가 발생한 암반사면의 개략적인 기울기 조정, 정밀분석이 어려운 소규모 사면의 안정성 분석 등에 이용하기 편리하다.

## (3) 한계평형해석

일반적으로 평사투영법을 이용하여 암반사면에서의 개략적인 안정성 평가를 실시한 후 위험하다고 판단된 잠재적인 파괴가능성을 가지고 있는 불연속면에 대해서는 한계평형식을 이용하여 안전율을 계산한다.

한계평형식은 미끄러짐을 유발시키는 힘이 저항하는 힘과 정확히 균형을 이루는 조건을 말하며 사면의 안정성을 나타내기 위해서는 안전율을 사용하는데, 이는 미끄러짐을 유발하는 합력에 대한 미끄러짐에 저항하는 합력의 비로 정의된다.

## (4) Block 이론

Block 이론은 암반내의 불연속면을 3차원으로 표현할 수 있는 안정해석 기법으로 위상기하학(位相幾何學)과 stereo 투영법을 응용해서 위험한 암괴(key block)를 검색하고, 그 block에 안정대책을 취함으로써 전체를 안정시키고자 하는 이론이다. 이 해석은 불연속면의 분포가 미리 파악되어 있는 것을 전제로 하며, 불연속면과 굴착면의 기하학적인 관계로부터 안정성을 논의하는 기법이다. 이러한 block 이론의 수치해석적 접근방법으로는 개별요소법(DEM)을 일례로 들 수 있으며, 불연속체 매질은 시스템을 구성하는 개별 물체 사이의 접촉면(contact)이나 경계면(interface)의 존재에 의하여 연속체 매질과는 구분된다. 개별요소법에서 계산은 모든 접촉에서의 힘-변위 법칙(force-displacement law)과 모든 블록에서의 Newton의 제 2법칙을 번갈아 적용하며 수행된다(Hoek, E. & Bray, J. W., 1981).

## (5) 낙석 수치모형 해석(Rockfall modeling)

사면보호공법의 설계를 위해서는 우선적으로 사면형태와 낙석의 특징을 알아야 한다. 낙석특징은 사면형태, 암반의 반발계수(coefficient of restitution) 및 마찰성질, 그리고 낙석의 제반 물리적 성질(모양, 크기 등)에 영향을 받으며, 낙석의 특징은 낙석 수치모형 해석(rockfall modeling, 그림 3 참조)과 같은 방법을 통하여 ① 낙석의 최대 이동가능 거리, ② 낙석이 튀어서 떨어질 때의 수평거리, ③ 낙석 이동 궤적의 종단, ④ 낙석이 낙하, 튀김, 미끄러짐 그리고 구르기 운동 중에 소비하는 에너지 등의 예측이 가능하다.

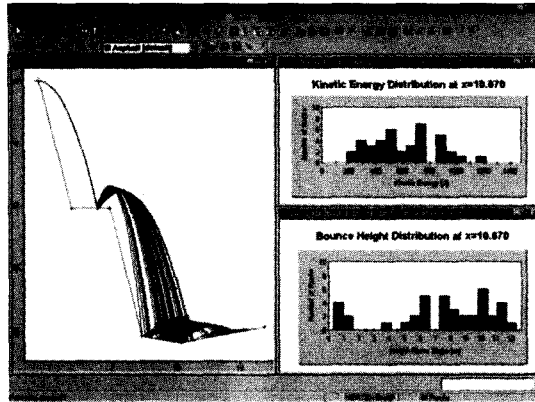


그림 3. RocFall 해석결과 예

## 2.3 최근 사면안정해석 이론

### 2.3.1 확률론적 사면안정해석

확률론적 분석기법은 해석조건이나 입력물성치의 불확실성을 고려하기 위하여 실시하며 일반적으로 많이 사용되는 방법으로는 몬테카를로 기법(Monte Carlo Simulation)과 일계신뢰분석법(First Order Reliability Method)이 있다(Cornell, C.A., 1971, Cambou, B., 1975).

#### (1) Monte Carlo Simulation

Monte Carlo Simulation에서는 불연속면의 방향, 간격, 연장성, 전단강도 등은 상당한 분산이 나타나므로 수많은 횟수의 샘플링을 실시하고 파괴의 발생가능성( $P_f$ )을 확률론적으로 평가한다. 0과 1사이 구간에서 발생시킨 무작위 난수 U(Uniform Random Variable)를 입력치의 누적분포함수(Cumulative Distribution Function, CDF)의 역함수에 대입하여 입력치 X를 구하게 된다.

한계평형해석(Kinetic Analysis) 및 블록이론에 의하여 활동가능한 썩기의 형성여부(Kinematic instability)와 썩기의 활동여부(Kinetic Instability)를 산정하고 전반적인 썩기파괴 가능성( $P_f$ )은 Kinematic Instability와 Kinetic Instability의 조합에 의해서 산정된다. 안정성 판정기준은 다음 식에 의한다.

$$P_f = P(\text{Kinematic Instability}) \times P(\text{Kinetic Instability}) < 0.15 (\text{Hoek, 1991})$$

#### (2) 일계신뢰분석법(First Order Reliability Method)

일계신뢰분석법(FORM)에서 한계상태함수(limit state function)는 표준공간에서 원점으로부터 가장 가까운 linearization point에서 tangent 평면으로 대체되며 First Order Reliability Method에서의 신뢰지수는  $\beta = \alpha^* \cdot y^*$

여기서,  $\alpha^*$ 는 design point에서 파괴영역으로 향하는 단위수직선이다. FORM의 파괴확률  $P_f$ 의 근사해는 다음 식과 같다.  $P_f = \Phi(-\beta)$

$\Phi$ : 누적정규분포함수

## 2.3.2 Fuzzy 이론(Expert 시스템)

### (1) 개요

퍼지이론은 1965년 캘리포니아대학의 자데(Zadhe)교수에 의해 제안된 수학적 이론을 응용하여 사면안정성에 관한 불확정의 상황을 소속도 함수로 표시하며 확률론에서의 통계적인 분산에 대해서 표시한다.

### (2) 엑스퍼트 시스템(Expert System)

사면분야에서의 엑스퍼트 시스템이란 사면안정의 전문가가 지니는 지식이나 경험을 획득하고 이것을 모델화하는데 따라 컴퓨터를 써서 지식표현이나 추론을 하며 전문가가 아닌 제 3 자도 사면 위험도 진단에 대해서 전문가와 같은 정도의 추론을 할 수 있는 시스템을 말한다. 사면붕괴에 영향을 미치는 요인인 지질요인, 지형요인, 지반요인, 식생요인, 기타 붕괴이력을 나타내는 요인을 추출하여 질문이 주어지면 독립적으로 존재하는 다수의 지식의 중심에서 추론에 필요한 것을 선택하여 결론을 도출, 새로운 추론을 실시하는 것이다. 관측된 데이터에 부수되는 불확실성과 애매성을 고려하기 위해 신뢰도를 정의하며 결론부에는 결론가설로서 퍼지집합(안전, 매우 안전, 보통, 매우 위험, 위험, 미지)을 정의한다. 사면 위험도 진단시스템의 검증은 과거에 표층붕괴가 발생한 지역에서 붕괴발생 사면과 비붕괴발생사면을 대상으로 하여 현지조사를 실시하여 얻어진 데이터를 입력하는데 따라 위험도를 구하여 과거 사실과의 비교에 따라 실시한다. 엑스퍼트 시스템의 기본구성은 다음의 그림 5 와 같다.

### 2.3.3 동적해석

구조물과 지반을 진동 모델로 하여 지진파형(또는, 응답스펙트럼)을 입력하고 해석하는 방법으로 실제 지진의 복잡한 거동을 고려할 수 있으므로 가장 신뢰성있는 해석 결과를 얻을 수 있다.

암반사면의 동적해석은 주로 높은 내진 안정성이 요구되는 경우나 장대 사면에서 지질구조가 복잡하고 유사정적해석에서는 충분한 지진시의 평가가 안 되는 경우 또는 충분한 안전율이 확보되지 않는 경우에 실시한다(그림 6). 일반적으로 차분법(FDM)에 의한 방법, 경계요소법(BEM)에 의한 방법, 유한요소법(FEM)에 의한 방법, DEM과 FEM에 의한 방법 등이 있다.

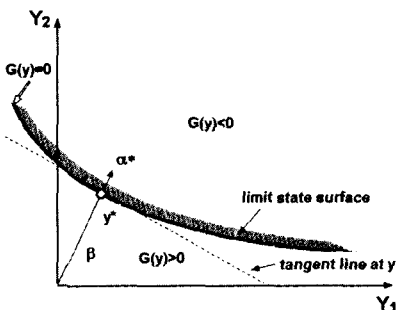


그림 4. 이차원 표준공간에서 일계신뢰분석시 신뢰지수의 표현

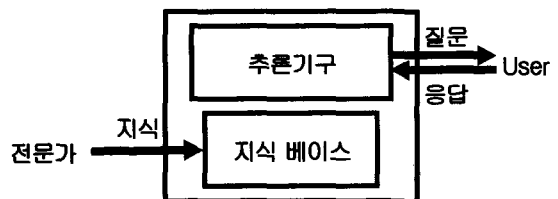


그림 5. 엑스퍼트 시스템의 기본구성

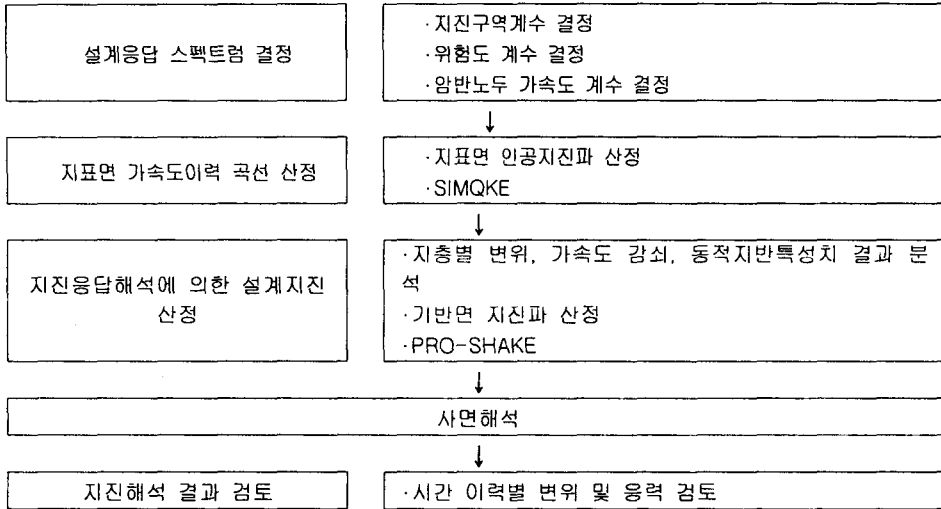


그림 6. 동적해석흐름

### 3. 사면설계를 위한 최신의 조사기법 및 시험

사면에 관한 조사 및 시험은 절취면을 구성하는 원지반의 물리적 특성과 역학적 특성을 파악할 수 있는 기초 자료를 제공함으로써 사면의 경사, 굴착공법, 보호대책 및 안정성 검토 등과 같은 사면 설계의 주요 결정 과정에 합리적인 근거를 제시하기 위한 것이다.

사면 설계를 위한 중요한 조사 및 시험 항목으로는 ① 지형(불안전 지형) ② 지질(지질구성, 지질 구조) ③ 원지반의 공학적 성질(흙, 기반암의 균열 및 풍화도) ④ 원지반의 물성(물리, 역학적 특성과 시간에 따른 변화) ⑤ 지하수 상황 등이다.

이와 같은 항목을 조사 및 시험하기 위한 방법으로는 조사 단계별로 많은 종류가 있으며 최근에는 항공사진 분석, 시추공 영상처리기법, 시추공 전단시험 등의 최신 기법이 새로이 도입되어 이용이 증가하는 추세이다.

#### (1) 항공사진 분석

사면과 관련된 항공사진의 이용은 넓은 지역에 걸쳐 동시 조사가 가능하고 조사지역을 선정하는데 편리한 장점을 지니고 있기 때문에 최근의 사면조사에서는 항공사진 촬영결과에의 이용이 증가하고 있다. 또한 같은 지역에 대한 정기적인 촬영은 포행(creep) 등 느린 속도의 사면 이동을 파악할 수 있으며, 사면의 지형형태, 사면의 변화과정, 함수 상태, 지질특성 등을 알 수 있다. 항공사진의 지질학적 해석기법을 통해 암반의 종류, 단층, 암맥, 파쇄대 등의 구조와 붕적층 및 충적층과 같은 퇴적 표토층의 두께 및 사면의 불안정성 등을 파악할 수 있다. 국내의 경우, 항공사진의 촬영 및 관리는 주로 국립지리원에서 하고 있으며 전국을 5개 구획단위로 세분하여 매년 1개 구획 단위씩 1년을 주기로 촬영하고 있다. 축척은 주로 1:20,000을 기준으로 하고 있으며, 이를 확대하여 1:5,000 축척으로



이용할 수 있다.

### (2) 시추공 영상 처리 시스템

시추조사는 토목설계 및 지하수 조사에서 귀중한 정보를 제공하지만 ①시추 장비의 성능과 시추자의 숙련도에 따라 결과가 달라질 수 있고, ②시추주상도에 표기된 정보의 불확실성과 ③코아상자의 보관 및 관리에 대한 제약성, 취급의 불편성을 수반하고 있다. 이와 같은 문제를 보완하여 보다 상세한 설계 자료를 얻기 위하여 시추공내에 특수 Video카메라를 삽입하여 공벽을 촬영하는 시스템이 개발되었다. 탐사방법은 시추공내에 360° 회전이 가능한 소형 TV카메라를 삽입하여 시추심도 전체 구간에 대한 공벽 촬영을 수행한 후 이에 대한 영상 자료를 해석함으로써 보다 상세한 정보를 얻을 수 있다.

### (3) 텔레뷰어(Televiewer) 탐사

텔레뷰어 탐사 장비는 빔(Ultrasonic beam)을 이용하여 공벽을 빈틈없이 스캐닝함으로써 공벽에 표출된 암석의 물성, 절리 발달 상태 및 외견상 strength index등을 제공해 주지만 초음파를 사용하는 관례로 시추공내에 매질(공내수)이 없으면 초음파가 전파되지 않아 시추공 영상자료를 얻을 수 없으며 또한 지하수의 이동이 있는 경우 초음파는 지하수의 흐름에 간섭을 받아 왜곡된 영상을 보여줄 수도 있다. 그러나 시추용수에 의해 공내수가 혼탁하여 시추공의 영상 촬영이 불가능 할 경우에도 Televiewer는 공내수의 혼탁 정도에 영향을 받지 않고 영상자료를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

### (4) 시추공내 직접 전단시험(Borehole Shear Test, BST)

BST는 흙의 내부 마찰각과 점착력을 원위치에서 직접적으로 측정 할 수 있는 시험이다. 즉 현장 원위치의 시추공(직경 75mm)에서 직접 전단시험을 수행 하는 것이다.

시추공 내 대상 지층에 전단판을 설치하고 지표에서 판을 통해 압력을 가하면 가장자리가 톱니처럼 울퉁불퉁한 실린더로 압력을 가하면 실린더는 인발력에 의해 끌어내지게 됨과 동시에 변위가 기록되어지며, 팽창압과 인장력은 전단응력으로 변환된다. 실내전단시험에서와 같이 3번 이상 시험구간에서 위치를 바꾸어 수평응력이 다른 상태에서 응력측정을 하여 Mohr-Coulomb의 파괴곡선으로부터 failure criteria에 의하여 강도정수  $c$ ,  $\phi$ 를 구한다.

그림 7은 1967년경 Iowa대학의 Handy교수가 개발한 BST의 모식도를 나타내고 있다(Joseph E. Bowles, 1988). BST는 가장 빠르게 흙의 강도와 점착력을 원위치에서 측정할 수 있는 시험으로서 시료를 채취하고, 운반하는 과정에서 발생하게 되는 시료의 교란 등을 사전에 예방하여 보다 신뢰성 있는 결과치를 얻을 수 있다는 장점이 있다.

## 4. 최근 사면안정화 대책 공법

구조물 등을 이용하여 활동안전율을 증가시키는 사면안정공법과 생화학적 혹은 물리학적 방법에

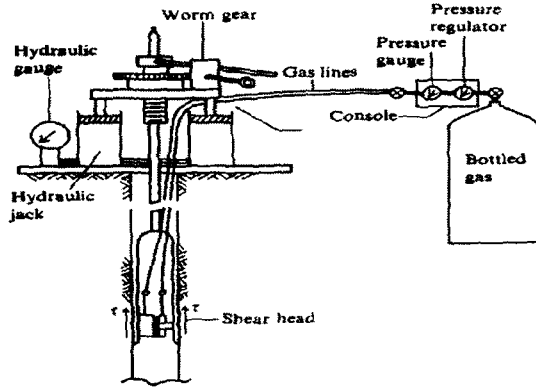


그림 7. BST 장치 모식도

의해 활동안전율을 유지시키는 사면보호공법으로 나누어 전통적으로 사용되는 사면안정화 공법을 간략히 언급하고 최근 현장에 적용되거나 연구되고 있는 분야에 대해 기술하였다.

#### 4.1 사면안정화 대책

지반의 절토 또는 성토에 의해 조성되는 사면을 안정화시키기 위한 방법은 절토, 배수, 압성토, 지반보강에 의한 방법으로 분류되거나(Schuster, 1992) 지반의 활동력 감소 및 저항력 증가에 의해 활동안전율을 증가시키는 방법과 현 상태에서의 활동안전율을 유지할 수 있도록 하는 방법으로 구분되고 있다(Hong, W.P., 1994).

##### 4.1.1 사면안정공

활동안전율 증가를 위한 보강공법은 활동력을 감소시키는 방법과 활동저항력을 증가시킴으로써 사면을 안정화시키는 방법으로 구분할 수 있다. 활동력 감소법은 사면의 경사를 완만하게 조정하거나, 활동 토괴 중 일부를 제거함으로써 안전율을 증가시키는 방법이며, 활동저항력을 증가시키는 방법은 앵커, 옹벽, 네일, 역지말뚝, 토목섬유, 지반개량 및 압성토 등을 이용하여 사면안전율을 증가시키는 방법이다(표 2).

##### 4.1.2 사면보호공

사면보호공은 주변의 환경적 요인에 의해 감소되는 사면의 안정성을 최소화시켜, 현상태의 안전율을 유지하고자 하는 목적으로 적용되며, 생물화학적 방법에 의한 식생보호공과 구조물에 의한 사면보호공의 두 가지로 구분할 수 있다(표 3참조). 식생보호공의 경우 우리나라는 1990년대 이전까지 대부분 공법과 공종이 비교적 단순하고 외국기술을 모방하는 단계였다. 이후 대기업이 환경개발 부문에서 신공법을 개발하고 투자하여 많은 신기술과 신공법이 개발되었으며, 최근들어서 환경친화적인 공법의 중요성이 대두되면서 식생을 이용한 보호공법이 활발히 적용되고 있다(한국도로공사, 1999).

표 2. 사면안정공법의 종류

구 분	종 류
사면경사조정	
억지공(抑止工)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Rockbolt공</li> <li>· Anchor공 - Earth anchor, Rock anchor</li> <li>· Soil Nailing공</li> <li>· 말뚝공 - Conc. 말뚝, P.C말뚝, 강관말뚝, Micro Pile</li> <li>· 옹벽공 - Conc. 옹벽공, 석축공(찰쌓기, 메쌓기)</li> </ul>
억제공(抑制工)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 지표수 배제공 - 수로공(도수로, 산마루측구), 침투수 방지공</li> <li>· 지하수 배제공 - 얕은층 지하수 배제공(암거), 깊은층 지하수 배제공(집수정)</li> <li>· 지하수 차단공 - 약액주입, 지하차수</li> <li>· 압성토공</li> </ul>

표 3. 사면보호공법의 종류

구 분	종 류
식생보호공	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 평매, 줄매 불임공</li> <li>· 식수공</li> <li>· 종자살포공 : Seed Spray</li> <li>· SF공, 녹생토공, 텍솔 녹화토공</li> </ul>
구조물에 의한 사면보호공	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Conc. 불임공, Block 불임공</li> <li>· 석장(石張)공 : 찰불임공, 매불임공</li> <li>· 슛크리트공, Gabion공</li> <li>· 낙석방지공</li> </ul>

## 4.2 최근의 사면안정화 대책 기술

이 분야에 대한 최근의 연구동향은 지가상승과 환경문제의 대두로 기존의 보강구조체의 개선이나 새로운 보강공법의 개발이 활발히 진행되고 있다. 따라서, 최근 적용되고 있는 공법이나, 연구되고 있는 공법을 중심으로 개념적인 사항을 요약하면 다음과 같다.

### 4.2.1 보강섬유를 이용한 공법

보강섬유를 이용한 공법 중의 하나인 FPF(Fibrillated Polypropylene Fiber)보강공법은 약 2-3cm 길이의 폴리프로필렌 합성수지를 이용하여 성토 재료에 섞어서 사용하는 성토재료의 기계적인 안정화 공법(Mechanical Stabilization Method)의 종류에 속한다. FPF는 지반 보강용 보강사로서 토사와 함께 포설하여 노반성토 재료, 사면의 보수 보강, 성토 재료, 연약지반 표층 포설 재료등으로 사용할 수 있는 공법이다.

Geotextile과 달리 보강섬유는 흙 속에 혼합되어서 흙과 섬유가 복합적으로 거동하기 때문에 그 거동과 메커니즘 해석이 난해하고 섬유와 흙과의 특성을 정확히 알아야 해석이 가능하다. 섬유의 보강효과를 이론적으로 해석하기 위한 모델의 개발은 대부분 모래질 흙을 대상으로 한 한계평형모델을

이용한 방법이었으며, 대표적인 모델은 Gray와 Ohashi(1983)가 제시한 모델이다(Gray & Ohashi, 1983). 이와같은 섬유보강 혼합토에 대한 연구가 선진국에서 활발히 진행중이다(Gray, 1986, O'Rourke, 1990)

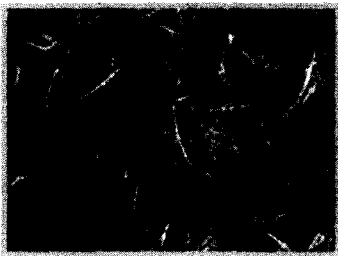
#### 4.2.2 고강도 네트를 이용한 공법

절리나 균열이 심하게 발달되어 있는 사면을 보강하는 공법으로, 최근에는 고인장 강도를 지닌 텐션네트를 사면에 밀착, 프리텐션닝으로 표면의 응력을 강화하고 네일 또는 락볼트로 지반의 전단강도를 제고시켜 강선메쉬-네일간의 힘을 상호 접선이동시킴으로써 전체사면을 일체화하는 고강도 텐션네트 공법이 개발되었다(최, 2001).

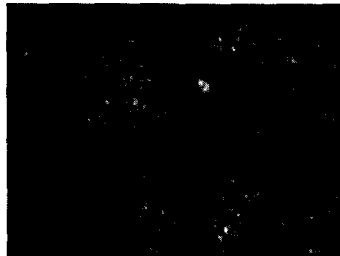
#### 4.2.3 압력분사 그라우팅을 이용한 공법

압력분사 그라우팅 네일을 이용한 사면보강공법은 천공 후 그라우트액을 지반에 따라 5~15kg/cm<sup>2</sup>의 압력으로 가압하여 그라우트재의 천공홀 충전뿐만 아니라 지반으로의 침투주입 효과를 일으켜, 전체적인 보강력 증대를 기대하는 공법이다(Kleyner, 1993). FRP관을 이용한 사면보강 그라우팅 공법은 고강도 FRP(fiberglass reinforced plastic)관을 지반조건에 따라 적절한 간격 및 형상으로 설치하고, 그라우트재를 압력에 의해 지반내에 침투 주입시킴으로써 주변지반의 전단강도를 증가시키고 고강도 FRP관에 의한 지반보강효과를 기대하는 압력분사 그라우팅공법의 일종이다(이상덕, 2000, 황영철, 2001)

그림 10은 압력분사 그라우팅네일 공법의 개념도를 나타낸 것이다.



세섬유(Fibrillated Fiber)



단섬유(Monofilament)



테이프 섬유(Tape Fiber)

그림 8. 사면보강용 보강섬유



그림 9. 고인장강도 메쉬와 네일 시공 예

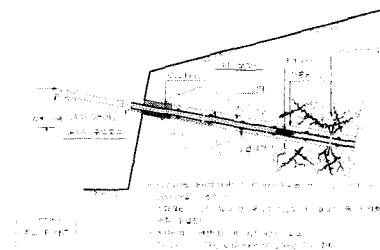


그림 10. 압력분사 그라우팅 네일 공법의 개념도

#### 4.2.4 조립식 강재틀을 이용한 보강공법

조립식 강재틀 구조란 일반 형강 및 판재를 사용하여 인력에 의해 운반할 수 있는 크기로 제작되며 현장에서 볼트체결에 의해 조립/시공되는 구조를 의미한다. 내부는 암석, 토사류 등에 의해서 충전되며 이러한 내부채움재의 전단저항과 철강재틀의 저항에 의해 외부하중에 대응하는 구조이다. 철강재틀 구조는 외국에서 사방댐, 옹벽, 기슭막이 등에 적용되고 있으며 국내에서는 1999년부터 사방댐과 기슭막이로 다수 적용실적이 있다.

강재틀 구조에 사용되는 메카니즘 중 강재틀의 경우는 기존이론으로 해석이 가능하나 내부채움재의 전단저항력에 대한 기존 연구가 미미하고 호안구조물이나 이중벽체구조의 강판셀 이론에 대한 Terzaghi(1945), Krynine(1945) 및 Cummings(1957) 등의 연구가 진행되었으나 이는 대부분 모래채움에 대한 것이므로 보다 많은 연구가 진행 되어야할 부분이다.

#### 4.2.5 낙석 흡수책 고리망(Ring)공법

산사태는 여러 종류의 유형이 있지만 우리나라의 경우는 토석류(debris flow)와 암탈락(rock fall)이 비교적 많이 발생한다. 상기 두 종류의 산사태는 비교적 빠른 시간내에 이동거리가 멀기 때문에 인명피해 발생 등 사회적 문제점을 유발시킨다.

미국, 일본, 스위스 등지에서는 사면상부 암괴가 경사면을 따라 이동하는 현상에 대해서 현장시험과 이에 대한 컴퓨터 해석프로그램을 만들어 암괴 이동에 따른 운동에너지와 이동거리 등을 분석하고 있다. 그리고 암괴가 경사면을 따라 이동될 때 이동암괴의 운동에너지를 흡수하여 특정구조물까



그림 11. 강재 옹벽그림



그림 12. 조립식 강재틀을 이용한 사방댐



그림 13. 토석류 붕괴지반 설치 예



그림 14. 암탈락 붕괴 예상지반 설치 예

지 도달하지 않도록 하는 대책방안이 개발되었는데, 예로서 경사면에 설치되는 고리망 공법을 들 수 있다(TRB, 1990).

## 5. 첨단기법을 이용한 사면계측 및 유지관리 기법

### 5.1 개요

사면 붕괴에 따른 인적 및 물적 피해는 매년 발생하며 이에 대한 대책마련을 위해 소요되는 예산도 적지 않다. 사면 붕괴는 내적 및 외적 요인이 복합적으로 작용하여 발생하므로 이의 원인규명에 많은 어려움이 수반된다. 최근에는 사면 붕괴를 사전에 방지하기 위하여 대책을 마련하지만 이상기후 및 환경의 변화, 사회적 여건 등으로 인하여 한계가 있는 것이 사실이다.

사면 붕괴원인 규명을 위하여 실시하는 계측 및 대책이 어려운 현장에 대하여 계측시스템을 도입하여 붕괴를 사전에 감지하는 방법과 국외 사면 계측 실태, 국내 활용되고 있는 사면 유지관리 시스템에 대하여 간략히 소개하고자 한다.

### 5.2 최근의 사면 계측 기술 동향

#### 5.2.1 광섬유 센서를 이용한 자동화 계측

자동화계측시스템은 기존의 탐독기를 현장까지 이동하여 특정시간에 계측하던 방식에서 벗어나 자동화기법을 이용한 상시계측방식으로, 정확도와 효율성에 있어서 기존의 방식과 비교되지 않을 정도의 혁신적인 기법이다. 사면 붕괴에 의한 재해를 사전에 방지하는데 매우 효과적으로 이용될 수 있다.

미국(M. E. Reid, 1999), 홍콩, 일본(Kawasaki, 1995, K. Masato et al., 1999) 등과 같은 선진국에서는 사면 시공관리와 사면 유지관리를 위해 자동화계측시스템을 많이 이용하여 왔으며, 이를 통해 사면 붕괴에 의한 재해를 최소한으로 줄이는데 많은 성과를 이룩하였다. 최근, 사면 관련 기술선진국들은 광섬유를 이용한 사면 계측기법을 개발하고 있으며, 지반변위량을 실시간 측정하고 사면 붕괴 임계값을 설정하여 경보 시스템에 적용함으로써 사면 붕괴에 의한 피해최소화를 시도하고 있다.

현장에서 광섬유 센서를 이용하여 사면 계측을 실시하고 자동으로 관리 및 운영자에게 자료를 전송하는 경우, 무선 통신 방식은 현장의 거리에 무관하게 관리가 가능한 장점이 있으며, 광섬유를 이용한 무선 자동 계측시스템의 예를 들면 다음과 같다.(그림 15).

#### 5.2.2 사면 무인감시 계측시스템

사면 무인감시 시스템은 실시간 무인감시를 통하여 사면 붕괴를 조기에 예지 및 예보함으로써 사면 붕괴에 따른 피해를 최소한으로 억제하고, 수집된 계측자료는 체계적으로 저장·관리함으로써 사면붕괴의 원인분석과 대책수립에 효과적으로 활용이 가능하다.

국내에서 개발된 사면 무인감시시스템의 전체 구성은 크게 데이터수집 및 비주얼감시, 전송(통신), 저장 및 인터넷서비스, 그리고 예경보 시스템으로 구성되어 있다. 그림 16은 사면 무인감시 시스템의

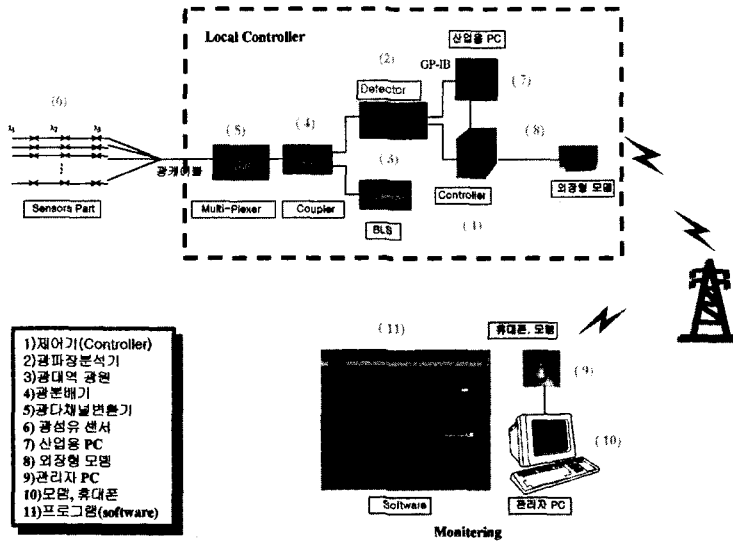


그림 15. 광섬유 센서를 이용한 무선 자동계측시스템의 모식도

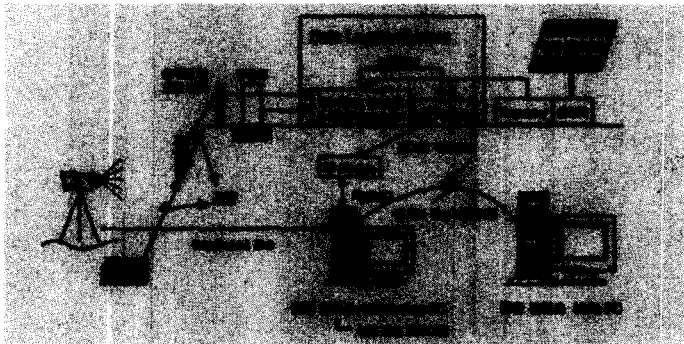


그림 16. 무인감시 시스템 개요

개요를 나타낸 것이다(한국건설기술연구원, 2001).

### 5.2.3 인공위성을 이용한 사면 계측시스템

인공위성을 이용한 사면 계측시스템에 대하여는 최근 국내에서 개발중인 모니터링 기법으로 본 시스템은 Differential Interferometry를 이용한 방법이다.

SAR자료를 이용한 Differential Interferometry 기술은 화산, 지진, 빙하의 이동, 지반침하 등의 다양한 지표의 변위량을 수 mm~cm단위로 정밀하게 측정할 수 있다. D-InSAR는 서로 다른 위치, 시점에서 측정된 여러 SAR자료에 내재된 대상물까지의 거리정보(위상)를 이용한다. 정밀한 측정을 위해서는 정확한 궤도보정, 자료처리과정, 높은 coherence (두 신호간의 상관성)가 요구된다.

최근 들어 사면 붕괴의 예측 및 방지를 위해 정량적인 활동량을 측정하려는 시도가 이루어지고 있으나 다음과 같은 문제점으로 인해 일부지역에 (규모가 크고 수목이 적은 지역) 대해서만 관측결

과가 보고된 상태이다.

화산, 지진, 빙하 등의 경우에는 대상지역에 수목 등이 적으며 변위발생면적이 상대적으로 산사태에 비해 높아 D-InSAR기술을 적용하기에 용이하다. 현재 사면에 D-InSAR를 적용한 사례를 보면 점진적인 운동을 보이는 큰규모의 사면 활동에 대해서만 보고된 상태이다. 최근들어 Permanent Scatterer technique(시간적으로 scattering 특성이 유지되는 사물을 이용)을 이용한 모니터링 기법이 연구 중이다.

### 5.3 사면 유지관리시스템

#### 5.3.1 개요

사면의 안정성을 평가할 수 있는 각종 자료를 체계적으로 수집하고 효율적으로 데이터베이스화한다면 국내 여건에 적합한 재해 예방 시스템의 개발과 함께 사면의 설계기준, 시공시 유의사항, 유지관리의 방법 등 사면 전반에 대해 국내 여건에 적합한 기준이 작성될 수 있을 것이다. 아울러 구축된 데이터베이스에 지리정보시스템(Geographic Information System, GIS)을 적용하여 각각의 사면 현장의 특성을 수치지도상에 구현한다면 사면의 지역적인 특성과 기타 다른 수치지도에서 나타나는 현장의 특성과의 상관관계를 얻을 수 있을 것이다.

#### (1) 국도 사면 유지관리 시스템

국도 사면 유지관리 시스템은 각종 공간정보와 속성정보로 이루어진 데이터베이스 부분과 이를 사용자와 연결시켜주는 인터페이스 프로그램(Interface Program) 부분으로 나눌 수 있다. 데이터베이스 부분은 사면 데이터베이스에서 기본도로 사용되는 GIS 수치지도에 관련된 지도 데이터베이스군과 현장조사에서 얻어진 다양한 사면의 특성자료와 관련된 사면 데이터 베이스군으로 세분된다. 그림 17은 이러한 도면정보 및 속성자료와 데이터베이스 부분이 연동되는 것을 모식적으로 나타낸 것이고 그림 18은 데이터베이스 시스템의 개발 및 운용 환경을 나타낸 것이다.

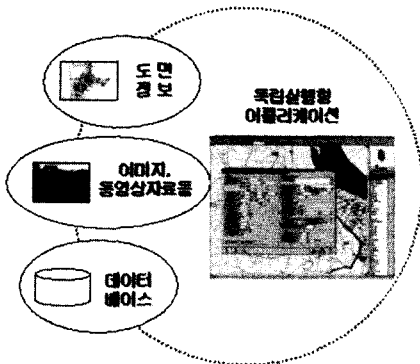


그림 17. 도면정보와 데이터베이스의 연동

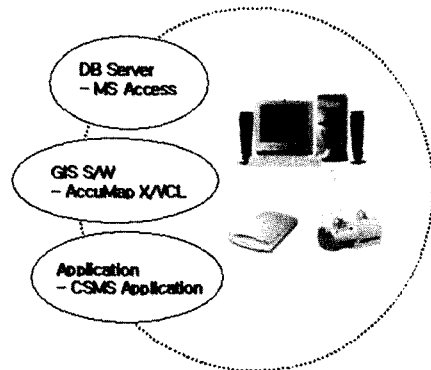


그림 18. 개발 및 운용 환경





그림 19. HGIS(Highway Geographic Information System) 개념도

## (2) 고속도로 사면 유지관리 시스템

HGIS(Highway Geographic Information System)은 고속도로 설계, 건설, 유지관리 업무의 과학화를 기하기 위해 각 업무에서 발생하는 정보를 지도 기반에서 제공하고 교통 및 물류, 안전관리, 건설, 유지보수시의 의사결정을 GIS분석기법을 통해 지원하는 시스템이다(그림 19).

고속도로 절토사면 유지관리시스템은 한국도로공사 건설 유지관리 시스템(HGIS)과 연계하여 개발되고 있으며 다음을 내용으로 하고 있다.

- 위치정보 제공 (교통사고, 교량, 터널 등을 노선도상에서 조회)
- 시각적인 지형제공 (주변지형과 연계한 도로 및 시설물 조회)
- 도형자료와 속성자료의 통합 분석(사고다발, 취약지점 등을 조회)
- 도형자료(지도, 도면 정보등)와 속성자료(각종대장)의 연계활용 (교량 위치정보와 교량대장, 외관조사도 등을 연계조회)
- 동적으로 변하는 실세계 정보 표현 (GPS 주행차량의 위치 표시등)
- 공간분석 기능제공(IC 인접시설물 검색 등)

## (3) 철도 사면 유지관리시스템

선로연변 사면관리시스템은 철도연변 재해 우려 개소에 대한 방호 설비 구축을 위한 우선 순위의 선정 등 체계적인 계획 수립 및 효율적 예산배정 기호 연구 및 철도 재해 방지를 통한 열차 운행상의 안전성 확보 등에 필요한 종합 방재시스템 및 재해복구지원시스템 구축의 기본 데이터베이스로 직접 활용할 예정이다. 또한 구축된 데이터베이스를 활용하여 낙석 및 산사태 위험지역을 사전에 인지할 수 있을 뿐만 아니라 지반 및 지질구조적(단층) 적정성 평가를 통하여 위험 지역 배제 등 신규 선로 및 시설물 입지 선정시 낙석 및 산사태 위험지역에 대한 대책 마련의 기본 자료로 활용할 수 있다.

그림 20은 현재의 철도종합방재시스템의 개념을 한차원 높여 인공위성 및 무인계측시스템을 이용한 예·검지를 환전자동화하고, 재해에 대한 복구지원을 시스템 내부에서 지능적으로 판단, 그 대안

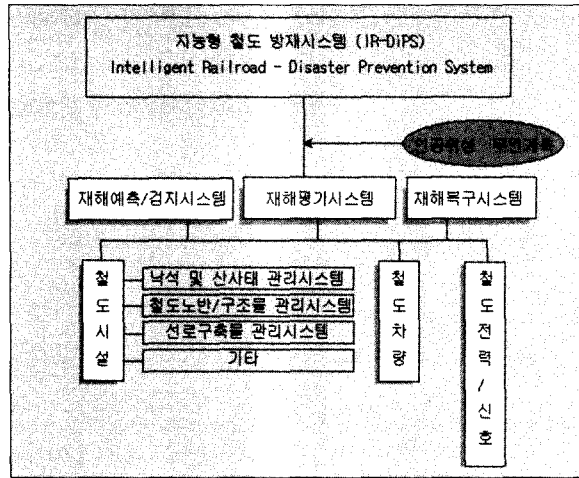


그림 20. 지능형 철도방재시스템 개요도

또는 처리방안을 제시하는 지능형 방재시스템인 지능형 철도방재시스템(IR-DIPS, Intelligent Railroad - Disaster Prevention System)의 개념도이다.

### 5.3.2 전국토 사면 유지관리 시스템 운영 발전 방향

사면 데이터베이스 시스템은 다양한 용도로 활용이 가능하여야 한다. 즉, 검색을 통하여 속성자료 간의 상관관계를 규명할 수 있어야 하며, 위치정보와 속성자료를 통하여 사면의 붕괴가 발생할 경우 원인을 파악할 수 있어야 한다. 또한 이러한 정보들이 축적되면 속성자료 간의 연관관계를 밝혀내 이를 근거로 우리나라의 현장상황에 적절한 사면의 설계기준이나 시방기준을 제시할 수 있게 된다. 이러한 관점에서 본 시스템의 운용은 사면을 직접적으로 관리하는 재해대책본부, 중앙부서, 지방자치단체와 사면의 안정성 평가 및 안정화 대책을 제시하는 설계사무소, 재해대책본부, 관련 중앙부서와 함께 공유하며 운용하는 것이 보다 효과적일 것으로 판단된다.

## 6. 마감하며

사면안정이론 분야에 대해서는 자연의 복잡함을 하나하나 밝히려는 의지와 이것을 해결하기 위한 접근방법들을 소개하였으며, 조사 및 시험분야에서는 전통적인 시험분야와 최근들어 급속도로 발전해 나가고 있는 조사분야에 대한 추세를 살펴보았다. 또한 최근에 개발 적용되고 있는 공법들에 대해서는 사면안정공법과 사면보호공법으로 구분하여 가능한 최신의 공법들을 소개함으로써 사면안정 혹은 보호기술의 현황과 기술개발 노력에 대한 방향을 조명하였다. 유지관리분야에 대해서는 현재 추진되고 있는 유지관리 현황과 유지관리를 위해 개발 노력중인 최신기법들을 소개하였다.

이와같은 사면안정기술의 다양한 분야에 대해 최신의 기법을 소개하고 최근의 동향을 파악함으로써 앞으로 우리가 나아가야 할 방향을 고민하고자 하였다.

1. Koo, Y. C. (1998), "Some Important Aspects of Design of Soil Slopes in Hong Kong", Proceedings of the Annual Seminar on Slope Engineering in Hong Kong, Hong Kong, Balkema, pp. 21-29.
2. A.W. Skempton. (1986), "Standard penetrate on test procedures and the sand of overburden pressure, relative density, particle size, aging and over consolidation", Geotechnique, pp. 23.
3. Ang, A.H.S. and Cornell, C.A. (1974), "Reliability bases of structural safety and design, Journal of the Structural Division", ASCE, 100, ST9; 1755-1769
4. Borges, J.F. and Castenheta, M. (1971), "Structural Safety, Laboratorio Nacional de Engenharia Civil", Lisbon, Portugal.
5. Brand, E. W. (1985), "Predicting the Performance of Residual Soil Slopes (Theme Lecture)", Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol. 5, pp. 2541-2578.
6. Cala, M. and Flisiak, J. (2001), "Slope Stability Analysis with FLAC and Limit Equilibrium Methods", Proceedings of the 2nd International FLAC Symposium, FLAC and Numerical Modeling in Geomechanics, Balkema, pp. 111-114.
7. Cambou, B. (1975), "Application of First-Order Uncertainty Analysis in the Finite Element Method in Linear Elasticity", Proc. 2nd Int. Conf. Application of Statistics and Probability in Soils and Structural eng'g.
8. Cornell, C. A. (1971), "First-Order Uncertainty Analysis of Soils Deformation and Stability".
9. Dawson, E., Motamed, F., Nesarajah, S. and Roth, W. (2000), "Geotechnical Stability Analysis by Strength Reduction", Geotechnical Special Publication No. 101, Slope Stability 2000, ASCE, Denver, Colorado, pp. 99-113.
10. De Mello, V.F.B. (1977), "Refections on design decisions of practical significance to embankment dams, Rankine Lecture", Geotechnique, 27, 3; 279-355.
11. Deere, D. U. and Miller, R. P. (1996), "Engineering classification and index properties for intact rock", Technical Report No. AFNL-TR-65-116 Air Force Weapons Laboratory, New Mexico.
12. Duwayne R. Anderson, Florian G. Bell (1999), "Optical Time-Domain Reflectometry", Tektronix Inc, pp. 1-10.
13. Fredlund, D. G. and Scoular, R. E. G. (1999), "Using Limit Equilibrium Concepts in Finite Element Slope Stability Analysis", Proceedings of the International Symposium on Slope Stability Engineering, Balkema, pp. 31-47.
14. Geotechnical Engineering Office (2000), Geotechnical Manual for Slopes, Civil Engineering Development Department, Hong Kong, 4th Ed., pp. 233-234.
15. Grattan K.T.V. and B.T. Meggitt (1995), "Optical Sensor Technology", Chapman & Hall.
16. Gray, D.H. and Al-Refeai, T. (1986), "Behavior of Fabric vs. Fiber Reinforced Sand", Journal of Geotech Engrg. ASCE, 112, pp. 804-820.
17. GRL newsletter (1995), "Influence of type of hammer on spt blowcounters in a sand", No. 27, pp. 1.
18. Kleyner, I.M., Krizek, R.J. and Pepper, S.F. (1993), "Influence of Grout Pressure on Capacity of Bore-Injected Piles and Anchors", Proceeding of the International Conference on Grouting in Rock and Concrete, Salzburg, Austria, pp. 159-165.
19. Ladd, C. C. and Edgar, L. (1972), "Consolidated undrained direct simple shear test on saturated clays", Department of civil engineering, MIT, Cambridge, Reserch report R72-82, No. 284.
20. Lumb, P. (1975), "Slope Failure in Hong Kong", Quarterly Journal of Engineering Geology, Geological Society of London, Vol. 8, pp. 31-65.
21. Masato K, Kazuya O, Kenji Y, Hiroichi K, and Yoshikazu N. (1999), "Remote Sensing System for a Fissure

- in a Rock Using Optical Fiber". 768-771, pp. 3-22.
22. Monma, K., Kojima, S. and Kobayashi, T. (2000), "Rock slope monitoring system and rock fall prediction". Landslide News, No. 13, pp. 33-35
  23. Ng, C. W. W. and Shi, Q. (1998), "A Numerical Investigation of the Stability of Unsaturated Soil Slopes Subjected to Transient Seepage", Computer and Geotechnics, Vol. 22, No. 1, pp. 1-28.
  24. Reid, M. E., Lahusen, R. G., and Ellis, W. L. (1999), "Real-time Monitoring of Active Landslides", USGS Fact Sheet, pp. 91-99.
  25. Shen, J. M. (1998), "Soil Suction in Relation to Slope Stability : A Summary of Research Carried Out in Hong Kong in 1978-1997", Proceedings of the Annual Seminar on Slope Engineering in Hong Kong, Hong Kong, Balkema, pp. 93-99.
  26. Terzaghi, K. (1945), "Stability and Stiffness of Cellular Cofferdams", ASCE No. 110.
  27. TRB (1990), "Landslides investigation and mitigation" Special Rep. 247, USA. pp. 497-498.
  28. Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C. and Lewis, R. W. (1975), "Associated and Non-associated Visco-Plasticity and Plasticity in Soil Mechanics", Geotechnique, Vol. 25, No. 4., pp. 671-689.
  29. 구호본, 백용 (2001), "三木博史 광섬유 센서를 이용한 산사태 계측기법 개발", 한국건설기술연구원.
  30. 김낙경, 박동원 (2001), "FPF(Fibrillated Polypropylene Fiber)보강 성토재료의 강도 특성에 관한 연구", 한국지반공학회 2001 봄학술발표회, pp. 433-440.
  31. 나승민, 임해식, 박종배, 박용부 (2001), "조립식 철강재틀 구조의 해석기법 및 적용방안", 2001년 사면안정학술발표회, 한국지반공학회, 181-188.
  32. 이상덕, 권오엽, 최용기 (2000), "FRP를 이용한 사면보강", 2000년 사면안정학술발표회, 한국지반공학회
  33. 최승일, 유병옥, 황영철 (2001), "고강도 텐션네트를 이용한 사면보강공법", 2001년 사면안정학술발표회, 한국지반공학회, pp. 91-110.
  34. 한국건설기술연구원 (2001), "도로사면 무인감시시스템 개발", 건설교통부.
  35. 황영철, 김낙영, 석정우 (2001), "그라우팅 네일을 이용한 사면보강공법의 설계인자 추출 연구", 2001년 사면안정 설계 및 시공 특별강연회, 한국지반공학회, pp. 44-58.