

# Slope/w v6 User Guide

(주)베이스소프트

안 준 상

## 1. 사면안정해석이란 ?

사면의 안정성은 이른바 안전율(Factor of safety) 을 근거로 하여 판단하고 있다. 안전율은 다음과 같이 정의할 수 있다. 즉, 안전율이란 주어진 활동면에 대해 흙의 전단강도를 현재의 전단응력으로 나눈 값이다. 다시 말하면, 사면 활동이 일어나도록 하는 힘과 저항하려고 하는 힘의 비라고도 말할 수 있다. 또 다른 의미로 표현하자면, 안전율이란 사면이 한계 평형 상태(파괴시)에 도달하도록 강도정수를 나누어 주는 계수이다.

따라서 이론상으로는 산정된 안전율이 1보다 크면 사면은 안전한 셈이 되지만, **국내 설계 기준상**에 있어서는 안전율이 허용 안전율(Allowable factor of safety) 이상이 되어야 사면은 안전한 것으로 판정된다. 따라서 허용 안전율은 사실상 일종의 무지지수이다. 왜냐하면 사면의 실제 거동에 대한 무지로 인하여 허용 안전율 개념이 필요하게 되었기 때문이다. 허용 안전율의 역할은 복잡하나 다음 두 가지로 대별할 수 있다.

- (1) 자료의 불확실성에 대한 대비수단 (입력 자료에 대한 무지지수로서의 기능)
- (2) 사면 변형을 허용치 이내로 제한하는 기능 (경험의 결과)

### 1.1 허용안전율의 결정 요소

Lowe(1967)는 동일한 사면에 대해서 안전율에 영향을 미치는 요인으로 전단강도 시험방법, 전단강도의 선택, 해석방법 등을 제시하고 있으며 복구비용 및 시험의 신뢰도 등이 추가로 고려될 수 있는바, 종합적으로 다음과 같은 사항을 판단하여 결정하여야 한다.

- 전단강도의 특징, 사면의 기하학적 조건 및 기타 조건에 대한 불확실 정도
- 사면의 경사를 완화시키거나 높이를 감소시키는데 소요되는 비용
- 사면 붕괴시의 피해액과 결과
- 사면이 영구 구조물인가 임시 구조물인가의 판단

### 1.2 국내 및 국외의 적용기준

국내 및 국외에서 적용되는 허용안전율의 설계기준은 대체로  $F_s = 1.1 \sim 1.5$  정도의 범위를 제시하고 있으며, 상세한 내용은 **도로설계 실무편람** 등 기타 참고 서적을 참고하길 바란다.

## 2. 사면의 불안정 요인 및 붕괴 형태

### 2.1 사면의 불안정 요인

사면의 불안정 요인에 관해 Terzaghi(1950)는 그 원인을 외적인 요인과 내적인 요인으로 나누어 다음과 같이 제시하였다. 우리나라에서는 강우가 직접적인 원인이 되는 경우가 대부분이다.

#### 2.1.1 외적인 요인

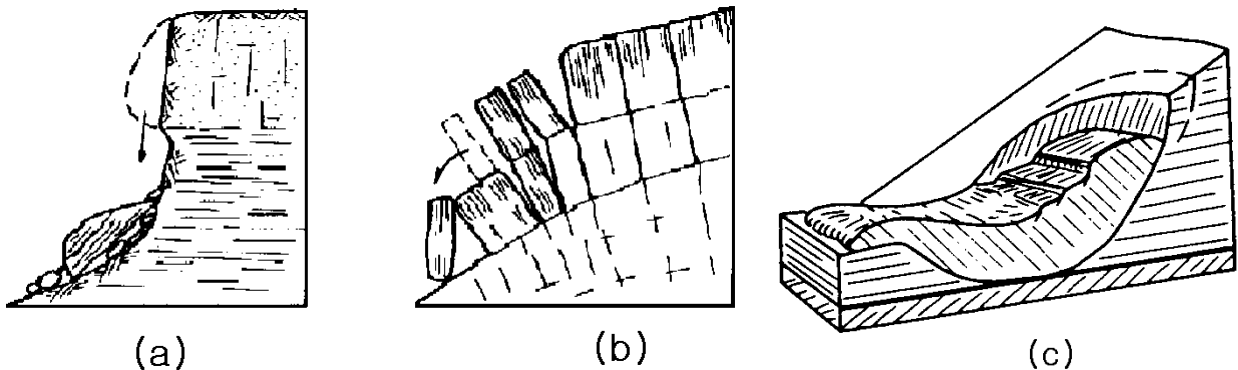
- ① 지형의 기하학적 변화 (인위적인 절토, 유수에 의한 침식 등)
- ② 상재 하중의 제거 (침식작용 및 인위적인 절토 등)
- ③ 하중의 증가 (하중의 추가, 사면 높이의 증가, 수위상승로 인한 흙무게의 증가 등)
- ④ 충격과 진동
- ⑤ 인접한 호수 또는 저수지의 수위강하
- ⑥ 강우

#### 2.1.2 내적인 요인

- ① 진행성 파괴
- ② 풍화작용 (동결융해, 건조수축 등)
- ③ 물의 침투에 의한 용해작용 (용해에 의한 침식, 파이핑 현상 등)

### 2.2 사면의 붕괴 형태

사면의 붕괴형태는 자연적인 원인과 인위적인 행위에 의하여 발생되며, 이러한 원인들이 복합적으로 작용되기 때문에 실제 발생하는 붕괴형태는 대단히 복잡하다. 이러한 사면의 붕괴형태는 Eckel, Skempton and Hutchinson 및 Zaruba and Mencl 등에 의하여 분류되었는데, 이들은 붕괴면의 형태와 붕괴의 직접적인 원인이 되는 지질구조 및 응력상태 등을 기준으로 분류하였다. 최근에는 Varnes(1978) 및 Cruden and Varnes (1992)에 의해 제시된 분류가 널리 사용되며, 이에 의한 분류 및 붕괴형태는 <표 2.1> 및 <그림 2.1>과 같다.



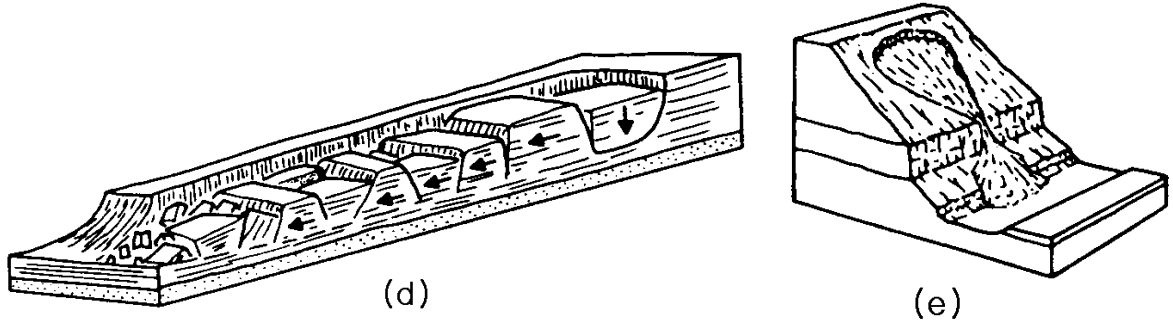


그림 2.1 사면활동의 종류 (a)낙석 (b)전도 (c)활동 (d)퍼짐 (e)흐름  
(Cruden and Varnes, 1992)

표 2.1 ABBREVIATED CLASSIFICATION OF SLOPE MOVEMENTS

Type of Movement	Type of Material		
	Bedrock	Engineering Soils	
		Predominantly Coarse	Predominantly Fine
Falls	Rock fall	Debris fall	Earth fall
Topples	Rock topple	Debris topple	Earth topple
Slides Rotational Translational	Rock slump Rock block slide Rock slide	Debris slump Debris block slide Debris slide	Earth slump Earth block slide Earth slide
Lateral spreads	Rock spread	Debris spread	Earth spread
Flows	Rock flow (deep crack)	Debris flow (soil creep)	Earth flow (soil creep)
Complex	Combination of two or more principal types of movement		

주) After Varnes (1978)

### 3. 사면의 설계기준

#### 3.1 사면의 표준경사

사면경사는 지층의 구성 상태, 지형조건, 용출수의 유무, 토질 및 암반의 공학적 특성, 사면의 안정성 및 경제성, 보강공법의 적용 여부 등을 종합적으로 검토하여 결정되므로 사면의 장기적인 안정성을 유지하기 위해서는 체계적이고 합리적인 분석과정을 거쳐야 한다.

현재 적용되고 있는 사면의 표준경사는 절토사면과 성토사면으로 구분하여 다음과 같이 정리하였다.

### 3.1.1 절토사면의 표준경사

절토사면의 표준경사는 사면을 구성하는 지층의 종류, 상태 및 사면 높이에 따라서 표 3.1, 표 3.2와 같이 적용하고 있으며, 기존 고속도로의 절취사면 경사는 표 3.3과 같이 적용하였다.

**표 3.1 원지반 토질에 대한 비탈면 경사의 범위**

원 지 반 의 토 질		흙막기 높이	경 사	비 고
모 래	밀실하지 않고 입도분포가 나쁜 것		1:1.5 이상	SW, SP
사 질 토	밀 실 한 것	5 m 이하	1:0.8 ~ 1:1.0	SM, SP
		5~10 m	1:1.0 ~ 1:1.2	
	밀실하지 않고 입도분포가 나쁜 것	5 m 이하	1:1.0 ~ 1:1.2	
		5~10 m	1:1.2 ~ 1:1.5	
자갈 또는 암괴 섞인 사질토	밀실하고 입도분포가 좋은 것	10 m 이하	1:0.8 ~ 1:1.0	SM, SC
		10~15 m	1:1.0 ~ 1:1.2	
	밀실하지 않거나 입도분포가 나쁜 것	10 m 이하	1:1.0 ~ 1:1.2	
		10~15 m	1:1.2 ~ 1:1.5	
점 성 토		0~10 m	1:0.8 ~ 1:1.2	ML, MH, CL, CH
암괴 또는 호박돌 섞인 점성토		5 m 이하	1:1.0 ~ 1:1.2	GM, GC
		5~10 m	1:1.2 ~ 1:1.5	

- 주) 1. 실트는 점성토로 간주한다. 표에 표시한 토질 이외에 대해서는 별도로 고려한다.
- 2. 위 표의 경사는 소단을 포함하지 않는 단일비탈면 경사이다.
- 3. 도로설계실무편람 (토공 및 배수공), '96. 9, P89 참조

**표 3.2 절토 사면 경사의 설계기준**

구	분	경 사	비 고
토 사	0 ~ 5m	1:1.2	5m 마다 소단 1m 설치
	5m 이상	1:1.5	
암 반	리 핑	1:1.0	절토 20m 마다 소단 3m 설치
	발 파	1:0.5	

- 주) 1. 도로설계실무편람 (토질 및 기초), '96.8, P74 참조

- 발파의 사면경사는 지표지질조사, 사면안정 검토, 시추조사(TCR 및 RQD) 결과를 분석한 후 적용함.
- 발파암의 사면경사를 1:0.5 보다 완만하게 적용(1:0.7 또는 1:0.8)할 경우 높이 10m마다 1~2m 폭으로 소단을 설치

표 3.3 기존 고속도로의 절취사면 경사

토질	높이별	적 용 경 사							비 고
		호남고속도로	중부고속도로	판교-구리신갈-반월고속도로	대구-춘천대전-진주고속도로	수원-남이신갈-원주고속도로	신갈-원주간 확장고속도로	고서-순천고속도로	
토사	0~5m	1:1.0	1:1.2	1:1.2	1:1.2	1:1.2	1:1.2	1:1.2	5m마다 소단 1m 설치
	5m 이상	1:1.0	1:1.5	1:1.5	1:1.5	1:1.5	1:1.5	1:1.5	
리핑암		1:0.6	1:1.0	1:1.0	1:1.0	1:1.0	1:1.0	1:1.0	
발파암		1:0.5	1:0.5	1:0.5	1:0.5	1:0.5 ~ 1:1	1:0.5 ~ 1:1	1:0.5 ~ 1:1	절토20m마다 소단 3m 설치

주) 1. 도로설계실무편람 (토질 및 기초), '96.8, P75 참조

표 3.4 암반사면의 표준구배

암석종류 (강도)	암반파쇄상태		굴착난이도	경사	소단설치	암반의 전단강도 정수	
	NX 시추시 (double core barrel 사용시)					Φ	c (kg/cm <sup>2</sup> )
	T.C.R%	R.Q.D%					
풍화암 또는 연암, 경암으로 파쇄가 극심한 경우	20% 이하	10% 이하	리핑암반	1:1.0	H=5m마다 소단 1m 폭 (리핑암과 발파암 사이에는 1m소단)	30°	1.0
강한 풍화암으로서 파쇄가 거의 없는 경우와 대부분의 연암, 경암	20-30%	10-25%	발파암반 (연암반)	1:0.8	H=10m마다 소단 2m폭	33°	1.3
	40-50%	25-35%	발파암반 (보통암반)	1:0.7	H=10m마다 소단 2m폭	35°	1.5
	70% 이상	40-50%	발파암반 (경암반)	1:0.5	H=20m마다 소단 3m폭	40°	2.0

- 주) 1. 단, 불연속면으로 인한 사면불안정 요인이 뚜렷할 경우에는 우세한 불연속면의 경사로 사면경사를 정하는 것을 본 표준경사 보다도 우선으로 한다.
2. 발파암 하부에 두꺼운 리핑암이 나타나면 상부 발파암도 하부 리핑암에 준하여 경사를 결정한다.
  3. 토질이 동일하지 않고 층을 이루는 지역에서 대각기를 할 경우에는 사면경사를 각 토층에 맞게 적용한다.
  4. TCR 및 RQD 값이 리핑암과 발파암에 상충될 경우에는 암질상태 및 인접 사면경사를 비교·평가하여 적용한다.
  5. 도로설계실무편람 (토질 및 기초), '96.8, P76 참조

기존 고속도로 절토사면의 경사는 발파암의 경우 사면내 불연속면 등의 유무에 상관없이 암석의 강도에 따라 절취각도를 대부분 일률적으로 1 : 0.5 경사를 적용하여 왔다.

그러나, 리핑암 및 발파암은 사면 굴착 후 하중제거로 쉽게 이완되고 지표에 노출될 경우 풍화작용이 급속히 진행됨을 감안하여야 하며, 시공 시 불연속면의 발달상태에 따른 지질구조에 의해 Sliding이 발생할 우려가 있으므로 사면경사는 대상 암반의 공학적 특성에 따라 결정해야 할 것으로 판단되며, 굴착 후 정밀조사를 수행하여 사면의 경제성과 안정성을 확보하여야 할 것이다.

한국도로공사에서는 설계단계에서 시추조사 자료(TCR, RQD)를 근거로 발파암의 사면경사를 표 3.4를 참고하여 차등 적용할 것을 추천하고 있다.

또한, 붕적토(Colluvium)는 중력에 의해 퇴적된 지층으로서 원암반이 풍화산류된 풍화토층에 비하여 치밀하지 못한 경향을 보여주며, 이러한 붕적토층의 특성을 감안하여 붕적토의 적정경사는 <표 3.5>와 같이 추천되어 적용되고 있다.

**표 3.5 붕적토의 적정 사면경사**

지 하 수 조 건	경 사
강우시에도 지하수위가 설계고보다 낮은 경우	1 : 1.2
강우시만 지하수위가 설계고보다 높아질 경우	1 : 1.5
상시 지하수위가 설계고보다 높은 경우	1 : 1.8 ~ 2.0

주) 1. 한국도로공사, 도로연구소, 1992년

#### 4. 사면안정 해석방법

고속도로 신설공사 및 확장공사에 있어서 절취사면에 분포하는 지층은 일부의 토사층과 암반층이 복합적으로 출현되기 마련이며, 토사층과 암반층은 각각의 붕괴 특성상 다소 차이가 있으므로 토사층과 암반층으로 구분하여 안정성을 평가할 필요가 있다.

토사층의 경우 미시적으로는 불연속적인 토립자들로 구성된 집합체이나 전체적으로 볼 때 하나의 연속체로 간주할 수 있는 반면, 암반사면의 경우 대부분 암반 내 단층, 절리, 엽리, 층리 등과 같은 불연속면들이 존재하므로 불연속면에 의해 분리된 암반들의 집합체로 간주할 수 있다.

그러므로 토층 사면의 경우 연속체로 간주될 수 있음에 따라 특별한 지층(연약층)이 분포하지 않는 경우의 파괴는 임의의 최소 활동 저항면을 따라 발생한다는 점을 염두에 두고 안정성 평가가 이루어지나 암반사면의 경우 암반에 분포하고 있는 불연속면의 특성, 예를 들면 주 불연속면의 방향, 경사, 거칠기, 틈새, 연장성, 풍화정도, 충전물질 유·무 등과 같은 불연속면의 공학적인 특성에 의해 붕괴가 발생하기 때문에 안정성 평가시 토층 사면의 경우와 비교할 때 복잡한 분석 및 계산을 필요로 한다.

그리고 안정성 평가에 필요한 주요소 중 하나인 지반정수 측면에서 볼 때 토사층의 경우 구성토질 및 조성상태 등 크게 두 가지에 따라서 지반정수 값이 달라지게되나 암반층에 대한 안정해석에 필요한 지반정수 값은 불연속면의 풍화상태, 거칠기, 충전물질 유·무, 불연속면 강도 등과 같은 여러 가지 요소에 따라 좌우되므로 대표 값의 판단 및 결정이 쉽지 않다. 따라서 사면안정 검토시 토층 사면의 경우는 구성토질, 조성상태 등의 파악이 중요한 반면, 암반사면의 경우 사면붕괴에 영향을 미칠 가능성이 큰 우세한 지질구조 또는 분포된 많은 불연속면에 대한 평가가 필요하다는 점에서 차이가 있다.

상기와 같이 토층사면과 암반사면은 역학적인 거동 특성과 지반정수 산정시의 불확실성의 요소에서  
의 차이점을 보이고 있으므로 사면 안정 검토시에는 토사층, 리핑암층, 발파암층으로 지층을 구분해서  
해석을 실시하여야 한다.

#### 4.1 토층사면의 해석방법

##### 4.1.1 해석방법의 종류

일반적으로 토층사면에 대한 안정해석시 사용되는 해석법은 유한요소법, 유한차분법, 개별요소법과  
같은 수치해석법(Numerical Analysis)이 있으며, 임계활동면에서의 역학적인 평형관계 만을 해석하는  
한계평형해석법(Limit Equilibrium Analysis)이 있다.

수치해석법(Numerical Analysis)은 지반의 **변형 특성**을 고려한 탄성 또는 탄소성해석 방법으로 지반  
정수 산정시 많은 현장시험 및 실내시험이 필요하며, 해석상의 소요시간이 긴 단점을 가지고 있다.  
최근에는 전단강도감소기법을 사용한 안전율 산정 방법들이 한계평형해석에 의해서 계산된 안전율과  
동일한 결과를 갖는다는 논문들이 계속 나오고 있는 실정이다. 특히, FLAC-Slope 이라는 FDM 사면  
안정해석 프로그램은 한계평형해석에 의해서는 알 수 없는 사면의 변형을 고려한 안전율을 보여줄 수  
있기 때문에 서로 보완 관계로 해석을 비교할 필요성이 대두되고 있는 실정이다.

한계평형 해석법(Limit Equilibrium Analysis)은 근본 원리상 사면안정해석 뿐만 아니라 토압, 지지력  
등과 같은 지반공학적 문제를 설명·해결하는데 기초를 이루는 방법으로 대상 지반을 하나의 토체로  
간주하여 임의의 파괴면에 대한 힘 또는 모멘트의 평형조건을 고려하는 것이다.

물론 한계평형 해석법은 굴착에 따른 비탈면 내 **응력 변화 및 그에 수반되는 변형 거동상태 해석**이  
가능한 일반적 수치해석 방법과는 달리 변형과 관련된 지반문제 해석에 있어서는 적용될 수 없다는  
단점이 있다. 그러나 해석방법의 **이해가 쉽고 사용이 간편하다는 점과 과거 많은 사면안정 해석에  
대한 적용 사례로부터 그 신뢰성도 입증된 상태이므로 사면 안정해석 방법으로 가장 많이 사용되고  
있다.**

한계평형법에 의한 사면안정 해석방법을 여러 가지 관점에 의해 분류될 수 있으나 크게 활동 토체  
를 단일 토체로 보는 방법과 활동 토체를 수 개의 수직절편으로 분할하는 절편법(Method of Slice)으  
로 구분할 수 있으며, 이중 **절편법**에 의한 사면안정 해석법이 많이 이용되고 있다.

절편법에 의한 사면안정 해석방법은 표 4.1에서 보는 바와 같이 많은 연구자들에 의해 여러 가지  
방법들이 제안되고 있으며, 안전율 산정을 위한 평형조건, 해석 활동면 형상, 절편 작용력 및 작용위  
치 가정 등에서 다소의 차이는 있으나 그 근본적 방법상의 차이는 없는 것으로 알려지고 있다.

표 4.1 한계평형법을 이용한 비탈면 안정해석 방법의 종류

해석 방법	활동면 형상	평형 만족 조건				계산		비고	
		Over of moment	Individual Slice moment	Vertical force	Horizontal force	수계산	컴퓨터 계산		
단일 활동 토체 해석 방법	Infinite Slope (Skempton & Delory, 1957)	평면	-	-	○	○	○	○	· 지표면과 평행한 무한비탈면이 지표면 과 평행한 평면적 파괴 예상시 적용
	Wedge Analysis	평면	-	-	○	○	○	○	· 비원호의 2개, 3개의 평면에 의한 파괴 예상시 적용
	Friction Circle method	원호	-	-	○	○	○	○	· 단일한 점성토 또는 사질토 지반의 비 탈면 안정 해석에 유용 · 활동면상 반력 작용선은 활동원 중심으 로 하는 마찰원에 접한다는 사항을 토 대로 작용력과 저항력간의 평형조건으 로부터 안전율 산정
수직 절편 으로 구 분 할 하 는 절 편 법	Fellenius method (Ordinary Slice Method) (Fellenius, 1927)	원호	○	-	-	-	○	○	· 절편법중 가장 간단한 방법임. · 완만한 비탈면에 대해 간극수압을 감안 한 유효응력 해석시 안전율 과소평가 · 깊은 원호 활동면이고 원호중심각( $\alpha$ )의 변화가 클 경우 해석결과 오차 증대
	Bishop's simplified method (Bishop, 1955)	원호	○	-	○	-	○	○	· 절편법중 가장 널리 이용되며 편리성과 신뢰성이 매우 양호함 · 선단부의 절편 저면 경사각 $\alpha$ 가 클 경 우 안전율이 과대평가 · 이 방법에 의한 안전율 Fellenius 방법에 의한 결과보다 다소 큼
	Janbu's simplified method (Janbu, 1968)	임의의 형상	-	-	○	○	○	○	· 절편양측면에 작용하는 수직전단응력을 없는 것으로 가정하여 부정정 차수감소 · 엄밀해석법을 계산의 간편성을 위해 힘 의 평형조건만을 감안하여 간편화 시킨 방법으로 이로 인한 부정확성을 보정계 수( $f_0$ )를 감안해줌으로서 보완
	Spencer's method (Spencer, 1967)	임의의 형상	○	○	○	○	-	○	· 각 절편 경계면상의 작용하는 전단력을 별도로 감안치 않은 대신 합력으로서 양측에서 서로 평행한 수평력으로 감안 (작용각 $\theta$ 는 일정) · 해석적으로 정해에 가까운 안전율을 산 정하므로 신뢰성 높음
	G.L.E method (Fredlund & Krahn, 1977)	임의의 형상	○	○	○	○	-	○	· Bishop, Janbu, Spencer방법 등을 포괄 할 수 있는 해석방법 · 비원호 활동해석시 가상회전중심 (Frictional center of Rotation)을 사용 하며 모멘트 평형, 힘의 평형을 개별로 고려하여 각각에 대한 안전율 산정이 가능



여기서는 절편법 중에서 가장 많이 쓰이고 있는 Bishop법에 대해서만 간략히 언급하겠다.

#### 4.1.2 Bishop의 간편법

이 방법은 절편법 가운데 가장 널리 사용되고 있으며, 그 결과는 이론상으로 “정확한” 다른 방법과 별 차이가 없다. 즉 이 방법의 편리성과 신뢰성은 많은 경험으로부터 입증된 셈이다.

Bishop(1955)은 그림 4.1에 보인 바와 같이 원호활동면에 대한 사면안정해석법을 발표하였다. 그러나 이 방법은 가상 회전중심을 사용함으로써 비원호활동면에 대해서도 적용할 수 있다.

이 방법은 절편간 작용력이 수평방향으로 작용한다고 가정한다. 각 절편의 저면에 작용하는 수직력 P는 연직방향 힘의 평형조건에서 구한다. 수직력 P는 식 (4.1)과 같다.

$$P = \left[ W - \frac{1}{F} (c'l \sin \alpha - ul \tan \phi' \sin \alpha) \right] \frac{1}{m_a}, \quad m_a = \cos \alpha \left( 1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{F} \right) \quad \text{식 (4.1)}$$

Bishop의 간편법의 개요가 그림 4.1에 제시되어 있다.

회전중심에 대한 모멘트 평형을 취함으로써 안전율  $F = F_m$  을 구할 수 있다. F는 그림 4.1의 식 (4)로 주어진다. 식(4)의 양변에 안전율이 있으므로 안전율은 시행착오법으로 구한다. 즉 우변의 안전율에 초기치를 가정하고 식(4)에 의해서 새로운 안전율을 산정한다. 새로운 안전율을 우변에 대입하면서 계산을 반복하되 두 안전율의 차이가 허용범위보다 작아질 때의 안전율을 사면의 안전율로 한다. 수렴은 보통 대단히 빠르고 손 계산도 가능하다.

안전율의 초기치는 보통 Fellenius 안전율을 기준으로 결정한다. 간극수압이 작을 때에는 전응력해석법이나 유효응력해석법 모두  $[F]_{Bishop} = 1.1 [F]_{Fellenius}$ , 간극수압이 보통 큰 경우에는 유효응력해석법에서는  $[F]_{Bishop} = (1.2 \sim 1.25) [F]_{Fellenius}$  가 초기치 결정의 지침이 된다.

절편 저면의 경사각  $\alpha$ 는 양(陽)과 음(陰)의 값 중 어느 것이나 될 수 있다. 안전율을 구하는 식(4)에 포함된 항  $(1 + \tan \alpha \tan \phi' / F)$ 은 영이나 음의 값이 될 수 있다. 이러한 일은 사면 선단부에서 활동면의 경사가 대단히 급해서  $\alpha$ 가 큰 음의 값이고, 이 영이 아닌 경우에만 일어날 수 있다(Whitman & Biley, 1967). 이 항이 영에 가까워짐에 따라 안전율은 과대평가 되어진다. 왜냐하면 절편저면의 수직력 P가 무한대가 되기 때문이다. 그러나 활동면의 경사가 더 급해지면 안전율은 과소평가되는데 그 이유는 저면의 수직력이 음의 값이 되어 전단저항의 방향을 틀리게 하기 때문이다. Whitman & Biley(1967)는 어느 한 절편에 대해서라도 식 (4.2)의 조건이 만족되면 Bishop의 간편법은 주의해서 사용해야 된다고 주장하였다.

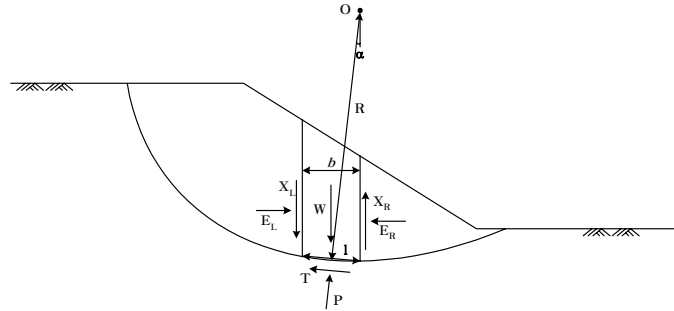
$$\frac{\sec \alpha}{1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{F}} < 0.2 \quad \text{식 (4.2)}$$

안전율을 산정한 뒤에 활동면을 따라 수직응력  $\sigma$ (즉, P)를 구해 보는 것이 좋다. 수직응력의 분포가 타당하면 해는 정확하다고 볼 수 있다.

### Bishop's Simplified Method of Slices

Failure is assumed to occur by rotation of a block of soil on a cylindrical slip surface centered on O. By examining overall moment equilibrium about O an expression for the factor of safety is obtained. It is assumed that the interslice forces are horizontal.

Soil properties  
:  $c'$ ,  $\phi'$ ,  $\gamma$



For slice shown : at base - normal stress  $\sigma$  , shear stress  $\tau$  , pore pressure  $u$

Mohr-Coulomb failure criterion :  $s = c' + (\sigma - u) \tan \phi'$

Mobilized shear strength  $\tau = s / F$  where  $F$  is factor of safety

$$\text{Now } P = \sigma l \quad T = \tau \quad \text{so } T = \frac{1}{F} [c' l + (P - u l) \tan \phi'] \quad (1)$$

Resolve vertically :  $s = P \cos \alpha + T \sin \alpha = W - (X_R - X_L)$

Assuming  $X_R - X_L = 0$  (i. e. interslice forces horizontal)

$$P = \left[ W - \frac{1}{F} (c' l \sin \alpha - u l \tan \phi' \sin \alpha) \right] \frac{1}{m_\alpha} \quad (2)$$

$$\text{Where } m_\alpha = \cos \alpha \left( 1 + \frac{\tan \alpha \tan \phi'}{F} \right)$$

Overall MOMENT equilibrium (about O) :  $\sum W R \sin \alpha = \sum T R$  (3)

Rearrange and substituting for  $T$  gives

$$F_m = \frac{\sum [c' l + (P - u l) \tan \phi']}{\sum W \sin \alpha} \quad (4)$$

As this equation contains  $F$  on both sides it has to be solved iteratively. Convergence is usually quick and so the method is suitable for hand calculation, although it is time consuming.

그림 4.1 Bishop's Simplified Method of Slices (From Bishop 1955)

Bishop의 간편법에 의한 계산 순서는 다음과 같다.

- ① 가상활동면을 선정한다.
- ② 활동토체를 다수의 연직절편으로 분할한다. 이 때 각 절편의 저면이 단일토층 내에 있도록 분할하여야 한다. 손 계산을 위해서는 절편의 수는 8~12개이면 충분하고, 컴퓨터 사용을 위해서는 30개 정도의 절편을 만든다.
- ③ 각 절편의 무게를 계산한다. 절편이 단위중량이 상이한 2개 이상의 토층에 걸쳐 있으면 각 토층의 무게를 합하여, 절편의 총중량을 산정한다.
- ④ 각 절편에 대하여 절편의 너비  $b$ , 저면의 경사각  $\alpha$ , 저면의 점착력  $c$ , 저면의 내부마찰각  $\phi$ , 저면의 간극수압  $u$  를 결정한다. (단, 전응력해석에서는  $u = 0$  로 둔다.)

- ⑤  $F$ 의 값을 가정하고 각 절편의  $m_a$ 를 구한다.
- ⑥ 그림 4.1의 식(4)로부터 안전율  $F$ 를 계산한다.
- ⑦ 만약, 산정된 안전율이 가정한 값과 상이하면 다른 안전율의 값을 가정한다.
- ⑧ 새로이 가정된 안전율로 ⑤, ⑥을 되풀이 한다.
- ⑨ 그림 4.2에서 보는 바와 같이 가정안전율과 산정안전율 간의 관계를 그리고, 45°선과 교점을 찾아낸다.
- ⑩ 이 안전율을 가정치로 하여 동일한 안전율이 산정되는지 ⑤, ⑥을 반복하여 계산하고, 확인한다.
- ⑪ 만약, 오차가 충분히 적으면 이를 안전율로 하고, 그렇지 못하면 오차가 허용범위 내에 올 때까지 시산(試算)을 계속한다.

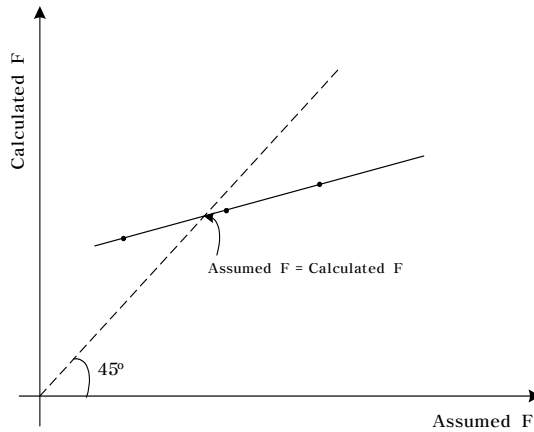


그림 4.2 가정안전율과 산정안전율 간의 관계

**Bishop의 간편법**으로 얻은 안전율은 그 정확도가 실용상 충분한 것으로 평가되고 있다. 그 주된 이유는 후술하는 바와 같이 모멘트 평형이 만족되는 경우 안전율은 절편간 작용력에 대한 가정에 둔감하게 반응하기 때문이다. 이 방법은 **전응력 해석과 유효응력해석법에 모두 적용할 수 있으며, 현재 가장 널리 쓰이는 방법**이다.

## 5. 사면안정해석에 사용되는 지반정수(토사층)

4절에서 언급한 바와 같이 암반 사면이라면 절리 등 불연속면의 특성이 파괴에 영향을 미치는 바가 더 크기 때문에 이러한 특성이 중요하지만, 토사 사면에 대한 안정해석에서 사용되는 지반 정수는 기본적으로 아래와 같은 기본적인 물성치에 대한 정확한 산정이 더욱 중요하다.

### (1) 단위 중량 ( $\gamma$ )

흙의 단위중량이란 흙덩이의 중량을 이에 대응하는 부피로 나눈 값이다. 단위중량의 단위는 일반적으로  $t/m^3$ 으로 표시된다. 일반적으로 사면안정해석에 사용되는 단위중량의 종류로는 전체(습윤)단위중량( $\gamma_t$ ), 포화단위중량( $\gamma_{sat}$ ), 수중단위중량( $\gamma_{sub}$ ) 등이 있으며, Talren 프로그램에서는 단위중량 입력항목이 1 곳 밖에 없으므로 사용자가 어떤 상황에 대한 해석인지를 파악하여 알맞은 값을 입력해주어야 한다.

단위중량에 대한 개념 및 자세한 사항은 토질역학 책을 참고하길 바란다.

(2) 점착력 (c) 및 내부마찰각 (φ)

재료의 파괴를 정의하는 여러 가지 이론이 있지만, 이중에서도 Mohr-coulomb의 파괴이론이 토질 역학에서 가장 많이 쓰이고 있다. 한계평형법 및 FEM 등을 이용한 사면안정해석시에 가장 기본적으로 입력되어야 할 지반정수가 c, φ 임이 바로 이러한 이유이다. Mohr-coulomb의 파괴이론에 대해서 간략히 언급해보기로 한다.

이 이론에 의하면, 파괴시 파괴면에서의 전단응력이 그 파괴면 상의 수직응력의 어떤 유일한 함수에 도달될 때 그 재료는 파괴된다는 것이다. 이것을 식으로 나타내면 식 (5.1)과 같다.

$$\tau_{ff} = s = f(\sigma_{ff}) \quad \text{식 (5.1)}$$

여기서,  $\tau_{ff}$ 는 파괴면에서의 전단응력,  $\sigma_{ff}$ 는 파괴시 파괴면에서의 수직응력, s는 전단강도를 표시하고 처음의 첨자 f는 파괴면, 두 번째 첨자 f는 파괴시를 의미한다. 이 이론에 의하면 재료가 파괴될 때 파괴면에서의 전단응력은 전단강도와 같다.

재료가 파괴될 때의 최대 주응력과 최소 주응력을 알면 Mohr 원을 그릴 수 있다. 그림 5.1(b)는 주응력을 여러 가지로 바꾸어 그린 Mohr원이다. 이 그림의 모든 원은 재료가 파괴될 때의 상태를 표시하므로, 여기에 접하는 선을 긋는다면 이 선상의 모든 점은 주어진 수직응력에 대해 전단응력이 도달될 수 있는 한계를 의미한다. 이 선을 Mohr의 파괴포락선(Mohr's failure envelope)이라고 한다.

응력상태를 표시하는 Mohr 원이 포락선과 접할 때에만 그 재료는 파괴된다. 따라서 Mohr원이 그 선 아래 그려진다면 그 재료는 아직 파괴에 이르지 않았다는 것을 의미하므로 안전한 상태에 있다. 그러나 포락선 위로 그려지는 Mohr원은 있을 수 없다.

Mohr 보다 훨씬 먼저 태어난 Coulomb은 흙의 전단에 관한 시험을 하여 흙의 저항력은 응력과 관계가 있는 성분과 응력과 관계가 없는 성분으로 나눌 수 있다는 것을 관찰하였다. 전자는 마치 고체 사이에 작용하는 마찰성분과 같은 것이고, 후자는 마치 풀처럼 두 재료를 결합시킬 수 있는 성분이다. 이것을 식으로 나타내면, 식 (5.2)와 같다.

$$s_f = c + \sigma \tan \phi \quad \text{식 (5.2)}$$

여기서,  $s_f$ 는 흙의 전단강도,  $\sigma$ 는 수직응력, c를 점착력(cohesion), φ를 내부마찰각 (angle of internal friction)이라고 한다.

그 후 여러 학자들의 연구결과에 따르면, c와 φ의 값은 흙에 따라 고유한 것이 아니고 전단하는 방법과 배수조건에 따라서도 크게 달라질 수 있다는 것이 밝혀졌기 때문에 최근에 와서 전자를 점착 절편 (cohesion intercept), 후자를 전단저항각 (angle of shearing resistance)이라고 말하기도 한다. 이 두 값은 흙의 전단강도를 결정하는데 대단히 중요하며, 이들을 합쳐서 강도정수 (strength parameter)라고 한다.

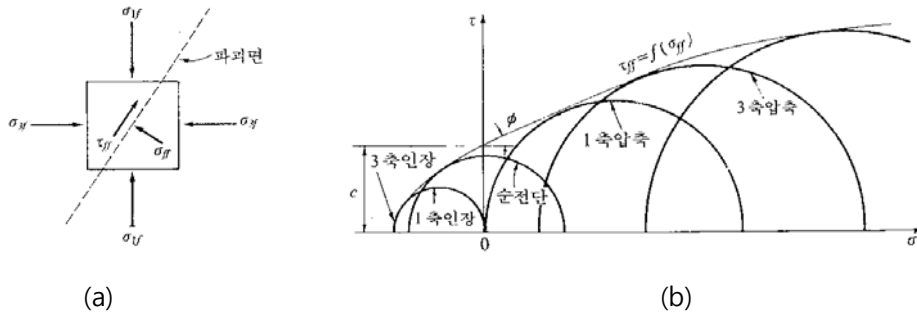


그림 5.1 (a) 파괴시 파괴면에서의 수직응력과 전단응력 (b) Mohr의 파괴 기준

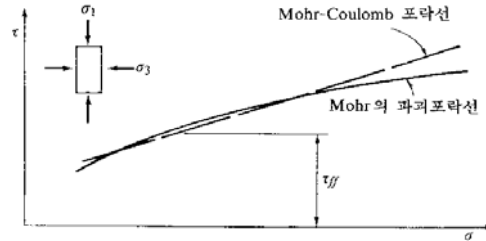


그림 5.2 Mohr-Coulomb 포락선

Mohr의 파괴포락선은 곡선으로 표시되므로 이것을 흙에 적용하는데 있어서는 대단히 불편하다. 만일 위에서 설명한 Coulomb의 전단강도에 대한 개념을 도입하여 이것을 직선으로 나타낼 수 있다면, 실용에 대단히 편리할 것이다. 그림 5.2는 Mohr의 포락선을 직선으로 표시한 것인데, 이것을 **Mohr-Coulomb의 포락선**이라고 한다. 이 직선의 세로축과의 교점이 점착력(c)이 되고, 직선의 수평축과의 경사각은  $\phi$ 가 되므로 전단강도는 앞서 기술한 식 (5.2)로 표시될 수 있다.

흙의 전단은 흙입자를 통해 전달되는 응력, 즉 유효응력에만 지배되므로 전단강도를 유효수직응력의 함수로 표시할 수 있다. 그러면, 식 (5.2)는 (5.3)으로 표현된다.

$$s = c' + \sigma' \tan \phi' \quad \text{식 (5.3)}$$

여기서,  $c'$ 은 유효응력으로 표시한 점착력(cohesion),  $\sigma'$ 은 유효수직응력,  $\phi'$ 은 유효응력으로 표시한 전단저항각이다. 전응력으로 강도정수를 표시할 때에는 수직응력은 전응력이어야 하고  $c$ 와  $\phi$ 에 첨자  $u$ 를 붙인다. 더 자세한 사항은 토질역학 책을 참고해서 확인하길 바란다.

## 6. Slope/w v6 일반 사항 -- GeoStudio 2004 v6

Slope/w 프로그램은 캐나다의 Geo-slope사에서 개발, 상용화한 사면안정해석 프로그램으로 윈도우 환경이 발전함에 따라서 User-friendly한 모델링 방법을 추구하며 프로그램의 버전이 몇 년 간격으로 업그레이드되고 있다. 2006년 현재 최신 버전은 Slope/w 2004 v6이며, 이전 버전에 비해서 모델링 방법이 많이 진화되었다. 특히, Region이라는 새로운 메뉴의 출현으로 복잡한 형태의 사면 모델링을 보다 간편하게 작업할 수 있게 되었다. 또한, 같은 회사 다른 제품들 간에 호환성이 강화되어서 coupled 해석이 보다 용이해졌다.

## 7. Slope/w v6 프로그램의 메뉴 설명

### 7.1 File 메뉴

File 메뉴에 대해서는 길게 설명할 필요가 없다. 어떤 프로그램이든지 다 가지고 있는 불러오기, 저장하기 등의 메뉴들이 있는 메뉴이다. 단지, 중요한 메뉴가 하나 있어서 언급하기로 한다.

- Select Analyses : 이 메뉴를 선택하면 그림 7.1과 같은 창이 열린다. v6에서는 slope/w 독자적으로도 해석하는 것 외에 다른 프로그램들과 모델을 공유하면서 해석을 수행할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 slope/w란에만 선택이 되어 있다면, 작업한 데이터 파일은 slope/w 독자적인 해석에서만 사용할 수 있도록 셋팅이 되는 것이다. 이 메뉴에 대한 세부 설명은 그림 7.2와 같다.

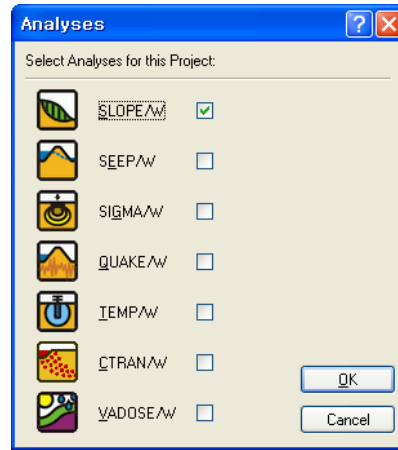


그림 7.1 Select Analyses

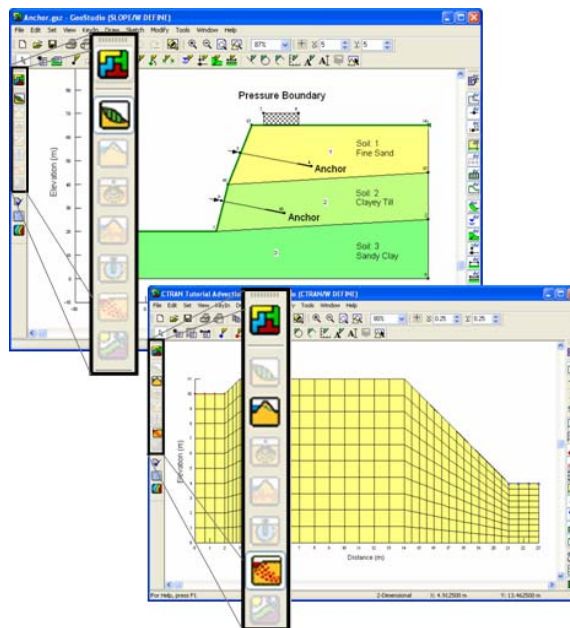


그림 7.2 Select Analyses (2)

GeoStudio는 Main 창에서 각 프로그램이 지원되어 동시 작업에 있어 효율성이 높아졌다. GeoStudio는 각 제품별 구매 및 독립적 작업수행이 가능하며, 제품별 데이터 통합관리도 가능하다. 활성화 시켜놓은 제품 간에 연계 모델링 및 해석이 가능하다.

## 7.2 Set 메뉴

Set 메뉴에는 Page, Scale, Grid, Zoom, Axes 의 5가지 항목이 있다. 이 메뉴들을 적절히 사용하여 해석 영역을 화면상에 나타낸다. 실제로 한번 사용해보면 알 수 있는 내용이며, 각각의 내용에 대한 설명은 아래와 같다.

### 7.2.1 Page

이 메뉴를 선택하면 그림 7.3과 같은 입력창이 열린다. Printer page는 현재 선택된 프린터의 정보가 나타난다. Working Area에서 작업 화면의 크기를 결정하고, Units에서 길이의 단위를 선택한다.

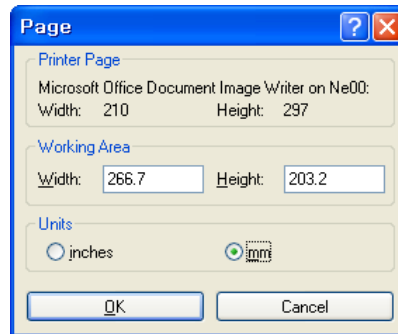


그림 7.3 Page

### 7.2.2 The Others

나머지 메뉴들에 대한 개략적인 내용을 그림 7.4를 만드는 과정을 예로 들어 설명하기로 한다.

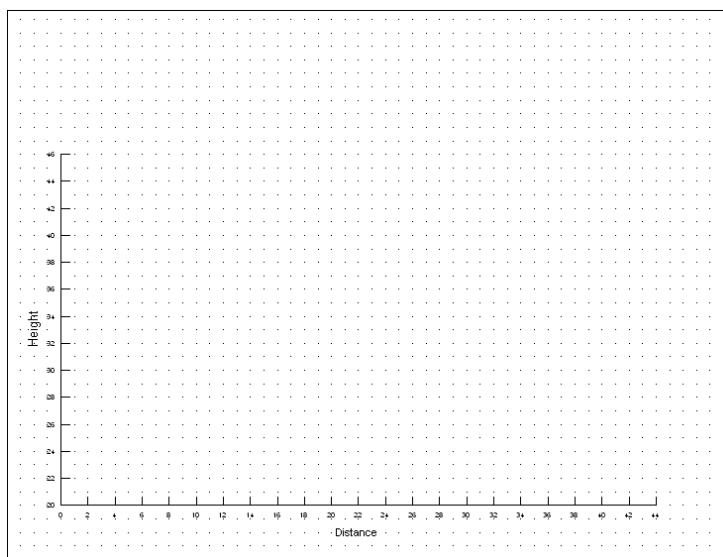


그림 7.4 해석 영역 만들기

그림 7.4는 나머지 메뉴들을 사용해서 만들어진 해석 영역을 보여준다. 가로 44m, 세로는 26m이지만, 세로 방향은 시작 위치가 20m인 경우에 대해서 만들어졌다. 우선, Scale 메뉴에서 그림 7.5와 같이 입력한다. Scale은 가로, 세로 각각 200배로 설정한다. 원점의 위치인 (0, 20)을 작업영역 상에 적절하게 배치하기 위해서 x방향으로 마진을 -4 만큼, y방향으로 16을 준다. 물의 단위중량은 default 값으로 9.807kN/m<sup>3</sup>이 입력되어 있다.

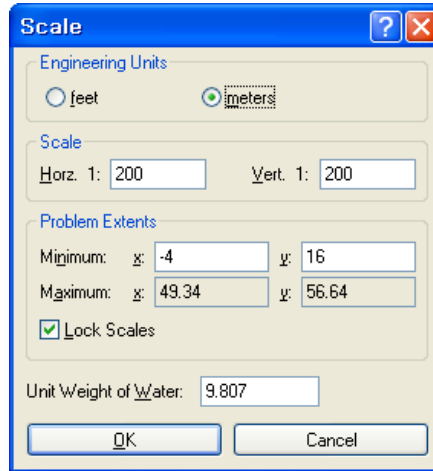


그림 7.5 Scale

Grid 간격은 1m로 놔두고, Display Grid와 Snap to Grid에 체크를 한다. 물론, 선택 사항이므로 사용자가 사용하기 편한 쪽으로 선택하면 된다.

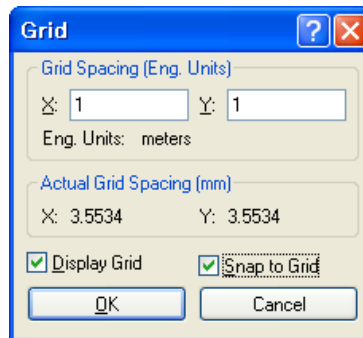


그림 7.6 Grid

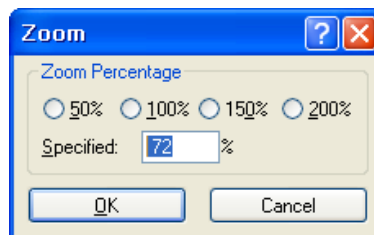


그림 7.7 Zoom

Zoom 메뉴는 그림 7.7과 같으며, 사용자가 보기 편한 정도로 %를 설정하면 된다.



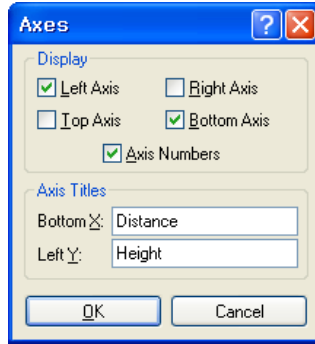


그림 7.8 Axes

Axes 메뉴를 선택하면 그림 7.8과 같은 창이 열린다. 화면상에 축을 도시하기 위한 옵션이며, 그림 7.4와 같은 형태의 축을 만들기 위해서는 Left Axis와 Right Axis에 체크를 하고 Titles에 적절한 제목을 입력한다. 그 후, OK 버튼을 클릭하면 그림 7.9와 같은 창이 열린다.

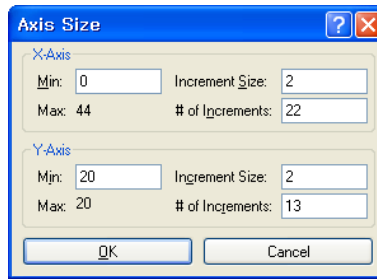


그림 7.9 Axis Size

x축에 대해서 시작점(Min)을 0으로 입력하고, 2m씩 22개를 증가시켜서 44m까지 화면상에 나타나도록 한다. y축에 대해서는 시작점을 20으로 입력하고, 2m씩 13개를 증가시켜서 46m까지 화면상에 나타나도록 하고 OK 버튼을 클릭한다.

### 7.3 View 메뉴

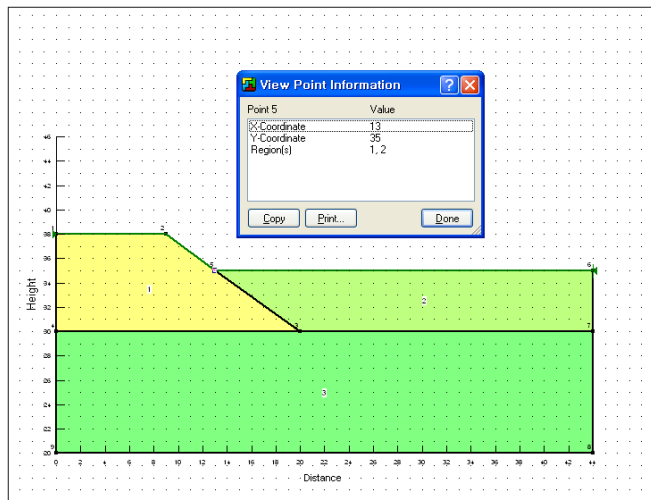


그림 7.10 View point information

그림 7.10에서는 View 메뉴 중에 좌표 점에 대한 정보를 볼 수 있는 메뉴를 보여주고 있다. View point Information을 클릭하면 마우스 커서가 십자가 모양으로 변하고, 마우스를 화면상에서 정보를 확인하고 싶은 점 위에 놓고 더블 클릭하면 정보를 확인할 수 있는 창이 열린다. 그림 7.11은 지층 물성치에 대한 정보를 보여주는 메뉴를 설명하고 있다.

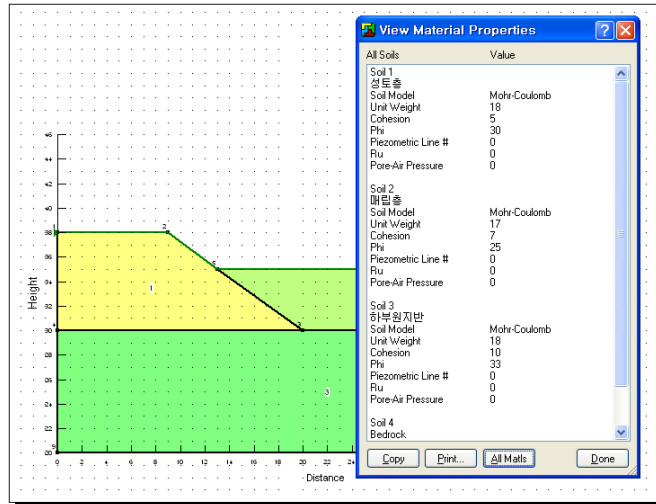


그림 7.11 View Material information

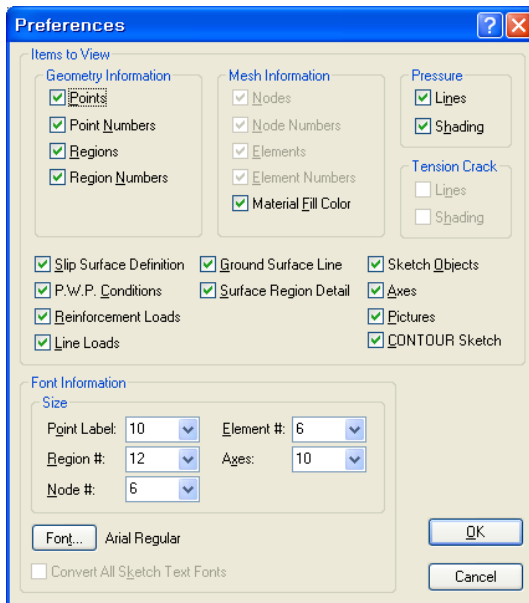


그림 7.12 Preferences

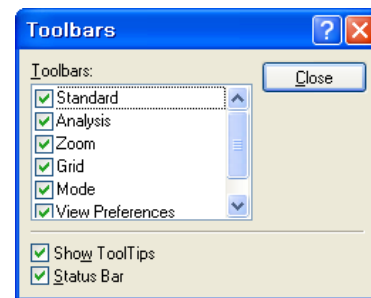


그림 7.13 Toolbars

그림 7.12는 화면상에 보여줄 내용에 대한 정의를 할 수 있는 Preferences 메뉴를 보여주고 있다. 화면상에 도사하고 싶은 항목에 대해서 체크를 하면 된다. Font information은 화면상에 나타나는 숫자의 크기를 정의할 수 있는 메뉴이다. 그림 7.13은 Toolbars 메뉴를 보여준다. 화면에 나타나있는 여러 가지 단축 아이콘들을 사용자가 원하는 대로 선택하면 된다.

## 7.4 KeyIn 메뉴

Slope/w 프로그램 메뉴들 중에 가장 중요한 메뉴이다. 해석을 어떤 방식으로 진행할 것인지에 대한 정의, 지반 및 보강재 물성치 입력, 하중, 해석 탐색법 정의 등등 해석 전반에 대한 정의를 하는 메뉴이다.

### 7.4.1 Analysis Setting

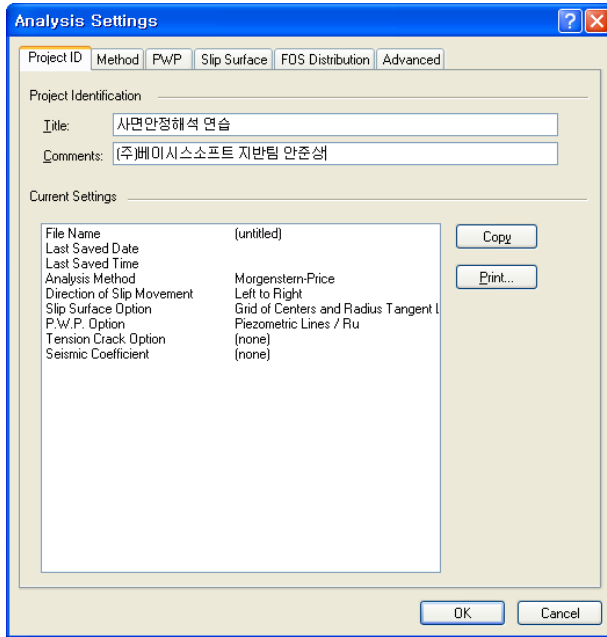


그림 7.14 Project ID

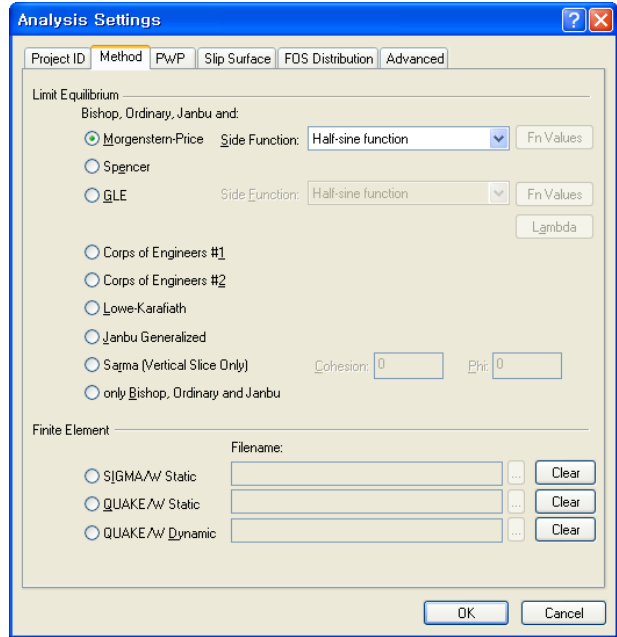


그림 7.15 Method

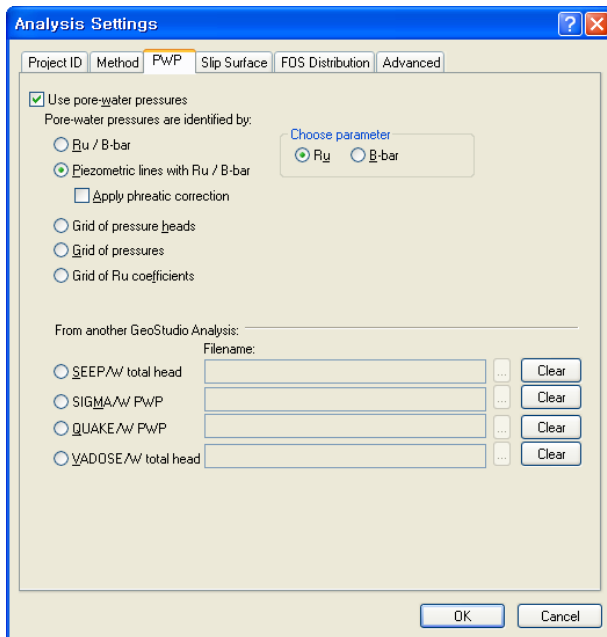


그림 7.16 PWP

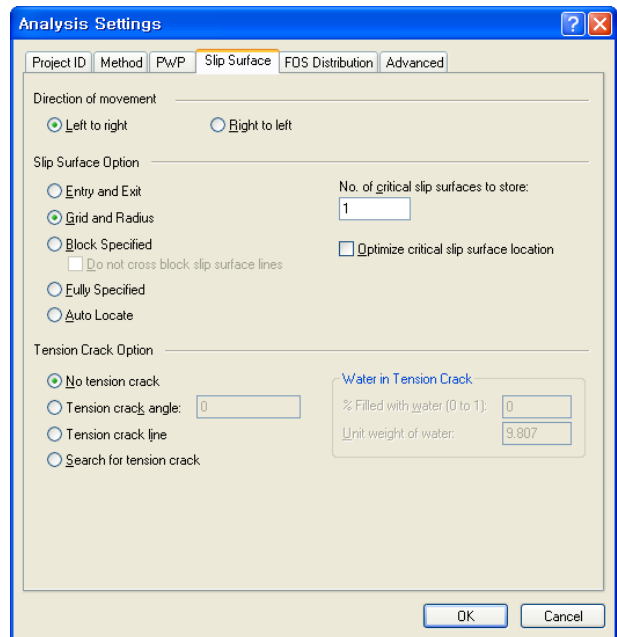


그림 7.17 Slip Surface

그림 7.14는 Analysis setting 메뉴 중에 Project ID 항목을 보여주고 있다. 프로젝트명 및 일반 기술 사항 등을 입력하는 곳이다. 프로젝트명 입력 외에 현재 선택된 사항을 보여주는 역할도 한다. 그림 7.15는 Analysis setting 메뉴 중에 Method 항목을 보여주고 있다. 사면안정해석 방법을 어떤 것으로 할 것인지 선택하는 항목과 GeoStudio 내에 다른 프로그램과 데이터 파일을 호환할 것인지에 대한 선택을 하는 항목이 있다.

그림 7.16은 Analysis setting 메뉴 중에 PWP (Pore Water Pressure, 간극수압) 항목을 보여주고 있다. 지하수위를 어떤 형태로 표현할 것인지에 대해서 선택해주는 항목과 GeoStudio 내에 다른 프로그램과 데이터 파일을 호환할 것인지에 대한 선택을 하는 항목이 있다. 그림 7.17은 Analysis setting 메뉴 중에 Slip Surface 항목을 보여주고 있다. 사면 형상을 어떤 형태로 모델링 할 것인지 선택(왼쪽 ->오른쪽 또는 오른쪽->왼쪽)하는 항목, 파괴면 유도를 어떤 형태로 탐색할 것인지에 대해서 선택해주는 항목 그리고 인장균열(Tension Crack)을 고려할 수 있는 항목이 있다.

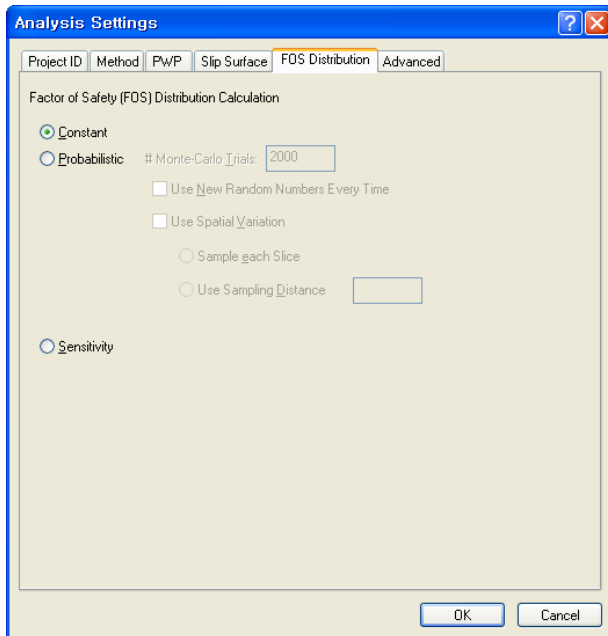


그림 7.18 FOS Distribution

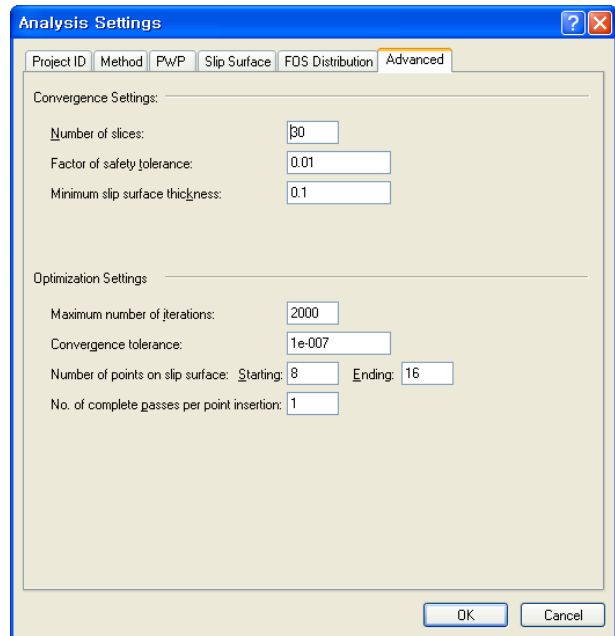


그림 7.19 Advanced

그림 7.18은 Analysis setting 메뉴 중에 FOS Distribution 항목을 보여주고 있다. 안전율을 계산하는 방법에 대한 선택을 하는 항목이 있다. 일반적인 상황에 대한 안전율을 산정하는 Constant 항목이 default 값으로 선택되어져 있고, 확률 해석 (Probabilistic) 및 민감도 분석 (Sensitivity)을 선택할 수 있다. 그림 7.19는 Analysis setting 메뉴 중에 마지막 항목으로 Advanced 이다. 여기서는 해석 대상에 대한 절편 개수, 각 절편 당 최소 두께 등을 정할 수 있다.

#### 7.4.2 Strength Functions

이 메뉴는 응력수준에 따라 변화가 있는 내부마찰각 값의 적용 및 파괴면의 각도에 따라서 변화가 있는 점착력 값을 적용할 수 있도록 사용자가 곡선을 만드는 작업을 하는 메뉴이다. 그렇게 사용빈도가 높은 메뉴는 아니므로 구체적인 언급은 하지 않는다. 궁금한 사항은 영문 매뉴얼을 참고하길 바란다.

### 7.4.3 Probability Functions

이 메뉴는 확률분포 해석을 하기 위해서 사용자가 곡선을 만드는 작업을 하는 메뉴이다. 이 메뉴 역시 그렇게 사용빈도가 높은 메뉴는 아니므로 구체적인 언급은 하지 않는다. 궁금한 사항은 영문 매뉴얼을 참고하길 바란다.

### 7.4.4 Material Properties

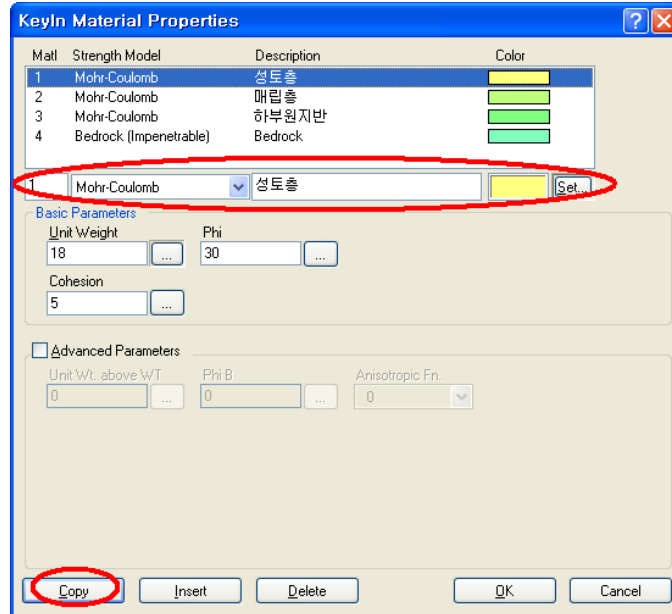


그림 7.20 KeyIn Material Properties

그림 7.20은 지반 물성치를 입력하는 Material Properties 창을 보여주고 있다. 모델링에 필요한 물성치의 수만큼 입력을 하면 된다. 그림 7.20에 보이는 빨간 원으로 표시한 부분에 모델 선택, 물성치 이름 기술, 지층 색깔을 선택한다. 입력이 끝나면 Basic Parameters 항목에서 단위중량(Unit Weight), 내부마찰각(Phi), 점착력(Cohesion) 등 기본 입력치를 입력한다. 그런 후에, 창 왼쪽 하단에 있는 Copy 버튼을 클릭해서 물성치를 리스트업 한다. 위의 그림은 4가지 지반 물성치를 리스트업 한 상황을 보여주고 있다. Advanced Parameters 에 있는 항목들은 필수적으로 기입해야 하는 항목은 아니지만, 필요한 경우에는 체크박스에 체크하면 입력항목이 활성화된다. 그 내용은 다음과 같다.

- Unit Wt. above WT : 지하수위 위에 지층의 단위중량. 이 항목은 지하수위가 어떤 지층의 중간 부분을 통과하는 경우에 지하수위 위의 습윤단위중량, 아래는 포화단위 중량으로 입력되게 하기 위한 항목이다. Basic Parameters의 단위중량은 포화단위중량이 되고 이 항목에 입력하는 단위중량이 습윤단위중량이 된다.
- Phi B : 간극수압계수. 지하수위를 그리지 않고 지층 자체의 간극수압 분포를 이 계수를 입력해서 적용하는 경우에 사용한다. 요즘은 거의 사용 빈도가 적은 항목이지만, 특별한 경우에 종종 사용한다.
- Anisotropic Fn. : 이방성을 고려해야 하는 경우에 7.4.2에서 언급한 Strength Functions 항목에서 곡선을 만들어 놓고, 여기서 선택을 하면 된다.

#### 7.4.5 Tension Crack Line

이 메뉴는 평상시에는 비활성화 되어 있고, 그림 7.17에 있는 인장균열 관련 항목에서 선택을 하면 활성화가 된다. 인장균열에 관련된 사항은 Analysis setting 에 Slip Surface 항목에서 입력하고, 여기서 인장균열이 있는 곳을 점 번호를 사용해서 선택만 해주면 된다.

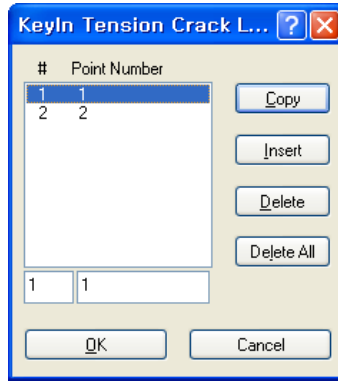


그림 7.21 KeyIn Tension Crack Line

#### 7.4.6 Points

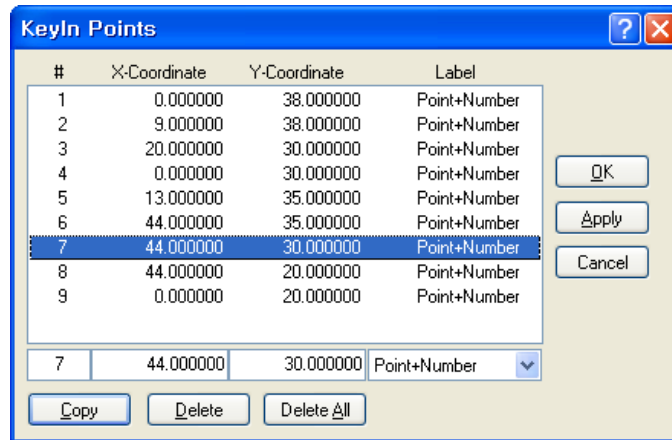


그림 7.22 KeyIn Points

모델링 상에 점의 좌표들을 입력하거나, Draw 기능을 사용해서 그림을 그리면 이곳에 좌표의 정보가 저장이 된다. 일반적으로 Draw 기능을 사용해서 모델링을 하므로 여기서는 더 이상의 설명은 생략하기로 한다.

#### 7.4.7 Regions

모델링 상에 지층을 표현하기 위해서 선분을 연결하여 폐합시킨 영역을 의미한다. 이전 버전에는 없던 기능으로 이제는 가로 방향의 2개의 선분으로 지층을 폐합해서 인식시키는 방법이 아니고 폐합된 공간에 지층을 인식시킨다. 일반적으로 Draw 기능을 사용해서 모델링을 하므로 여기서는 더 이상의 설명은 생략하기로 한다.

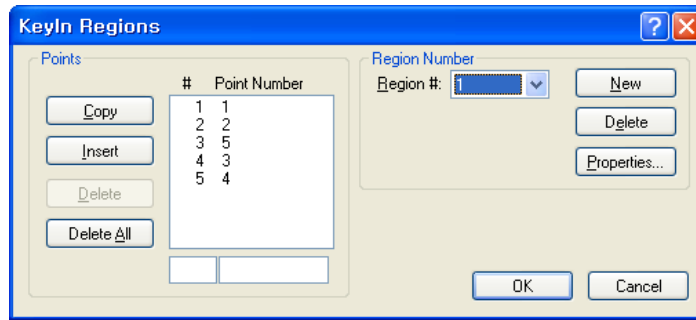


그림 7.23 KeyIn Regions

#### 7.4.8 Slip Surface

이 메뉴는 파괴면 탐색에 대한 정의를 항목이다. Slope/w v6에서는 이전 버전에 비해서 Entry and Exit 및 Axis Point 라는 새로운 항목이 추가되었다. 구성 항목은 그림 7.24와 같으며 그 각각에 대한 설명은 아래와 같다. 이 항목들은 Analysis Setting 메뉴의 Slip Surface에서 선택된 항목만 활성화 되어 있다.



그림 7.24 KeyIn Slip Surface 의 하위 메뉴

1) Entry and Exit : STABL 계열의 프로그램에서 흔히 볼 수 있는 탐색법으로 대상 사면의 상부에 일정 영역(사면 좌측면)을 잡고, 하부에도 일정 영역(사면 우측면)을 잡아서 그 사이를 탐색하는 기법이다.

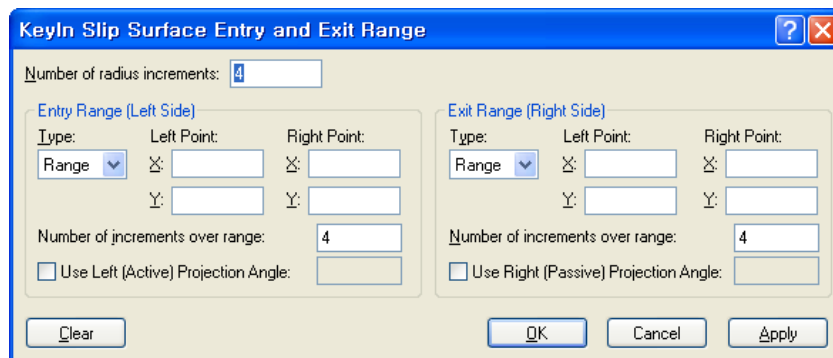


그림 7.25 KeyIn Slip Surface Entry and Exit Range

2) Grid and Radius : 가장 보편적인 방법으로 사용자가 원호의 중심점들의 위치를 격자망으로 정의하고 또한 원호의 반경을 정의해서 원호 파괴면을 유도하는 방법이다. 주로 Draw 기능을 사용해서 정의하기 때문에 작성 요령은 Draw 항목에서 설명하기로 하고, 여기서는 KeyIn 메뉴에서의 창만 보여주기로 한다. 그림 7.26은 Grid and Radius 입력창을 보여준다.

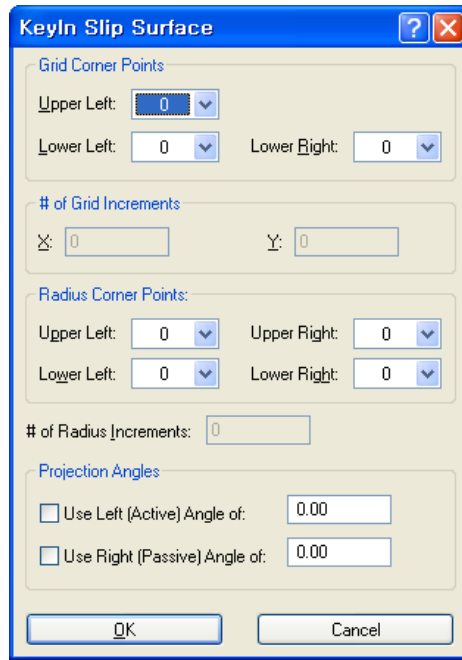


그림 7.26 KeyIn Slip Surface Grid and Radius

3) Left Block, Right Block : 비원호 파괴면을 정의해서 안정 해석을 수행할 경우, 특정 위치에 격자망을 구성해서 여러 개의 비원호 파괴면을 유도할 수 있다. (그림 7.28 참조)

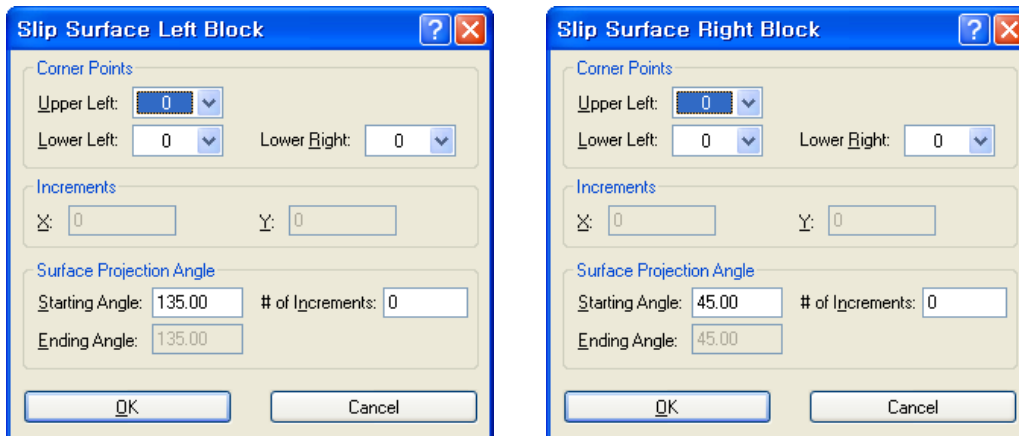


그림 7.27 KeyIn Slip Surface (Left, Right Block)

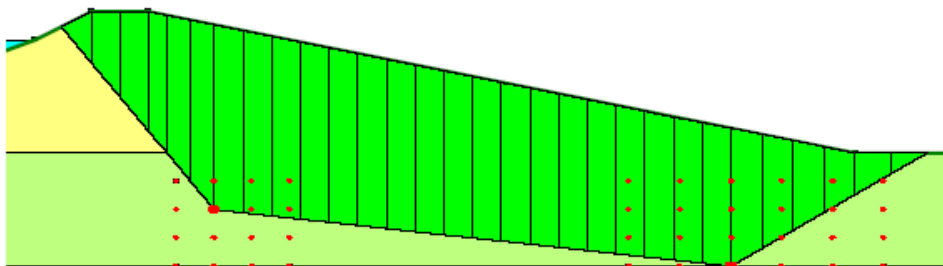


그림 7.28 Left Block, Right Block 모델링 형상



4) Fully Specified : 비원호 파괴면을 구성하기 위한 항목

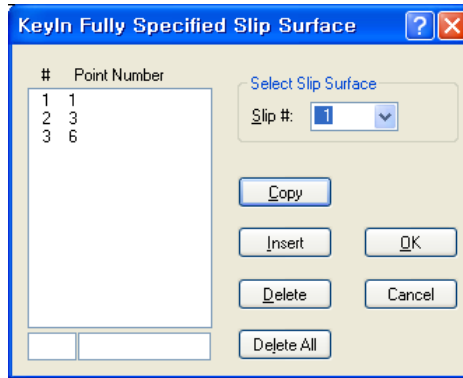


그림 7.29 KeyIn Slip Surface (Fully Specified)

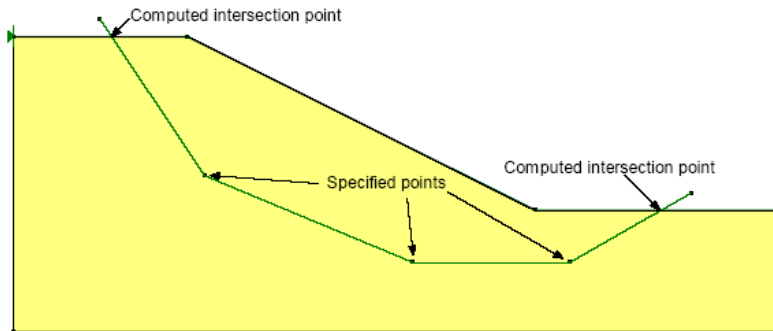


그림 7.30 KeyIn Slip Surface (Fully Specified) 개요도

5) Axis Point : 비원호 해석을 수행할 경우, 파괴면의 중심점이다. (그림 7.32 참조)

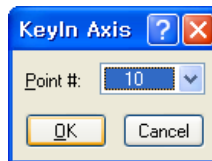


그림 7.31 KeyIn Slip Surface (Axis Point)

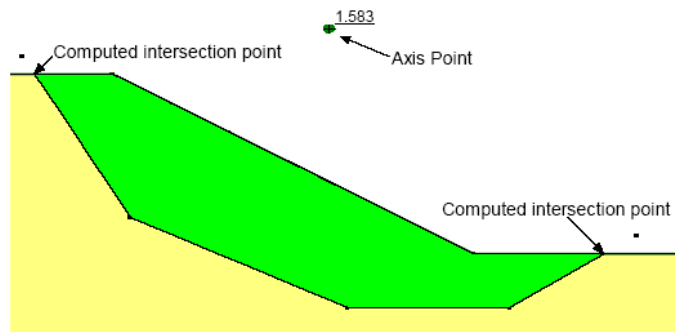


그림 7.32 KeyIn Slip Surface (Axis Point) 개요도

6) Limits : 파괴면 활동 영역을 정의하는 항목. Default 값으로 지표면과 일치하도록 되어 있고, 만약 사용자가 임의로 파괴면 활동 영역을 바꿔주려면 그 시작점과 종료지점을 지표면 내에 있도록 정의해주면 된다.

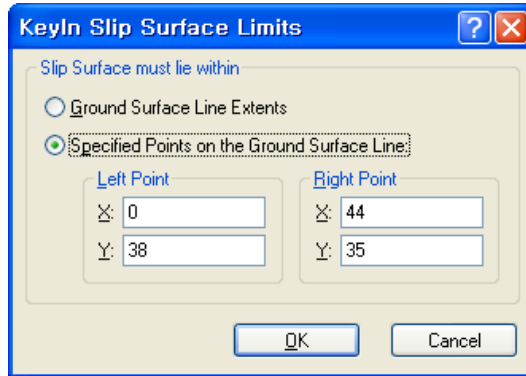


그림 7.33 KeyIn Slip Surface (Limits)

#### 7.4.9 Pore Water Pressure

간극수압을 정의하기 위한 항목이다. 지하수위를 입력하기 위해서 첫 번째로 Apply to Materials에서 지하수위가 존재하는 지층을 선택한다. 지표면 아래로 완전포화 된 경우라면 그림 7.34에서처럼 All 버튼을 클릭해서 모든 지층을 선택한다. 이 항목 또한 Draw 기능을 사용해서 지하수위를 그리는 것이 일반적인 방법이며, Point in Line 항목에 지하수위가 존재하는 좌표 점의 번호를 입력해도 된다. Define Ru 버튼을 클릭하면 지하수위를 그리지 않고 지층별로 간극수압계수를 입력해서 간극수압을 지층별로 표현하는 방법도 있다.

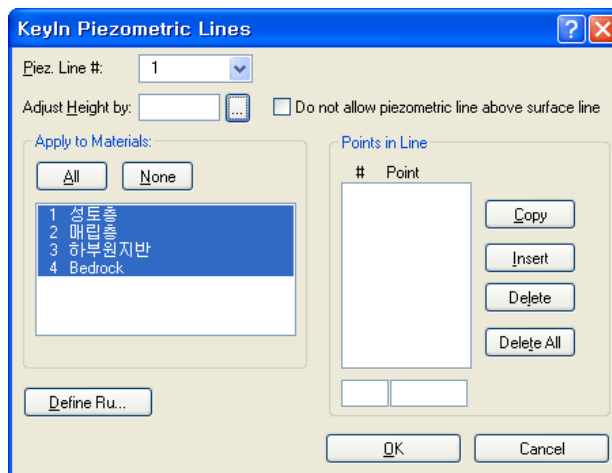


그림 7.34 KeyIn Pore Water Pressure

#### 7.4.10 Pore Air Pressure

간극공기압을 입력하는 항목이다. 그렇게 흔하게 쓰는 메뉴는 아니지만, 간극공기압을 고려해야 하는 상황이라면 각 지층별 간극공기압을 입력해주면 된다.

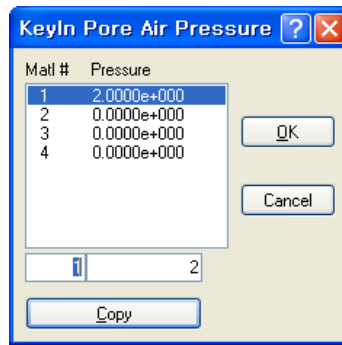


그림 7.35 KeyIn Pore Air Pressure

#### 7.4.11 Line Loads

선하중을 입력하는 항목이다. 선하중이 작용하는 좌표에 해당하는 점 번호 입력, 하중 크기 입력, 하중 방향 입력(+90도가 연직하향 방향임) 후에 copy 버튼을 클릭해서 선하중을 입력한다.

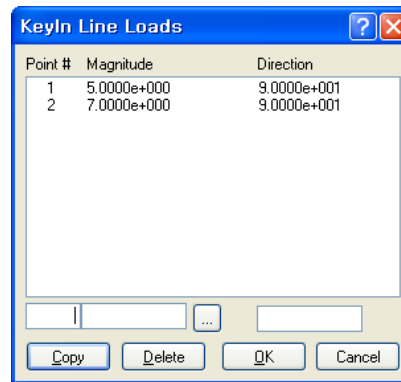


그림 7.36 KeyIn Line Loads

#### 7.4.12 Reinforcement Loads

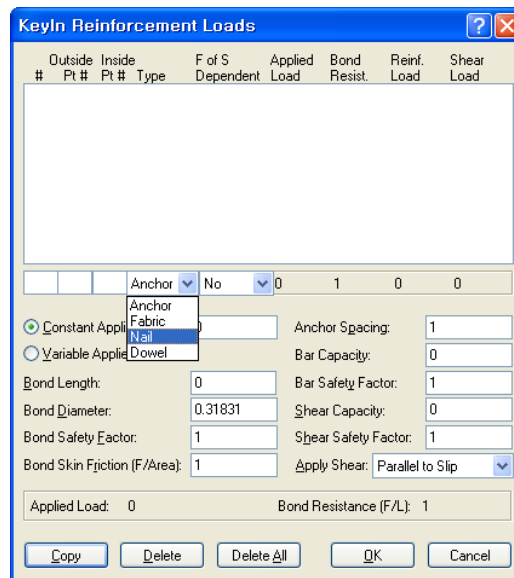


그림 7.37 KeyIn Reinforcement Loads

보강재의 특성을 입력하는 항목이다. 이전 버전과의 차이점은 각 보강재별로 입력항목을 구분해놓았다는 점이다. 이전 버전에서는 하나의 보강재 입력창에서 동일한 입력 형태로 서로 다른 보강재를 사용했었기 때문에 사용자의 이해도가 많이 떨어지는 편이었으나, 현재는 각 보강재 별로 입력 항목들이 구분되기 때문에 사용의 편의성이 많이 좋아졌다. 적용 가능한 보강재는 Anchor, Fabric (지오텍스타일 계열), Nail, Dowel (말뚝 형태의 연직 보강재 계열) 등이 있다.

- 1) Anchor
- 2) Fabric
- 3) Nail
- 4) Dowel

(세부 내용은 아직 정리하지 못했습니다. 추후 보강 예정임)

#### 7.4.13 Seismic Loads

지진하중을 입력하는 항목이다. 수평, 수직방향 지진계수를 입력하면 파괴면 활동방향으로 각 절편에 하중으로 작용하게 된다. 하중 재하 메커니즘은 상당히 간단한 원리이며, 이를 일반적으로 유사 동적 해석이라고도 한다. 기본 원리는 영문 매뉴얼을 참고하길 바란다.

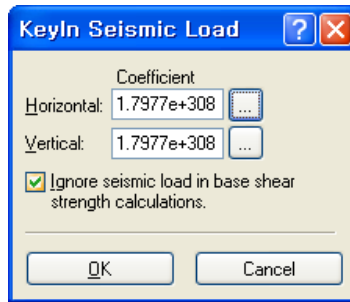


그림 7.38 KeyIn Seismic Load

#### 7.4.14 Pressure Lines

등분포 하중을 입력하는 항목이다. 등분포하중이 재하될 위치에 좌표 및 크기를 입력하면 된다. 주로 Draw 메뉴를 사용해서 그리기 형태로 많이 사용한다. 물론, Draw 메뉴를 사용해서 등분포 하중을 입력하면, 여기에 그 정보가 저장된다.

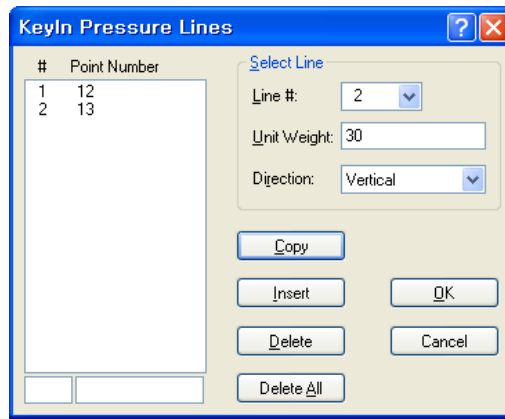


그림 7.39 KeyIn Pressure Lines

### 7.5 Draw 메뉴

이 메뉴는 KeyIn 메뉴에 보완적인 도구로서 그림 그리기 형태의 작업을 할 수 있는 메뉴이다. 화면 상에 도시되는 거의 대부분의 작업을 할 수 있다. 예를 들어, 지층형태, 하중, 지하수위, 인장균열, 원호 파괴면을 탐색하기위한 격자망, 원호활동 제한선 등을 작업할 수 있다.

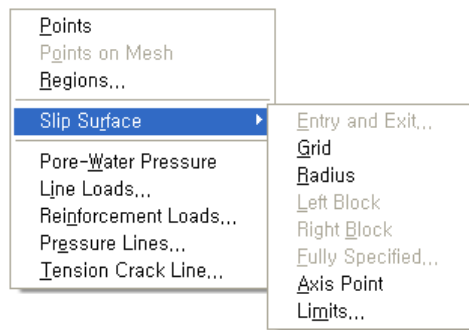


그림 7.40 Draw 메뉴

그림 7.40에서 비활성화 되어있는 항목들은 Analysis Setting 메뉴에서 선택을 어떻게 하느냐에 따라서 활성화/비활성화 되어서 표현된다. 예를 들어, Point on Mesh 는 Seep/w 프로그램과 데이터를 호환하도록 설정하면 활성화된다. 모든 항목들은 선택 후, 작업영역 상에 그림 그리는 형태로 작업을 하면 된다. 약간의 규칙들이 있으나, 1~2회 정도 연습을 해보면 쉽게 알 수 있는 기능이므로 세부 사항은 특별히 기술하지 않겠다.

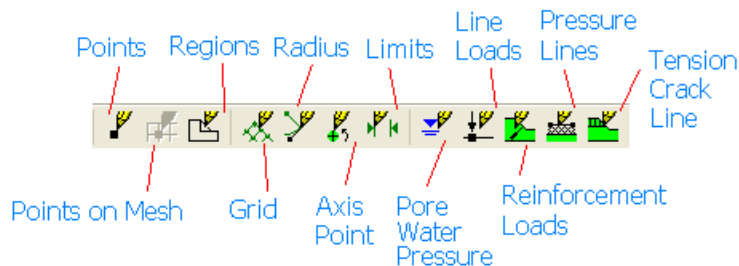


그림 7.41 Draw 메뉴에 관련된 아이콘 설명

### 7.5.1 Points

작업영역에 좌표를 그리는 항목이다. 지층구분 등 기본 모델링 작업은 Regions 항목을 사용하면 되므로 그 외에 필요한 좌표를 그릴 때 사용한다. 그림 7.42는 좌표 입력이 완료된 화면이다. 전술한 바와 같이 작업영역에 좌표를 찍으면 KeyIn Points에 실시간으로 그 정보가 저장된다.

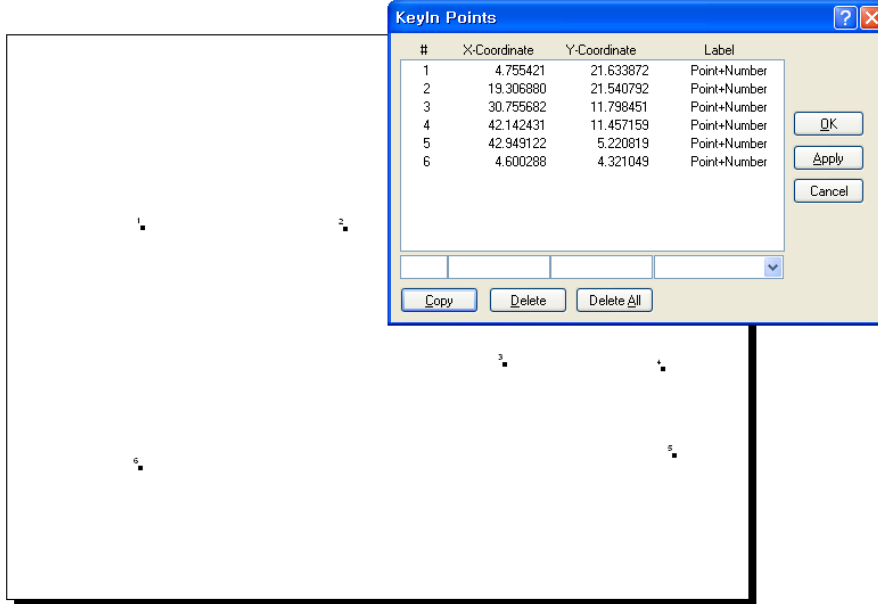


그림 7.42 Draw - Points

### 7.5.2 Regions

지층영역을 그리기 위한 항목이다. Draw Regions 작업에 앞서 선행되어야 것은 필요한 지층에 대한 정보를 Material properties에 저장해 놓는 것이다. 아래 그림은 간단한 지층에 대한 Draw Regions 작업이 완료된 형상이며, 작업 순서를 후술하기로 한다.

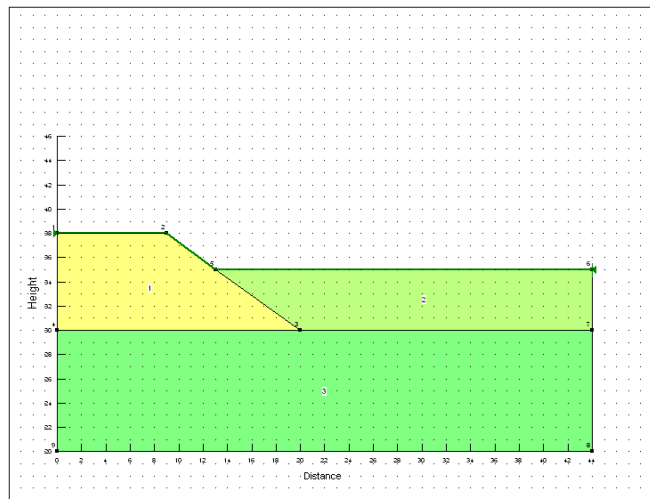


그림 7.43 Draw - Regions 으로 완료된 단순 사면 형상

이 예제에서 필요한 지층의 수는 3개이며, 선 작업으로 이미 Material properties에 입력을 해놓은 상태이다. 우선 상부의 1번 지층을 먼저 그린다. 1번 지층 폐합시 그 방향이나 시작점의 위치 등은 제한 사항이 없다. 하지만 Regions를 인식시키는 순서는 그 제한이 있으므로 순서에 맞게 그리기 작업을 수행해야한다. 이 예제는 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 사면이 형성되도록 Analysis Setting에서 선택을 해놓았기 때문에 Regions의 순서도 상부 지층 먼저 그리고 상부 지층도 왼쪽 지층 먼저 작업을 해야 한다. 또한 처음 그리는 지층이 Material properties에 입력된 1번 지층이 되므로 이 또한 주의해서 입력을 해야 한다. 아래 그림들은 3개의 지층을 순서에 입각해서 모델링하는 모습을 보여준다.

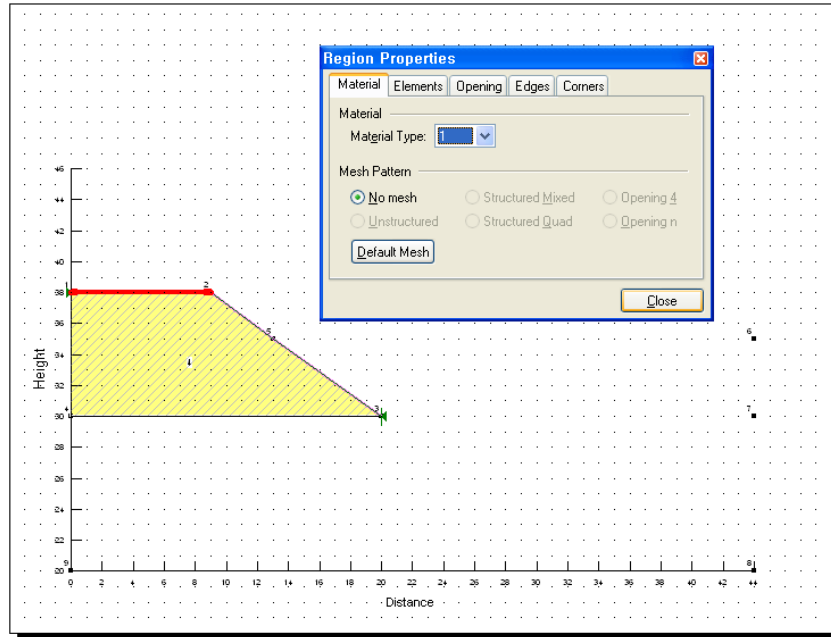


그림 7.44 Draw - Regions 으로 완료된 1번 지층 형상

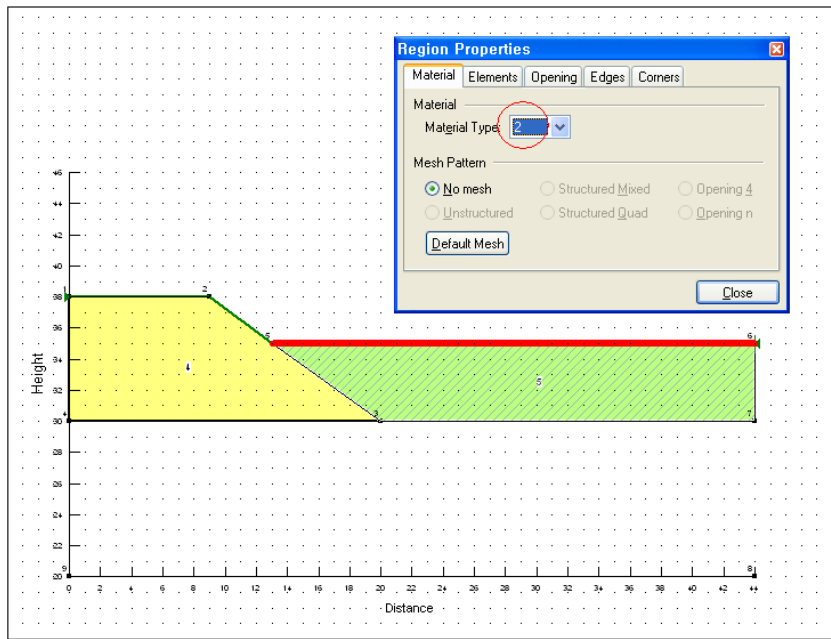


그림 7.45 Draw - Regions 으로 완료된 2번 지층 형상

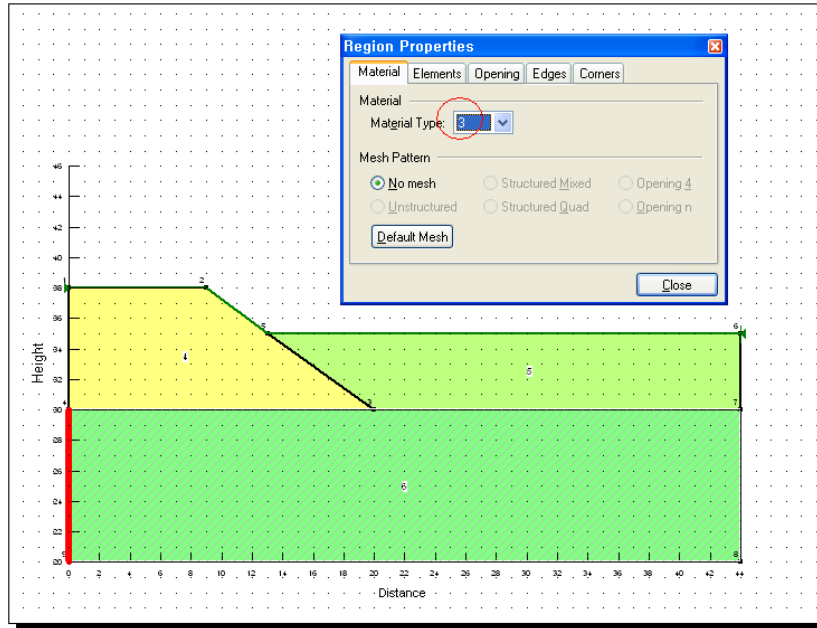


그림 7.46 Draw - Regions 으로 완료된 3번 지층 형상

### 7.5.3 Slip Surface

파괴면 탐색 방법에 필요한 사항들을 그리는 항목이다. 아이콘으로 빠져나와 있는 항목들은 탐색 기법 중 가장 기본적으로 쓰는 원호 해석에 관련된 사항들이다. Grid, Radius 등이 해당 항목이며, 그 외에 비원호 해석을 할 때 주로 사용하는 파괴면 중심점(Axis points) 그리고 마지막으로 Limits 항목이 아이콘으로 나와 있다. 그 외에 아이콘에 등록되어 있지는 않지만, Entry and Exits, Block 등을 선택해서 Draw 작업을 수행할 수 있다.

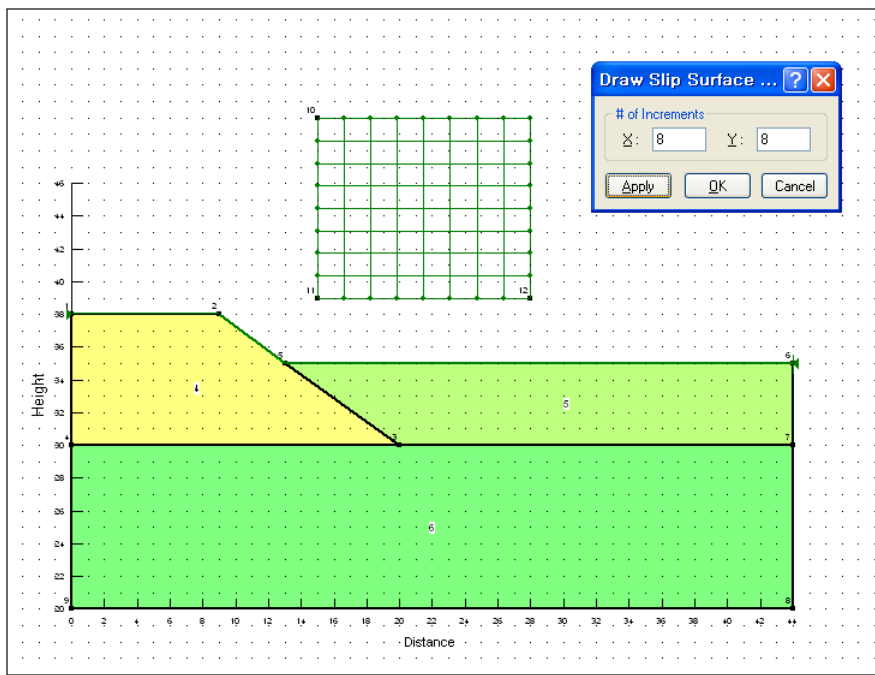


그림 7.47 Draw - Slip Surface - Grid



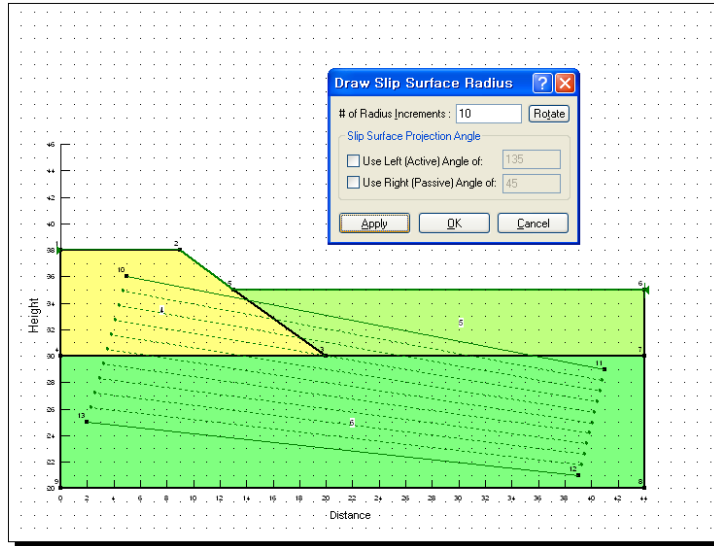


그림 7.48 Draw - Slip Surface - Radius

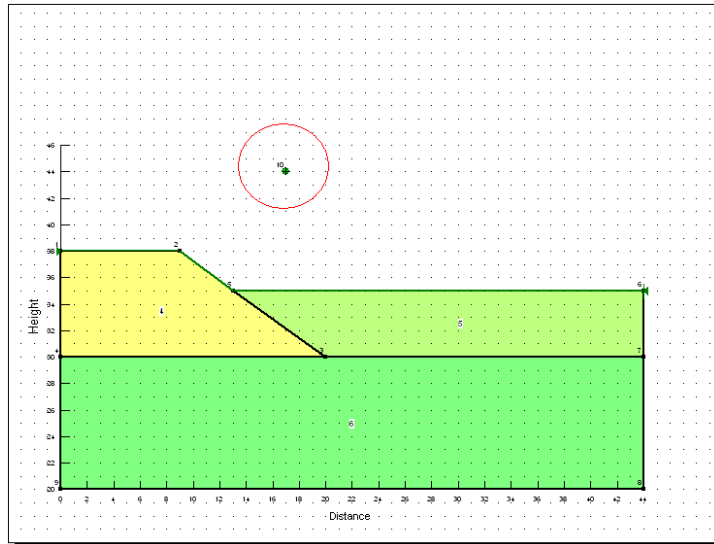


그림 7.49 Draw - Slip Surface - Axis Points

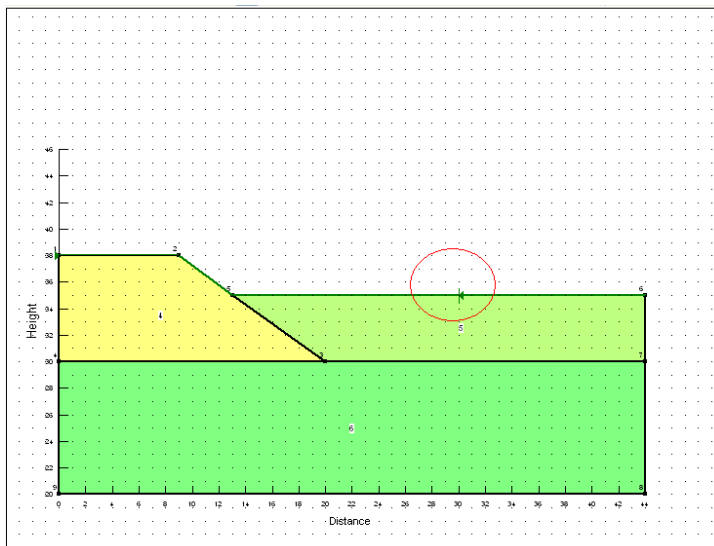


그림 7.50 Draw - Slip Surface - Limits

그림 7.50에서 보여주고 있는 Limits 기능은 탐색 활동을 할 영역을 정의해주는 것으로 Default 값으로 최상위 선분으로 자동 인식된다. 사용자가 이를 변경해줄 필요성이 있다면 이 기능을 사용해서 활동 위치를 조정해줄 수 있다. 하지만, 기본 원리상 최상위 선분 내에서만 바꿔줄 수 있음을 알고 있어야 한다.

### 7.5.4 Pore Water Pressure

지하수위를 간단하게 그려서 입력하는 항목이다. 그림 7.51은 지하수위를 입력한 상태를 보여주고 있다.

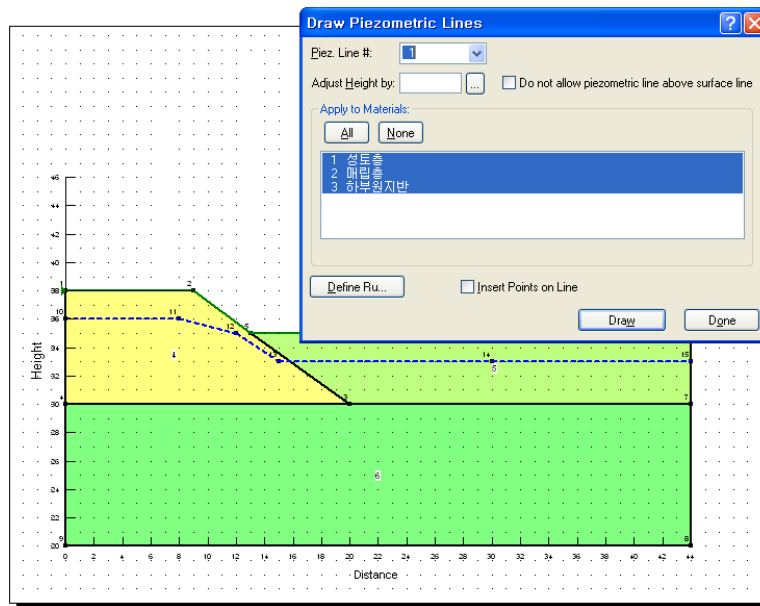


그림 7.51 Draw - Pore Water Pressure

### 7.5.5 Line Loads

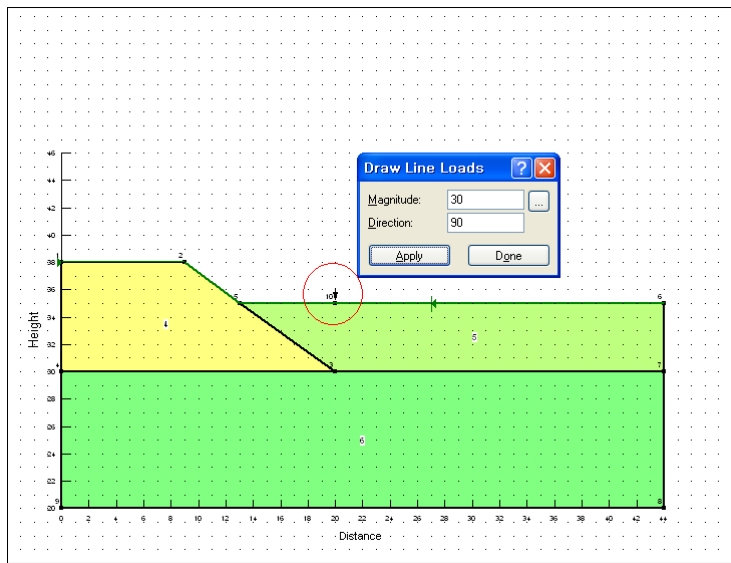


그림 7.52 Draw - Line Loads

7.5.6 Reinforcement Loads

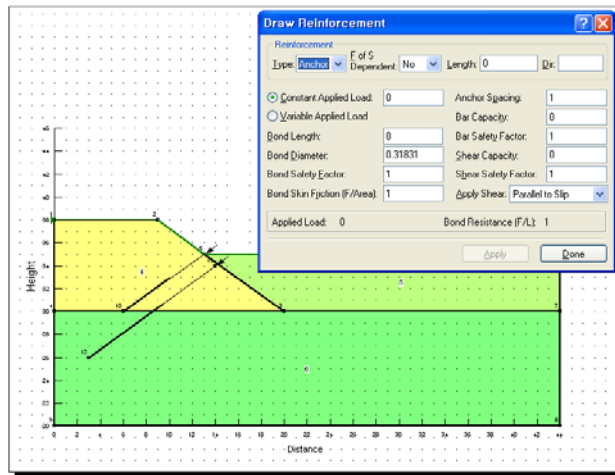


그림 7.53 Draw - Reinforcement Loads

7.5.7 Pressure Lines

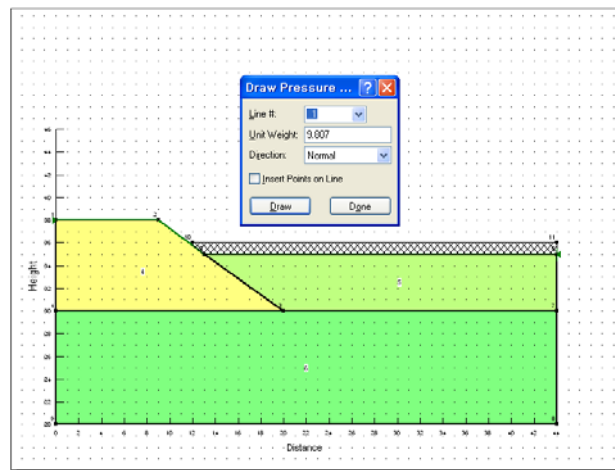


그림 7.54 Draw - Pressure Lines

7.5.7 Tension Crack Line

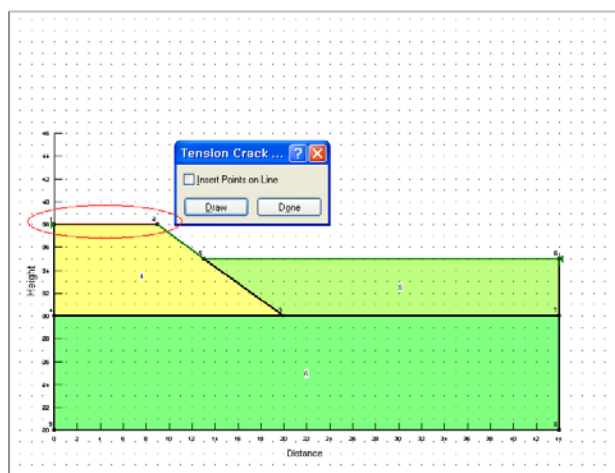


그림 7.55 Draw - Tension Crack Lines

## 7.6 Sketch 메뉴

이 항목은 해석하고는 관계없이 결과물을 꾸미기 위해서 부가적으로 사용하는 메뉴이다.

### 7.6.1 Lines, Circles, Arcs

선분, 원, 호 등을 작업 영역 내에 그릴 수 있다.

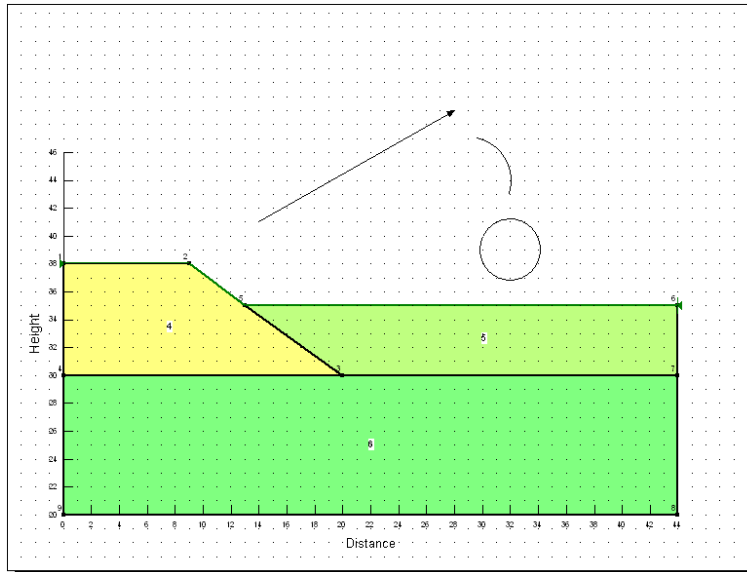


그림 7.56 Sketch - Lines, Circles, Arcs

### 7.6.2 Text

작업 영역 내에 글자를 입력해놓기 위한 메뉴이다.

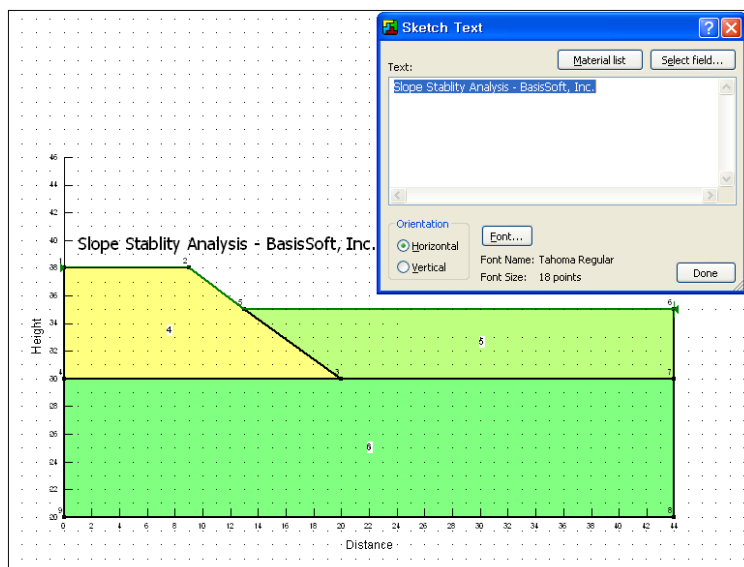


그림 7.57 Sketch - Text