

터널 굴진시의 3차원 지반거동의 2차원적 해석법 고찰 A Study for 2-Dimensional Analysis Technique for 3-Dimensional Ground Behaviour Due to Tunneling

김 교 원 (Kim, Gyo-Won)
이 현 범 (Lee, Hyun-Bum)

시설안전기술공단 연구위원
(주) 삼안 건설기술공사 이사

요약 / ABSTRACT

터널이 굴진될 때 주변지반은 3차원적으로 거동하게 되나 설계단계에서의 해석은 일반적으로 2차원적으로 수행하고 있다. 2차원적인 터널해석은 응력분배법 또는 강성 변화법에 의하여 3차원적인 터널 주변 거동을 의사화하게 되는데, 본 연구는 3차원 해석을 실시하여 터널굴진에 따른 다양한 조건하에서의 정규화된 지반 변위곡선을 구하고 이 곡선과 유사한 곡선이 유도되도록 시행착오법에 의하여 2차원 해석을 실시하므로써 3차원 해석과 근사한 변위곡선을 가지도록 막장거리별 응력분배비율을 결정하였다. 따라서, 시간과 노력이 많이 소요되는 3차원 해석없이 도 적절한 응력분배비율을 적용하는 경우 2차원 해석으로 터널굴진시의 3차원적인 지반거동을 평가할 수 있게 되었다.

In general, a three dimensional ground behaviour during tunneling is simulated by using two dimensional analysis programs in consideration of a certain ratio of stress or strain distribution to take into account the effect of construction stage by a tunnel face advance. A series of three dimensional analyses was conducted to deduce a normalized displacement (surface or crown settlement) curve in longitudinal direction, of which curve is reflecting an effect of a tunnel advance under a various condition. And, by using try and error technique, two dimensional analyses were carried out to determine an optimum stress distribution ratio for a settlement curve coincided with the curve obtained by three dimensional analyses. Finally, monitored results from a subway tunnel were compared with two dimensional analysis results for varification of the deduced stress distribution ratio as well as the two dimensional analysis program employed in this study.

1. 서 론

산업화에 따른 도시인구의 집중과 함께 최근의 극심한 도로 혼잡은 노면 교통 및 수송효율을 지속적으로 저하시키고 환경공해를 유발시키고 있다. 이러한 상황에서 대도시의 교통, 수송수단의 특성인 대량성, 안정성, 신속성을 고려할 때 수송수단의 지하화, 즉 지하철도 및 지하철도의 요구가 증대되었으며 이러한 대량 지하교통수단의 개발은 세계적으로 공통적인 경향이 되고 있다. 또한, Utility Line의 공동구화, 방사성 폐기물의 영구저장용이나 대규모 유류비축기지용의 심층 대규모 지하공동(Cavern) 등의 건설도 활발히 진행되고 있다. 이러한 제반 산업시설의 지하화로 인하여 지하구조물의 설계 및 시공부분에서 터널의 거동을 보다 합리적이고 현실적으로 해석해야 할 필요성이 절실하게 요구되고 있다. 터널의 해석 및 설계는 1960년대까지 주로 경험적인 자료에 의존해 왔으나, 1970년대에 이르러 지하구조물의 응력-변형해석 및 안정성 검토에 유한요소법 등 수치해석 기법이 적용되었고, 지하공동의 수치해석과 더불어 시공시 나타나는 실제의 변형 및 응력을 실측함과 동시에 이를 효율적으로 설계 및 재 설계에 반영하고 있다.

터널에 관련된 문제를 해석하는데 널리 이용되고 있는 일반적인 수치해석 기법은 굴착대상 지반을 연속체로 가정한 접근방법과 불연속체로 가정한 접근방법, 또는 이들 방법들을 혼합한 방법으로 대별할 수 있는데 다음과 같은 기법들이 보편적으로 적용되고 있다.

- 연속체 모델 : Finite Element Method (FEM)
Finite Difference Method (FDM)
Boundary Element Method (BEM)
- 불연속체 모델 : Discrete Element Method (DEM)
- 혼합모델 : Hybrid Model (FEM + DEM 등)

이들 해석기법중 가장 널리 이용하고 있는 방법은 연속체 역학 및 미소변형 이론을 전제로 한 유한요소법이나, 1991년 11월 한국지반공학회에서 터널설계 및 시공관리를 위하여 실시한 주어진 조건하에서 수행된 2차원 터널해석은 사용 프로그램에

따라서 해석결과에 큰 차이가 있었다(Kim 등, 1991). 이러한 해석결과 차이는 터널굴착에 의한 3차원 지반거동을 2차원으로 모형화 하는 방법의 차이에 기인하는 것으로 나타났다(Lee, 1993). 따라서 본 연구에서는 Ward(1978) 등의 연구 결과에 의해 규명된 터널 굴착시 발생하는 3차원적 지반거동을 실제 3차원 유한요소 해석을 수행함으로써, 2차원 유한요소해석으로도 실제 터널의 3차원적 거동을 합리적으로 모형화 할 수 있는 방법을 개발하여 터널 설계에 보다 실용적이고 합리적인 해석방법을 제시하고자 하였다.

2. 2차원 모형화를 위한 3차원 유한요소해석

터널 구조물은 굴착 시공 중 막장 근처에서는 Figure 1과 같은 응력전이 현상이 발생하여 응력재배치가 일어난다. 즉, 막장으로 부터 떨어진 거리와 관계없이 터널축과 직각방향으로 하중전이에 의한 아칭(arching) 현상이 발생하고 또한 여기에 추가하여 터널축과 평행한 아칭현상도 발생한다(Sinha, 1989). 이러한 두 개 이상의 아칭현상은 지반응력을 3차원으로 분산시켜 터널 주변과 터널 막장 전면에서도 변위가 발생하게 되는 원인이 된다.

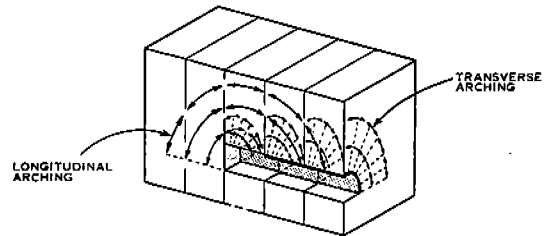


Figure 1. Three dimensional ground behaviour around tunnel (Sinha, 1989).

따라서, 터널해석은 막장진행에 의한(막장까지 거리에 의한) 지반의 3차원 거동효과를 나타낼 수 있는 해석방법이 요구되며 이러한 3차원 거동영향을 고려하기 위해서는 3차원 해석기법에 의해서만 가능하다. 따라서 3차원적인 구조거동을 2차원으로 해석하기 위해서 특정 터널에 대하여 3차원 해석을 실시하고 그 결과로부터 막장거리에 따라 2차원 해석에 적용되어야 할 응력분배를 또는 강성 변화

터널 굴진시의 3차원 지반거동의 2차원적 해석법 고찰

을을 도출할 수 있다(Vassilev and Hristov, 1988). 3차원 유한요소해석에는 GEOKST 프로그램을 사용하였다.

하였다.

Table 1. Input parameters for analyses.

| 구분 | 변형계수 (E, x10 ¹⁰ t/m ²) | 포아송비 (ν) | 점착력 (c, t/m ²) | 내부마찰각 (φ, Degree) | 단층위량 (γ, t/m ³) | |
|-----|---|----------|----------------------------|-------------------|-----------------------------|-----|
| 지반 | 풍화토 | 8.0 | 0.33 | 10 | 2.0 | |
| | 풍화암 | 10.0 | 0.30 | 10 | 3.3 | |
| | 연암 | 80.0 | 0.28 | 15 | 2.4 | |
| | 경암 | 300.0 | 0.25 | 25 | 2.6 | |
| 지보재 | Shotcrete | 100.0 | 0.20 | 500 | - | 2.4 |

가. 해석조건

해석에 사용된 유한요소망은 Figure 2와 같으며 대상지반의 특성치는 Table 1에 정리하였고 해석결과에 영향을 미치는 초기 축압계수는 입력되는 포아송비에 의하여 결정된다. 해석 Case는 Table 2에 정리한 바와 같이 총 16개의 조건을 대상으로

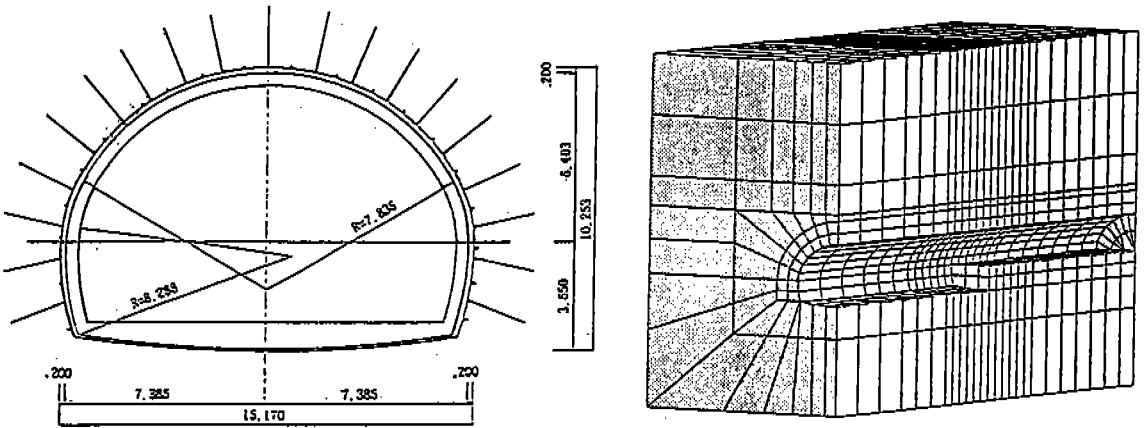


Figure 2. Tunnel section and 3-dimensional analysis model.

Table 2. Analysis cases for different cutting methods and layers.

| 구분 | 해석 Case | 단면 | 지반구성조건 | | |
|-----------|--------------------|---------------|---------|---------------------|---------------------|
| 전단면 굴착 | 단일지층 | Case 1 | 마제형 | 경암 | |
| | | Case 2 | 반원형 | | |
| | | Case 3 | 마제형 | 연암 | |
| | | Case 4 | 마제형 | | |
| | | Case 5 | 마제형 | 풍화암 | |
| | | Case 6 | 반원형 | | |
| | 복합지층 | Case 7 | 마제형 | 경암 - 연암 - 풍화암 - 풍화토 | |
| | | Case 8 | 반원형 | | |
| | | Case 9 | 마제형 | | |
| 상·하 분할 굴착 | 상반 선진도갱 | Case 10 | 마제형 | 경암 | |
| | | Case 11 | 마제형 | | |
| | | Case 12 | 마제형 | 복합지층(경암-연암-풍화암-풍화토) | |
| | Bench Cut (굴착이격거리) | L=1D (15m) | Case 13 | 마제형 | 풍화토 |
| | | | Case 14 | 마제형 | 복합지층(경암-연암-풍화암-풍화토) |
| | | L=0.5D (7.5m) | Case 15 | 마제형 | 풍화토 |
| | | | Case 16 | 마제형 | 복합지층(경암-연암-풍화암-풍화토) |

나. 해석결과

굴착방법 및 지반구성 조건별 3차원 유한요소 해석 결과로 얻어진 최대 터널 천단침하량으로 기준 막장면($\pm 0m$)에서의 굴착 거리별 천단침하면

위량을 정규화시켜서 비교한 결과를 Table 3에서 Table 8에 정리하였다. 여기서 NDR은 Normalized Displacement Ratio의 약칭이다.

Table 3. Crown settlement and settlement ratio for full face cut.

| 지반구성조건 | | 단면 | $U_{x=0}$ (mm) | U_{max} (mm) | NDR(%) | 비고 |
|--------|---------------|-----|----------------|----------------|--------|--------|
| 단일지층 | 경암 | 마제형 | 1.14 | 3.96 | 28.7 | CASE 1 |
| | | 반원형 | 0.991 | 3.71 | 26.7 | CASE 2 |
| | 연암 | 마제형 | 3.83 | 12.91 | 29.6 | CASE 3 |
| | | 풍화암 | 28.20 | 88.97 | 31.7 | CASE 4 |
| | 풍화토 | 마제형 | 35.53 | 110.50 | 32.6 | CASE 5 |
| | | 반원형 | 30.55 | 110.29 | 27.7 | CASE 6 |
| 복합지층 | 경암-연암-풍화암-풍화토 | 마제형 | 1.75 | 6.81 | 25.6 | CASE 7 |
| | | 반원형 | 1.53 | 6.45 | 23.7 | CASE 8 |
| | 연암-풍화암-풍화토 | 마제형 | 4.86 | 17.17 | 28.3 | CASE 9 |

Table 4. Crown settlement and settlement ratio for top heading cut.

| 지반조건 | 단면 | 굴착형태 | U_x (mm) | U_{max} (mm) | NDR(%) | 비고 |
|------|-----|---------------------|------------|----------------|--------|---------|
| 경암 | 마제형 | 상반($U_{x=0}$) | 0.991 | 3.98 | 24.9 | CASE 10 |
| | | 상반통과($U_{x=3D}$) | 3.65 | | 91.6 | |
| | | 하반($U_{x=0}$) | 3.78 | | 94.8 | |
| | | 하반 영향치($U_{x=0}$) | 0.13 | 0.26 | 48.1 | |

Table 5. Crown settlement and settlement ratio for bench cut (Bench length, $L = 1D$).

| 지반조건 | $U_{x=0}$ (mm) | U_{max} (mm) | NDR(%) | 비고 |
|------|----------------|----------------|--------|---------|
| 풍화토 | 31.64 | 112.96 | 28.0 | CASE 13 |
| 복합지층 | 1.55 | 6.90 | 22.5 | CASE 14 |

Table 6. Crown settlement and settlement ratio for bench cut (Bench length, $L = 0.5D$).

| 지반조건 | $U_{x=0}$ (mm) | U_{max} (mm) | NDR(%) | 비고 |
|------|----------------|----------------|--------|---------|
| 풍화토 | 31.25 | 111.39 | 28.1 | CASE 15 |
| 복합지층 | 1.57 | 6.87 | 22.9 | CASE 16 |

Table 7. Crown settlement and settlement ratio for different methods in multi-layers.

| 굴착 구분 | $U_{x=0}$ (mm) | U_{max} (mm) | NDR(%) | 비 고 |
|--------------|----------------|----------------|--------|---------|
| 전 단 면 | 1.75 | 6.81 | 25.6 | CASE 7 |
| Bench Cut | L=0.5D | 6.87 | 22.9 | CASE 16 |
| | L=1D | 6.90 | 22.5 | CASE 14 |
| 상반 선진도갱 | 1.53 | 6.92 | 22.1 | CASE 12 |

Table 8. Crown settlement and settlement ratio for different methods in residual soil.

| 굴착 구분 | $U_{x=0}$ (mm) | U_{max} (mm) | NDR(%) | 비 고 |
|--------------|----------------|----------------|--------|---------|
| 전 단 면 | 39.53 | 110.50 | 32.6 | CASE 9 |
| Bench Cut | L=0.5D | 111.39 | 28.1 | CASE 15 |
| | L=1D | 112.96 | 28.0 | CASE 13 |
| 상반 선진도갱 | 30.55 | 116.18 | 26.3 | CASE 11 |

3. 침하변위 특성곡선

국내 지하철의 유치선 중 특정단면에 대한 굴착 방법 및 지반특성치를 변화시켜 3차원적으로 해석

한 결과, 막장진행에 따른 침하변위 형태는 Figure 3 및 Figure 4와 같이 터널단면 형상이나 지반조건에 의해서 크게 영향을 받지 않고 일정한 침하곡선 형태를 보여주고 있어서, 막장위치별 침하변위 비

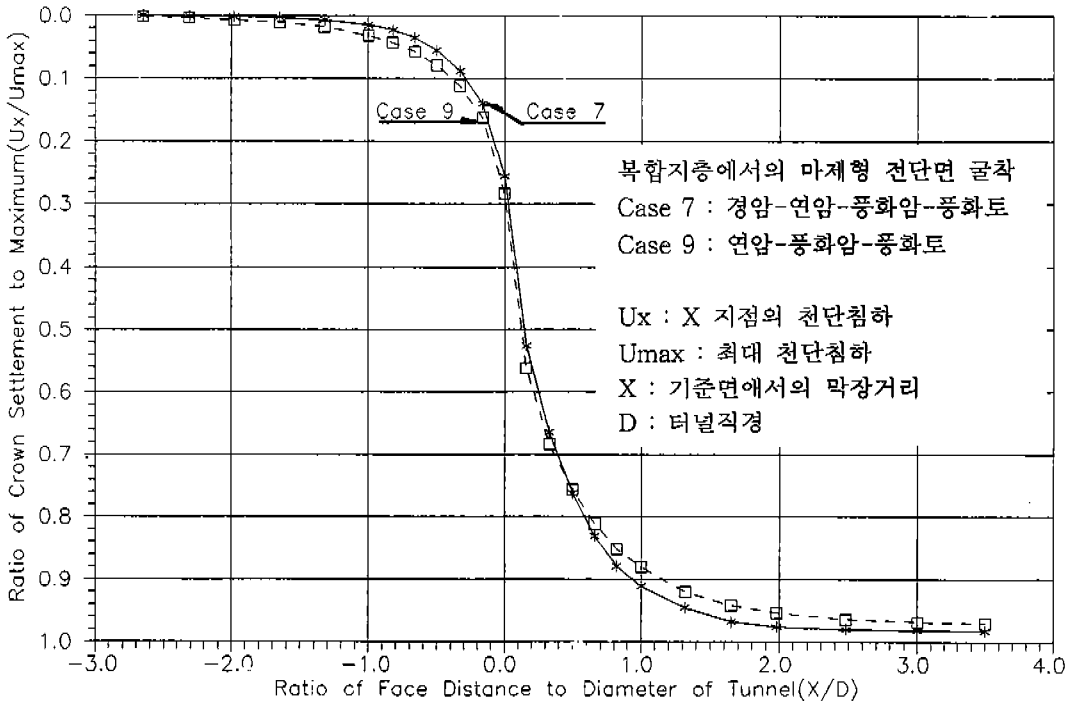


Figure 3. Normalized settlement curves in longitudinal direction for cases 7 and 9.

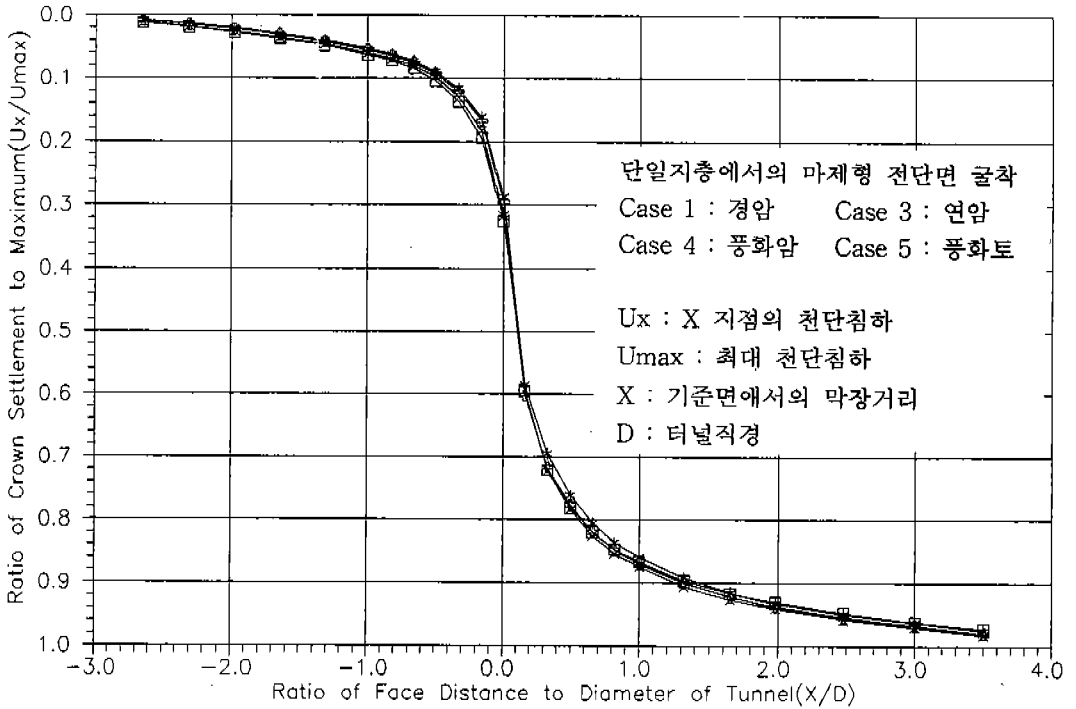


Figure 4. Normalized settlement curves in longitudinal direction for cases 1, 3, 4 and 5.

을(NDR)을 2차원 해석에 적용하면, 터널 굴착에 의한 3차원 거동을 2차원적으로 해석하기 위한 모형화가 가능한 것으로 나타났다.

4. 침하변위비율을 고려한 2차원 해석

3차원 해석에 사용된 동일 단면 및 지반조건으로 2차원 해석을 시행하여 막장 진행거리에 따른 동일 침하량에서 3차원 해석시의 침하변위비율(NDR)과 2차원 해석에서의 응력해방비율을 비교한 결과는 Figure 5와 같이 상당히 높은 정도의 상관관계를 보여주고 있다.

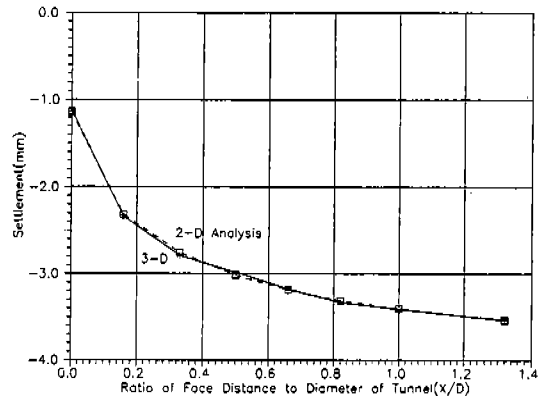


Figure 5. Comparison of two and three dimensional analyses results for hard rock.

5. 계측결과에 따른 지반거동 분석

Figure 6은 서울지하철 시공시의 계측사례로서 지표침하 초기계측은 막장 통과지점의 50m 전방에서부터 개시되었다. 침하는 계측지점의 약 3D 거리

전방에서부터 발생되고 막장이 계측지점을 통과할 때에 침하량이 증가하고 침하 기울기가 급격히 변화됨을 보여주고 있다. 또한, 굴착이 정지된 상태에서는 침하량의 증가가 거의 없어서 침하는 막장의 진행에 의하여 주로 발생됨을 보여주고 있다. 따라

터널 굴진시의 3차원 지반거동의 2차원적 해석법 고찰

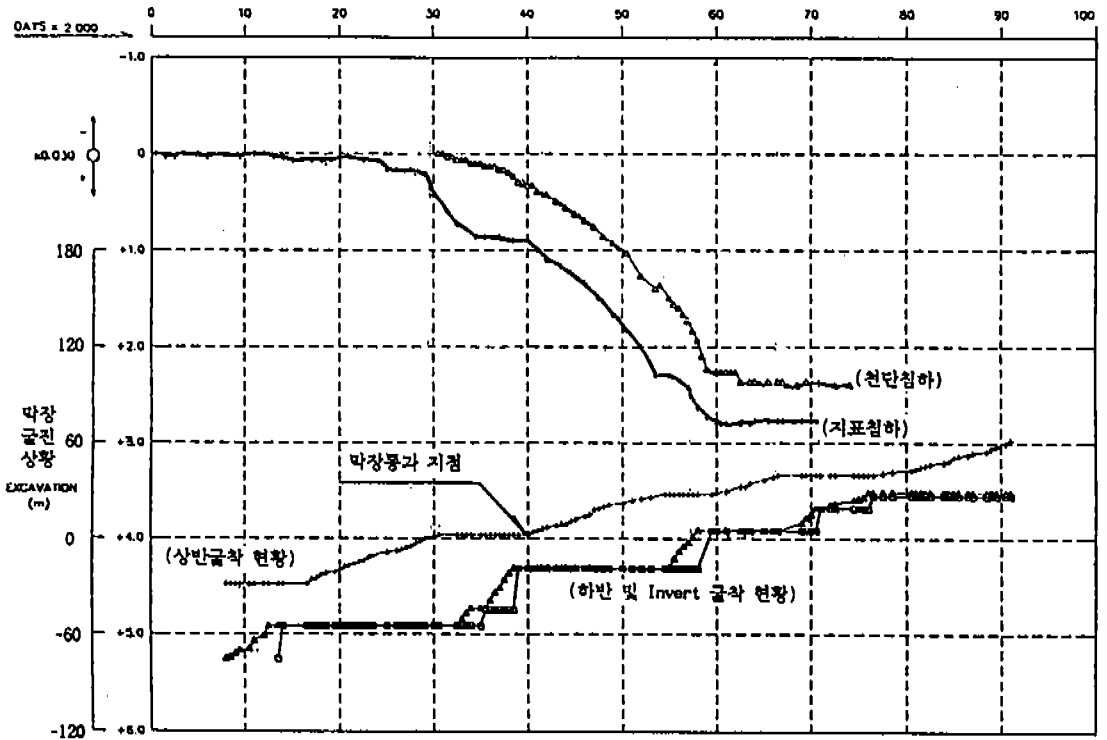


Figure 6. Example of settlement measured at ground surface and tunnel crown.

서 터널 굴착에 의한 지반거동은 3차원 아칭효과에 의해서 이루어 지고 있음을 보여준다. 또한 막장면 통과시의 지표침하량은 전체 발생된 침하량의 약 30% 정도로 나타나며 계속지점을 통과한 후 약 3D 거리가 되면 침하가 최종치에 수렴되고 있어 3차원 유한요소해석 결과와 잘 일치하고 있음을 보여주고 있다.

6. 응력해방비율

터널 굴착에 의한 3차원 거동효과를 고려한 2차원 해석시에 일반적으로 굴착면의 응력해방비율을 적용하는 응력분배법과 굴착으로 제거될 부분의 강성감소비율을 적용하는 강성 변화법이 널리 적용된다. 본 연구 결과로 볼 때 3차원 효과를 적절하게 의사화 하기 위한 2차원 해석시 굴착면의 응력해방비율 또는 강성 감소비율을 막장 진행거리에 따라 Table 7와 같이 적용할 수가 있을 것으로 판단된

다.

Table 7. Stress distribution ratio for optimum two dimensional analysis.

| 굴 착 진행거리 | 응력 분 배 율 | | 비 고 |
|-------------|------------|-----------------|------------|
| | 암 반 지 반 | 풍 화 토 지 반 이하 | |
| 막 장 면 | 25 % | 30 % | 초기해방응력 비율 |
| 막 장 통 과 | 55 % | 60 % | 초기해방응력 비율 |
| L = 0.5D | 75 % | 80 % | 초기해방응력 비율 |
| L = 1D | 90 % | 90 % | 초기해방응력 비율 |
| L = 1.5D | 95 % | 95 % | 초기해방응력 비율 |
| L = 2D | 98 % | 98 % | 초기해방응력 비율 |
| L = 3D이상 | 100 % | 100 % | 평면변형을 조건상태 |

6. 결 론

터널 막장면의 접근 및 진행 등 실제 터널시공 상황을 모형화 할 수 있는 2차원 유한요소 해석기법을 개발하고자 3차원 유한요소 해석을 실시하였으며, 도출된 해석결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 초기굴착 막장면에서의 침하변위비율(NDR)은 굴착 대상지반이 양호하고, 벤치장이 길어질수록 감소되며, 평균적으로 암반층에서 25%, 풍화토 지반에서 30% 정도로 나타났다.
- 2) 굴착면이 기준 막장면에서 0.5D 거리를 진행하면 침하는 전체 침하량의 75~80% 정도 발생하고, 1D 정도 진행시 90%, 1.5D 정도 진행시 95%, 3D 이상 진행하면 거의 100%의 침하가 발생되어 평면 변형을 조건상태가 되는 것으로 판단된다.
- 3) 상반 선진도갱에 의한 굴착일 경우에는 상반 통과에 의하여 발생하는 변위량은 최종 변위량의 90% 이상이고 하반굴착에 의한 추가 변위량은 전체 변위의 약 10% 정도가 되는 것으로 나타났다.
- 4) 동일 지반조건에서 전단면 굴착시의 최대 침하량이 분할굴착시 보다 작은 것으로 나타났다. 즉, 분할굴착은 응력의 재분배를 반복하게 되어 소성변형과 함께 침하량이 증가됨을 보여주고 있어 주변변위를 최소화하기 위하여서는 전단면 굴착이 유리함을 알 수 있다. 그러나, 전단면 굴착은 반드시 굴착시의 막장자립이 가능할 때 적용할 수 있을 것이다.

- 3) Ward W.H., 1978, Ground Supports for tunnels in weak rocks, Geotechnique vol. 28, no.2., 133-171p.
- 4) 김 교원, 엄 기영, 이 재성, 1991, 유한요소법에 의한 터널해석(사례문제 2), 지반공학에서의 컴퓨터 활용, '91년도 추계학술발표회 논문집, 사단법인 한국지반공학회, 108-122p.
- 5) 이 현범, 1993, 터널굴진에 의한 3차원 지반거동의 2차원적 해석방법, 석사학위논문, 한국과학기술원 토목공학과, 27-112p.

김 교 원
 경기도 안양시 동안구 관양동 1588-9
 시설안전기술공단
 431-062
 TEL : 0343) 80-3192
 FAX : 0343) 80-3216

이 현 범
 경기도 과천시 별양동 1-20
 삼안전설기술공사
 427-040
 TEL : 02) 504-2524
 FAX : 02) 503-5277

참 고 문 헌

- 1) Sinha, R.S., 1989, Underground Structures Design and Instrumentation, Elsevier, 119p.
- 2) Vassilev, V.H. & Hristov, T.N., 1988, Influence of the Heading Face and a Two-Dimensional Calculation Model of Tunnel Linings, Numerical methods in Geomechanics, Innsbruck, Swoboda(ed.), 1,527-1,532p.