터널과 지하공간, 한국암반공학회지
제14권 제6호, 2004년 12월, pp. 440~449

TUNNEL & UNDERGROUND SPACE, Vol. 14, No. 6, 2004, pp. 440-449
Journal of Korean Society for Rock Mechanics

3차원 수치해석을 이용한 터널막장 전방 지반 상태의 예측

박연준[1]*, 유광호[1], 송한찬[2], 김기선[3], 이대혁[4]

The Prediction of Ground Condition ahead of the Tunnel Face using 3-Dimensional Numerical Analysis

Yeon-Jun Park, Kwang-Ho You, Han-Chan Song, Ki-Sun Kim and Dae-Hyuck Lee

Abstract Rock mass includes natural discontinuities such as joints and faults during its formation. Discontinuities are also referred as planes of weakness because of their weak mechanical characteristics. In the design of underground structures, it is necessary to consider the properties of discontinuities to insure the stability. During the excavation of a tunnel, these discontinuities have to be identified as early as possible so that proper change in excavation method or support design can be made accordingly. The excavation of the tunnel in a stable rock mass causes a 3-dimensional arching effect around the excavation face. It was revealed by previous studies that the existence of a weak zone or a fault zone ahead of tunnel face induces a typical displacement tendency of convergence. For better understanding of the meaning of influence/trend lines of various displacement components, three-dimensional numerical analyses were conducted while varying deformation moduli, thicknesses and orientations of discontinuities. Numerical results showed that the changes in influence/trend lines of various displacement components were very similar to those by measurements. The discrepancies from the expected values were dependent on the physical properties, thicknesses and orientations of discontinuities.

KeyWords Arching Effect, Tunnel, Face, Influence Line, Trend Line, Ground Condition

초 록 암반은 지각을 형성하는 암석의 집합체로서 지질학적인 생성 과정에서 단층, 절리 등의 역학적 불연속면을 포함하고 있다. 이러한 불연속면은 구조상 매우 취약하므로 지하 암반구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 불연속면의 특성을 고려한 설계가 필수적이며, NATM터널 시공 시에는 이러한 불연속면을 가능한 빨리 확인하여 굴착공법 및 지보체계의 변경이 조속히 이루어져야 한다. 지하 암반 중에 터널을 굴착하게 되면, 터널 막장면을 포함한 무지보 굴착면 주위에 발생하는 3차원적 응력 전이 현상으로 인하여 막장 전방에 연약대가 존재하거나 파쇄대가 존재하는 경우에 터널의 내공 변위가 특정한 경향을 나타내는 것이 기존 연구 결과로 알려져 있다. 막장 전방의 불연속면 상태에 따른 내공변위 경향을 알아보기 위하여 막장 전방에 존재하는 불연속면의 변형계수, 두께, 방향성 등을 변화시켜가며 3차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석 결과에서 다양한 변위성분의 영향선과 경향선의 변화가 실제 측정값들과 비슷하다는 것을 알 수 있었으며 불연속면의 물성, 두께, 방향성에 따라 값의 변화 정도가 달라지는 것으로 나타났다.

핵심어 응력 전이 현상, 터널, 막장, 영향선, 경향선, 지반 상태

1. 서 론

지하 암반은 많은 불연속면을 포함하고 있으며, 지각 운동으로 인하여 불규칙한 초기 지압을 받고 있다. 또한, 지하 암반에 공동이 굴착되면 응력의 재배치가 일어나는데, 이러한 응력의 재배치 현상은 터널의 안정성 확보에 매우 중요하게 작용한다. 그러나 터널 공사 시 막장 전방에 연약대나 지하공동이 존재하게 되면 연약대나 지하공동으로의 응력전이가 충분히 이루어지지 않아 막장면과 연약대 사이에 응력집중 발생하므로, 막장 전방의 연약대나 지하공동을 사전에 파악하지 못하면 보통의 지반에서는 경험해보지 못한 터널의 거동 변화로 인해 많은 비용과 시간을 투자하게 되는 난국에 당면하게 될 뿐만 아니라, 터널이나 지하공간

[1] 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수
[2] 학생회원, 수원대학교 토목공학과 석사과정
[3] 정회원, 수원대학교 토목공학과 박사과정, 동흥개발 대표이사
[4] 정회원, SK건설 GeoTask팀 부장
*교신저자(Corresponding Author): yjpark@suwon.ac.kr
접수일: 2004년 12월 20일
심사 완료일: 2004년 12월 21일

의 붕괴나 붕락을 초래할 수도 있다.

이러한 터널 시공 시 문제점은 최근 3차원 계측 기술의 발달과 다양한 수치해석적 연구를 통해 많은 부분 해결이 되고 있지만, 막장 전방 연약대의 발달 특성을 정량적으로 예측할 수 있는 다양한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구는 이러한 문제점 해결의 일환으로 3차원 수치해석을 통해 터널 막장 전방에 연약대가 존재하는 경우 이의 역학적 및 기하학적 특성에 따른 다양한 내공변위 거동변화를 분석하여 연약대의 특성에 따른 내공변위 거동을 파악하는데 있다. 이를 위하여 연약대의 변형성, 규모 및 방향성의 변화를 주어 무지보 탄성 비균질 암반에 대한 내공변위의 변화에 대해 해석을 수행하였다.

2. 아칭효과

터널을 굴착하면 굴착부 주위가 자유면이 되면서, 굴착 경계부를 따라 변형이 발생한다. 이러한 변형을 일으키는 힘을 굴착 상당력 또는 해방력이라 하며, 이는 굴착부에 존재했던 지반 초기 응력에 의하여 발생한다.

터널이 완성되었을 때 굴착 상당력은 지반과 지보재로 이루어지는 복합 구조계의 횡 방향 아치에 의해서만 전적으로 지지된다. 그러나 시공 중에 있는 터널의 막장 주위에서는, 막장 전면의 미 굴착부의 지지효과로 인하여 횡 방향 아치 뿐 아니라 종 방향 아치도 형성된다. 이러한 종 방향 아치는 횡 방향 아치와 합세하여 굴착 상당력을 지지한다. 이것을 막장부 종방향 아칭 효과라 하며, 이러한 효과는 막장 후면으로 가면서 작아져서 막장에서 충분히 떨어진 곳에서는 완전히 사라진다(정대열, 1993). 이러한 응력의 재배치 현상을 아칭효과(Fig. 1)라 한다.

터널은 안정된 지하 지반에 인위적인 공동을 형성하여 평형을 깨는 작업이므로 최초의 굴착이 이루어지는 무지보 상태의 막장면에서 가장 불안정한 상태를 이루게 되고, 이어서 1차 지보재가 설치됨에 따라 점차 안정된 지하 구조물이 되는 특성을 갖고 있다. 지하에 공동을 형성하였을 때, 무지보 터널 막장이 일정 시간동안 자립할 수 있는 것은 상술한 아칭 효과(arching effect)에 기인한다. 아칭 효과는 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 3차원 상으로 터널의 종 방향과 횡 방향으로 하중이 전이됨으로써 발생하게 된다. 지반 굴착으로 발생되는 지하공동 주변 지반의 응력과 변형은 터널의 기하학적 모양, 무지보 굴착 거리 등의 조건에 따라 다양한 양상을 보인다. 터널 막장면 부근에서의 변위는 막장 전방의 지반 변화에 따라 그 크기와 방향이 달라지므로 이를 계측하면 막장 전방의 지반 상태를 예측할 수 있다.

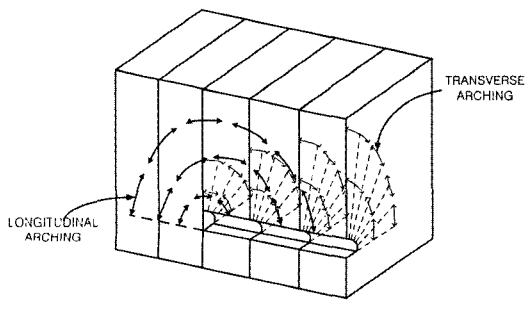

Fig. 1. 3-dimensional arching effect in the vicinity of a tunnel face(Gnilsen, R., 1989)

3. 터널의 3차원 변위 해석 방법

Schubert 와 Steindorfer(1996)는 터널 천단부의 절대변위 측정결과로부터 새로운 계측 결과의 활용 기법을 제시하였다. 막장 전방에 파쇄대나 지하공동이 존재하게 되면, 터널 축 방향으로의 응력 재분배가 제대로 이루어지지 않아 연약대 부근에 응력집중이 심화된다.

L값을 천단부(crown)에서의 터널 축 방향 변위라 하고, C값을 터널의 천단침하라 할 때, Fig. 2에 도시한 바와 같이 L과 C의 비, 즉 L/C비를 내공경사각(α)으로 정의할 수 있으며, 균질한 지반에 터널을 굴착하는 경우 이 각은 7~12정도의 범위에 속하는 것으로 알려져 있다. 그러나, 파쇄대나 지하공동 등의 연약대가 존재하면 C값의 증가에 비해 L값의 증가가 더 크게 되므로 내공경사각의 크기가 커지게 된다.

Schubert와 Vavrovsky(1994)는 같은 시간에 각기 다른 측정지점에서 측정한 터널의 천단 변위를 하나의 선으로 연결하여 영향선(influence line)이라 정의하였다. 또한 영향선의 시작점에서 같은 거리만큼 떨어진 값들을 연결한 선을 경향선(trend line)이라고 정의하여 막장 전방 지반상태 변화에 이용하였다.

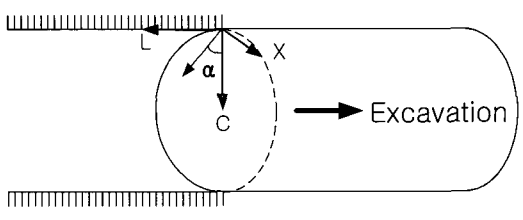

Fig. 2. Components of displacement vector and inclination angle α

Fig. 3에서 보는바와 같이 파쇄대층에 막장이 접근해 감에 따라 천단의 축 방향 변위나 수직 변위가 증가하여 영향선과 경향선의 모양에 변화가 발생함을 볼 수 있다. 따라서 영향선과 경향선을 이용하면 터널 막장 전방의 파쇄대를 예측할 수 있다.

천단 침하를 평균값으로 일반화 시킨 값인 C/C_o비 또한 막장 전방의 지반 상태를 예측하는데 사용될 수 있다. 여기서 C는 해당 계측지점의 천단 수직변위(=천단 침하)이며, C_o는 계측 지점 이전까지의 5지점의 평균 수직변위이다.

이인모 등(2002)은 현장계측에서 발생할 수 있는 모든 오차를 정규분포로 가정하여, 계측 결과의 평균과 분산도를 구함으로써 결과분석에 활용할 수 있는 C/C_o 평가 기법을 도입하였다. C/C_o비의 신뢰범위는 평균±2 σ (σ=표준편차)이므로 C/C_o비의 경향선이 평균에서 2 σ 를 초과하면 막장 전방에 연약대가 존재한다고 볼 수 있다고 보고하였다.

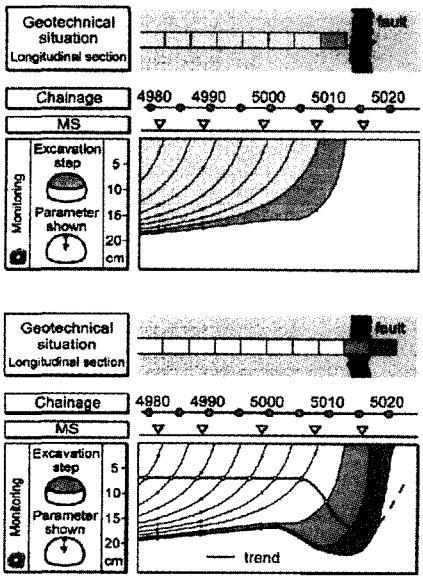

Fig. 3. The changes of influence line and trend line when a tunnel face approaches to a weak zone(Schubert and Steindorfer, 1996)

4. 연약대를 고려한 터널의 3차원 수치해석

본 연구에서는 유한차분법에 근거하여 작성된 지반 해석용 프로그램인 FLAC-3D를 사용하여 탄성 해석 및 탄소성 해석을 실시하였다.

해석 대상 지반은 높이 78 m, 폭 120 m, 터널 굴진 방향 60 m의 직육면체로 모델링 하였으며, 터널은 전단면 굴착으로 시공되는 것으로 가정하였다. 터널의 형상은 도로공사 2차선 표준단면을 사용하였으며 터널은 남쪽에서 북쪽으로 굴진되는 것으로 하였다. 해석에 사용된 해석 요소망은 Fig. 4와 같다.

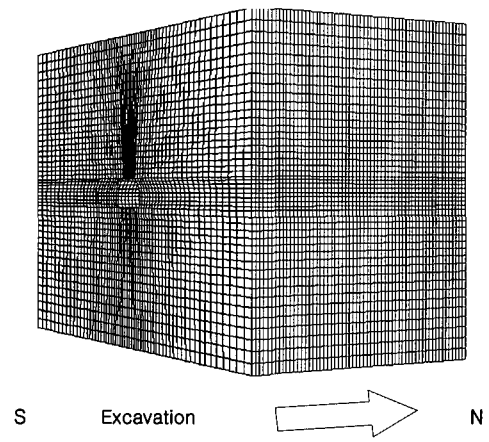

Fig. 4. A mesh for 3-dimensional stability analysis

Table 1. Strength and deformability parameters by rock mass class(Highway & Transportation Institute, KHC, 2002)

Properties / Rock mass class	Young's modulus (GPa)	Bulk modulus (GPa)	Shear modulus (GPa)	Friction angle (deg)	Cohesion (kPa)	Density (kg/m^3)	Poisson's ratio	Tensile Strength (kPa)
I	34.12	22.75	13.65	45	1e3	2600	0.25	5e2
II	28.02	18.68	11.21	42	5e2	2600	0.25	2.5e2
III	13.01	8.67	5.20	38.5	2.5e2	2600	0.25	1.25e2
IV	6.04	4.03	2.42	35	1e2	2600	0.25	5e1
V	2.80	1.87	1.12	31	5e1	2600	0.25	2.5e1
VI	1.26	0.84	0.50	26.5	2.5e1	2600	0.25	1.25e1

해석에 사용된 지반 특성치는 Table 1에 주어진 바와 같으며, 한국 도로 공사에서 제안한 암반등급별 변형성 및 강도정수 중 3등급 물성을 사용하였다(한국도로공사 도로교통기술원, 2002).

연약대의 탄성계수는 원 지반 탄성계수의 1/5, 1/10, 1/20, 1/50, 1/100 로 가정하였고, 포아송비는 0.25로 통일하였다.

막장면 전방에 연약대가 존재할 경우 터널 천단부의 3차원 절대변위의 변화를 해석하기 위하여 연약대의 두께, 탄성계수, 경사, 간격 등을 변화시키면서 터널의 내공변위를 분석하였다. 3차원 해석에 사용된 연약대의 변화 조건을 정리하면 Table 2 및 Table 3과 같다.

5. 해석결과의 고찰

5.1 탄성해석과 탄소성 해석의 결과 비교

암반은 강도를 초과하는 응력 하에서 파괴되므로 탄소성 해석을 실시하는 것이 원칙이나, 3차원 탄소성 해석에는 많은 시간이 소요되므로 탄성해석으로 소기의 목적을 달성할 수 있다면, 탄성 해석을 수행하는 것이 바람직할 것이다.

탄성 해석으로도 여러 가지 변위 성분의 경향선을 올바르게 얻을 수 있는지 알아보기 위해 동일한 조건에 대하여 탄성해석과 탄소성 해석을 실시하여 그 결과를 비교하였다.

두께 1 m의 연약대가 터널과 수직으로 교차하는 경우에 대하여 Table 1에 제시된 물성 중 3등급 암반에 해당하는 물성을 동일하게 사용하였으며, 연약대의 탄성계수는 원 지반 탄성계수의 1/100로 가정하였다. 탄소성 해석 시 연약대의 강도 정수는 Table 1에 제시된 물성 중 6등급에 해당하는 물성을 사용하였다.

Table 3. Spacings of the weak zones used in the analysis

Young's modulus Ratio	Thickness	Spacing		
1/20	2 m	5 m	10 m	20 m

Fig. 5는 탄성 및 탄소성 해석결과로부터 L/C비 경향선을 도시한 것이다. 연약대는 갱구부로부터 30 m 떨어진 지점에 위치하고 있는데, 연약대가 존재하는 지점 이전까지의 L/C비 변화는 탄성 해석과 탄소성 해석 결과가 동일한 양상으로 나타났다.

반면, 탄성 해석에서는 연약대 통과 시에 별다른 변화

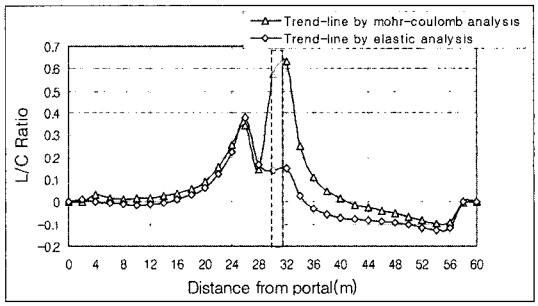

Fig. 5. Comparison of L/C ratio for mohr-coulomb analysis and elastic analysis

Table 2. Parameter combinations of the weak zone used in the analysis

Dip	Thickness	Young's modulus Ratio (E_f/E_m)				
30°	1 m	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
	2 m	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
	5 m	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
45°	0.5 m	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
	1 m	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
	2 m	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
	5 m	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
60°	1 m	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
	2 m	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
	5 m	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
90°	0.5 m	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
	1 m	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
	2 m	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100
	5 m	1/5	1/10	1/20	1/50	1/100

가 없는데 반하여, 탄소성 해석에서는 막장이 연약대에 접근함에 따라 L/C비가 급격히 증가하였으며, 연약대 통과 후에도 내공변위가 평상치로 수렴하는데 상당한 기간이 소요됨을 알 수 있다. 이는 막장이 연약대를 통과하는 과정에서 연약대가 파괴되어 터널 축방향 변위가 급격히 증가하기 때문이며, 연약대로 전이되어야할 응력이 연약대 전방의 암반으로 전이되어 연약대와 인접한 원지반의 일부도 파괴되기 때문이다.

천단에서의 터널 축 방향 변위를 살펴보면, 탄성 해석의 경우에는 연약대 통과지점에서 0.1 mm 정도의 축방향 변위가 굴진 반대 방향으로 발생하였으나 탄소성 해석의 경우에는 연약대 지점에서 2.4 mm 정도의 축방향 변위가 굴진방향의 반대 방향으로 발생하였다.

그러나 연약대를 통과하기 이전까지의 경향선의 변화 양상은 탄성해석 결과와 탄소성 해석 결과가 거의 일치하므로 연약대 예측을 위한 3차원 해석은 탄성 해석으로 충분함을 알 수 있었다.

5.2 연약대의 두께에 따른 영향

연약대의 탄성계수는 원 지반 탄성계수의 1/100로 가정하였으며 터널 축과 수직으로 교차하는 경우에 대하여 연약대의 두께를 0.5 m, 1 m, 2 m, 5 m 로 변화시키면서 연약대의 두께에 따른 천단침하, C/C_o비 및 L/C비 변화를 검토하였다.

Fig. 6은 해석결과로부터 L/C비를 계산하여 이의 경향선을 도시한 것이다. 연약대는 갱구부로부터 30 m 떨어진 지점에 위치하고 있는데, 균질한 지반을 굴착하는 경우에는 L/C비의 변화가 거의 없으나, 막장면이 연약대에 접근함에 따라 L/C비의 변화가 점차 커지는 것을 알 수 있다. L/C비는 연약대가 존재하는 지점의 15 m 전방에서부터 변화하기 시작하였으며 연약대의 두께가 두꺼워짐에 따라 변화 폭이 커짐을 보인다(Fig. 6).

Fig. 7은 동일한 해석 결과로부터 천단침하 경향선을 도시한 것이다. 그림에서 보는바와 같이 연약대의 두께가 두꺼워짐에 따라 연약대가 존재하는 지점에서 천단침하의 경향선이 크게 변화하는 것으로 나타났다. 그러나 Fig. 6의 L/C비의 경향선이 연약대가 존재하는 지점의 15 m 전방에서부터 변화한 것과는 달리 Fig. 7의 천단침하의 경향선은 연약대가 존재하는 지점의 5 m 전방에서부터 변화하는 것으로 나타났다. 이는 막장 전방에 존재하는 연약대의 영향으로 터널 축방향 변위의 증가가 천단 침하 성분의 증가보다 먼저 발생함을 의미한다.

Fig. 8은 동일한 해석 결과에 대한 C/C_o비를 표준화하여 도시한 것이다. 연약대의 두께에 따라 C/C_o비의 평균값과 표준편차가 다르게 나타나므로 이를 동일한 그래프에 도시하기 위하여 다음과 같이 C/C_o비를 표준화시켜 표준화된 C/C_o 비로 나타내었다.

$$standardized\ C/C_o\ ratio = \frac{C/C_{o\ ratio} - mean}{\sigma} \quad (1)$$

연약대가 존재하는 지점에서 변화범위(평균+2 σ)를 초과하는 C/C_o비가 나타났으며 연약대의 두께가 두꺼워짐에 따라 그 수치가 커지는 것으로 나타났다.

Fig. 6의 L/C비의 경향선이 연약대가 존재하는 지점

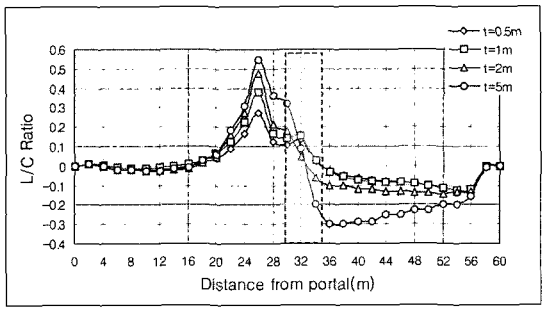

Fig. 6. Trend lines of L/C ratio for weak-zones with different thicknesses

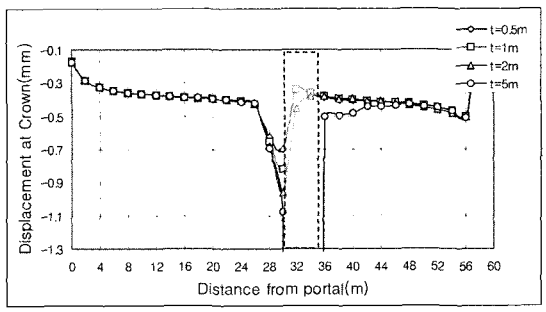

Fig. 7. Trend lines of displacements at crown for weak-zones with different thicknesses

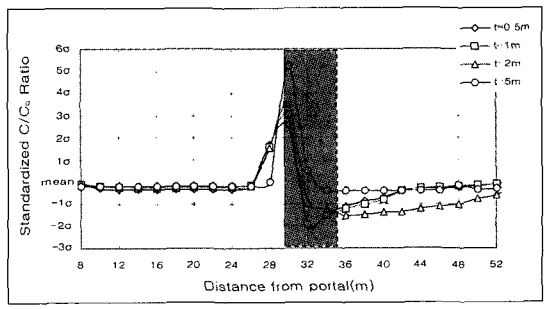

Fig. 8. Trend lines of C/C_o ratio for weak-zones with different thicknesses

의 15 m 전방에서부터 변화한 것과는 달리C/C_o비와 천단침하의 경향선은 연약대가 존재하는 지점의 5 m 전방에서부터 변화하는 것으로 나타났다. 그러나 연약대가 존재하는 지점에서는 명확한 거동을 나타냈으므로 L/C비의 변화와 함께 천단침하와 C/C_o비를 함께 검토하면 보다 효율적으로 연약대의 존재를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

5.3 연약대의 변형성에 따른 영향

두께 1 m의 연약대가 터널과 수직으로 교차하는 경우에 대하여 연약대의 탄성계수를 원 지반 탄성계수의 1/5, 1/10, 1/20, 1/50, 1/100로 변화시키면서 연약대의 변형성에 따른 L/C비의 변화를 검토하였다.

Fig. 9는 L/C비 경향선을 연약대의 변형계수 별로 도시한 것이다. 연약대의 탄성계수가 원지반의 강도에 비해 작을수록 L/C비의 변화가 명확하게 나타났으며, L/C비는 연약대가 존재하는 지점의 15 m 전방에서부터 변화하기 시작하였다.

5.4 연약대의 경사에 따른 영향

연약대와 터널축이 이루는 경사에 따른 L/C비의 변화를 검토하기 위하여 연약대와 터널 축이 터널 진행방향과 터널 진행 반대 방향으로 각각 30°, 45°, 60°의 경사를 이루는 경우에 대하여 해석을 실시하였다. Fig. 10과 Fig. 11에 도시한 바와 같이, 편의상 불연속면의 경사가 터널 진행방향과 동일한 경우의 경사를 (+) 값으로, 터널 진행 방향과 반대인 경우를 (-)로 정의하였다.

Fig. 12는 불연속면이 경사진 경우에 대한 해석결과를 도시한 것이다. 불연속면의 경사가 다양하므로 그래프에 표시한 연약대의 위치는 불연속면이 터널 바닥부의 연장선과 교차하는 지점을 나타낸다.

연약대가 (+)방향의 경사인 경우는 수직으로 교차하는 경우에 비하여 L/C비의 변화가 일찍 나타나는 것으로 보이나, 실제로는 L/C비가 최대값이 되는 지점에서 연약대가 터널의 크라운부와 교차하므로 L/C비 경향선은 연약대가 터널 크라운부에 노출되기 약 8~10 m 이전에 변화하기 시작함을 알 수 있다. 실제로 연약대가 터널 축과 30°, 45°, 60°의 경사를 이루는 경우, 터널 천단부와 연약대가 교차하는 지점은 갱구부로부터 각각 15 m, 22 m, 26 m 떨어진 지점이다.

한편 연약대가 (-)방향의 경사인 경우에는 수직으로 교차하는 경우에 비해 L/C비의 변화가 늦게 나타나게

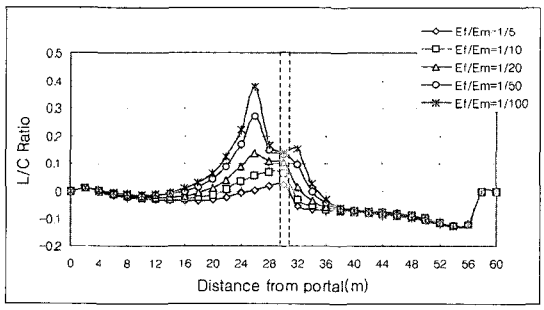

Fig. 9. Trend lines of L/C ratio for weak-zones with different Young's moduli

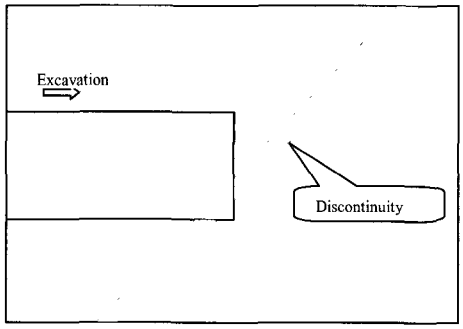

Fig. 11. A weak zone with negative dip

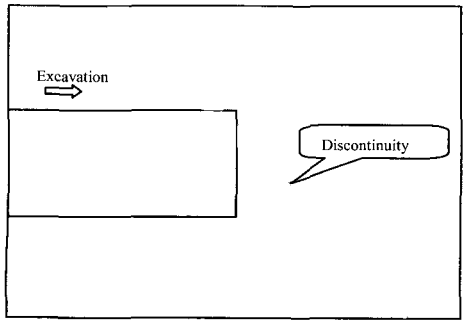

Fig. 10. A weak zone with positive dip

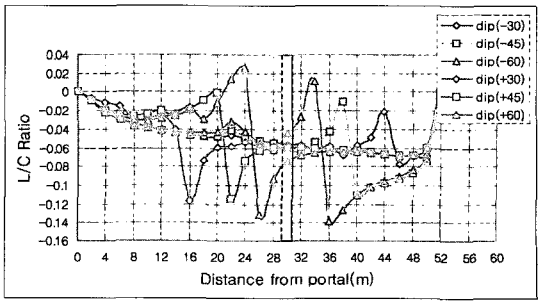

Fig. 12. Trend lines of L/C ratio for weak-zones with different dips

된다. 이는 연약대의 (-)방향 경사로 인하여 연약대와 터널 천단부가 교차하는 지점까지의 거리가 길어져서 터널 천단부의 응력 집중 지점이 갱구부로부터 멀어짐에 따라 나타나는 현상이며, (-)방향의 경사인 경우에는 터널 축과 연약대의 경사가 90인 경우와 L/C비의 변화가 비슷하다는 기존의 연구결과(이인모 등, 1998)와는 상이한 결과로 나타났다. 또한 연약대의 경사가 수평에 가까울수록 연약대 부근의 응력 집중이 심화되었으며, 연약대가 터널 축과 30°, 45°, 60°의 경사를 이루는 경우에 터널 천단부와 연약대가 교차하는 지점은 갱구부로부터 각각 45 m, 40 m, 36 m 떨어진 지점에서 나타났다. 이 경우 L/C비 경향선 분석으로 연약대의 출현을 예측할 수는 없으나, 터널 바닥부와의 교차점에서 육안관찰이 가능하므로 안정성 확보를 위한 조치가 가능할 것으로 판단된다.

5.5 경사진 연약대의 변형성에 따른 영향

(+)방향으로 45°의 경사를 이루며 두께가 1 m인 연약대의 탄성계수를 원 지반 탄성계수의 1/5, 1/10, 1/20, 1/50, 1/100로 변화시키면서 L/C비의 변화를 검토하였다.

Fig. 13은 이에 대한 해석결과를 도시한 것인데, 연약대가 수직으로 교차하는 경우(Fig. 9)와 비교해보면 L/C비의 변화 폭이 다소 작으며, 변형계수 비의 영향도 더 작음을 알 수 있다.

5.6 경사진 연약대의 두께에 따른 영향

경사진 연약대의 두께변화에 따른 L/C비의 변화를 검토하기 위하여 (+)방향과 (-)방향으로 각각 45의 경사를 이루는 연약대의 두께를 0.5 m, 1 m, 2 m, 5 m로 변화시켰다. 이 때 연약대의 탄성계수는 원 지반 탄성계수의 1/100로 가정하였다.

Fig. 14와 Fig. 15는 이 경우의 L/C비 경향선을 도시한 것이다. 연약대는 갱구부로부터 30 m 떨어진 지점에서 터널 하반과 교차하고 있다. 경사진 연약대의 두께가 0.5 m 및 1 m 인 경우에는 두께가 2 m 이상인 경우에 비하여 L/C비의 변화 폭이 상당히 작게 나타났다. 이와 달리 연약대의 두께가 2 m 이상인 경우에는 L/C비의 변화 폭이 커지며 변화거동이 명확하게 나타나, 사전에 연약대의 존재를 예측하는 것이 용이하였다.

(+)경사인 경우에는 연약대가 존재하는 지점의 25 m 전방, 터널 크라운부와 교차하기 15 m 전방에서부터 L/C비의 변화가 발생하기 시작하였으나, (-)경사인 경우에는 연약대가 존재하는 지점의 5 m 후방, 터널 크라운부와 교차하기 5 m 전방에서부터 L/C비의 변화가 발생하기 시작하였다.

연약대가 수직인 경우에 비하여 경사진 연약대가 존재하는 경우에는 두께가 두꺼워짐에 따라 터널 축과 연약대가 교차하는 지점에서 응력 집중이 다소 큰 것으로 나타났으며, 연약대의 경사가 수평에 가까울수록 응력 집중이 크게 나타났다.

특이한 사항으로는 연약대가 (-)경사인 경우에도(Fig. 15) 연약대의 두께가 2 m 이상인 경우에는 연약대가 터널 하부에 교차하기 이전에도 L/C비 경향선이 증가

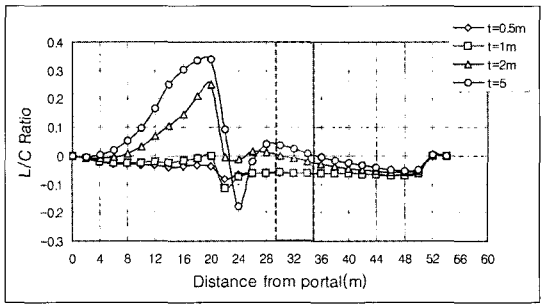

Fig. 14. Trend lines of L/C ratio for weak-zones with different thicknesses (dip=+45°)

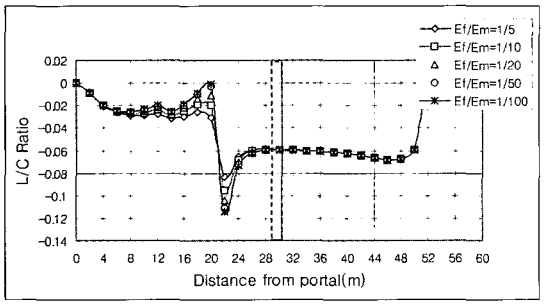

Fig. 13. Trend lines of L/C ratio for weak-zones with different Young's moduli (dip=+45°)

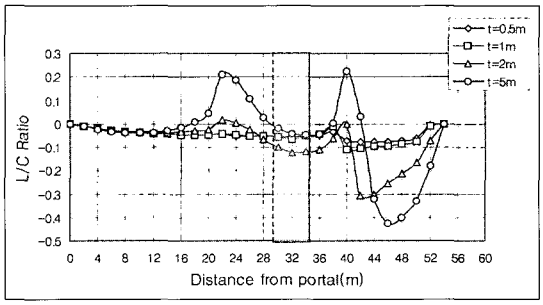

Fig. 15. Trend lines of L/C ratio for weak-zones with different thicknesses (dip= - 45°)

함을 보여 사전예측이 가능하였다. 이것은 터널 천단부와 연약대가 교차하는 지점에서 큰 응력 집중이 발생하여 축 방향 변위의 변화가 크게 발생하였으므로 나타난 결과라고 판단된다.

5.7 연약대의 간격에 따른 영향

갱구부로부터 20 m 떨어진 지점에 존재하는 연약대로부터 간격을 5 m, 10 m, 20 m로 변화시키며 연약대의 간격에 따른 천단침하, C/C_0비 및 L/C비의 변화에 대하여 검토하였다.

Fig. 16은 연약대의 간격이 5 m인 경우의 L/C비 영향선 및 경향선을 도시한 것인데, 그림에서 보는바와 같이 연약대와 연약대 사이에서 L/C비의 영향선이 크게 변화하며 큰 값을 나타내고 있다. 응력 분포를 살펴본 바, 연약대와 연약대 사이의 L/C비가 크게 변화하는 부분에서 큰 압축응력이 작용하고 있는 것으로 확인되었으며, 이로 인하여 L/C비의 변화가 크게 발생한 것으로 판단된다. 본 연구에서는 수치해석을 이용한 결과값을 활용하였으므로 각각의 연약대의 존재를 파악할 수 있었으나, 시공 시 이러한 구간에 대하여 계측을 실시하게 되면 Fig. 16의 수치해석 결과와 같이 각각의 연약대의 존재를 파악하기는 다소 어려울 것으로 예상되며 하나의 대규모 연약대가 존재하는 것과 같은 계측결과가 나타날 것으로 생각된다.

Fig. 17은 동일한 해석 결과로부터 천단 침하 경향선을 도시한 것인데, 각각의 연약대가 존재하는 지점에서 천단침하 경향선의 변화가 명확하게 나타났다. 그러나 Fig. 16의 L/C비의 경향선이 연약대가 존재하는 지점의 15 m 전방에서부터 변화한 것과는 달리 Fig. 17의 천단침하의 경향선은 연약대가 존재하는 지점의 5 m 전방에서부터 변화하는 것으로 나타났다. 이로부터 막장이 연약대에 접근하게 되면 터널 축방향 변위 성분의 증가가 천단변위 성분의 증가보다 더 일찍 나타남을 다시 한번 확인할 수 있었다.

Fig. 18은 연약대의 간격이 5 m인 경우의 C/C_0비 경향선을 도시한 것이다. 첫 번째 연약대가 존재하는 지점에서는 오차의 한계인 평균값+2 σ를 초과하는 값이 나타났으나, 두 번째 및 세 번째 연약대가 존재하는 지점에서는 오차의 한계를 초과하지 않아 C/C_0비 경향선으로는 매우 근접한 연약대를 모두 찾아내기는 어려울 것으로 판단되었다.

Fig. 19는 연약대의 간격이 10 m인 경우에 대한 해석 결과로부터 L/C비 경향선을 도시한 것이다. 그림에서 보는바와 같이 연약대의 간격이 5 m인 경우에 비하여 각각의 연약대에 대한 L/C비 경향선의 변화 거동이 명확하게 나타났다.

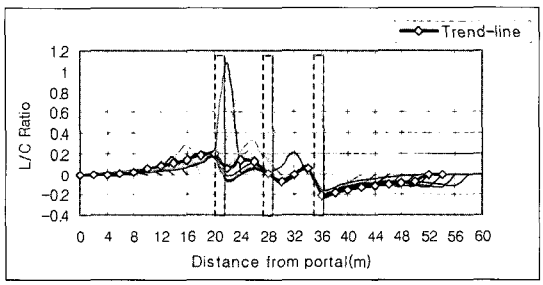

Fig. 16. Trend line of L/C ratio for weak zone with 5 m spacing

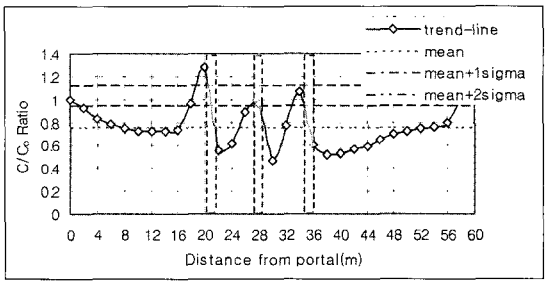

Fig. 18. Trend line of C/Co ratio for weak zone with 5 m spacing

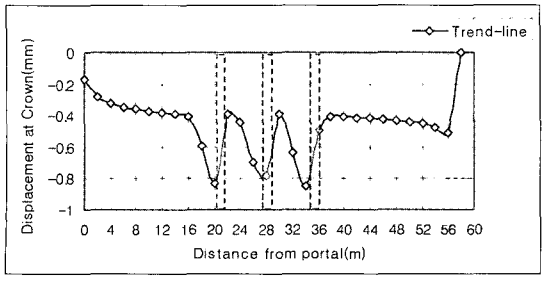

Fig. 17. Trend line of displacement at crown for weak zone with 5 m spacing

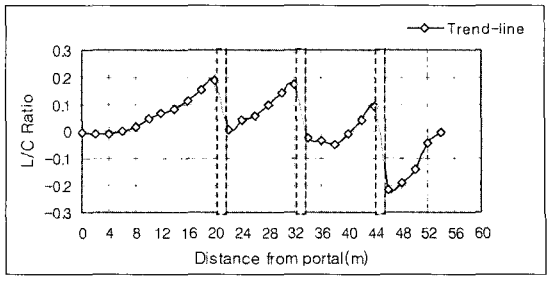

Fig. 19. Trend line of L/C ratio for weak zone with 10 m spacing

Fig. 20은 동일한 경우에 대하여 천단침하 경향선을 도시한 것인데, 각각의 연약대가 존재하는 지점에서 천단침하의 변화가 명확하게 나타났으므로 각각의 연약대의 존재를 예측하는 것이 가능하였다.

Fig. 21은 동일한 해석 결과로부터 C/C_o비 경향선을 도시한 것인데, 첫 번째 연약대가 존재하는 지점에서는 오차의 한계를 초과하는 변화가 발생하였으며, 두 번째 및 세 번째 연약대가 존재하는 지점에서도 오차 한계에 근접한 C/C_o비 값이 나타났다. 따라서 연약대의 간격이 10 m 이상으로 멀어지게 되면 다수의 연약대가 존재하는 경우에도 천단침하와 C/C_o비 및 L/C비에서 각각의 연약대의 존재를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 22는 연약대의 간격이 20 m인 경우의 L/C비 경향선이다. 연약대간의 거리가 충분히 이격되어 있으므로 각각의 연약대의 전방에서 영향선이나 경향선의 거동은 각각의 연약대가 독립적으로 존재하는 것과 흡사한 경향을 나타내었다. 영향선의 거동은 연약대의 간격이 10 m인 경우보다 더 명확하게 변화하였으므로 영향선으로부터 연약대의 위치를 쉽게 예측할 수 있었으며, 일반적으로 사용되는 4막장 전의 영향선을 연결한 경향선보다 1막장전의 영향선을 연결한 경향선으로써 연약대의 위치를 보다 명확하게 예측할 수 있었다.

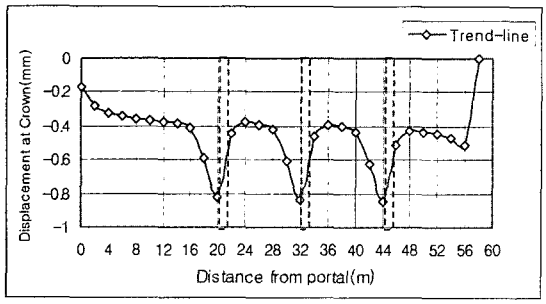

Fig. 20. Trend line of displacement at crown for weak zone with 10 m spacing

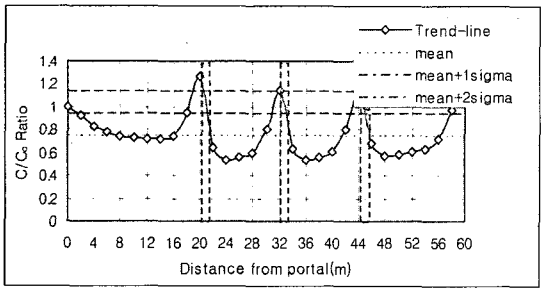

Fig. 21. Trend line of C/C_o ratio for weak zone with 10 m spacing

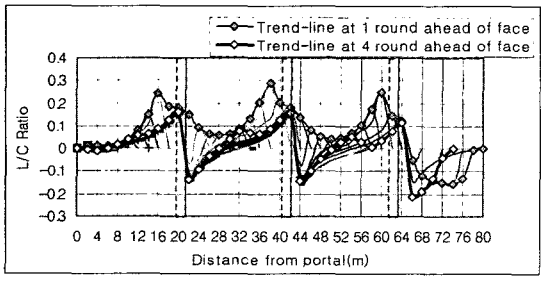

Fig. 22. Trend line of L/C ratio for weak zone with 20 m spacing

6. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 천단침하, C/C_o비 및 L/C비의 변화로부터 연약대를 예측하는 것은 매우 유용한 방법임을 확인하였다.
2) 연약대의 두께가 커질수록, 또한 연약대의 탄성계수가 원 지반의 탄성계수에 비해 작을수록 경향선의 변화 거동이 커져 막장 전방에 존재하는 연약대의 예측 가능성이 향상되었다. 이중 연약대의 두께에 의한 영향이 더 뚜렷하게 나타났다.
3) 연약대로 인한 터널 천단부의 응력 집중 지점은 터널 축과 연약대의 경계면이 만나는 지점에 따라 달라졌으며, 터널 축 방향으로 경사질수록 응력의 집중이 심화되었다. 따라서 터널 축과 연약대의 경계면의 위치에 따라 연약대가 예측되는 지점이 변화되는 것으로 판단된다.
4) 막장 전방에 연약대가 다수 존재하는 경우에는 주변 값을 크게 상회하는 L/C비가 연속적으로 나타났으며, 연약대간의 이격거리가 가까울수록 L/C비의 수치가 크게 나타났다. 따라서 주변 값을 크게 상회하는 L/C 비가 연속적으로 나타나는 구간에서는 천단부에서 큰 응력 집중이 예상되므로 시공 시 각별히 유의해야 할 것으로 판단된다.
5) 향후 보다 많은 계측자료와의 비교를 통하여 막장 전방에 시공 상 문제를 일으킬만한 연약대가 존재하는 경우에 대한 경향선의 최소변화한계 결정과 관련된 연구가 수행되면 본 방법의 현장 적용성을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 정대열, 1993, 터널 막장 주위의 3차원적 영향을 모사하는 2차원 해석 모델의 하중분배율에 관한 연구, 서울대학교 대학원 박사학위논문.

2. 이인모, 손영진, 박광준, 1998, 터널 막장 전방의 지반 변화 예측을 위한 3차원 해석, 대한토목학회 논문집, Vol. 18, No. III-4호, 505-519.
3. 이인모, 이승주, 이주공, 이대혁, 2002, 파쇄대에 접근하는 터널의 내공변위 변화, 터널기술 ,4.3, 235-245.
4. 한국도로공사 도로교통기술원, 2002, 암반등급에 따른 도로터널 지보체계 개선 연구, 연구보고서.
5. Gnilsen., R. 1989, Numerical Methods, Underground Structures Design and Instrumentation, Elsevier.
6. Schubert, P., and Vavrovsky, G. M. 1994, Interpretation of Monitoring Results, World Tunneling, November.
7. Schubert, W., and Steindorfer, A. 1996, Selective Displacement Monitoring Tunnel Excavation, Felsbau, 14.2, 93-97.

박 연 준

1981년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1983년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원 토목공학과 공학박사
Tel: 031-220-2580
E-mail: yjpark@suwon.ac.kr
현재 수원대학교 토목공학과 교수

송 한 찬

2003년 수원대학교 공과대학 토목공학과 공학사

Tel: 031-220-2522
E-mail: shch10182@hotmail.com
현재 수원대학교 토목공학과 석사과정

이 대 혁

1991년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
1993년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
1998년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사
Tel: 02-3700-8644
E-mail: dhlee-d@skec.co.kr
현재 SK건설 GeoTask팀 부장

유 광 호

1984년 연세대학교 공과대학 토목공학과 공학사
1986년 연세대학교 대학원 토목공학과 공학석사
1992년 미국 Minnesota 대학교 대학원 토목공학과 공학박사
Tel: 031-220-2566
E-mail: khyou@suwon.ac.kr
현재 수원대학교 토목공학과 교수

김 기 선

1971년 한양대학교 공과대학 토목공학과 공학사
1990년 울산대학교 대학원 토목공학과 석사
2003년 수원대학교 대학원 토목공학과 박사수료
Tel: 02-576-9081~3
E-mail: civil0224@hanmail.net
현재 동흥개발(주) 대표이사