

굴진장을 고려한 얇은 터널파괴거동에 대한 모형실험 및 수치해석

김영민^{1)*}

Model Test and Numerical Analysis for Failure Behaviour of Shallow Tunnel Considering Unsupported Tunnel Length

Kim, Youngmin

Abstract During excavation of shallow tunnels in soft ground, failure mechanism around the tunnel face have major influence on the stability of tunnels. In this paper, a series of laboratory tests under plane strain condition on the small scale of a shallow tunnel considering unsupported tunnel length has been performed. The results have shown that tunnel failure mechanism changes from failure mode 1 to failure mode 2 as unsupported tunnel length increases. By comparing the experimental and the numerical results, the loosening pressure for the shallow tunnel and progressive failure have been investigated.

KeyWords Tunnel model test, Failure behaviour, Shallow tunnel, Unsupported tunnel length

초 록 토사지반에서 얇은 터널을 굴착하는 경우, 터널 막장부의 파괴 메카니즘이 터널 안정성에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 일련의 굴진장을 고려한 2차원 종 방향 터널 모형 실험을 수행하였다. 그 결과 얇은 터널의 파괴 메카니즘은 굴진장이 길어질수록 파괴모드 1에서 파괴모드 2로 변하는 것을 알 수 있었다. 또한, 모형실험결과와 수치해석을 비교하여 터널에 작용하는 최소 지보압과 진행성 파괴 거동에 대하여 분석하였다.

핵심어 터널모형실험, 파괴거동, 얇은 터널, 굴진장, 유한요소해석

1. 서 론

NATM공법에 의하여 터널을 굴착하는 경우, 막장이 굴착되고 상당기간 방치 후, 지보공이 시공되기 때문에 막장주변의 터널 파괴거동이 매우 중요한 문제가 된다. 특히 토사지반의 얇은 터널의 경우 지표면 위 인근 구조물이 있다면 터널굴착에 의하여 구조물에 부동침하가 발생되어 심각한 피해를 야기할 가능성이 높다. 또한 터널 자체의 안정성에도 큰 문제를 야기한다. 이러한 피해를 줄이기 위해서는 터널 주변지반의 파괴거동에 대한 정확한 파악이 매우 중요하게 된다.

터널의 안정은 그 형상과 지보압에 의하여 커다란 영향을 미치며 굴진장 및 보조공법의 선택에 의하여 결정된다. 이러한 터널굴착공사에서 터널의 파괴에 대한 과정은 경험적인 방법이나 모형실험의 결과에 의존하여

그 파괴거동을 추정하고 있으나 그에 대한 메카니즘은 아직까지 명확하게 밝혀지지 않고 있다(川島機夫, 1995).

본 논문에서는 얇은 터널막장 부근의 파괴거동을 분석하기 위하여, 인공지반재료로서 알루미늄봉을 이용하고, 압력경계조건으로 터널의 굴착을 모사하는 장치를 사용하여 얇은 터널 파괴거동을 실험하였다. 사진측량으로 변위를 측정하고 자동적으로 최대 전단변형율을 계산할 수 있는 프로그램을 개발하여 터널 막장주변의 파괴형태를 분석하였다. 또한 보다 정밀하게 분석할 수 있는 비선형유한요소법을 적용하여 실험결과와의 비교검토를 수행하여 얇은 터널막장 부근의 파괴거동에 대하여 보다 자세하게 검토하였다.

2. 터널 굴착모형실험

토사지반 터널주변의 파괴거동을 분석하기 위해서 많은 터널모형실험이 수행되었다. 이러한 터널모형실험

¹⁾ 전주대학교 토목환경공학과 부교수

* 교신저자 : youngmk@jj.ac.kr

접수일 : 2005년 8월 8일

심사 완료일 : 2005년 9월 23일

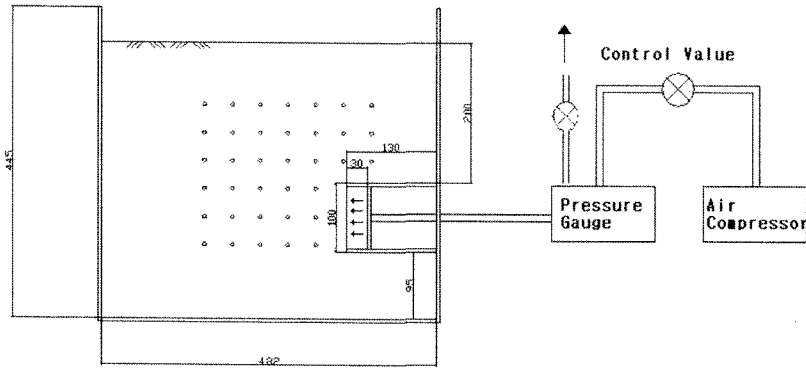


Fig. 1. Apparatus of model tunnel

험에 사용된 재료로서 표준사 또는 알루미늄봉을 이용하였다. 지금까지의 많은 터널모형실험은 굴착과정을 하기 위해서 굴착면에 일정한 변위를 제어하는 경계변위 문제로서 실험한 것이 많았다. 그러나 실제의 터널 굴착문제는 굴착면의 경계조건이 일정한 변위경계가 아니고 일정한 압력에 의하여 제어하는 압력경계조건에 가까운 상태이다(足立紀尙 등, 1986, Akutagawa, S. and Sakurai, S. 1997).

본 논문에서는 인공지반재료로서 알루미늄봉을 사용하고, 굴착면에 일정한 압력을 제어하는 압력경계조건으로 터널 굴착과정을 모사하는 장치를 사용하여 얇은 터널파괴거동을 실험하였다. 사용한 터널 모형실험장치는 다음과 같은 장점이 있다.

- (1) 알루미늄 인공지반 모델이 자립하기 때문에 전 후면을 지지할 필요가 없어, 벽면마찰각이 발생하지 않는다.
- (2) 알루미늄 집합체인 인공지반에 직접 표점 및 표선을 그릴 수 있어 지반변위거동에 대하여 관찰이 용이하다.
- (3) 인공지반을 쉽게 재구성할 수 있어 여러 번 반복적으로 실험할 수 있다.
- (4) 터널굴착을 압력경계로 모사할 수 있어 좀 더 현실적인 파괴거동을 재현할 수 있다.
- (5) 터널 굴착면에 작용하는 압력을 측정하는 것이 가능하기 때문에 터널의 지보압을 검토할 수 있다.

본 터널모형 실험은 위와 같은 장점을 이용하여 알루미늄 적층체를 인공지반으로 하고, 터널굴착모사를 에어백을 이용한 실험장치를 제작하여 사용하였다. 사용한 터널 중단면에 대한 모형실험장치 모식도를 Fig. 1에 나타내었다. 이 실험장치는 길이 5 cm이며, 직경

1.5 mm 와 직경 3 mm의 알루미늄봉을 무게비 6: 4로 혼합하여 만든 인공지반(알루미늄봉 집합체)을 사용하였다. 또한, 터널굴착을 모사하기 위하여 공기압으로 제어되는 터널모형의 에어백을 설치한다. 공기압은 미세 제어밸브에 의하여 0.001 tf/m^2 까지 제어할 수 있으며, 압력센서에 의하여 그 값은 디지털로 표시된다.

2.1 터널 중단면에 대한 모형실험

터널모형실험 방법은 알루미늄봉으로 구성된 인공지반을 구성하여, 터널형상의 에어백에 터널의 토피 압에 해당되는 공기압을 가하고, 터널천정부의 알루미늄이 이동하지 않도록 주의하여 소정의 지표면까지 알루미늄봉을 쌓는다. 이 상태에서 알루미늄봉으로 구성된 인공지반에 1 cm 간격으로 표점을 격자형식으로 표시하고, 터널형상의 에어백의 공기압을 감소시킴으로써 터널의 굴착과정을 시뮬레이션한다. 굴착전과 소정의 공기압을 감소시킨 후의 표점에 대해 디지털 사진기로 각각 사진을 찍어 컴퓨터로 전송 후, 사진측량 프로그램에 의하여 각 측정점의 변위를 측정하고, 개발된 분석프로그램으로 터널주변지반의 파괴거동을 분석하는 실험이다(Fig. 2 (a),(b)참조).

2.2 계측사진 데이터 분석 프로그램

터널 파괴거동을 자세히 분석하기 위해서는 측정된 변위를 증분 변위벡터와 최대전단변형율로 표시하는 것이 필요하다(櫻井春補, 1982, 신종호, 이인근, 2001). 터널주변의 지반 내에 충분한 측정점이 있고 그 점들에 대하여 변위가 측정된 경우, 측정 점에서 둘러싸인 영역 내에 삼각형의 유한요소망을 구성하여 각 절점의 변위로부터 변형율 ϵ 은 보간함수(유한요소법에서의 변위

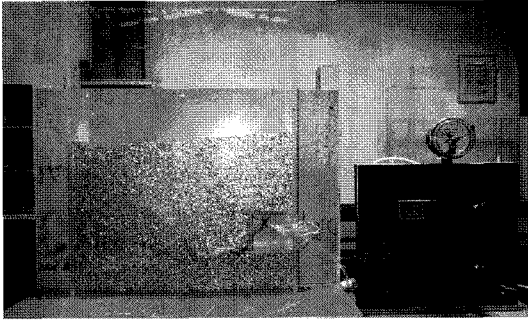


Fig. 2(a) Photo of model tunnel

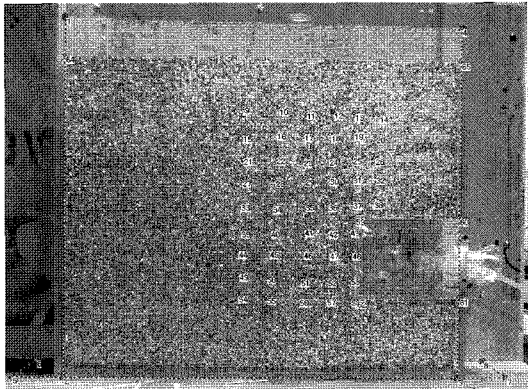


Fig. 2(b) Measurement points of model tunnel

-변형율매트릭스)를 이용하여 터널주변의 변형율을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon = [B] u \tag{1}$$

위에서 구한 변형율을 이용하여 최대전단 변형율을 다음과 같이 구한다.

$$\gamma_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2}\right)^2 + \frac{1}{4} \gamma_{xy}^2} \tag{2}$$

또한 계산된 변형율 값을 표시하기 위하여 각 삼각형 요소의 값을 절점의 값으로 표시할 필요가 있다. 이때에 다음과 같은 최소자승법에 의하여 요소값을 절점의 값으로 추정하였다.

Fig. 3과 같이 삼각형의 요소값이 f_e 인 경우, 각 절점의 값을 f_1, f_2, f_3 로 간주하여 형상함수 N 으로 보간하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

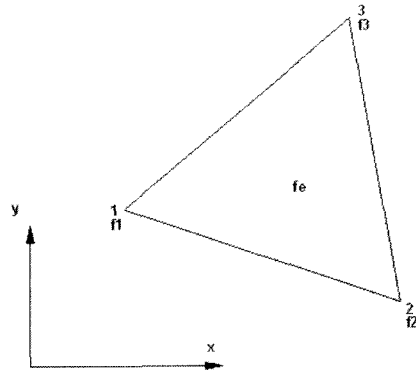


Fig. 3. Triangular element for least square method

$$f = N \bar{f} \tag{3}$$

여기서 $N = [N_1, N_2, N_3]$ $\bar{f} = [f_1, f_2, f_3]^T$
 최소자승법에 원리에 의하여 표시하면 아래와 같은 식을 얻는다.

$$E = \sum_e \frac{1}{2} \int_e (f - f_e)^2 dA \tag{4}$$

여기서 (3)식을 (4)식에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$E = \sum_e \frac{1}{2} \bar{f}^T \left(\int_e N^T N dA \right) \bar{f} - \bar{f}^T (f_e \int_e N^T dA) + \frac{1}{2} f_e^2 eA \tag{5}$$

위 식의 마지막 항은 상수이므로 위식을 정리하면 아래와 같은 식을 얻을 수 있다.

$$E = \sum_e \frac{1}{2} \bar{f}^T [W^e \bar{f} - \bar{f}^T R^e] + constant \tag{6}$$

여기서,

$$W^e = \int_e N^T N dA = \frac{A_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$R^e = f_e \int_e N^T dA = \frac{f_e A}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

위 식을 전체요소로 조합하여 정리하면 아래 식을 얻을 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} F^T W F - F^T W + constant \quad (7)$$

여기서 F는 전체 절점에서의 변형율을 나타내는 벡터이다.

$$F = [F_1, F_2, \dots, F_{MN}]^T \quad (8)$$

최소자승법에 의하면, 윗식은 변수F에 의한 미분값이 0가 되어야 함으로 최종적으로 아래와 같은 식을 얻는다.

$$W F = R \quad (9)$$

윗 식을 살펴보면, W값은 강성매트릭스에 해당되고, R값은 하중벡터에 해당됨을 알 수 있다. 따라서 기존의 유한요소법의 방정식을 푸는 방법으로 위의 방정식을 계산할 수 있다.

위와 같은 방법으로 요소에서 얻어진 값을 각 절점에 해당되는 변형율 값으로 계산하여 실험데이터 시각화 상용프로그램인 Tecplot를 이용하여 터널의 파괴거동을 나타내는 증분변위 벡터 또는 최대 전단변형율로 표시할 수 있다.

2.3 모형 터널실험에 의한 터널주변의 파괴거동 분석

각 실험은 얇은 터널의 거동을 중심으로 토피비(H/D)가 1, 2의 각 경우에 대하여 굴진장 비(P/D) 0, 0.5, 1의 3경우에 대하여 실험을 실시하였다 여기서 H는 터널의 토피를 나타내며, D는 터널직경으로 본 모형터널실험에서는 10 cm로 하였다. 그리고 P는 터널의 굴진장을 표시한다(Fig. 4참조). 터널 굴착과정은 터널의 토피압에 해당되는 공기압을 에어백에 가한 후 알루미늄봉을 소정의 높이까지 쌓아 올린다. 알루미늄봉 표면에 유성 사이펜을 이용하여 측정점을 일정한 간격으로 표시한다. 카메라를 세팅한 후 실험은 공기압을 순차적으로 감소시켜 가면서, 터널의 변형이 발생되면, 각 단계별로 사진을 찍고 사진측량으로부터 변위를 구하고, 개발된 분석 프로그램을 이용하여 터널 주변의 파괴거동을 조사하였다. 각 경우에 대한 터널 모형실험결과로 얻어진 최종상태의 증분 변형도와 증분 최대전단변형율도를 표시하면 Fig. 5~10 과 같다.

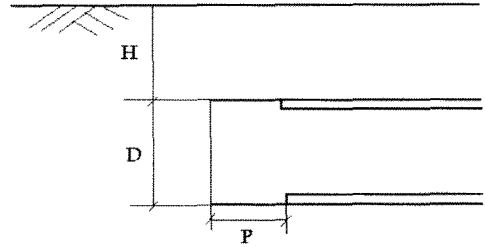
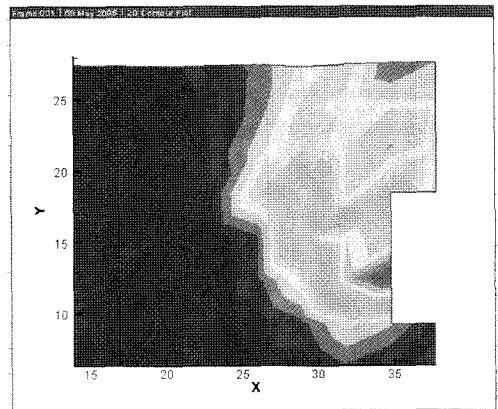
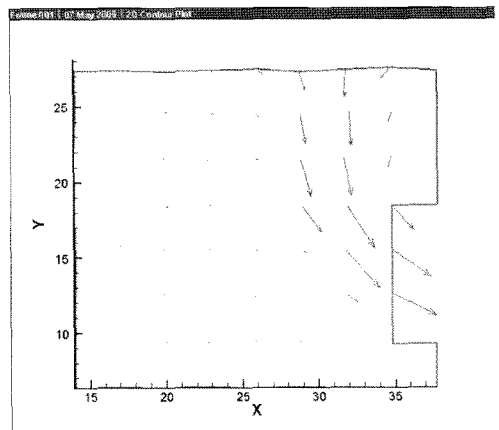


Fig. 4. The representation of model tunnel

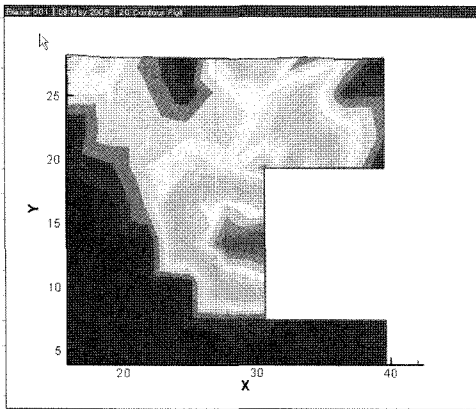


(a) Maximum shear strain

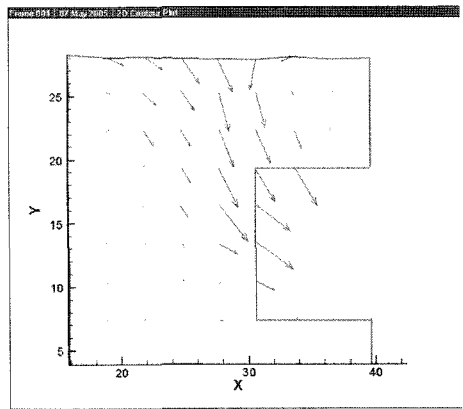


(b) Incremental displacement vector

Fig. 5. Maximum shear strain and Incremental displacement vector(H/D=1, P/D=0)

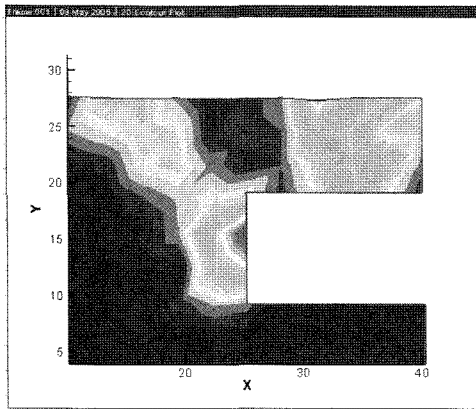


(a) Maximum shear strain

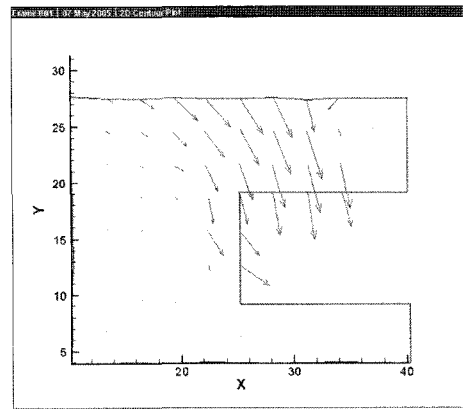


(b) Incremental displacement vector

Fig. 6. Maximum shear strain and incremental displacement vector(H/D=1, P/D=0.5)

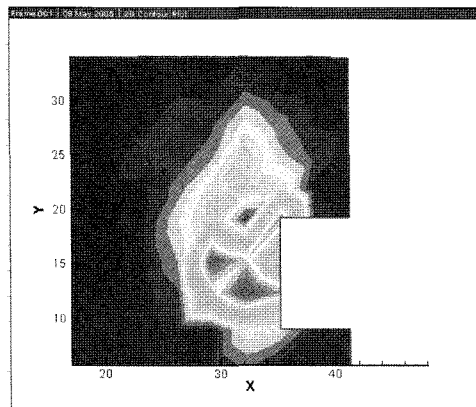


(a) Maximum shear strain

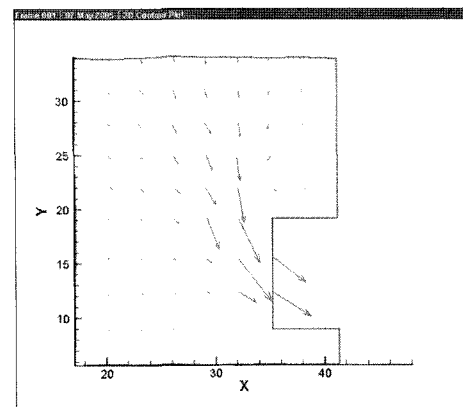


(b) Incremental displacement vector

Fig. 7. Maximum shear strain and incremental displacement vector(H/D=1, P/D=1)

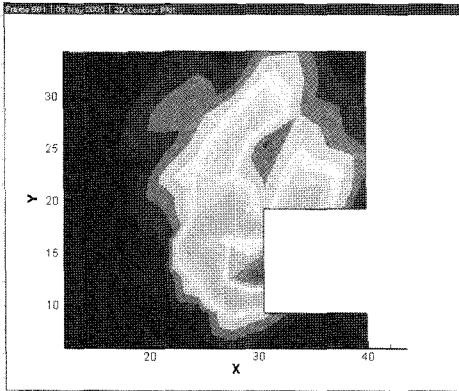


(a) Maximum shear strain

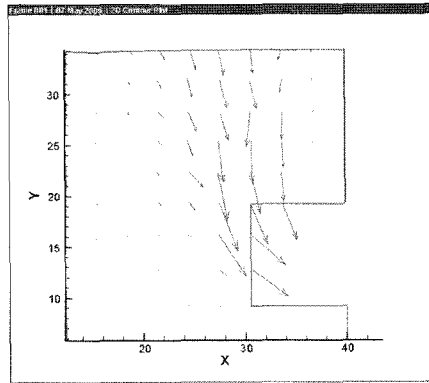


(b) Incremental displacement vector

Fig. 8. Maximum shear strain and incremental displacement vector(H/D=2, P/D=0)

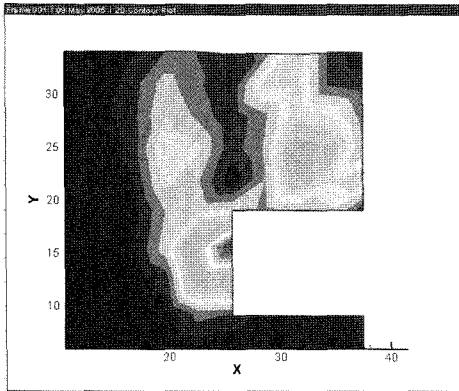


(a) Maximum shear strain

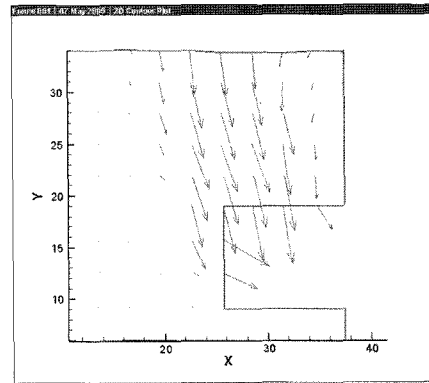


(b) Incremental displacement vector

Fig. 9. Maximum shear strain and incremental displacement vector(H/D=2, P/D=0.5)



(a) Maximum shear strain

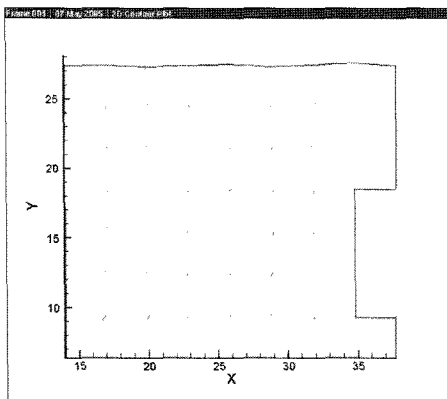


(b) Incremental displacement vector

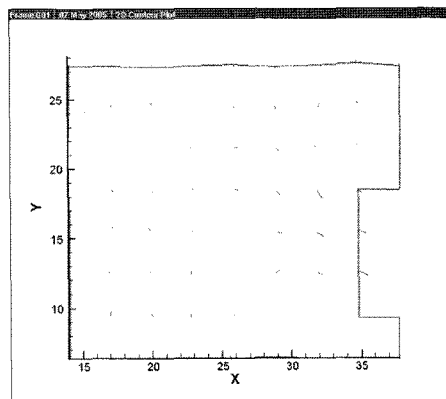
Fig. 10. Maximum shear strain and incremental displacement vector(H/D=2, P/D=1)

또한, 토피가 1D이고 P/D=0(D: 터널의 직경, 본 실험의 경우, D=10 cm)인 경우, 각 하중단계별 터널의 파괴 형태를 분석하여 보면, Fig. 11 (a), (b), (c), (d), (e), (f),

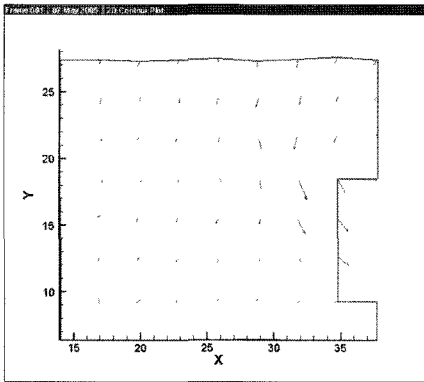
(g)와 같다. 각 하중 단계별에 터널 내부압력 값은 Table 1에 표시하였다.



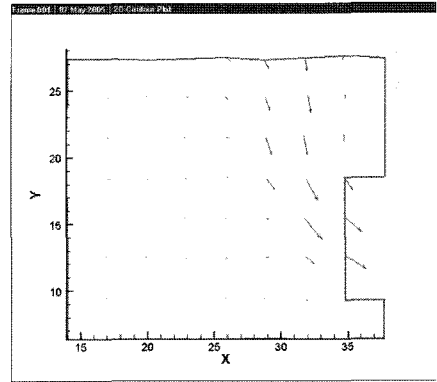
(a) Incremental disp. vector(1 step)



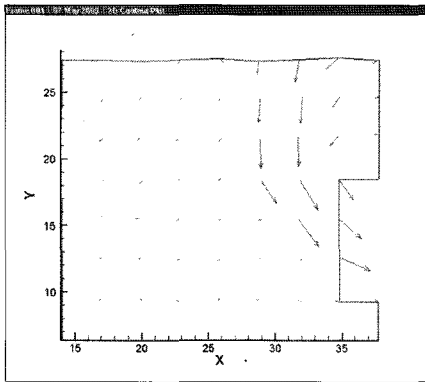
(b) Incremental disp. vector(2 step)



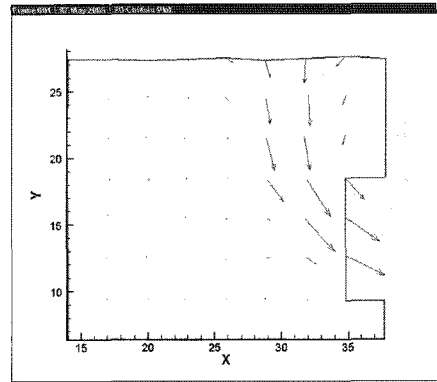
(c) Incremental disp. vector(3 step)



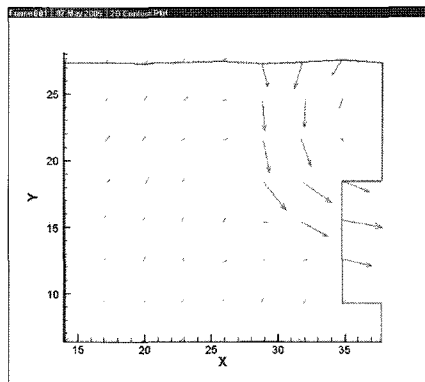
(d) Incremental disp. vector(4 step)



(e) Incremental disp. vector(5 step)



(f) Incremental disp. vector(6 step)



(g) Incremental disp. vector(7 step)

Fig. 11. Incremental displacement vector during test for $H/D=1$, $P/D=0$

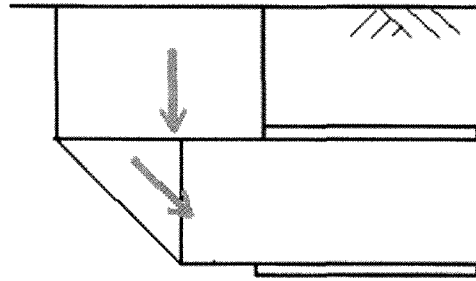
Table 1. Internal pressure during test for $H/D=1$, $P/D=0$

Step	Internal pressure (tf/m^2)
0	0.33
1	0.26
2	0.25
3	0.16
4	0.098
5	0.065
6	0.047
7	0.032

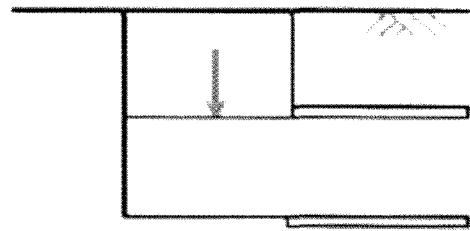
일반적으로 터널 모형실험결과에 의하면 얇은 터널의 막장부근에서 종단면의 파괴형태는 모식적으로 터널굴진장이 길어짐에 따라 Fig. 12(a), (b)와 같이 흠뻑기 형태에서 평면파괴형태로 파괴모드가 나타나는 것으로 알려져 있다(川島機夫, 1995, Casarin, C. and Mair, R. J. 1981).

본 실험 결과에 의하여 터널막장 주변지반의 파괴거동을 분석하여 보면, $P/D=0$ 인 경우 터널막장 바닥부근에서 파괴가 시작되어, 막장에 쐐기모양의 파괴영역과 지표면으로 발달되는 파괴모드 1에 가까운 파괴 형태를 나타내고 있다(Fig. 5, 8참조). 또한, $P/D=1$ 인 경우에는 막장의 천단 모서리에서 파괴가 시작되어 지표면위로 발달되고, 라이닝모서리 부에서도 수직으로 파괴면이 발생되는 파괴모드 2의 평면파괴양상에 가까운 파괴거동을 나타내었다(Fig. 7, 10참조). 이러한 파괴형태는 일반적으로 알려진 얇은 터널파괴에서 나타나는 굴진장에 따라 파괴모드 1에서 파괴모드 2로 변경되는 것을 잘 묘사함을 알 수 있다.

그리고 $H/D=1$, $P/D=0$ 인 터널모형실험에서 얇은 터널의 파괴 진행과정을 살펴보면, Fig. 11에 표시한 것과 같이 변형초기에는 터널 막장면에서 배부름 현상이 발생되어 터널 막장면 앞에 쐐기형태의 파괴가 발생되고, 지표면으로 파괴가 진행되어 최종적으로 파괴모드 1에 가까운 형태를 나타내었다. 또한 본 모형실험 경우 터널의 최소 지보압을 구하기 위해 실험에서 각 하중단계별로 증분변위를 분석하여 터널주변의 변위가 급격히 증가되어 지표에 영향을 미치는 단계를 터널의 파괴상태로 간주하고 모형터널내부의 공기압을 측정하여 최소 지보압으로 평가하였다. $H/D=1$, $P/D=0$ 인 경우에는 증분변위가 지표면까지 발생하는 굴착단계 4로 간주하여 터널의 최소 지보압을 0.098 tf/m^2 로 평가하였다(Fig. 11(d), Table 1참조).



(a) Failure mode 1(Wedge type)



(b) Failure mode 2(Plane type)

Fig. 12. Tunnel failure mode

3. FEM에 의한 모형실험 분석

본 절에서는 위의 터널 모형실험에 의한 터널의 파괴거동을 보다 자세히 분석하기 위하여 유한요소법으로 수치해석을 수행하였다. FEM 해석방법으로 파괴 거동해석에 적합한 가상적 점탄소성이론(Zienkiewics, Corneau, 1974, Owen, D.R, and Hinton, E., 1980, 小林正樹, 1990)을 사용하였다. 또한, 지반재료의 파괴거동을 해석하기 위해서는 모아-쿨롱이론과 비연상유동법칙(non-associated flow rule) 사용하는 것이 적합한 것으로 알려져 있다(김영민, 2001, Smith, I. M. and Griffiths, D. V., 1997). $H/D=1$, $P/D=1$ 인 터널모형인 경우에 사용한 FEM모델은 Fig. 13에 표시하였다. 사용한 요소는 8절점 저감직분요소이며, 요소수 700, 절점수 2211이다. 경계조건은 좌우측면은 롤러지지, 바닥경계는 힌지지, 터널lining부(AB, CD)는 변위를 고정하였다. 사용한 재료정수 값은 Table 2와 같이 알루미늄 집합체의 직접전단 시험에서 얻은 값을 사용하였다(Stepi, D and Sakurai, S, 1997)).

Table 2. Material parameters

Cohesion (tf/m ²)	Friction angle(°)	Dilatancy angle(°)	Unit weight (tf/m ³)	Earth pressure coefficient	Young's modulus (tf/m ²)	Poisson's ratio
0.	30	0	2.2	0.5	3300*	0.2

* assumed value

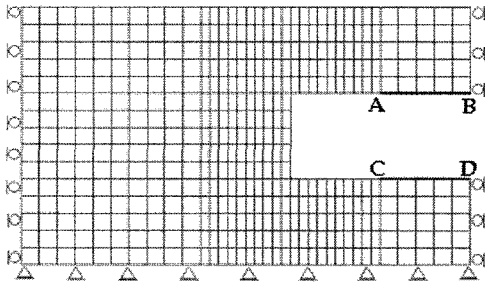
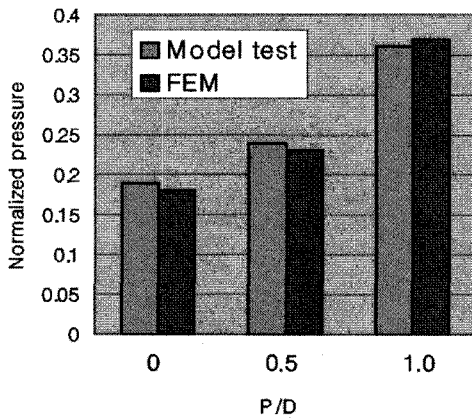


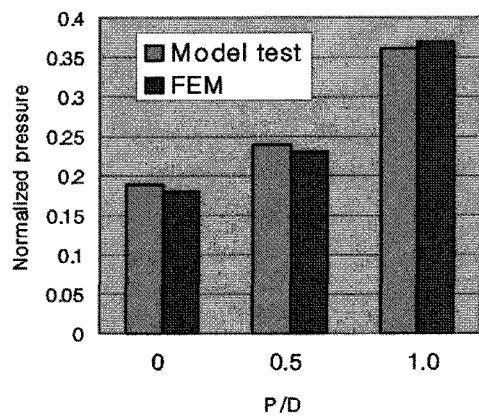
Fig. 13. FEM model mesh for H/D=1, P/D=1

각 경우에 대한 FEM 해석결과, 얻어진 최종상태의 변형도를 표시하면 Fig. 15~16와 같다. 또한 FEM해석

시 굴착하중 단계별로 수렴을 조사하여 수렴이 되지 않은 단계를 터널파괴로 간주하여 터널 파괴 시 최소 지보압을 계산하였다. 터널의 최소 지보압은 지반응답곡선에서 터널의 파괴시점의 지보압에 해당되므로, FEM 터널해석에서는 터널 주변의 초기응력을 바탕으로 초기 전굴착하중을 계산하고, 단계적으로 굴착하중을 터널면에 가하여 터널을 파괴시키게 된다. 따라서 최소지보압은 FEM해석시 수렴이 되지 않는 단계의 굴착하중을 구하여 초기 전굴착하중에서 파괴시 굴착하중값을 뺀값으로 간주할 수 있다. 여기서 최소 지보압은 초기 전굴착하중에서 파괴시 굴착 하중값을 뺀 값을 표시한다. Fig. 14에 모형실험에서 측정된 값과 FEM해석 시 얻은 최소 지보압을 각 경우에 대하여 전 토파압에 대한 비로 표시하여 나타내었다. 또한 Table 3에 각 경우



(a) H/D = 1

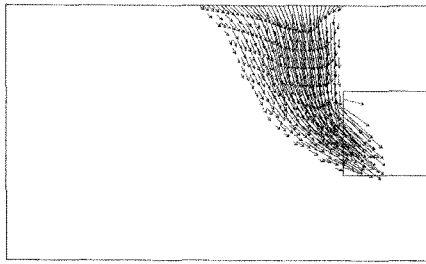


(b) H/D = 2

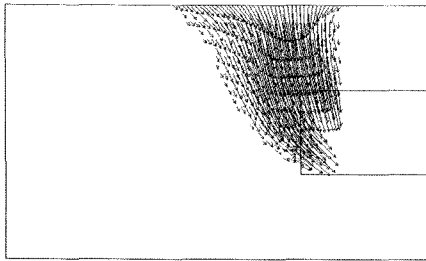
Fig. 14. Comparison of minimum supporting pressure between model test and FEM

Table 3. Minimum supporting pressure for Model test and FEM(unit: tf/m²)

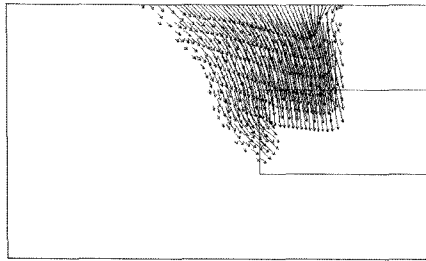
Case		P/D=0	P/D=0.5	P/D=1
H/D=1	Model test	0.098	0.1419	0.188
	FEM	0.099	0.132	0.182
H/D=2	Model test	0.10	0.132	0.198
	FEM	0.099	0.127	0.204



(a) P/D=0 case



(b) P/D=0.5 case



(c) P/D=1.0 case

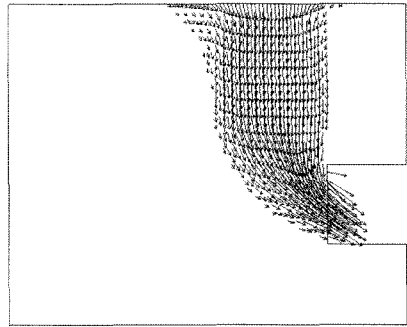
Fig. 15. Incremental displacement vector at failure for H/D=1

에 대한 최소지보압 비에 대한 값을 표시하였다.

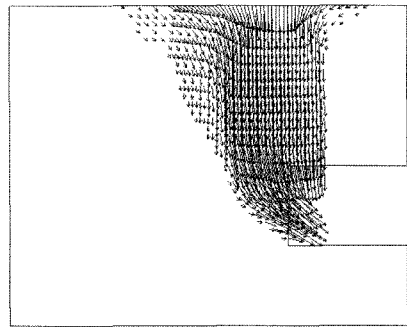
터널의 최소 지보압에 대하여 터널모형실험과 FEM 해석 결과를 살펴보면, 각 경우에 대하여 FEM 해석 결과가 다소 작게 평가되는 경향이 있으나 대체적으로 실험값과 유사하게 추정되는 결과를 나타내었다. 또한 FEM 해석결과, 파괴시 증분변위벡터를 Fig. 15, 16에 나타내었다. 전반적으로 파괴거동이 모형실험의 결과와 매우 비슷하게 얻어져 수치 해석적으로도 비교적 정확하게 터널 파괴거동을 평가할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

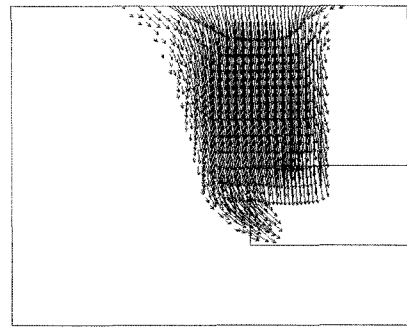
본 논문에서는 얇은 터널의 파괴거동을 모사하기 위



(a) P/D=0 case



(b) P/D=0.5 case



(c) P/D=1 case

Fig. 16. Incremental displacement vector at failure for H/D=2

해서 간편하게 터널모형실험을 할 수 있는 시험장치 및 분석법을 개발하여, 얇은 터널의 굴진장에 대한 파괴거동에 대하여 분석하였다. 얻어진 분석 결과에 대하여 정리하면 다음과 같다.

1. 알루미늄봉과 에어백을 이용한 압력제어 터널모형 실험을 통하여 얇은 터널파괴거동을 비교적 정확하게 모사할 수 있었다.

2. 개발된 사진측량 분석기법을 이용하여 모형터널의 상세히 터널의 파괴거동에 대하여 자세히 표현할 수 있었다.
3. 터널의 최소 지보압을 유한요소해석 결과와 비교한 결과, 본 실험의 압력시험 장치를 이용하여 비교적 정확하게 직접 측정할 수 있었다.
4. $P/D=0$ 인 경우 터널막장 바닥부근에서 파괴가 시작되어, 막장에 썩기모양의 파괴영역과 지표면으로 발달되는 썩기 파괴 형태인 파괴모드 1에 가까운 파괴 형태를 나타내었다.
5. $P/D=1$ 인 경우에는 막장의 천단 모서리에서 파괴가 시작되어 지표면위로 발달되고, 라이닝모서리 부에서도 수직으로 파괴 면이 발생하는 파괴모드 2의 평면파괴양상에 가까운 파괴거동을 나타내었다.

사 사

이 논문은 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(R05-2003-000-11633-0)이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김영민, 2001, 얇은 터널파괴거동에 대한 모형실험과 수치시뮬레이션 비교검토, 대한토목학회논문집, Vol 21, 제 2-C호, pp.91~98.
2. 신중호, 이인근, 2001, 화강토지반내 복합막장터널의 파괴메카니즘 연구, 한국지반공학회논문집, Vol.17, No.4, pp.317~329.
3. 足立紀尚, 田村武, 八島厚, 上野洋 1986, 토피가 얇은 사질지반의 터널굴착에 따른 지표면 침하, 일본토목학회 논문집, No370/III-5, pp.129~136
4. 川島機夫, 1995, 지반변위측정에 GPS적용과 현장계측 변위를 이용한 토피가 얇은 터널의 안정성에 관한 연구, 고베대학 박사학위논문.
5. 櫻井春輔, 1982, 터널공사에 대한 변위계측결과의 평가법, 일본토목학회논문집, No.317, pp.93~100.
6. 小林正樹, 1990, 지반의 안정, 침하해석에 관한 유한요소법 적용에 관한 연구, 동경공업대 박사학위논문.
7. Akutagawa, S. and Sakurai, S. 1997, An analytical and experimental investigation on stability of underground openings, *Comp. Meth. and Advances in Geomechanics*, pp.1495-1500.
8. Casarin, C. and Mair, R.J., 1981, The assessment of tunnel stability in clay by model tests, *Soft Ground Tunneling*, eds. Daniel, R. and Miguel, P.R., pp.33~44.
9. Sterpi, D. and Sakurai, S., 1997, Numerical analysis of laboratory tests on a model tunnel Deformation and Progressive Failure on Geomechanics, IS-NAGOYA97, pp.757~762.
10. Zienkiewicz, O.C. and Corneau, I.C., 1974, "Viscoplasticity and creep in elastic solids unified numerical solution approach", *Int. J. Num. Meth. Eng.* Vol.8.
11. Owen, D.R. and Hinton, E., 1980, *Finite element in plasticity*, Pinerige Press.
12. Smith, I. M. and Griffiths, D. V., 1997, Programming the finite element method, 3th, John Wiley & Sons.

김 영 민

1986년 고려대학교 토목공학과 공학사
1988년 한국과학기술원 토목과 공학석사
1996년 일본 고베대학 대학원 공학박사

Tel: 063-220-2661

E-mail: youngmk@jj.ac.kr

현재 전주대학교 공과대학 토목환경공학과 부교수

