

지하공간 건설에 따른 굴착전면의 파괴모드 Heading Failure Modes during Underground Excavation

권오엽¹⁾, Kwon, Oh-Yeob, 조재완²⁾, Cho, Jae-Wan, 신종호³⁾, Shin, Jong-Ho,
최용기⁴⁾, Choi, Ypng-Ki, 신용석⁵⁾, Shin, Yong-Suk

1) 건국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Konkuk Univ.

2) 태조엔지니어링 지반부, Geotechnical Dept., TESO Engineering Co., Ltd.

3) 건국대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Konkuk Univ.

4) 대원토질 회장, Chairman, Dae Won Soil Co., LTD

5) 한국시설안전기술공단, 부장, Director, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation

SYNOPSIS : Design analysis for underground spaces requires evaluating stability related to tunnel collapses. A failure mode is one of the critical factors in the conventional methods of stability analysis. Therefore identification of failure modes is essential in securing safe construction in the phase of design analysis, instrumentation planning and implementation of reinforcing measures. In this study failure modes at the tunnel heading in granular soils are investigated using physical model tests and numerical simulation for various tunnel depths and ground surface inclinations. Test results indicated that the effect of depth and inclination of ground surface on a failure mode are significant. It is identified that, with an incase in depth, failure modes become localized in a region close to the tunnel. It is also known that an increase in the inclination of ground surface results in inclined and wide failure modes.

Key words : underground space, failure mode, physical model test, numerical analysis

1. 서 론

최근 지상공간에서의 건설이 한계에 이르러 지하구조물의 수요가 급증하여 토피고가 얇고 지반이 불안정한 지반이나 도심지 내에서의 지하공간 및 터널의 건설이 불가피하게 되었다. 지하 공간 건설에서 굴착시 발생하는 지반의 변형은 지하 구조물의 안정성은 물론 주변 구조물의 안정성에도 위협이 되므로 설계 단계부터 신중히 검토될 필요가 있다. 특히, 대도시의 대부분은 연약지반대가 분포하는 하천이나 해안부근에 위치하며, 여기에 건설되고 있는 지하철 건설은 이용의 편의성과 건설비 등의 이유로 지표로부터 깊이 얇은 위치에 건설되고 있다. 따라서 대부분의 도심 터널은 얇은 연약지반 터널로 분류된다. Peck(1969)은 연약지반 터널의 설계 요구조건을 제시하였다. 첫째, 안정적이고 경제적이어야 한다. 둘째, 인접구조물에 피해를 주지 말아야 한다. 셋째, 설계수명동안 안전하게 외력에 대해 지지하는 것이라고 지적하였다. 이 세 가지 원리는 각각 터널의 붕괴에 대한 안정성, 지반침하에 따른 주변 구조물의 영향, 외력에 저항하는 터널의 라이닝이나 굴착면 등에 작용하는 토압등과 밀접한 관계를 가진다. 이 중에서 굴착면에서의 터널의 붕괴에 대한 안정성은 가장 중요한 문제라 할 수 있다(그림 1).

지반 안정문제는 통상 강소성역학에 기초하여 파괴에 대한 안전율을 평가하는 방식으로 이루어진다. 이런 접근방법을 해석적 방법이라고 하며, 제한된 경우에 한해서만 해석적 방법(Atkinson & Potts, 1977 ; Davis 등, 1980)의 적용이 가능하다. 안정해석은 극한평형법(limit equilibrium method), 한계이론법(limit theorem) 그리고 응력장법(slip-line method)등에 의해 이루어지고 있다. 이중 한계이론법의 상계법이나 극한평형법은 안전에 대한 명확한 물리적 개념을 제공하고 있어 실무에 선호되고 있다. 이

들 해석 방법은 파괴메카니즘의 가정이 필요하므로, 실제파괴형상에 가깝게 메카니즘을 가정하는 것이 매우 중요하다. 일반적으로 파괴메카니즘은 붕괴사례를 분석하거나 원심모형실험으로부터 조사되어 왔다. 특히 터널굴착에 따른 지반거동은 흙의 자중에 의해 지배 되므로 이를 모델링 할 수 있는 원심모형 실험(Kimura & Mair, 1981)이 터널의 파괴메카니즘 연구에 많이 이용되어왔다. 그러나 원심모형실험은 건설과정, 즉 현장의 특수한 조건을 적절히 고려하기 어렵고, 또한 균질한 지반에 대해서만 조사가 가능하다(신중호 등, 2001). 따라서 본 연구에서는 간단한 물리시험장치와 수치해석적 기법을 통해 대규모 지하공간의 굴착전면의 파괴메카니즘을 고찰하고자 한다.

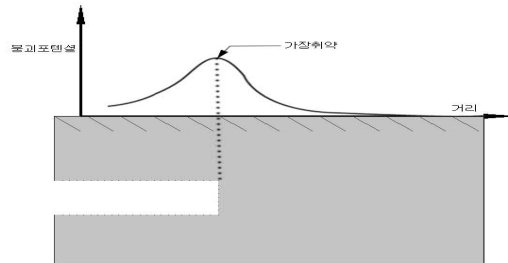


그림 1 터널의 붕괴 포텐셜

2. 붕괴사례 및 기존 실험연구 고찰

붕괴사례 분석(그림2)에 따르면 국내 터널붕괴의 경우 풍화암 층 붕괴사고가 57%로 절반이상으로서, 지반 상태가 매우 불량한 경우 많이 발생함을 알 수 있으며, 연암층 19%, 경암층 14%씩의 빈도를 보인다. 또한, 터널 공사중 붕락이 가장 많이 발생하는 시기는 발파 직후 지보물을 설치하지 않은 무지보 시점이며, 파괴 형상에 따라 벤치부 파괴, 천장부 파괴, 막장부파괴, 전막장 파괴, 연약대파괴, 표토층 파괴등으로 구별할 수 있다. 따라서 터널 굴착시 막장부(heading)에서 붕괴포텐셜이 가장 높고, 특히 풍화도와 같은 사력지반에서 붕괴가 집중적으로 일어나고 있어 이에 대한 파괴메카니즘의 이해와 안정해석기법의 개선이 요구된다.

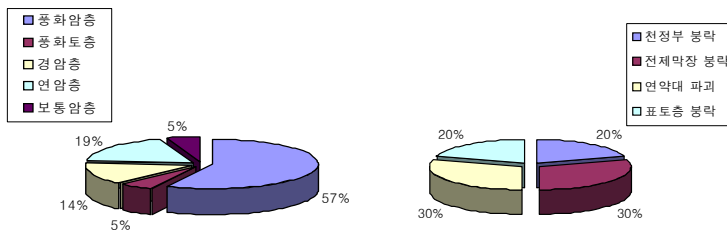


그림 2 터널의 붕괴현황(지층별 및 형태별)

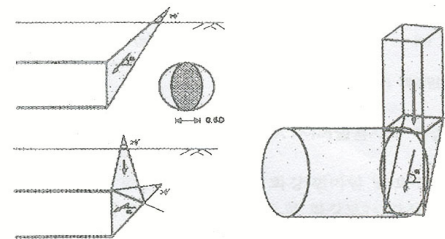


그림 3 배수 파괴 메카니즘

본 연구는 안정해석을 위한 파괴메카니즘을 다루고자하는 것으로, 먼저 기존 연구로부터 제시되었던 파괴메카니즘을 고찰하고자 한다. 대부분의 터널 붕괴가 막장부근에서 일어나므로 터널의 안정의 문제는 2차원 문제보다는 3차원문제로 고찰하는 것이 바람직하지만, 3차원 문제의 기하학적 복잡성과 모델링의 어려움 때문에 2차원 경우로 다루는 경우가 많다. 2차원 메카니즘은 충분히 긴 터널을 구성하는 지반을 동시에 들어낸다는 개념으로서 무지보 2차원 터널이 막장의 지지를 받는 3차원 문제에 비해 보수적인 결과를 준다고 가정하는 것이다. 따라서 대규모 지하공간 개발시 굴착전면(heading)은 평면변형 조건으로 다루는 것이 적절하며, 비교적 보수적인 해를 줄 것으로 판단된다.

사질토와 같은 투수성 지반은 배수가 터널의 굴진 속도와 비교하여 비교적 빨리 일어나므로 이때의 파괴메카니즘을 배수 파괴메카니즘으로 구분 한다. 그림 3은 토사지반터널의 붕괴모드를 정리한 것이다 (Leca & Dormieux, 1990; Anagonstau & Kovari, 1997; Boroere, 1998). 터널 전면에 3차원 형상의 파괴메카니즘을 보이고 있다. 본 연구에서 고찰하고자 하는 파괴모드는 굴착 폭이 넓은 대규모지하공간의 굴착전면으로서 모서리에서 충분히 떨어진 경우 그림3과 같은 붕괴모드를 그대로 적용하기 어렵다.

3. 실내 실험

3.1 개요

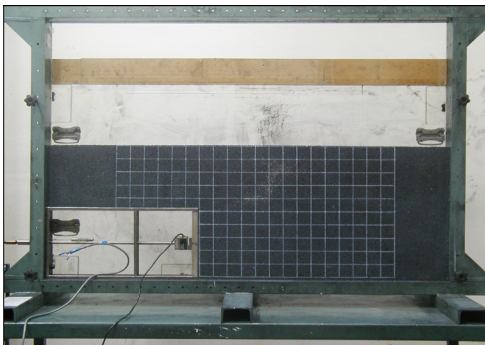
물체의 모델링은 실물의 거동에 대한 해석적 연구를 위하여 수행한다. 실물의 특징을 연구하기 위해선 Full-scale로 재현을 해야 하나 대부분의 물체의 모델들은 예상되는 정보를 빨리 얻고, 실험실에서 보다 쉽게 다룰 수 있기 때문에 원형보다 작게 만들어 진다. 모형실험으로 얻어진 결과의 신뢰성을 얻기 위해서 상사성(similitude)을 고려해야한다. 그러나 본 연구는 지반거동의 재현성이 좋은 탄소봉을 이용하여 단순한 막장 전면의 파괴모드를 찾는 정성적 결과를 목적으로 하므로 규모(길이) 상사율만을 고려하였다.

3.2 시험장치

본 실험에서 사용된 지반대용재료는 거동의 재현성이 우수한 길이가 55mm 이고, 직경이 3mm, 4mm, 6mm인 탄소봉들로서 각각 2:1:1의 비율로 혼합하여 가상 지반을 조성하였다. 이 실험조건은 평면변형조건에 해당되며, 실험에 사용된 탄소봉의 물성치는 표1에 나타나 있다. 모형지반의 내부마찰각을 측정하기 위하여 직접 전단상자를 모형지반의 특성에 적합하도록 제작하여 직접전단시험을 수행하였다. 터널모형 시험 진행 중에 발생하는 모형지반의 변형은 디지털 카메라를 이용하여 일정한 간격으로 촬영하여 관찰하였다. 또한 수동 카메라를 이용하여 지반 변위형태를 장시간 노출시켜 촬영하였다.

표 1 탄소봉의 물성치

Specific gravity	Void ratio	Unit weight(t/m ³)	Friction angle(°)
1.65	0.2	1.38	30



1. 탄소봉시험장치 2. 모형지반 3. 모형터널 4. Load Cell 5. LVDT 6. 변위제어장치

사진 2 탄소봉 시험장치

토사터널 굴착에 따른 막장면 전면의 파괴거동을 모사하기 위해 가로 145cm, 높이 100cm, 폭 10 cm 인 □-형 단면의 2차원 평면변형을 조건의 탄소봉 모형 시험기를 사용하였다. 터널의 모형은 가로 55cm, 높이 25cm, 폭 5.5cm, 두께 1.2cm 의 ‘ㅂ’자 형태의 강재를 사용하여 모형터널을 제작하였다. 막장면은 높이(D) 25cm, 폭 5.5cm, 두께 2cm의 아크릴로 제작하였다. 제작된 모형틀은 탄소봉 시험장치 좌측하단에 고정 시킨 후, 모형 막장면을 변위 제어장치와 연결하여 일정한 속도(1mm/min)로 후퇴시켜 막장면의 굴착dfm 모사하여 막장붕괴를 유도하였다. 일정한 변위 제어를 위해 LVDT(Linear Variable Differential Transformer)를 사용했으며, 막장면의 막장압을 측정하기 위해 Load Cell (중량 20kgf)을 설치하였으며, 컴퓨터에 연결된 UPC 601-U를 사용하여 변위와 막장압을 측정하였다. 사진 1 은 본 실험에서 사용된 탄소봉 시험장치이다.

3.3 실험 계획

본 연구에 이용된 터널의 모형은 폭이 넓은 대단면 터널을 모사한 것으로 모형터널의 높이(D) 25cm

의 2차원 모형으로 제작하였다. 본 실험은 터널의 토피고(H)가 막장면에 미치는 영향을 관찰하기 위하여 토피고를 1.0D, 1.5D, 2.0D로 변화시켜 실험을 수행 하였으며, 일정한 토피고에서 지반이 갖는 경사의 영향을 고려하여 막장면에서 토피고 1.0D를 기준으로 0°, 10°, 20°의 지반경사(α)를 고려한 실험을 수행하였다(표 2 및 그림 4).

표 2 실내모형실험 목록

CASES	토피고(H/D)	지반경사(α)
1.0DA00	1.0	0°
1.5DA00	1.5	0°
2.0DA00	2.0	0°
1.0DA10	1.0	10°
1.0DA20	1.0	20°

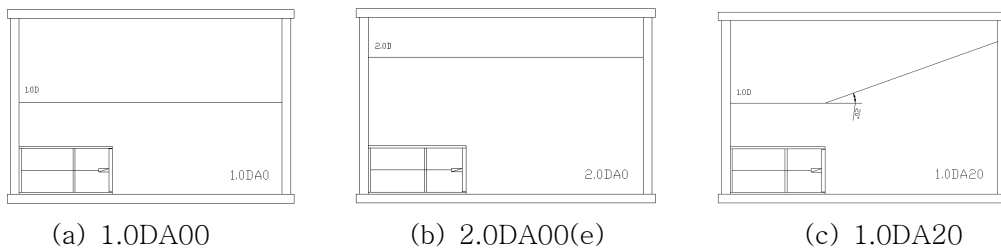


그림 4 지반의 조건

3.4 실험 결과 및 분석

3.4.1 파괴시 막장압

본 시험에서 막장면을 강성체로 가정하여, 일정속도로 막장면을 후퇴시켜 굴착의 효과를 주었다. 막장면에 Load Cell(20kgf)을 설치하여 막장면의 변위동안 최소 압이 관찰되는 시점을 막장전면의 파괴 시작점으로 판단하였다. 지반의 토피고에 따른 파괴시 막장면의 막장압은 붕괴 시작 후 막장면 전체변위(10mm)의 약 40%의 변위 이후에서부터 비교적 일정한 값을 유지한다(그림 5). 막장압의 분포를 보면 토피고 1.0D, 1.5D, 2.0D 경우 약 40% 변위를 전후하여 일정한 값을 보여준다. 막장의 파괴시작은 그 전부터 진행이 되었지만 실제적인 파괴모드의 형성은 40% 변위 이후부터 시작된다고 본다. 40% 변위 이후는 파괴면을 따라 지반의 거동을 나타낸다. 지반이 경사진 경우도 약 40%를 기점으로 이후의 변위에 대한 막장압이 일정한 값을 가진다(그림 6). 그림에서 보면 정지 상태인 초기 응력상태에서는 정지압의 상태에서 막장이 붕괴되면서 주동의 상태로 바뀔 수 있다.

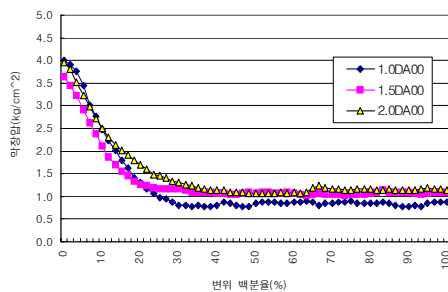


그림 5 토피고에 따른 막장압

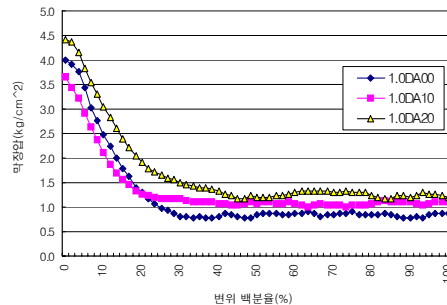


그림 6 지반경사에 따른 막장압

3.4.2 파괴메카니즘분석

시험결과를 토대로 모형지반의 한점에서 파괴시 벡터 변위와 증분량을 분석하고, 사진 촬영을 실시하

여 붕괴된 지반의 파괴메카니즘을 제시 하였다. 사진 촬영은 먼저 디지털 카메라로 한점에 대하여 각 변위 마다 촬영을 하여 벡터를 관찰 하였고, 수동카메라로 장시간 노출시켜 지반의 파괴형태를 촬영하였다.

전형적인 파괴거동(1.0DA00)

그림 7은 파괴면을 따라 파괴가 일어나는 지반의 대표적 결과를 나타낸 것이다. 막장변위가 50%부터는 일정한 방향을 형성하면서 지반이 거동한다. 지반 거동이 일정한 방향을 보이는 시점에서의 벡터의 방향을 나타낸 것으로, 사진 2의 형태와 매우 유사함을 알 수 있다. 사진 2는 수동카메라로 장시간 노출시켜 지반의 흐름을 찍은 것으로 파괴면을 정성적으로 3가지 영역으로 표현할 수 있다. 파괴영역은 벡터의 크기와 방향에 따른 영역화(zoning)와 노출사진의 입자거동을 토대로 구분되었다. 막장면 앞의 썩기영역(I)과 막장천단을 중심으로 회전하며 대수나선 파괴를 일으키는 영역(II)과 수직의 변형을 보이는 영역(III)으로 나타난다. 막장면 앞의 썩기영역 I은 막장면 하부에서 약 $\theta=44^\circ$ 경사로 직선파괴를 일으킨다. 영역II는 썩기영역 I부터 대수나선의 파괴선을 형성한다. 수직 파괴영역 III는 파괴선이 지표까지 이른다. 막장 천단부를 기준으로 파괴의 폭은 $B=0.8D$ 의 크기를 형성하면서 지표까지 붕괴되는 전반 전단파괴를 보이고 있다.

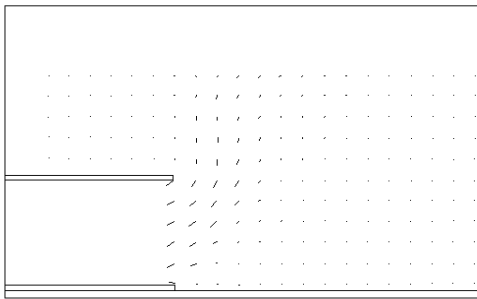


그림 7 파괴시 지반거동(1.0DA00)

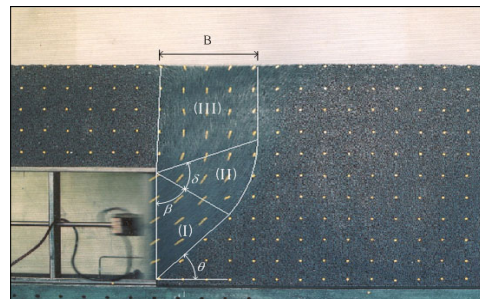


사진 2 1.0DA00 지반의 파괴모드

토포고에 따른 파괴모드

토포고에 따른 지반의 파괴모드를 분석한 결과, 막장앞의 썩기영역 I은 토포고가 증가할수록 크기가 작아짐을 볼 수 있다. 이는 썩기를 형성하는 각 θ 와 β 의 감소로 잘 나타난다. 대수나선 파괴를 일으키는 영역II는 각 δ 가 토포고 증가에 따라 증가를 보인다. 수직 파괴영역 III은 토포고에 증가에 따라 막장 천단부에서의 파괴높이가 감소하는 국부 전단파괴의 경향을 나타내고, 파괴형태도 삼각형 형태를 보인다. 막장 천단부에서 파괴의 폭은 토포고 1.0D와 1.5D에서는 $B=0.8D$ 를 나타내며, 토포고 2.0D에서는 $B=0.9D$ 로 약간의 증가를 보인다(그림 8). 파괴의 높이는 토포고 증가에 따라 감소를 나타내고, 1.0D에서는 실제 1.4D 이상의 파괴높이가 예상되나, 얇은 토포고(1.0D)로 인해 지표까지 파괴되는 전반 전단파괴를 보이고 있다(그림 9). 토포고가 증가할수록 막장면 앞의 썩기영역은 작아지고, 대수나선 파괴영역은 커짐을 보인다. 파괴의 높이가 작아짐은 지반 토포고가 증가할수록 지반이 작용하는 아칭현상의 증가로 판단된다.

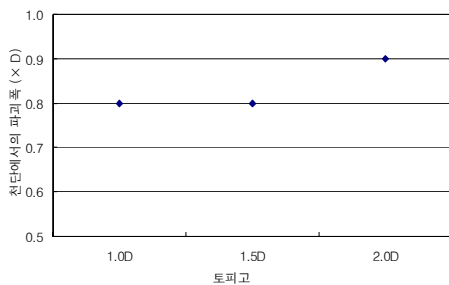


그림 8 토포고에 따른 막장천단에서의 파괴폭

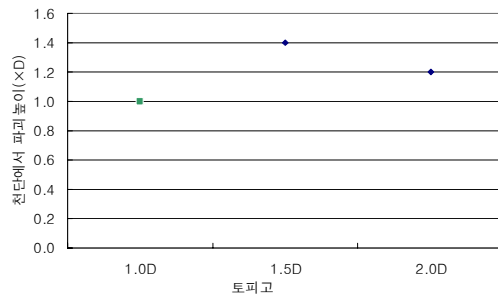
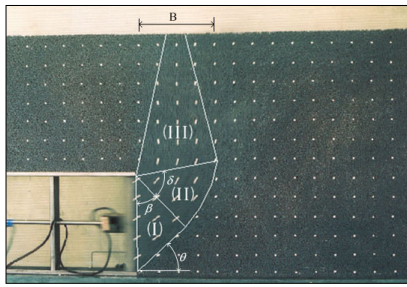


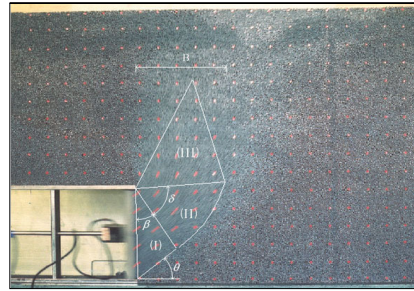
그림 9 토포고에 따른 막장천단에서의 파괴높이

지반경사(α) 따른 파괴모드

지반경사에 따른 파괴모드를 분석한 결과 지반의 경사가 증가 할수록 전체적인 파괴영역은 4개로 구분되어 경사지반을 향해 기울어져 가는 경향을 보였다(사진 4).

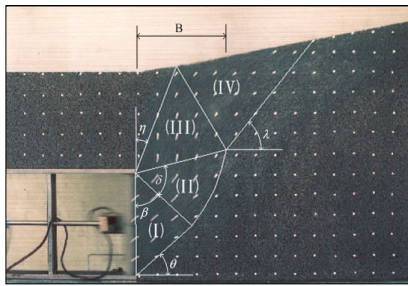


(a) 1.5DA00

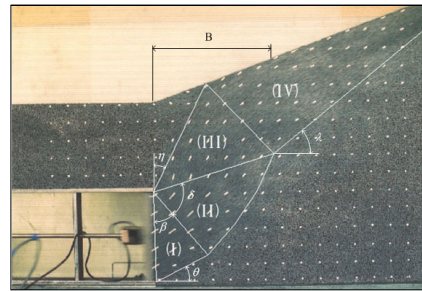


(b) 2.0DA00

사진 3 토피고에 따른 지반의 파괴모드



(a) 1.0DA10



(b) 1.0DA20

사진 4 지반경사에 따른 지반의 파괴모드

지반경사에 따라 파괴영역이 확장되는 이유는 막장 붕괴시 경사지반의 자중으로 인한 편압이 막장면을 향해 발생하기 때문으로 판단된다. 수평지반인 경우($\alpha=0^\circ$) 막장 천단부 위쪽의 영역Ⅲ은 수직 형태의 파괴를 나타내고 있으나, $\alpha=10^\circ$ 에서는 지표에서 파괴폭이 증가하며 파괴영역도 나누어진다. $\alpha=20^\circ$ 에서는 지반 경사부에서는 무한사면 형태의 파괴를 보이고 있어 본 모형시험 영역 밖으로까지 확대되었다. 지반경사 $\alpha=0^\circ$ 에서 수직파괴를 보인 영역 Ⅲ은 경사가 증가할수록 경사지반의 영향을 받아 감소하며, 경사지반에서 사면썰기형태의 영역 Ⅳ를 발생시킨다. 막장앞의 썰기영역 Ⅰ은 경사가 증가할수록 감소하는 경향을 보이고, 지반경가 $\alpha=20^\circ$ 인 경우 각 θ 와 β 값의 감소폭이 크게 나타난다. 반대로 대수나선의 파괴영역Ⅱ의 영역은 상대적으로 확대되어 천단부에서의 파괴폭 B는 지반 경사 증가로 커짐을 알 수 있다(그림 10).

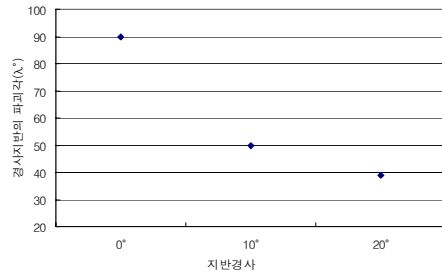
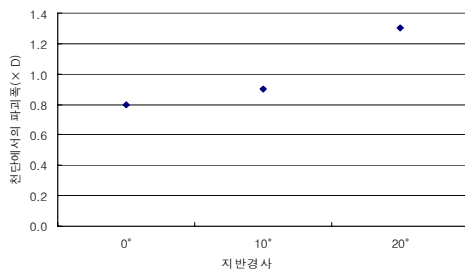


그림 10 지반경사에 따른 막장천단에서의 파괴폭 그림 11 지반경사에 따른 막장하단에서의 파괴각(λ)

지반의 경사가 증가하는 막장의 붕괴에 따른 경사지반의 불안정성이 증가하여 경사지반에서도 파괴영역을 형성함을 보였다. 지반경사의 증가로 수직파괴영역이 경사형태의 두 영역으로 나뉘어 파괴를 일으키고 대수나선 파괴영역 Ⅱ의 경우도 경사지반에서의 영역Ⅳ로 인해 크기가 증가함을 보였다. 상대적으로

상부의 파괴영역 증가로 막장앞에서의 파괴영역 I 은 감소하고, 지반경사 $\alpha=20^\circ$ 에서는 감소폭이 크게 나타난다. 이는 경사지반에서 발생하는 경사파괴영역 IV 의 발생으로 인한 자중증가로 편압이 발생하여 굴착전면 앞의 썩기영역 I 을 누르는 힘의 증가로 판단된다.

4. 수치해석

4.1 수치해석 모델링

본 모형시험은 실제 터널을 축소하여 이루어져 많은 단순화가 수반된다. 터널붕괴는 통상 예측하지 못한 상황에서 발생하므로 복잡한 현장 조건을 모형시험으로 파악하는데 한계가 있다. 따라서 수치해석 방법을 도입하여 모형시험을 수치해석 모델로 유사화하여 파악된 지반의 거동을 모형시험의 결과와 비교함으로써, 보다 복잡한 경계조건을 갖는 실제지반을 향후 수치해석적 방법을 이용하여 파괴모드를 예측 할 수 있다면 많은 도움이 될 것이다. 본 연구에서는 *Visual FEA*를 사용하였다. 본 해석을 위하여 지반은 사각형의 유한 요소망으로 모델링 하였으며, 배수가 양호한 토사를 사용하므로 배수조건을 적용하여 Plane strain 조건으로 해석하였다.

수치해석에 사용된 지반의 물성치는 실내모형실험 재료의 물성치를 사용해야 한다. 그러나 모형지반의 물성값은 지반이 변화함에 따라 면화하므로 실제 모형지반의 물성치를 이용하여 수치 해석한 결과 모형실험에서의 변위와는 상당히 다른 양상을 얻기 위해 역해석기법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 표 5에 해석에 사용한 물성치를 보였다.

표 3 모형지반의 물성과 역해석시 물성

	γ (t/m^3)	ν	ϕ	c	E (kg/cm^2)
모형지반 물성치	1.38	0.33	30°	0	200
역해석 물성치	1.38	0.20	25°	0.01	1000

4.2 수치해석 결과 및 분석

수치해석의 분석은 모형시험에서와 같이 막장면의 변위(10mm)를 100%로 하고, 각 막장의 변위에 따른 지반의 변화를 살펴보았다. 그림 13(a)는 모형지반 1.0DA00인 경우에 대한 수치해석에서 막장의 변위에 따른 누적변위의 변위를 보여 준다. 그림 13(a)에서 보면 막장의 변위가 증가함에 따라 지반이 막장 변위 방향으로 움직임이 나타난다. 누적 변위는 초기 횡방향 변위의 크기를 반영하고 있다, 따라서 실제 80% 변위시 변위는 수직의 형태로 일어남을 알 수 있고, 이는 모형시험에서 얻은 붕괴의 형태와 유사한 형태를 보이고 있다. 80% 변위시 지반이 붕괴를 일으키면서 지표까지 붕괴로 일으키는 전반 전 단 파괴의 형태를 보이고 있다.

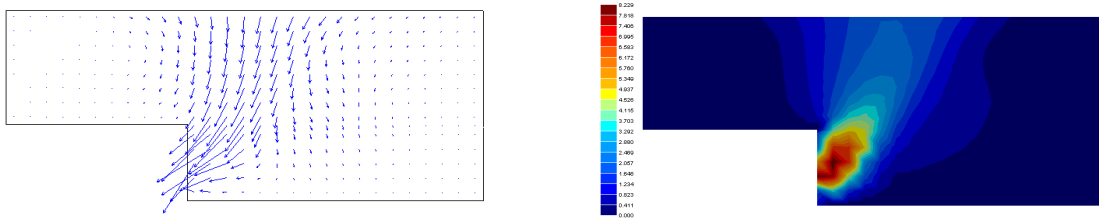


그림 12 2.0DA00의 수치해석 결과(누적변위 및 누적변위 Contour; 100%막장변위, H/D=2.0, $\alpha=0^\circ$)

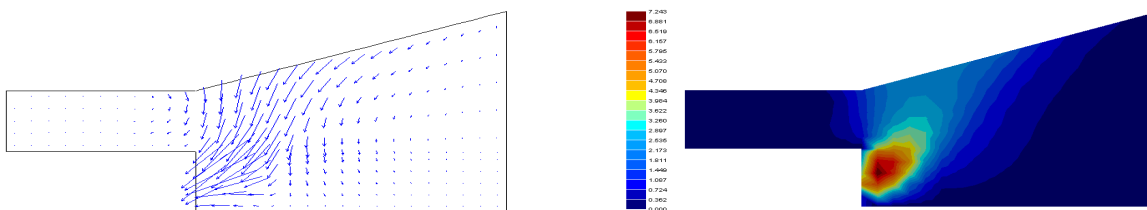


그림 13 1.0DA20의 수치해석 결과(누적변위 및 누적변위 Contour; 100%막장변위, H/D=1.0, $\alpha=20^\circ$)

지반의 변위는 막장면에서 가장 큰 변위가 나타나야 하나 벡터의 크기를 보면 막장면 뒤쪽의 지반보다 상대적으로 작은 변위가 발생하였다. 이는 막장면 변위제어를 했기 때문에 지반보다 작은 변위가 발생함을 알 수 있다. 이는 그림 13(b)의 변위Contour 에서도 뚜렷하게 나타나고 있다. 그림 13(b)에서는 초기 막장의 변위가 막장 전면에서 상대적으로 발생하기 시작하여 변위가 증가할수록 지표까지 확대됨을 볼 수 있다. 변위 100%에서는 변위의 영역이 거의 수직인 형태를 보이고 있다. 이때의 변위Contour는 실제 모형실험에서의 파괴면과 거의 유사한 형태를 보이고, 간격이 좁게 나타나는 곳을 따라 지반의 파괴선을 추정할 수 가 있다. 파괴면의 방향을 추정하기 위하여 Slip Line과 주응력(주변형률)과의 관계를 고찰한 바, 이는 모형실험결과와 대체로 일치함을 보였다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 점착력이 없는 사질토 지반에서 지하공간 굴착 시 토피(1.0D, 1.5D, 2.0D)의 높이와 지반의 경사(0° , 10° , 20°)에 따른 파괴모드를 확인하기 위하여 실내 모형실험을 실시하였고, 수치해석과 연속 사진촬영을 통해 지반의 파괴모드를 비교 분석하였다. 이러한 과정을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1). 기존의 붕괴사례에서 나타난 파괴모드를 모형시험과 수치해석을 통해 예측 가능성을 확인하였다.
- 2). 지반의 토피고가 증가할수록 지반은 파괴영역이 감소하여 국부 전단 파괴의 형태를 보였다. 지반의 높이가 증가함에 따라 지반내 아칭작용으로 파괴영역이 확대되지 못하고 국부적 파괴의 형태를 보이는 것으로 판단된다.
- 3). 지반경사가 증가할수록 경사지반의 사면썰기 증가로 편압이 발생하여 지반의 파괴영역은 사면 상부로 확대되는 형태를 보인다. 경사지에서 썰기는 경사각이 증가할수록 무한사면의 파괴를 나타낸다. 또한 사면에서의 편압으로 인한 막장 앞의 썰기는 감소하고, 대체적으로 파괴영역은 증가한다.
- 4). 토사지반의 막장에서의 파괴모드의 형상은 토피고 보다는 지반의 경사의 영향이 두드러지게 나타났다. 이는 막장이 경사지에서 작용하는 편압의 영향 때문인 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 마상준, 서경원(1999) “NATN개념 터널에서의 붕락패턴에 관한 국내외 사고사례 조사 및 분석”, 터널기술, Vol. 1, No. 2, **대한터널협회**
2. 신종호, 이인근(2001) 화강토지반내 복합막장터널의 파괴메카니즘 연구, **한국지반공학피논문집**, Vol. 17, No. 4, pp. 317-239.
3. Anagnostou, G. and Kovari, K.(1994) The Face Stability of Slurry-shield-driven Tunnels, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 9, No. 2, pp. 165-174.
3. Davis E. H., Gunn, M. J., Mair, R. J. and Seneviratne, H. N.(1980) The Stability of Shallow Tunnels and Underground Openings in Cohesive Material, Geotechnique, Vol. 30, No. 4, pp. 397-416.
5. Kimura, T. and Mair, R.J.(1981). Centrifugal testing of model tunnels in soft clay". Proc. the 10th int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol.1, pp.319-322.
6. Leca, E. and Dormieux, L.(1990) Upper and Lower Bound Solutions for the Face Stability of Shallow Circular Tunnels in Frictional Material, Geotechnique, Vol. 40, No. 4, pp. 581-606.
7. Peck, R. B.(1969) Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground, Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico, Vol. 3, pp. 225-290.