

FLAC의 Interfaces Module을 이용한 퇴적암 사면의 안정성 해석에 관한 연구

A Study on Slope Stability Analysis of Sedimentary Rock using Interfaces Module of FLAC

오 대 열(Dae Youl Oh)

대구공업대학 토목환경과

정 교 철(Gyo Cheol Jeong)

안동대학교 지구환경과학과

요약 / ABSTRACT

이 연구는 활동 가능성이 높은 퇴적암 사면에 대한 안정성을 분석하기 위해 수치해석을 수행하고, 안정성을 확보할 수 있는 보강공법을 제시하기 위한 목적으로 수행되었다. 연구지역은 백악기 하양층군의 학봉 현무암층에 해당하는 지역으로 대부분이 현무암질 응회암으로 구성되어 있으며, 지질 구조 요소로는 크게 1차 구조 요소인 층리와 2차 구조요소인 절리 및 단층이 확인되었다. 층리는 단사구조를 보이는데, 대부분의 경우 경사방향이 120~160/15~25(dip direction/dip)이고, 절리의 경우에는 크게 3개 조의 절리군이 확인되는데 세트 1은 310~330/65~85, 세트 2는 230~250/70~85이며, 세트 3은 뚜렷한 연장성을 보이지는 않지만 020의 경사방향에 85°이상의 고각을 보이고 있다. 사면에 대한 안정성 해석은 운동학적 해석과 한계평형 해석을 수행한 후, 수치해석 방법으로 FLAC을 이용하였다. FLAC은 유한차분법을 이용하는 연속체 역학모델이지만, Interfaces Module을 이용하여 UDEC과 같은 불연속체 모델의 해석효과를 얻을 수 있었다.

주요어 : 암반사면 절리군, 수치해석, 연속체역학, 법선강성, 전단강성

This study was for analysing the sedimentary rock slope stability and providing the reinforcement method that can heighten stability. The study area consists of Cretaceous basalt or basaltic tuff belonging to Hak-Bong Basalt Formation in Ha-Yang Group. Nature of geological structure confirmed in this area are bedding, joint and fault. Majority of geological structure that affect most relationship rock slope stability is bedding.

It is shown that dip direction is 120~160/15~25. In other structure, joint sets are shown that dip direction of set 1 is 310~330/65~85 and set 2 is 230~250/70~85. Joint set 3 shows above 85° high angle on NE trend although do not show clear. Stability analysis about rock slope used kinematic analysis, limit equilibrium method and FLAC by numerical analysis method. FLAC is continuum model that use Fintie Defference Method, but could use Interfaces Module and get discrete model's analysis effect such as UDEC.

Key Words : Rock slope, Joint set, Numerical analysis, Continuum mechanics, Normal stiffness, Shear stiffness

서 론

암반 사면의 활동은 암반내에 존재하는 불연속면(층리, 절리, 단층, 부정합면, 습곡축면, 엽리 등)의 상태와 이들 불연속면에 의해 구분되는 암괴의 크기 및 주 활동면의 종류 등에 따라 다양한 형태로 발생될 수 있다.

즉, 암반 사면의 활동 형태는 크게 원호파괴, 평면파괴, 쉐기파괴, 전도파괴로 나눌 수 있으며, 각 파괴형태에 따른 암반 내 불연속면들의 입체투영망 분포도에 따라 파괴형태를 예상할 수 있다. 암반 내 불연속면의 분포가 분산된 형태이면 원호파괴가, 한 방향으로 집중 분포하면 평면파괴가, 두 방향으로 집중 분포하면 쉐기파괴가, 한 방향으로 집중 분포하면서 사면의 경사방향과 불연속면의 경사방향이 반대인 경우는 전도파괴가 일어날 수 있음을 추정할 수 있다.

암반사면의 안정성 분석과 관련된 문제는 그 구성 재료의 다양한 성질과 재료 내에 존재하는 간극, 불연속면 등의 불균일성 때문에 타 분야에서 볼 수 없는 복잡성을 가지고 있다. 이러한 복잡한 요인을 모두 고려한 수치해석은 극히 어려운 분야임에 틀림이 없다. 그러나, 과거에는 지반 재료의 구성법칙과 항복조건, 구조물의 기하학적인 형상과 경계조건 등을 단순히 모형화한 경우에도 지반의 역학적 특성에 대응하는 탄성, 점탄성 및 소성의 이론식을 푸는 것이 어려웠던 것에 비해, 최근에 이르러서는 컴퓨터의 발달과 수치 해석법의 개발로 과거 수 년 동안 괄목할 만한 발전을 하여왔다.

오늘날 널리 사용되고 있는 암반사면 안정성 해석기법으로는 첫째, 입체투영망을 이용하여 기하학적으로 분석하는 운동학적 해석방법이 있다. 이 방법은 대상 암반 사면의 지질조건이 균질해야 하고(동일한 암석, 동일한 입자 크기, 동일한 암석 조직, 동일한 불연속면 종류 및 불연속면의 변형-응력 반응 분포의 일정성), 특정한 구조대(단층면, 파쇄대, 취성전단대, 연성전단대, 변질대, 풍화대 및 단층각력대)에 대한 고려가 배제된 분석 방법이다.

둘째로는 한계평형법을 이용한 수치해석 기법이 있다. 이 방법은 사면 상에서 전단강도와 전단응력의 상관관계를 비교하여 안전율을 결정하는 방법이다. 즉, 전단강도가 감소하거나 전단응력이 증가할 경우 사면의 평형상태가 파괴됨으로써 사면이 활동을 시작하게 된다는 것에 착안한 해석법이다. 이 방법은 절편법을 이용하여 토사 사면의 원호형 파괴를 해석하는데(Bishop법) 주로 사용되고 있으며, 간혹 명확히 인지할 수 있는 활동면을 반드시 포함하는 비원호형 파괴를 고려하는 Janbu법을 이용하여 암반사면의 안정성 해석에 사용되기도 한다. 세번째는 경계요소법(BEM), 유한요소법(FEM) 또는 유한차분법(FDM)등 연속체 모델을 이용한 방법과 불연속체 모델을 이용한 개별요소법(DEM) 등을 이용한 수치해석적 기법이 있다.

본 연구에서는 최근 지질 및 지반공학적인 문제를 해석하기 위해 널리 사용되고 있는 해석 프로그램인 FLAC을 이용하여 해석을 시도하였다. 그러나, 잘 알려진 바와 같이 FLAC은 연속체 모



Fig. 1. A view of the study area.

델을 이용하는 유한차분법 해석 프로그램이다. 따라서, 층리가 발달하는 퇴적암류에서는 그 적용에 제한이 따를 수밖에 없다. 따라서, FLAC 프로그램에 내장된 Interfaces Module을 이용하여 불연속체 모델과 유사한 거동을 유도할 수 있는 해석을 수행하여 보았다.

아울러, 전술한 세 가지 해석법을 모두 이용한 결과를 비교하고, 본 연구지역 암반사면의 안정성을 증진 시킬 수 있는 적절한 보강방법을 제시하고자 한다.

지질 및 실내시험 결과

본 연구 지역은 대구시 북구 침산동 산 15-1번지 오봉산 공원일대로서 중생대 백악기의 하양층군 중 학봉 현무암층의 표식지인 학봉에서 남서측으로 5km 정도 떨어진 지역에 해당되며, 개괄적인 층서는 다음의 Table 1과 같다.

학봉 현무암층은 대부분이 현무암, 현무암질 응회암 및 각력응회암으로 구성되어 있는데, 본 연구지역에는 현무암질 응회암이 주로 분포하고 있다.

본 지역에서 확인되는 지질 구조요소는 크게 1차 구조 요소인 층리와 2차 구조요소인 절리 및 단층이 확인되었다. 층리는 단사구조를 보이고 있는데 경사방향(Dip direction)은 대부분이 120~160/15~25의 분포를 보이고 있으며, 절리의 경우

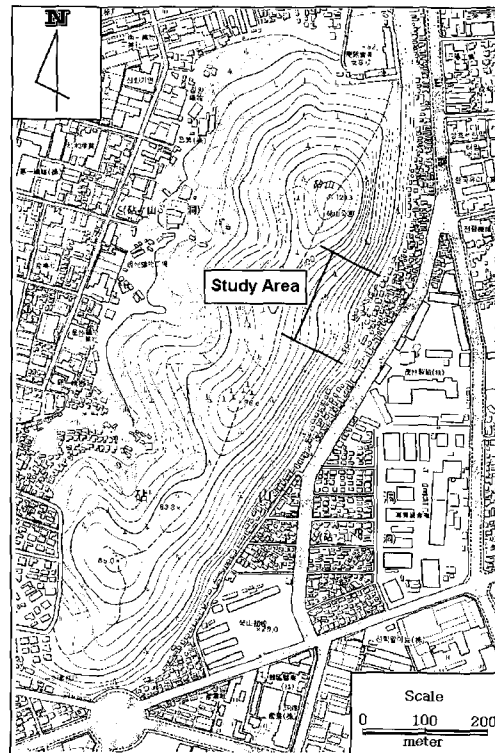


Fig. 2. Location map of the study area.

크게 3개 조의 절리군이 확인되는데 세트 1은 310~330/65~85, 세트 2는 230~250/ 70~85의 방향성을 보이며, 세트 3은 뚜렷한 연장성을 보이지는 않지만 020의 경사방향에 85°이상의 고각을 보이고 있다.

Table 1. Stratigraphic unit of the study area. (장기홍, 1977)

Quaternary	Alluvium		
	~ Unconformity ~		
	Bulguksa Intrusions		
	~ Intrusions ~		
	Yuchon Group		
	~ Intrusions ~		
	Hanyaung	Chindong Fm.	
		Haman Fm.	
		Hakbong Fm. (Basalt, Tuff, Agglomerate)	
		Shilla Conglomerate Fm.	
Chilgok Fm.			
Gr.	Shindong Group		

현장에서 시추를 통해 채취한 코어에 대해 실내 역학시험을 수행한 결과는 다음의 Table 2 및 Table 3과 같다.

Table 2. Properties of the rock specimen

No.	Unit Weight kg/cm ³	Porosity (%)	Seismic Velocity m/sec		Uniaxial comp. strength kgf/cm ²	Elastic modulus × 10 ⁵ kgf/cm ²	Poisson's ratio
			P	S			
1	2.67	0.95	5110	2890	910	2.47	0.20
2	2.60	2.06	4430	2560	910	6.22	0.17

Table 3. Results of triaxial compression tests and Brazilian test.

No.	단위 kgf/cm ²				Internal Fric. Ang. (°)
	Max. Strength	Conf. Press.	Coh.	Tensile Strength	
1	1500	50			55
2	2000	100	150	110	
3	2500	150			

입체투영망을 이용한 안정성 분석

본 연구지역에 대한 입체투영망 분석 결과는 다

음 Fig. 3과 같으며, 그 결과에 따르면 평면파괴 또는 전도파괴 가능성이 잠재되어 있는 것으로 확인되었다.

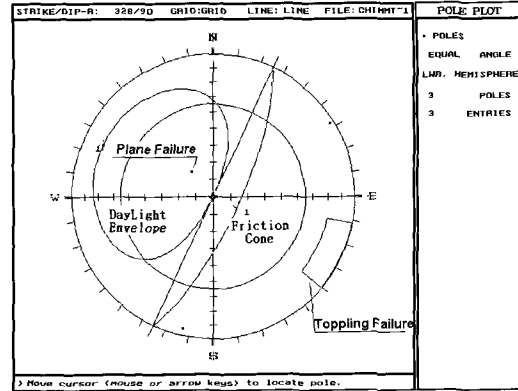


Fig. 3. Results of the kinematic analysis

한계평형법을 이용한 안정성 분석

한계평형 해석을 위해서는 STABL5M을 이용하였으며, 파괴 가능면 추적(trial failure searching)기법을 적용함에 있어서는 기반암의 내부마찰각을 고려하여 파괴구간을 설정하고 Bishop의 파괴 모형을 적용하여 해석을 실시하였다.

해석에 적용한 물성치는 전술한 Table 2와 Table 4의 암석 물성을 기초로 하였다. 그러나, 본 프로그램이 대부분 토사 사면에 적용되는 특성을 고려하여 절리면이 발달한 암반의 경우에는 절리면(interface boundary)의 연약특성을 고려하여 수정된 물성치를 적용하였다. 즉, 절리를 포함한 암반의 경우 점착력은 0.5kgf/cm², 내부마찰각은 20°를 적용하였다.

해석에서는 100개의 가상 파괴면을 추적하였으며, 그 결과 최소 안전율을 나타내는 10개의 안전율을 구하였다. 결과적으로 지하수로 포화된 상태에서 자연사면의 최소 안전율은 0.969에서 1.051로 확인되었다(Fig. 4).

아울러, 지하수로 포화된 자연사면에 대해 록볼트(rock bolt)를 보강한 이후에 안전율의 변화를 확인하기 위해 역시 100개의 가상 파괴면을 추적하였다. 그 결과 최소 안전율을 나타내는 10개의 안전율을 구하였다. 결과적으로 지하수로 포화된

FLAC의 Interfaces Module을 이용한 퇴적암 사면의 안정성 해석에 관한 연구

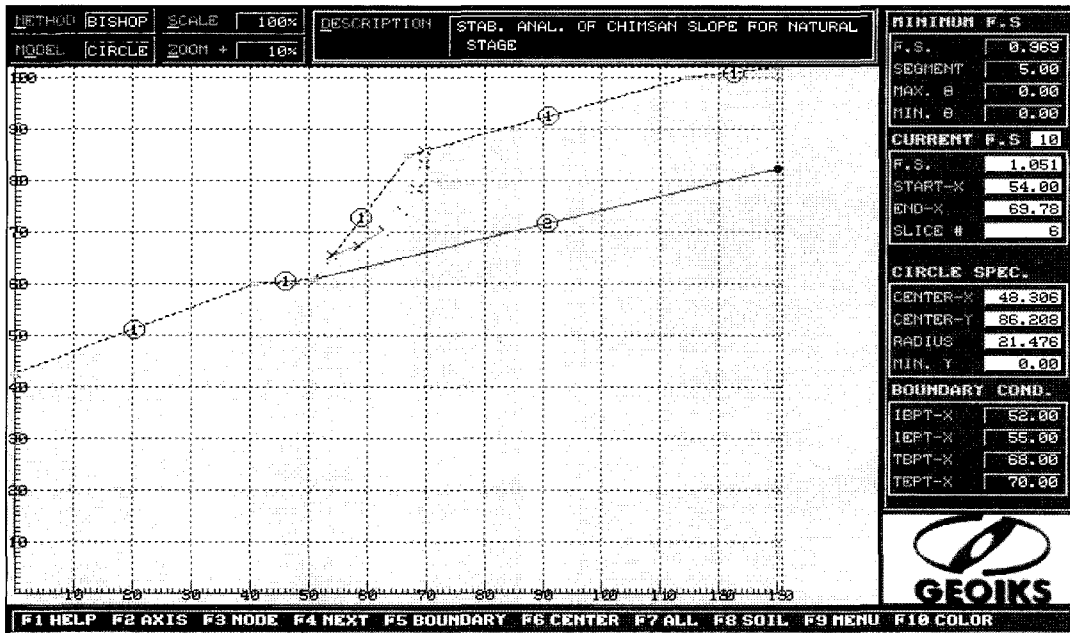


Fig. 4. The minimum factor of safety is assumed about 1.0 with high water level during heavy raining.

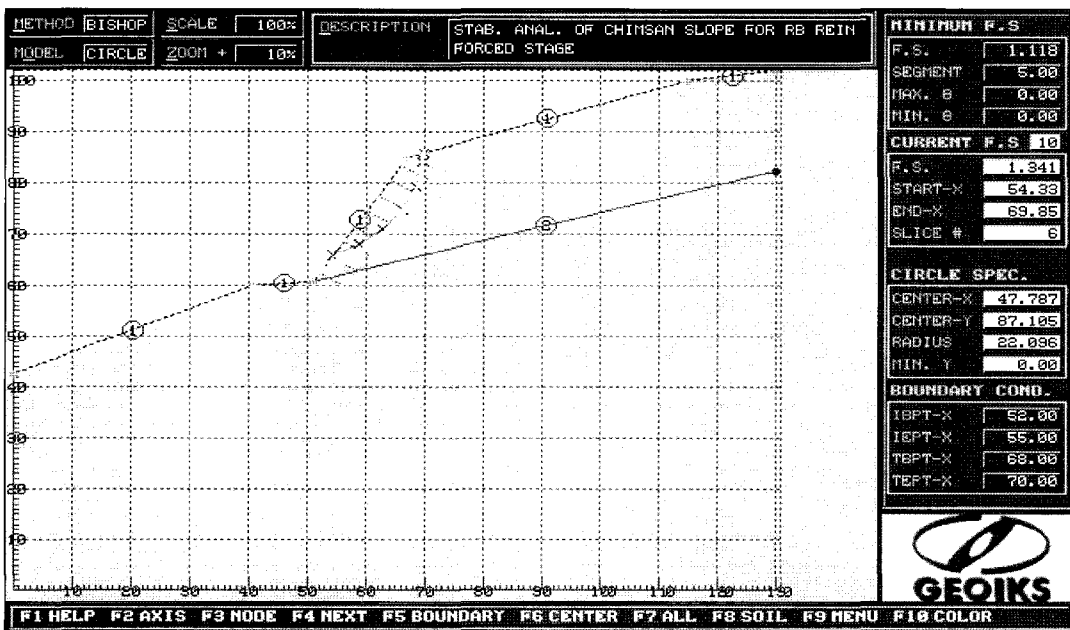


Fig. 5. The minimum factor of safety is assumed as more than 1.2 with high water level after rock bolt reinforcement.

상태에서 자연사면의 최소 안전율은 1.118에서 1.341로 현저히 증가되는 것으로 확인되었다(Fig. 5).

FLAC의 Interfaces Module를 이용한 안정성 분석

FLAC은 수치해석 기법으로는 유한차분법(Finite Difference Method)을 사용한다. 이 프로그램은 2차원의 연속체 공간을 유한차분망(Finite Difference Mesh)으로 분할하고, 각 요소의 절점에서 불균형력에 의한 뉴턴(Newton)의 운동방정식을 세워 해(속도, 변위)를 구하고, 구해진 해를 사용하여 변위율(strain rate)을 계산하며, 사용 모델의 구성방정식에 변위율을 적용하여 응력 증분량을 구해 각 절점에 해당되는 불균형력이 영(0)에 근접하도록 반복하여 해를 구한다.

잘 알려진 바와 같이 FLAC은 연속체 해석모델이므로, 퇴적암과 같은 불연속면이 많이 발달하고 있는 이방성 암석의 해석에는 많은 주의가 필요하다.

그러나, FLAC 프로그램에는 이방성 암석의 해석에 사용되는 개별요소법과 같은 효과를 발생시킬 수 있는 Interfaces Module을 내장하고 있어 이를 활용한 해석을 수행하였다.

Interfaces Module

Kulhawy(1975), Rosso(1976) 혹은 Bandis et al.(1983) 등의 연구 자료를 종합하면, 절리 또는 단층의 법선강성(k_n , normal stiffness) 및 전단강성(k_s , shear stiffness)은 다음의 식으로 표현된다.

$$\frac{1}{E} = \frac{1}{E_r} + \frac{1}{k_n \cdot s} \quad \text{또는}$$

$$k_n = \frac{E \cdot E_r}{s \cdot (E_r - E)}$$

또한,

$$k_s = \frac{G \cdot G_r}{s \cdot (G_r - G)}$$

(1)

이때, E:암반의 변형계수, E_r :intact rock의 탄성계수, G:암반의 전단변형계수, G_r :intact rock의 전단탄성 계수, s:불연속면 간격(spacing) 이다.

또한, 실내시험을 통해 암석으로부터 산출된 탄성계수, 전단 탄성계수 및 체적 탄성계수를 근거로 하여 현지 암반에 대한 변형계수(전단 및 체적 변형계수 포함)를 구할 수 있다.

실험실에서 측정된 결과를 이용하여 원위치 값을 추정하는 데에는 여러 가지 상관관계가 이용될 수 있다. 예를 들면 RQD와 변형계수 감소비(E/E_r)의 상관관계를 이용하기도 한다. 여기서 E는 원위치암반의 변형계수이며, E_r 은 작은 무결함 암석을 이용하여 실험실에서 측정된 탄성계수이다.

암반의 변형계수 측정에 있어서의 치수효과(scale effect)에 대한 최근의 연구결과(Heuze, 1980)에 따르면, 실험실에서 측정된 변형계수는 원위치 변형계수보다 평균적으로 2.5배정도 높다는 사실이 밝혀졌다. 특히, 대부분의 원위치 변형계수 측정치는 실험실 측정치의 0.2 ~ 0.6배 정도이다. 그러나 이 수치들은 암질에 따라 변화한다.

Herget & Unrug(1974)와 Kendorski(1975)는 실험실 값을 이용하여 광주 및 운반강도와 같은 광산구조물의 현장치를 추정하는 문제를 연구하였으며, Kendorski(1980)는 터널설계를 위한 암반강도 산정법을 연구하였다. 또한, Bieniawski(1967)는 현장 탄주의 강도를 추정하기 위해 석탄에 대한 실험실 자료를 현장 값으로 환산하는 방법을 연구하였다.

수치해석적 모델링 또는 모형실험 방법이 측정 결과를 현장조건으로 환산시키는 중요한 접근방법이라는 것에 주목하여야 한다. 실제로 컴퓨터를 이용한 정교한 계산기법의 발달에 따라 수치해석 모델링이 이러한 목적에 광범위하게 사용되고 있다.

변형계수 자료

Deer(1967)등은 코어암질 지수(RQD) 또는 속도 지수(V_F/V_L)²를 이용하여 암반의 변형계수

를 추정하는 방법을 제안하였다. Coon & Merritt(1970)에 의하면 RQD와 변형계수 감소비 (E/Er)는 상관계수 0.544의 상관성을 보이거나 속도 지수의 경우에는 상관계수가 0.368로 낮게 나타난다고 밝히고 있다. 그러나 변형계수 감소비와의 상관관계 분석에 사용된 RQD 자료는 비록 3개의 다른 프로젝트에서 구한 소량의 자료가 포함되어 있기는 하지만, 주로 Dworshak 댐 프로젝트에서 양호한 암반에 대한 측정된 결과이다.

Kulhawy(1978)는 불연속면의 존재에 의해 암반의 역학적 성질이 감소되는 수정 RQD모형을 제안하였으며, 변형계수 감소비와 RQD의 상관성을 불연속면의 성질(강성)에 대한 함수로 설정하여 상관성을 높였다. Dershowitz 등(1979)은 현재 사용되는 경험적 상관관계 및 해석모형을 고찰하여 RQD가 통계적 관점에서, 특히 암질이 나쁜 경우, 암반의 변형계수를 기술하는데 충분하다는 것을 보였다. 이 연구에서 절리간격 및 방향성에 대한 RQD의 상관관계를 제안한 Priest & Hudson(1976)의 연구결과가 이용되었다.

Bieniawski(1978)는 암질이 좋은 암반에서 RMR과 현장 변형계수와의 사이에 상관계수 0.961의 높은 상관성이 있음을 발견하였다. 또한 Grimstad & Barton(1993)은 현장 변형계수와 Q 값 사이에 상관관계를 제안하였다(Fig. 6).

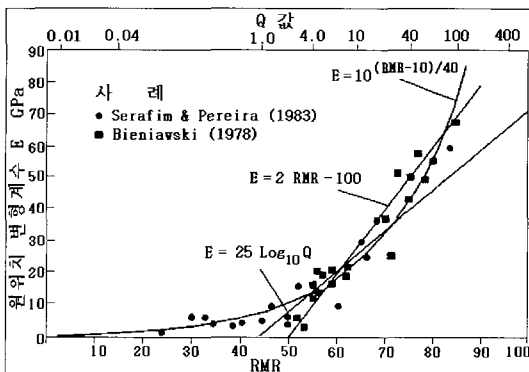


Fig. 6. Estimating Graph of Deformation Modulus using by Rock Mass Rating(By Grimstad & Barton, 1993).

RMR 방법에는 실험실 시험 자료를 이용하지

않는다. 따라서 실험실 시험 결과 자체의 분산이 변형계수 감소비에 미치는 영향을 배제한다는 장점이 있다. 최근에는 Serafim & Pereira (1983)에 의해 RQD와 RMR과의 상관관계가 연구되었으며, RMR < 50인 암반에 대해 여러 결과들이 제시되었다.

해석을 위한 지반물성 입력치

이상에서 살펴본 바와 같이 원위치 암반의 변형계수는 실내암석 실험을 통한 암석 탄성계수의 15~50% 내외의 값을 보이고 있다는 것을 알 수 있으므로, 본 해석에서는 변형계수를 탄성계수의 50%로 추정하고 안정성 분석을 수행하였다.

따라서, 상기한 식을 토대로 절리면의 법선강성과 전단강성을 추정한 값은 각각 6.099×10^7 KPa/m 와 2.606×10^7 KPa/m로 계산되었다.

또한, 전술한 Table 2와 Table 3의 자료를 바탕으로 하여 FLAC 해석에 적용한 지반물성치는 다음의 Table 4와 같다.

Table 4. Input properties for FLAC analysis

Elastic Modulus (Er, KPa)	Def. Modulus (E, KPa)	Shear Modulus (Gr, KPa)	Sh. Mod. of Rockmass (G, KPa)	Uniaxial Comp. Strength (σ_c , KPa)
6.099×10^7	3.050×10^7	2.606×10^7	1.303×10^7	8.920×10^4
Bulk Modulus (Kr, KPa)	Bulk Mod. of Rockmass (K, KPa)	Poisson's ratio (ν)	Cohesion (KPa)	
2.449×10^7	1.225×10^7	0.17	1.470×10^4	

해석 조건

전술한 바와 같이 해석 대상사면은 대부분의 경우 평면파괴 가능성이 매우 높게 확인되었다. 즉, 이는 대부분의 수치해석에서 사용되는 모어-쿨롱(Mohr-Coulomb)의 파괴조건식 만으로 연속체 모델을 이용하여 본 사면의 안정성 해석을 수행하는데 제약이 있음을 시사하는 결과가 되었다.

따라서, 본 연구를 수행하기 위해서 UDEC(불

연속체 수치해석)프로그램에서 사용하는 불연속체 모델을 차용하여 FLAC 프로그램이 제공하는 Interface Module을 활용하였다.

즉, 현장에서 뚜렷이 확인되는 층리면(대부분의 경사방향이 120~160/15~25)을 해석 대상사면

에 적용하여 망생성 작업(mesh generation)을 수행하고, 이 Interface Module과 접촉하는 망 경계에는 적절한 입력 물성치를 적용하여 해석을 수행하였다(Table 4).

해석단면의 경계조건은 다음 Fig. 6과 같다.

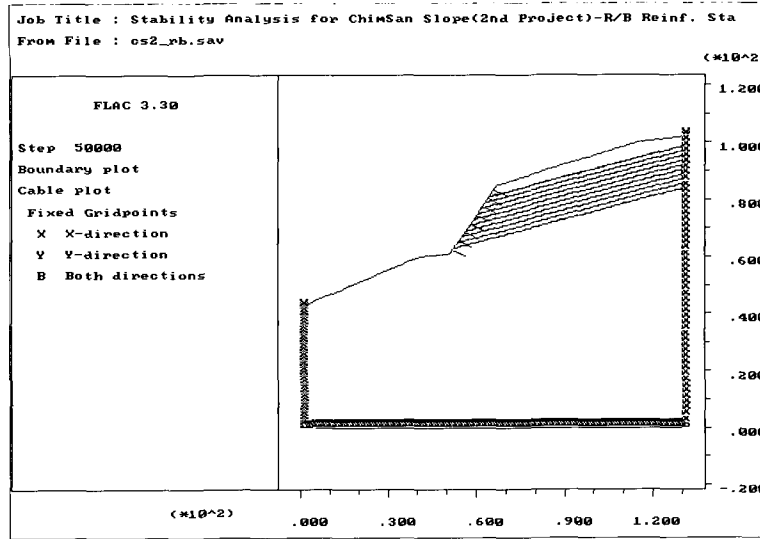


Fig. 7. Boundary condition and support system for analysis

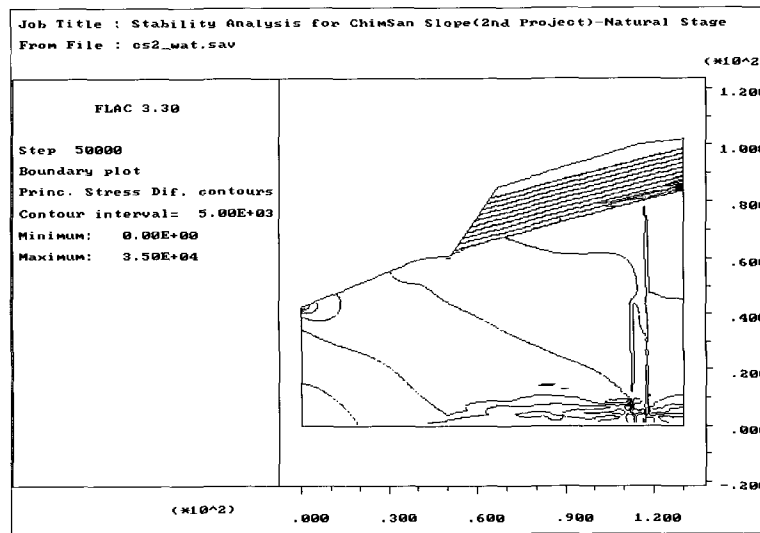


Fig. 8. Differential stresses under saturated condition.

이상과 같은 경계조건 및 물성을 적용하여 현재 상태와 같은 자연사면을 설정하고 홍수 또는 집중호우에 의한 지하수위의 상승을 가정하여 수치 해석을 수행하였다. 수치해석 결과 불평형력은 50000 step에서 수렴되었다.

연사면에 대한 해석결과

FLAC를 이용한 수치해석 결과 자연상태의 사면에서 예상되는 최대 변위량은 73.07mm로 계산되었다. 자연사면에 대한 해석결과 자료는 다음의 Fig. 8 ~ Fig. 12와 같다.

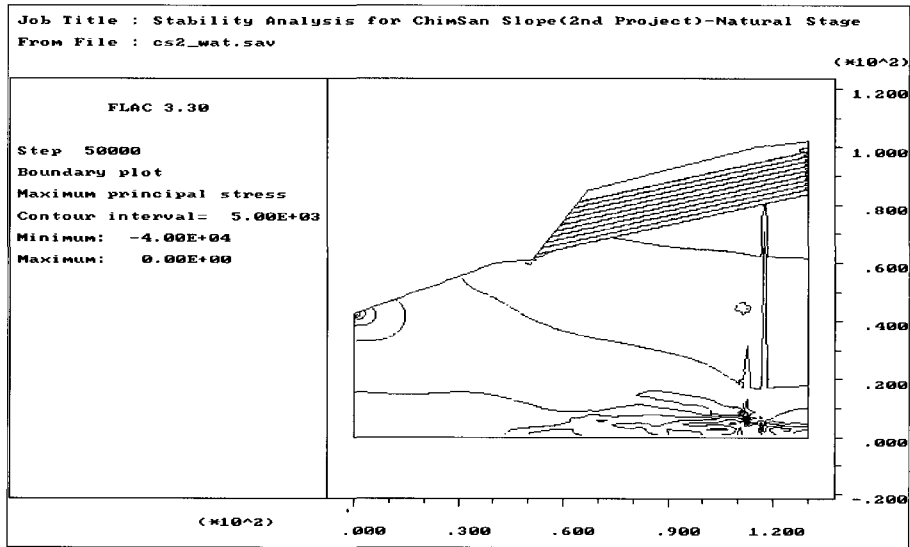


Fig. 9. Maximum Principal stresses under saturated condition.

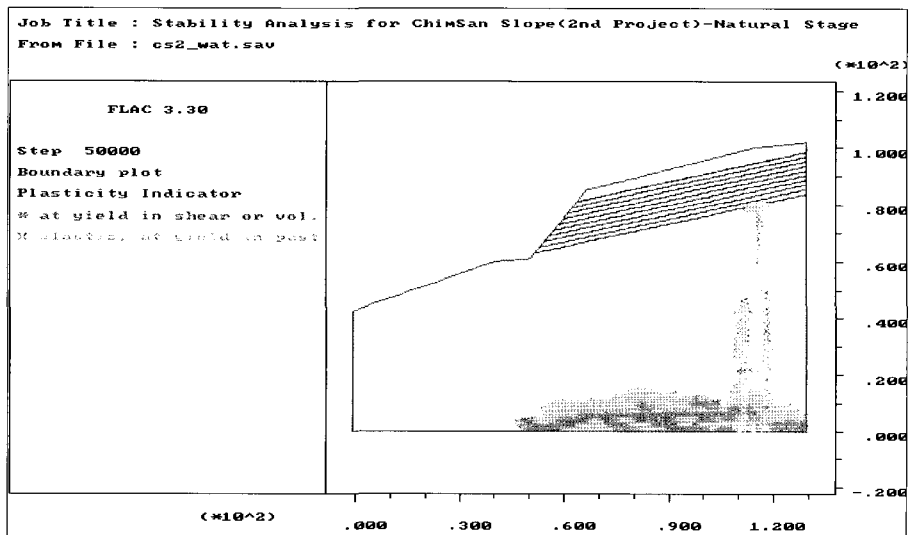


Fig. 10. Plasticity indicator under saturated condition.

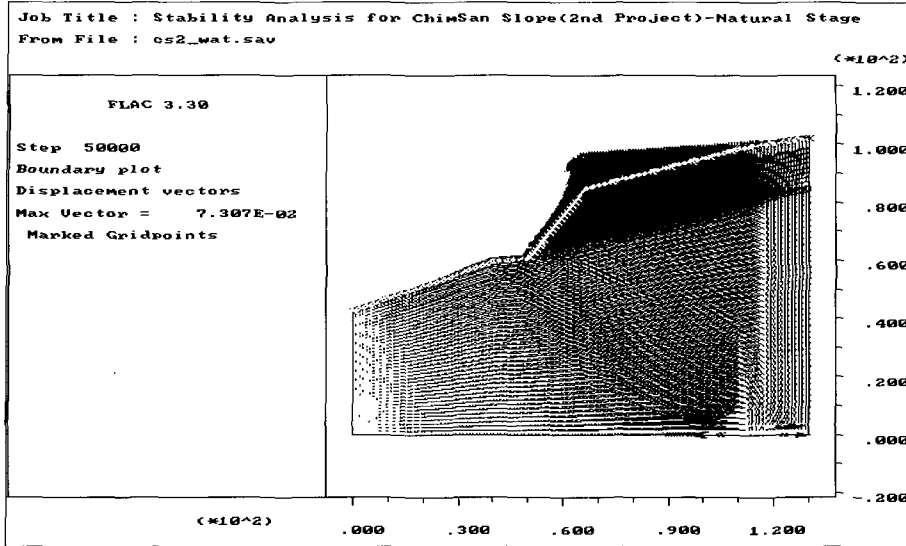


Fig. 11. Displacement vectors under saturated condition.

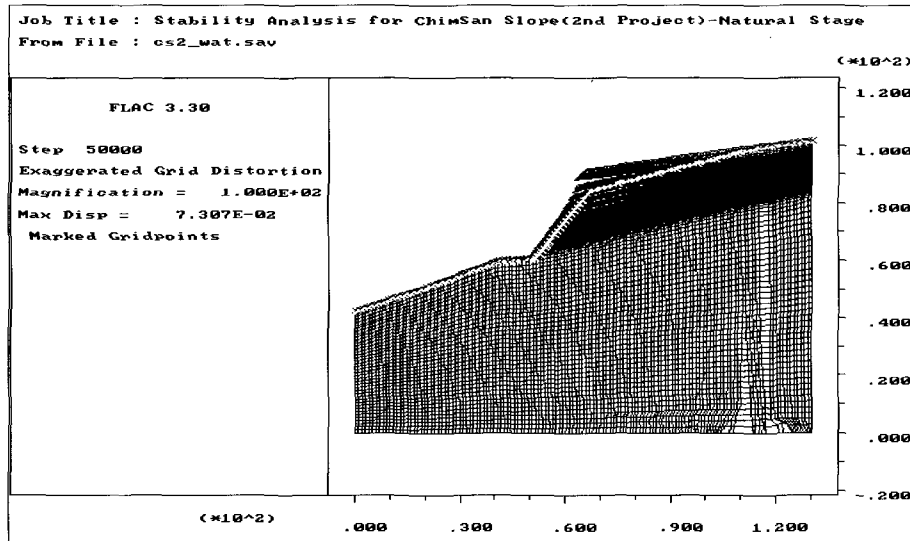


Fig. 12. Deformational schema under saturated condition

Rock Bolt 보강사면에 대한 해석결과

록볼트를 이용한 사면 보강효과를 검증하기 위해 FLAC의 케이블 요소(Cable Element)를 이용하여 수치해석을 수행하였다.

이때, 록볼트는 HD 25(SD 40)으로 상-하 및 좌-우의 C.T.C를 각각 3m, 철근의 근입장을 5m로 설정하였다. 따라서, 이 케이블 요소의 물성치는 탄성계수 2.06×10^8 KPa, 단면적 4.908×10^{-4} , K-bond 1.5×10^7 KPa/m, s-bond 1.0×10^6 KPa/m으로

FLAC의 Interfaces Module을 이용한 퇴적암 사면의 안정성 해석에 관한 연구

로 입력되었다.

이상과 같은 해석 결과, 최대 변위량은 59.43 mm로 자연상태의 사면에서 발생할 수 있는 변위량의 약 20%를 억제하는 효과를 나타내었고, 록볼트에 작용하는 최대 축력(인장응력)은 100 KN(10.2 tonf)으로 확인되었다. 즉, SD 40 이형철근의 최대 인장강도 20 톤의 50%에 불과한 값을 나타내었다.

따라서, 이상의 본 연구지역의 사면에 대한 록볼트 보강법은 변위를 억제하고 안전율 증가시킬 수 있는 적절한 공법으로 판단되었다.

록볼트로 보강한 후의 사면에 대한 안정해석결과는 다음의 Fig 13 ~ Fig. 18과 같으며, 사면부분만을 확대하여 해석망(mesh)의 변형성을 비교한 그림은 Fig. 18 및 Fig. 19와 같다.

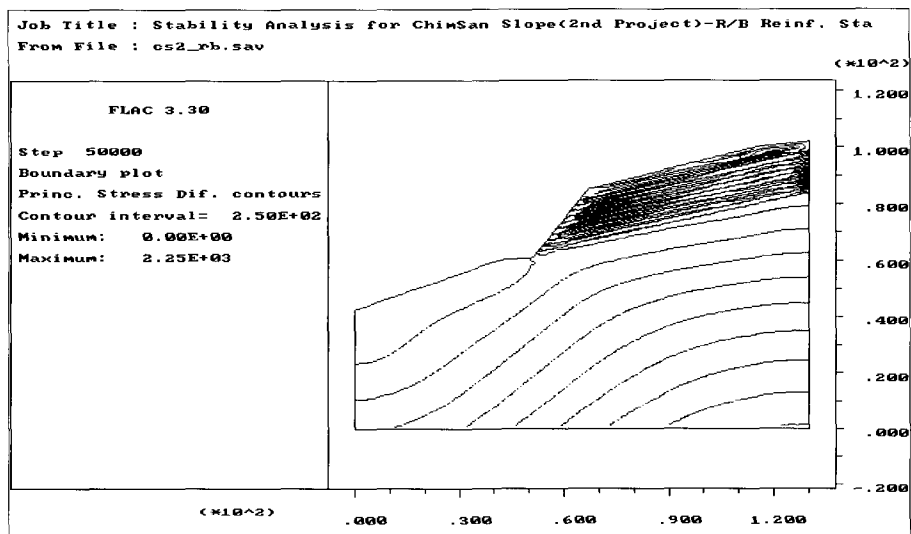


Fig. 13. Differential stresses after rock bolt reinforcement condition.

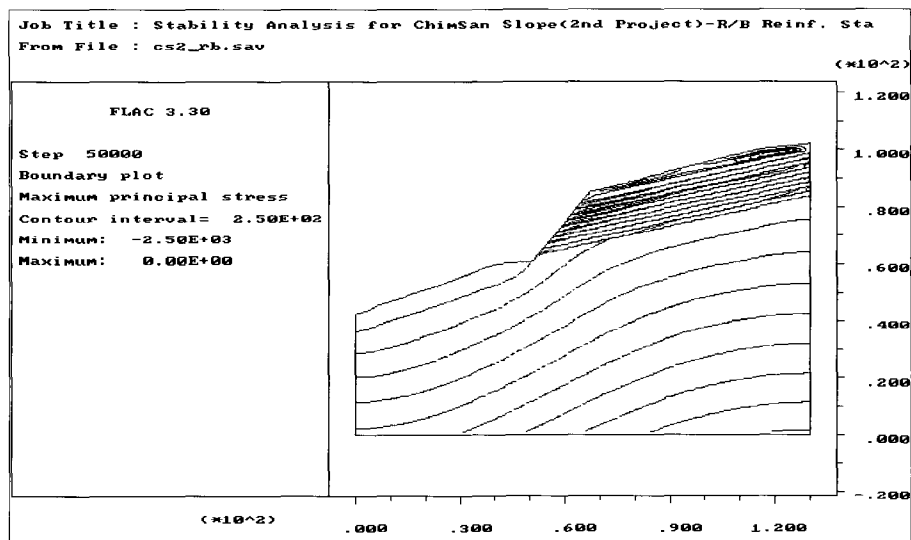


Fig. 14. Maximum Principal stresses after rock bolt reinforcement condition.

오대열, 정교철

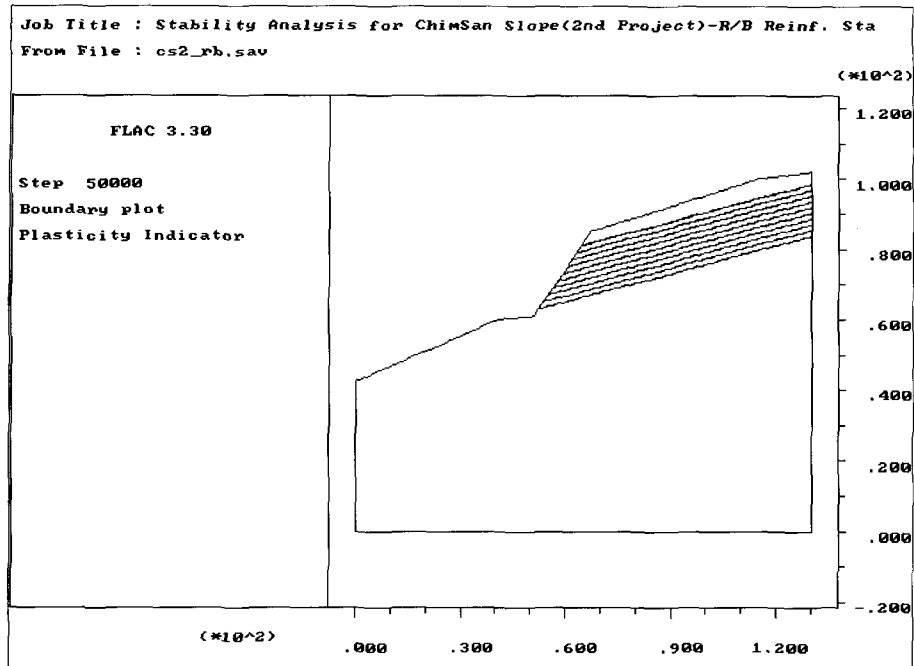


Fig. 15. Plasticity indicator after rock bolt reinforcement condition.

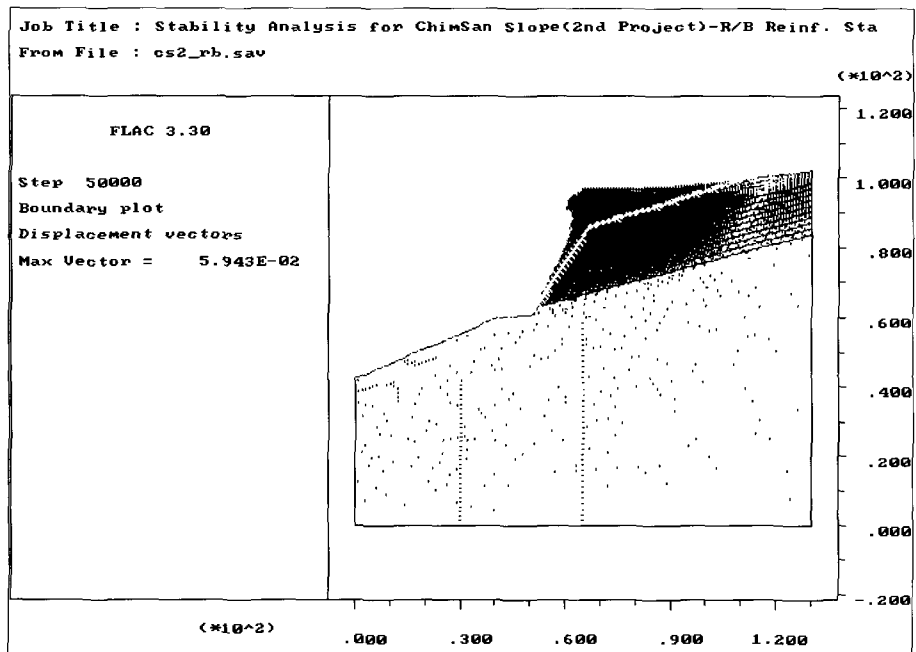


Fig. 16. Displacement vectors after rock bolt reinforcement condition.

FLAC의 Interfaces Module을 이용한 퇴적암 사면의 안정성 해석에 관한 연구

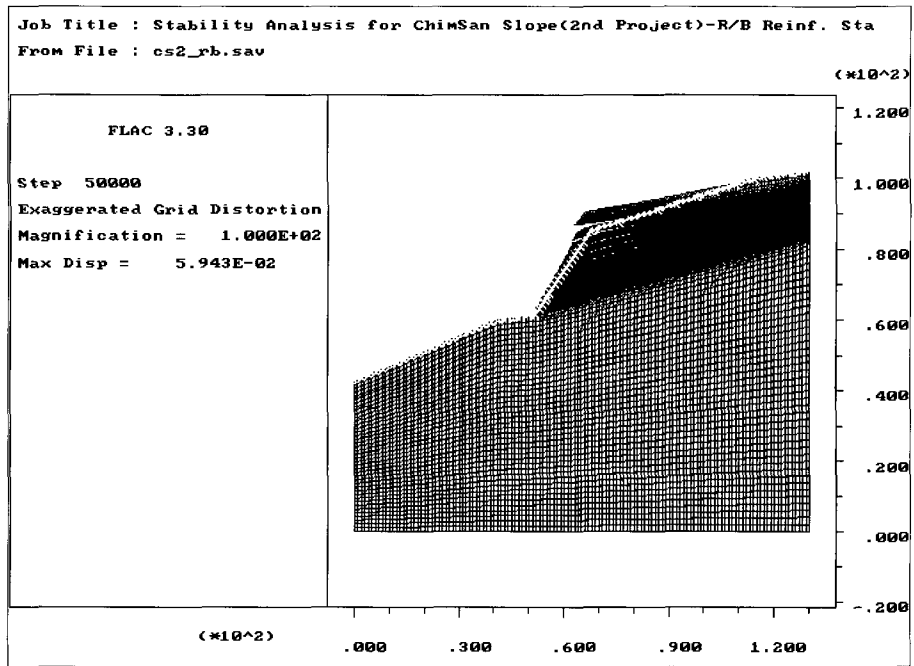


Fig. 17. Deformational schema after rock bolt reinforcement condition.

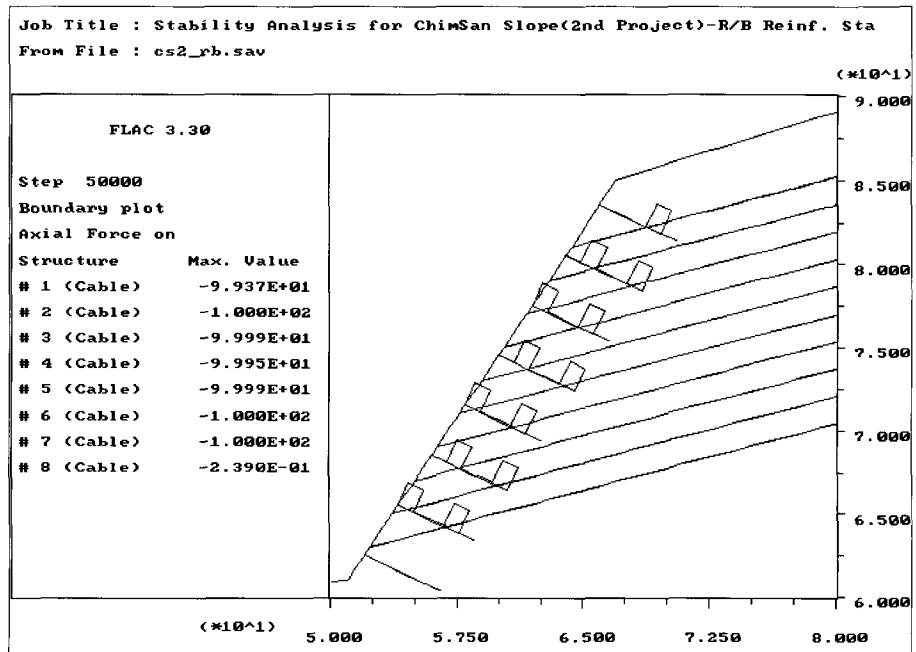


Fig. 18. Axial force diagram of rock bolt

결 언

이 연구에서는 활동 가능성이 높은 퇴적암 사면에 대하여 수치해석을 통한 사면의 안정성을 분석하고, 주위경관과 조화를 이루면서도 안정성을 높일 수 있는 보강공법을 제시하기 위한 목적으로 수행되었다.

연구지역은 중생대 백악기의 하양층군 중 학봉 현무암층에 해당되는 지역으로 대부분이 현무암, 현무암질 응회암 및 각력응회암으로 구성되어 있다. 본 지역에서 확인되는 지질 구조요소는 층리와 절리가 있으며, 층리의 경사방향(Dip Direction)은 120~160/15~25, 절리의 경우에는 세트 1이 310~330/65~85, 세트 2는 230~250/70~85의 방향성을 보이고, 세트 3은 뚜렷한 연장성 없이 20°의 경사방향에 85°이상의 고각을 보이고 있다.

사면 안정성 해석을 위해서는 운동학적 해석을 통해 평면파괴 및 전도파괴의 가능성을 확인하였으며, 한계평형 해석 결과 지하수로 완전히 포화된 상태에서 자연사면의 최소 안전율은 0.969에서 1.051로 확인되었다. 이 사면에 대해 록볼트를

보강한 이후에는 최소 안전율이 1.118에서 1.341로 현저히 증가되는 것으로 확인되었다

수치해석에는 FLAC의 Interfaces Module을 이용하여 절리면을 따른 변위 발생을 확인함으로써 UDEC에서와 같은 불연속체 모델의 해석효과를 얻을 수 있었다. 그 결과 지하수로 포화된 자연상태의 사면에서 예상되는 최대 변위량은 73.07mm로 계산되었으며, 록볼트로 보강한 이후에는 최대 변위량이 59.43mm로 계산되어 자연상태 사면에서 발생할 수 있는 변위량의 약 20%를 억제하는 효과를 나타내었고, 록볼트에 작용하는 최대 축력은 100 KN(10.2 tonf)으로 확인되었다. 즉, 한계평형 해석과 유한차분 해석의 결과가 유사한 경향을 보이는 것으로 확인되었다.

따라서, 본 연구지역의 퇴적암 사면에서는 록볼트를 이용한 억지공법이 유효한 것으로 해석되었으며, 안정성 제고를 위해 배수공을 추가한다면 보다 좋은 보강효과를 얻을 것으로 판단되었다. 향후 과제로는 본 연구결과와 UDEC 또는 개별요소법을 이용한 또 다른 프로그램과의 비교연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

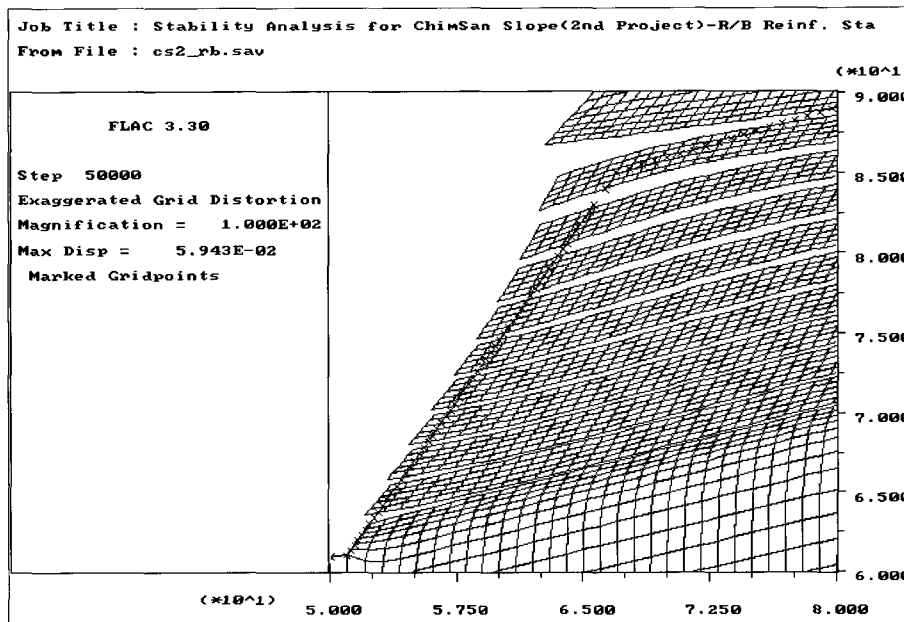


Fig. 19. Enlarged deformational schema after rock bolt reinforcement. (Mag. × 50)

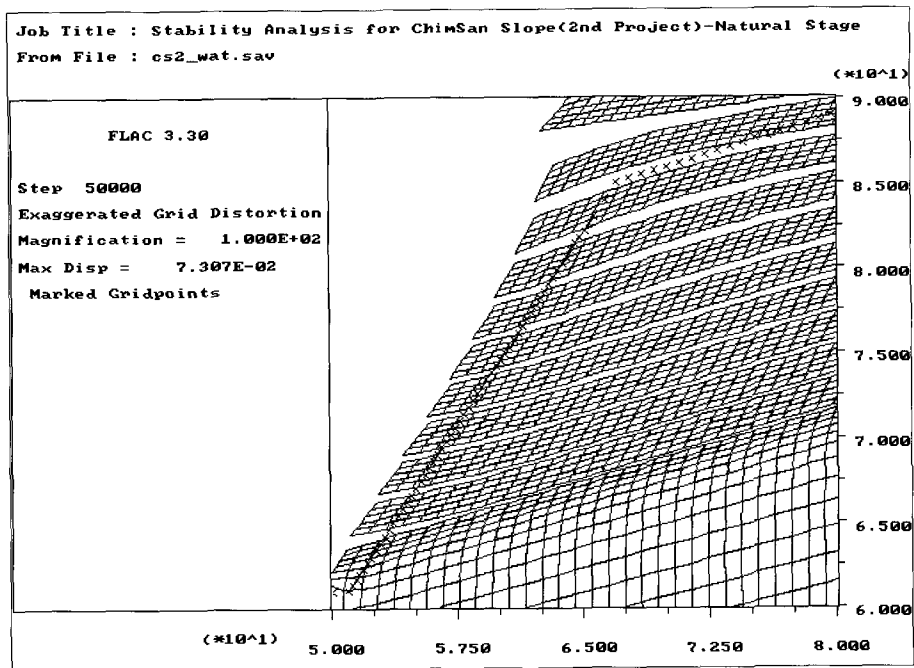


Fig. 20. Enlarged deformational schema of slope zone under saturated condition.(Mag. $\times 50$)

참 고 문 헌

- 장기홍, 1977, 경상분지 상부 중생계의 층서, 퇴적 및 지구조, 지질학회지, 13권, 76-90.
- Bandis, S.C., Lumsden, A.C., and Barton, N.R., 1983, Fundamentals of Rock Joint Deformation, Int. J. of Rock. Mech. Min. Sci. & Geochem., Abstr., v. 20, n. 6, 249-268.
- Bieniawski, Z.T., 1967, Mechanics of brittle fracture of rock, Int. Jr. Rock Mech. and Min. Sci., v. 4, 395-435.
- Bieniawski, Z.T., 1978, Determining rock mass deformability, Experience from case histories, Int. Jr. Rock Mech. and Min. Sci. & Geochem., Abstr., v. 15, 237-247.
- Dershowitz, W., G. Baecher, and H. Einstein, 1979, Prediction of rock mass deformability, Proc. 4th Cong. Int. Soc. for Rock Mech., v. 1, 605-611.
- Grimstad, E., Barton, N., 1993, Updating of the Q-system for NMT, Int. Symp. on Sprayed Concrete - Modern use of wet mix sprayed concrete for underground support, Fargernes.
- Herget, G., Unrug, K., 1974, In situ strength prediction of mine pillars based on laboratory tests, Advances Rock Mech. (Proc. 3rd Cong. of the Int. Soc. for Rock Mech.), v. IIA, 150-155.
- Kendorski, F.S., 1980, Field and laboratory assesment of rock mass strength for tunnel design with allowance for dilation. Underground Rock Engr.(Proc. 13th Canadian Rock Mech Symp.), 162-167.
- Kulhawy, F.H., 1975, Stress deformation properties of rock and rock discontinuities, Eng. Geol., v. 9, 327-350, Div. ASCE, v. 4(GT2), 211-227.

Kulhawy, F.H., 1978, Geomechanical model for rock foundation settlement, J. Geotech. Engr.
Priest, S.D. and Hudson, J.A., 1976, Discontinuity spacings in rock, Int. Jr. Rock Mech. and Min. Sci., v. 13, 135-148.
Rosso, R.S., 1976, A comparison of joint stiffness measurements in direct shear, triaxial compression and In Situ, Int. J. of Rock. Mech. Min. Sci. & Geochem., Abstr. v. 13, 167-172.
Serafim, J.L. and Pereira, J.P., 1983, Consideration of geomechanics classification of Bieniawski, Int. symp. Eng. Geol. Underground Constr., LNEC, v. 1, II.33-II.42.

투 고 일	2002년 7월 12일
심 사 일	2002년 7월 13일
심사완료일	2002년 8월 24일

오대열

대구공업대학 토목환경과
704-721 대구광역시 달서구 본동 831
Tel: 053-560-3870
Fax: 053-560-3874
e-mail: ds1cye@korea.com

정교철

안동대학교 지구환경과학과
760-749 경북 안동시 송천동 388
Tel: 054-820-5753
Fax: 054-823-1627
e-mail: jeong@andong.ac.kr