

수치해석에 의한 터널의 파괴거동에 미치는 영향분석

A Study on Effects of Failure Behaviour of Tunnel Using A Numerical Analysis

김 영민, Young-Min Kim

전주대학교 토목환경공학과 전임강사, Full time lecturer, Dept. of Civil & Envir. Eng. Jeonju Univ.

SYNOPSIS : In this paper, an application of finite element procedure for tunnel failure analysis has been studied. The numerical model is applied to the simulation of a series of plane strain laboratory tests on the small scale model of a shallow tunnel. By comparing experimental and numerical results some conclusions are drawn on the effectiveness of the numerical approach. The findings from these numerical experiments show relative differences in the pattern of failure behaviour for shallow tunnels.

Key words : tunnel stability, FEM, failure behaviour, dilatency, model test

1. 서론

최근에는, 지하의 특성을 이용한 시설의 건설(지하저장시설)등 터널구조물에 대한 건설수요가 늘어나고 있는 추세이다. 이에 따른 터널공사에 대한 경제적이고, 합리적인 설계, 시공의 필요성이 더욱 중요하게 되고있다. 따라서, 터널공사에 따른 지반의 응력, 변형거동을 정확히 파악하여, 설계, 시공에 반영하는 것이 중요한 기술 및 능력이 된다.

종래의 터널에 대한 설계 및 시공관리는 과거의 실적 및 기술자의 경험에 의하여 경험적인 요인에 의하여 판단되는 것이 많았다. 또한 터널에 대한 수치해석도 주로 지반의 극한상태에 해당되는 파괴거동보다는 파괴이전상태에 대한 허용변위 및 응력값, 이완범위를 검토하는 수준정도 이었다.

최근의 컴퓨터 및 수치해석법의 급속한 발달로 지반의 파괴거동을 비교적 간단하게 취급할 수 있는 방법이 검토되고 있다. 수치해석에 의한 터널파괴거동의 해석은 실험결과에 대한 분석 및 재해석과 현장에서 발생하는 터널거동에 대하여 이를 이론적으로 설명하고, 발전시킬 수 있는 효율적인 수단이다.

NATM 공법에 의하여 터널을 굴착하는 경우, 막장이 굴착되고 상당기간 방치후, 지보공을 시공하기 때문에, 터널의 파괴거동이 매우 중요한 문제가 된다. 터널의 안정은 그 형상과 토피압에 의하여 커다란 영향을 미치며, 굴착공법 및 보조공법의 선택에 의하여 결정된다. 이러한 터널굴착공사에서 터널의 파괴에 대한 과정은 경험적인 방법이나 모형시험결과에 의존하여 추정하고 있으나, 그에 대하여 메커니즘은 아직까지 명확하게 밝혀지지 않고 있다.

본 논문은 터널파괴거동 해석 시 더 정밀하고 다양한 결과를 계산할 수 있는 유한요소법을 적용하여 기존의 이론 및 실험결과와 비교검토를 수행하고 기존의 방법에서 검토할 수 없는 추가적인 요인에 대하여 터널 파괴거동에 영향을 미치는 요인에 대하여 분석, 검토하였다.

2. 모형실험에 의한 터널 파괴거동 분석 예

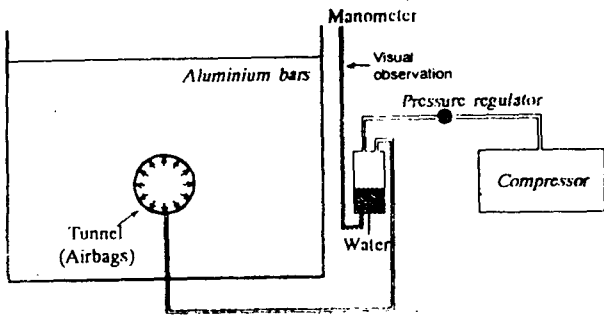


그림-1 터널모형 시험장치

본 절에서는 일본 고베대학에서 사용한 알루미늄봉을 이용한 터널모형실험결과에 대하여 살펴보고, 터널의 파괴거동에 대하여 분석하고자 한다. 그림-1에 고베대학에서 사용한 실험장치를 나타내었다. 이 실험장치는 길이 5cm이며, 직경 1.5mm 와 직경 3mm의 알루미늄봉을 무게비 6:4로 혼합하여 인공지반을 형성한다. 이 인공지반(알루미늄봉 집합체)에 원형 터널형상의 에어백을 설치하고, 터널의 토피압에 해당되는 공기압을 가하여, 터널천정부의 알루미늄봉이 이동하지 않도록 주의하여 소정의 지표면까지 알루미늄봉을 쌓는다. 이 상태에서 알루미늄으로 구성된 인공지반에 1cm 간격으로 표점을 표시하고, 터널형상의 에어백의 공기압을 감소시킴에 의해 터널의 굴착과정을 시뮬레이션한다. 굴착전과 소정의 굴착후의 표점에 대한 위치를 사진을 찍고, 사진을 확대후, 디지털이저에 의하여 각 측정의 변위를 분석으로 터널의 변형거동을 분석하는 실험이다.

토피가 1D (D:터널의 직경, 본 실험의 경우 $D=10\text{cm}$)인 경우의 실험에 의한 변위분포를 표시하면 그림-2와 같다. 또한 그 때의 최대전단변형율분포도는 그림-3에 표시하였다. 이 결과를 분석하여 보면, 터널 SL 부근에서 파괴가 시작되어, 천정부위에 토끼 귀 형태의 전단대가 발달되어 파괴되는 형태를 나타내고 있다. 이것은 워싱턴 DC의 지하철공사시 측정된 지중변위계 및 경사계의 결과로부터 구한 최대전단율 분포도와 유사한 결과이다(그림-4 참조).

본 실험장치는 터널벽면에 압력을 가하기 때문에 터널을 안정시키는 데 필요한 터널의 내부지지압을 구하는 것이 가능하다. 본 실험장치에서 측정한 터널 붕괴시 이완하중(release force)은 $0.74\gamma D$ 로 측정되었다.

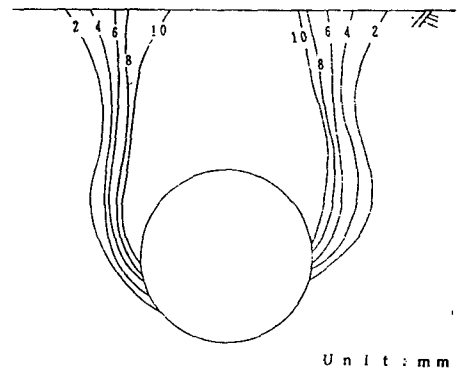


그림-2 실험에 의한 변위선도

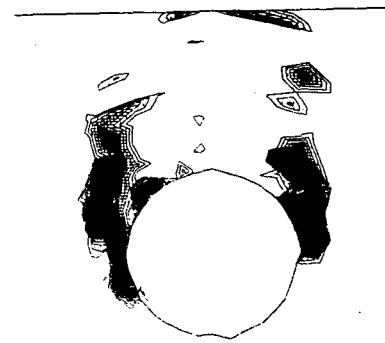


그림-3 실험에 의한 최대전단변형율선도

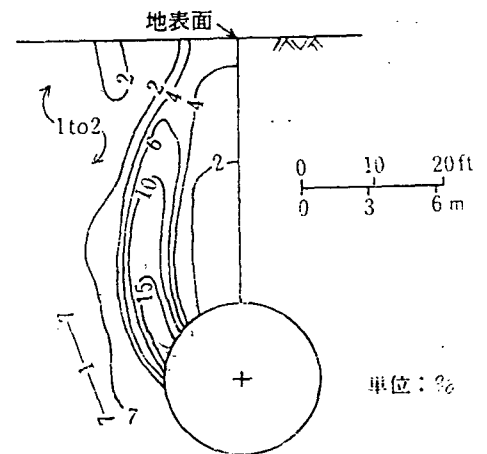


그림-4 터널 주변의 최대전단변형율분포도 (워싱턴 DC 지하철경우)

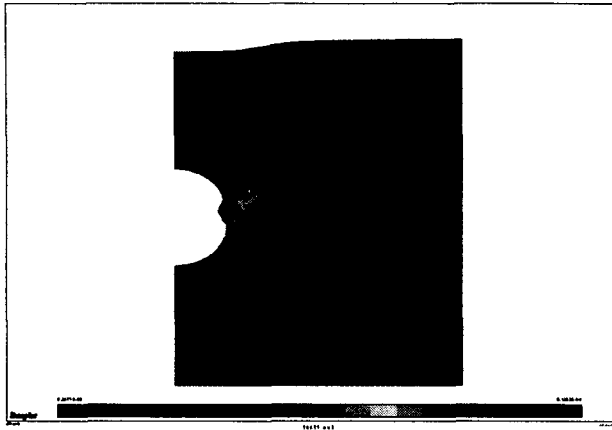


그림-5 전단변형을 분포도(수치해석)

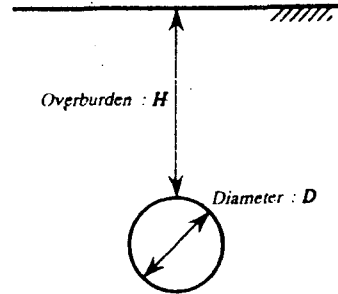


그림-6 해석모델도

3. 터널모형실험 수치시뮬레이션

위의 터널모형실험을 의한 터널의 파괴거동을 재현하고자 유한요소법에 의한 파괴거동해석에 적합한 점탄소성이론에 의한 모아 쿨론이론과 8 절점의 저감적분한 요소를 이용하고, 해석수법으로 Initial stiffness method 를 사용하여 계산을 수행하였다. 여기서 사용한 재료정수는 알리미늄봉 집합체의 직접전단시험에서 얻은 값으로 $c=0$, $\phi=31$, $\nu=0.2$ 로 하였다($\psi=0$ 가정). 또한 터널의 파괴시점은 반복횟수 500 회 까지 수렴되지 않는 때를 파괴로 간주하였다. 해석결과를 살펴보면, 터널모형실험에서와 같이 터널의 파괴거동 및 터널내부의 이완하중의 크기가 $0.76\gamma D$ 로 계산되어 거의 유사한 결과를 나타내고 있다(그림-5. 참조)

4. 수치실험에 의한 터널의 파괴거동에 미치는 영향분석

본 절에서는 균일한 사질토층으로 구성된 단일 터널의 경우를 가정하여 유한요소법에 의한 터널파괴 거동해석에 영향을 미치는 요인에 대하여 분석하였다. 해석모델은 그림-6 과 같이 원형터널단면을 설정하고, 지반의 재료정수값으로 $c=0$, $\phi=30$ $\gamma=22t/m^3$, $K_0=0.5$, $E=5e6 t/m^2$, $\nu=0.3$, $D=1H$ ($D=4m$)으로 가정하였다.

4.1 요소선택에 의한 영향검토

유한요소법에 의한 지반의 파괴거동해석 시 요소의 선택에 의한 영향을 분석하기 위해서 삼각형요소, 저감적분한 사각형요소, 완전적분한 사각형요소, 저감적분한 8 절점요소망을 구성하여 동일한 조건하에서 터널의 파괴과정에 대하여 계산을 수행하였다. 그 결과 그림-7 과 같이 저감적분한 8 절점요소가 가장 적합한 형태의 파괴거동을 모사함을 알 수 있다.

4.2 다일러탄시영향

사면의 파괴거동이나 trap-door 문제와 같은 지반의 파괴거동 시 다일러탄시 각도가 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 본 절에서는 터널의 파괴거동해석시 다일러탄시각도가 터널의 파괴거동에 미치는 영향을 조사하기 위해서, $\psi=0$, $\psi=10$, $\psi=20$, $\psi=30$ 로 변화시켜 위의 모델을 이용하여 수렴되지 않을 때까지 계산을 수행하여 그 영향을 조사하였다. 그 결과를 살펴보면, 다일러탄시각도가 0 에서부터 큰 값을 가질수록 터널의 굴착이완하중 값(각각 61, 63, 64, $64\gamma D$)은 커지고, 파괴거동은 터널 천단부위에 천단대가 발생되지 않는 경향이 있다(그림-8).

4.3 토피에 따른 파괴거동

터널의 파괴형태는 일반적으로 토피에 따라 큰 차이가 발생하는 것으로 알려져 있다. 수치실험에 의한 토피의 변화에 따른 터널의 파괴거동을 조사하기 위해서, 터널직경에 대한 토피비를 $H/D=0.5, 1, 2$ 로 변화시켜 해석모델(터널직경 $D=4m$)을 이용하여 터널의 파괴거동을 분석하였다($\psi=0$ 가정). 결과를 살펴보면, 토피비가 0.5 일 때는 무라야마교수의 실험결과처럼 아치형태의 지역 1과 토끼 귀 모양의 지역의 파괴영역으로 나누어지는 형태를 나타내며, 토피비가 1.0 인 경우에는 하나의 전단대가 발생되어 토끼 귀 모양의 파괴형태를 나타낸다. 또한, 토피 비가 2 인 경우에는 두 개의 전단대가 발달되어 가는 파괴 형태를 나타낸다($\psi=0$ 인 경우). 또한 파괴시 굴착이완하중의 크기는 각각 51, 61, 71 γH 로 나타내어 토피 비가 증가할수록 터널파괴 시 굴착이완하중의 상대적 크기는 감소하는 것으로 나타났다.

4.4 정지토압계수의 영향

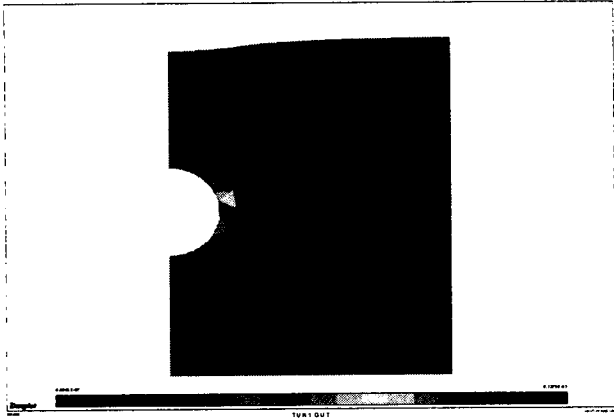
지반재료정수 중 터널 구조물 설계 및 변형거동해석에 중요한 영향을 미치는 요인으로 정지토압계수를 들 수 있다. 정지토압계수에 따른 터널의 파괴거동을 분석하기 위해서 국내에서 일반적으로 가정하는 범위의 정지토압계수비=0.5, 1.0, 1.5 에 대하여 토피비=1 인 경우에 대하여 조사하였다($\psi=0$ 인 경우). 계산 결과를 분석하여 보면, 토피비가 1 인 경우에, 정지토압계수비가 커질수록 파괴시 굴착이완하중크기(각각, 61, 72, 75 γD) 는 크게 되어 터널안정성에 보다 유리한 것으로 나타났으며, 파괴거동을 살펴보면 정지토 압계수비가 클수록 전단대 발달이 어려워 연결된 전반적인 파괴형태를 띄지 못하는 것으로 나타났다.

5. 결론

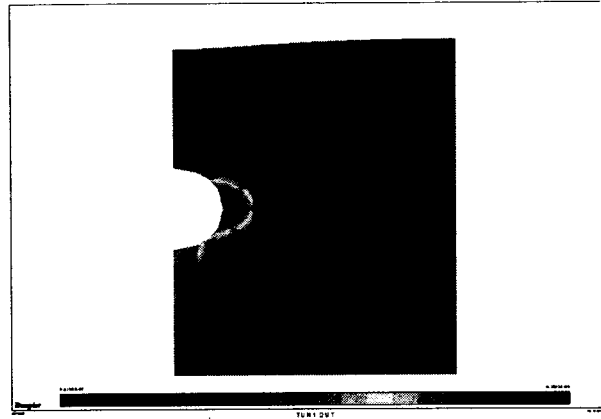
유한요소법으로 터널의 모형시험에 대한 수치 수플레이션을 수행하여 터널의 파괴거동에 미치는 영향에 대하여 검토하였다. 그 결과 유한요소법에 의한 방법으로도 충분히 파괴거동에 대하여 일괄적으로 분석할 수 있다는 것을 보여 주었다. 터널의 파괴거동은 재료정수인 정지토압계수와 다일러턴시 각도에 의하여 상당한 변화가 발생된다. 또한 터널의 파괴의 활동은 터널의 SL 부근에서 발달되기 시작하여 점진적으로 터널천정 어깨부로 진행되어 가는 토끼 귀 형태의 파괴과정을 거치는 것을 알 수 있다.

6. 참고문헌

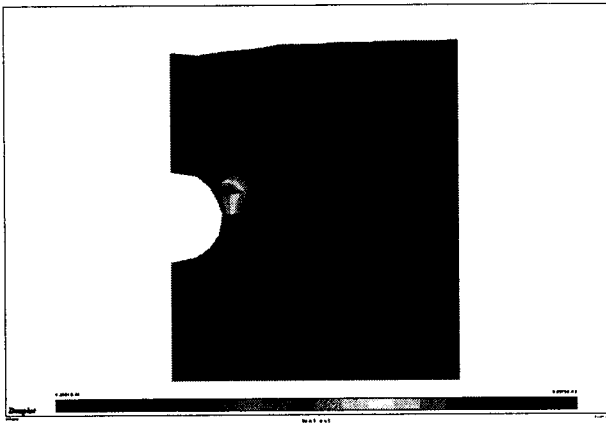
1. 小林正樹(1990), "지반의 안정, 침하해석에 관한 유한요소법 적용에 관한 연구", 동경공업대 박사학위논문
2. Smith, I.M. and Griffiths, D.V.(1988), "Programming the finite element method", 1988, John Wiley
3. 김영민(1997), "대변형탄소성유한요소법에 의한 재료의 연화현상을 고려한 파괴거동해석", 한국지반공학회논문집
4. Hasmire W.H. and Cording, E.J.(1985), "Soil tunnel test section: Case history summary", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol.111, No.11
5. 川鳥幾夫, "지반변위측정에의 GPS적용과 현장계측변위를 이용한 토피가 얇은 터널의 안정성에 관한 연구", 고베대학 박사학위논문
6. 村山郎朗, 松岡元(1971), "사질토중의 터널 토압에 관한 연구", 일본 토목학회논문집, 제187호
7. Sterpi, D. and Sakurai, S(1997), "Numerical analysis of laboratory tests on a model tunnel", Deformation and Progressive Failure in Geomechanics, IS-NAGOYA97



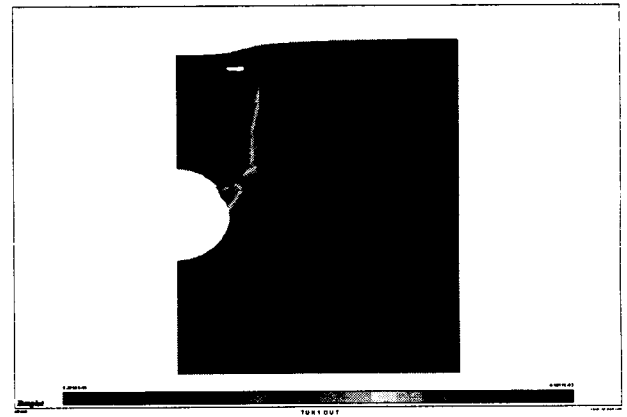
(a) 삼각형 요소인 경우



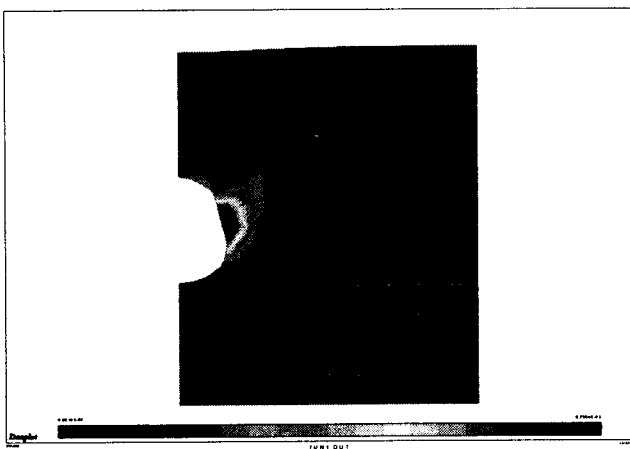
(b) 완전적분한 사각형요소 경우



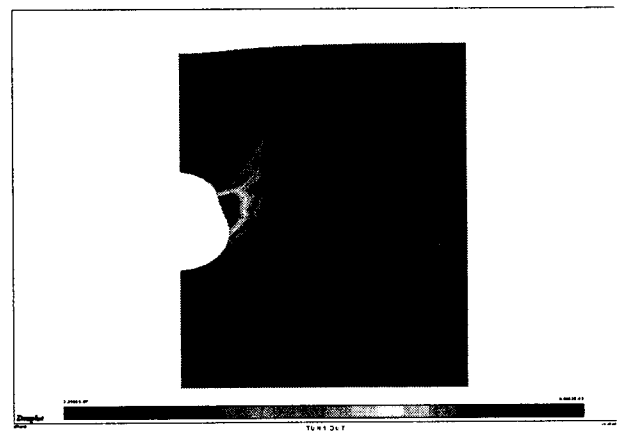
(c) 저감적분한 사각형 요소인 경우
그림-7 요소선택에 따른 영향



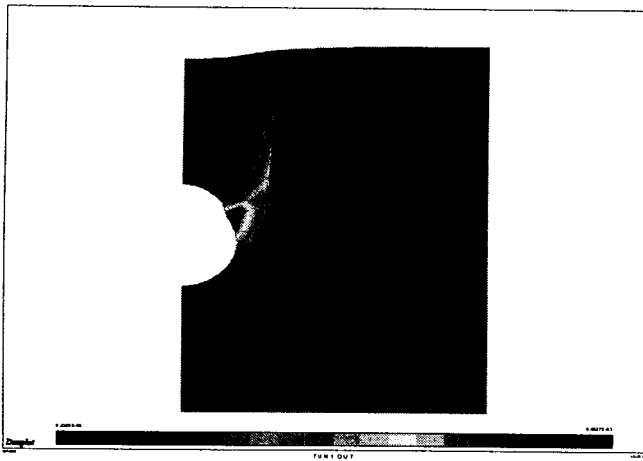
(d) 저감적분한 8절점 요소인 경우



(a) 다일러턴시 각 30



(b) 다일러턴시 각 20



(c) 다일러턴시 각 10
그림-8 다일러턴시 각도의 영향

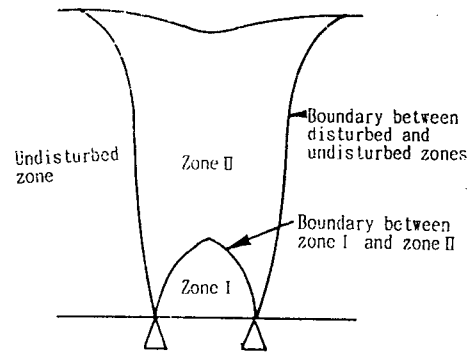
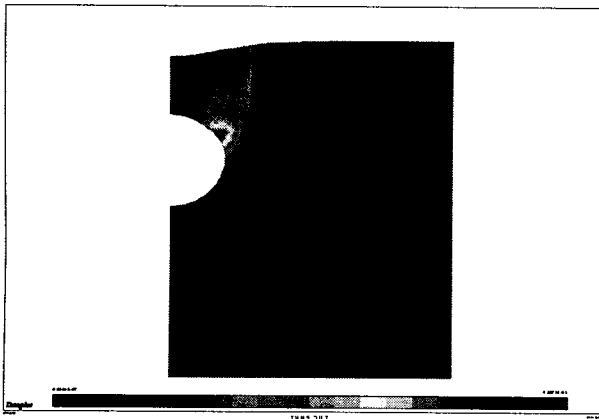
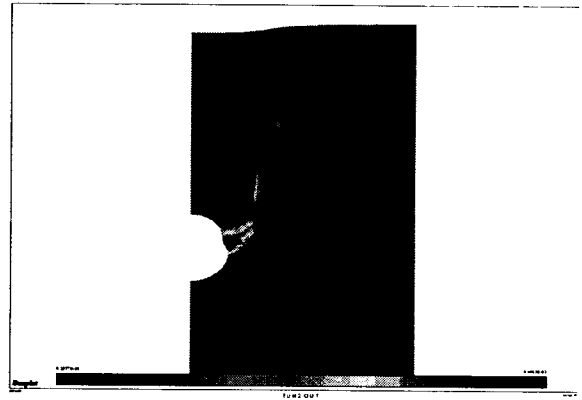


그림-9 제1, 제2 변형영역과 경계

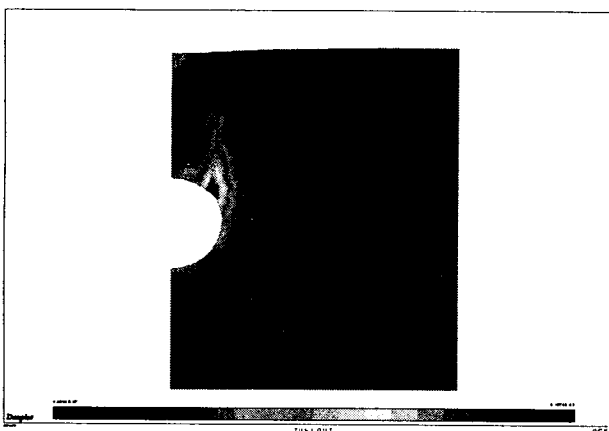


(a) 토포비 0.5 인 경우

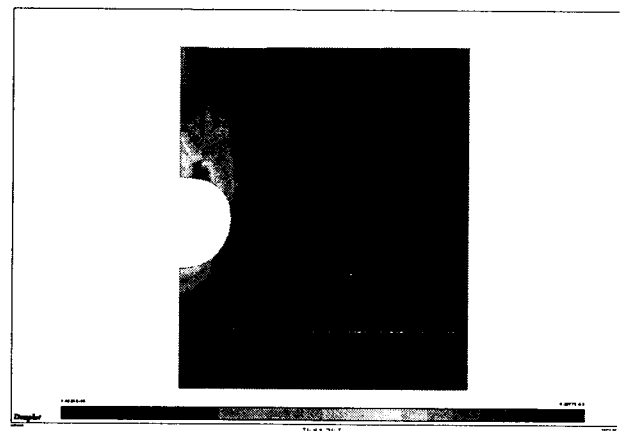


(b) 토포비 2.0 인 경우

그림-10 토포비의 영향



(a) K=1.0 인 경우



(b) K=1.5 인 경우

그림-11 정지 토압계수의 영향