

터널 막장 전방의 지반 변화 예측에 관한 연구

Prediction of Ground-condition ahead of Tunnel Face

이인모¹⁾, In-Mo Lee, 손영진²⁾, Young-Jin Sohn, 박광준³⁾, Kwang-Joon Park, 강기돈⁴⁾, Gi-Don Kang

¹⁾ 고려대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

²⁾ 삼보기술단 기술연구소 연구원, Researcher, Sam Bo R&D Institute

³⁾ 고려대학교 대학원 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

⁴⁾ 고려대학교 대학원 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Korea Univ.

SYNOPSIS : An analytic method to predict the change of stiffness ahead of the tunnel face, and to predict the existence of fault zone by analyzing absolute displacements of a tunnel in 3-dimensions is presented. The excavation of the tunnel in a stable rock mass causes a 3-dimensional arching effect around the excavation face. The fact, that the change of ground condition ahead of excavation face or the existence of a weak fault zone will make a typical displacement tendency, is observed by the 3-dimensional analysis. The ratio of L/C (longitudinal displacement divided by settlement at crown) and S/C (horizontal displacement at sidewall divided by settlement at crown) can be used for predicting the existence of the discontinuity in which rock mass stiffness is changed. In addition, the plotting of influence and trend lines along tunnel axis, or the stereonet plotting of displacement vectors bring a better understanding of geomechanical profiles ahead of the tunnel face.

Therefore, by monitoring the 3-dimensional absolute displacements during tunnel excavation, and by applying the analytic method proposed in this study, the change of ground condition and existence of fault zone ahead of tunnel face can be predicted.

Key words : 3-dimensional absolute displacements, 3-dimensional arching effect, L/C, S/C, influence line, trend line, stereonet

1. 서론

지하암반은 생성당시나 또는 그 이후의 복잡한 지구 물리학적 활동에 의해 많은 불연속면(단층, 습곡, 절리, 파쇄 등)을 갖고 있는, 불균질한 이방성의 매질이므로 암반에 인위적인 지하 공간(터널)을 형성하게 되면 새로운 평형을 찾으려는 응력의 재배치가 일어나 터널주변에는 3차원상의 아칭현상이 발생한다.

터널 막장 전방의 불연속면 및 파쇄대가 아칭현상에 의해서 터널의 3차원 절대 내공 변위에 미치는 영향을 확인하기 위해 먼저 균질한 지반에 터널을 굴착하는 경우를 해석하여 이 결과를 기준으로 불연속면에 접근하는 경우와 파쇄대에 접근하는 경우에 대해서 3차원 수치 해석을 수행하였다. 지반의 강성이 변하는 불연속면 접근시의 해석은 경계면에서의 지반 강도 차이, 불연속면과 터널 막장과의 경사 방향 및 경사각을 달리하여 해석을 수행하였고, 파쇄대에 접근하는 경우는 파쇄대와 지반의 강도 차이, 파쇄대와 터널 막장과의 경사 방향 및 경사각을 달리하여 이들의 영향을 검토하였다.

본 연구에서는 불균질한 암반층에 터널을 굴착하는 경우에 터널 막장면의 전방에 존재하는 불연속면이나 파쇄대의 영향을 3차원 수치해석을 통해 규명함으로써 실제 현장에서 3차원 계측(터널의 절대 내공 변위를 측정)을 통하여 측정한 계측 결과를 이용하여 터널 막장 전방에 존재하는 불연속면을 예측하고 지보 패턴 변경시점을 제시할 수 있는 새로운 계측 활용 기법을 제안하였다.

2. 터널 굴착에 따른 아칭 효과

2.1 균질한 지반에서의 아칭 효과

터널은 안정된 지하 지반에 인위적인 공동을 형성하여 불평형력을 초래하는 작업이기 때문에 최초의 굴착이 이루어지는 무지보의 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 터널 주변지반의 응력과 변위가 재배치되는 아칭 효과(arching effect)에 기인한다. 아칭 효과는 그림 2.1에 나타낸 바와 같이 3차원 상으로 터널의 종방향과 횡방향으로 하중이 전이됨으로써 발생하게 된다. 지반 굴착으로 발생되는 지하공동 주변지반의 응력과 변형은 터널의 기하학적 모양과 무지보 굴착 거리등의 시공조건과 지반의 특성과 같은 지반 자체의 조건에 따라 다양한 양상을 보인다. 터널의 막장면 부근에서의 변위는 막장 전방의 지반 변화에 따라 그 크기와 방향이 달라지므로 이를 계측하면 막장 전방의 지반 상태를 예측할 수 있다.

Lunardi (1995)는 터널 막장의 안정은 전적으로 막장 전방의 지반 조건에 의해서 결정된다고 보고 터널 막장 전방의 암을 삼축 상태의 시료(core)로 가정하여 터널 막장의 안정성을 설명하였다(그림 2.2 참조). 터널의 굴착으로 인한 하중전이 효과의 발생범위를 굴착 지반의 암반 상태에 따라 그림과 같이 세 경우로 나누어 설명하였다. 그림 2.2와 같이 횡방향 아칭 효과(transverse arching effect)는 굴착 지반의 강도가 작으면 굴착 단면에서 멀리 떨어져 발생하며, 강도가 커질수록 굴착 단면 가까이에 아칭 효과가 발생하는 것으로 보고하였다. 즉, 하중전이 효과는 지반의 강도와 매우 밀접한 관계가 있다고 설명하였다.

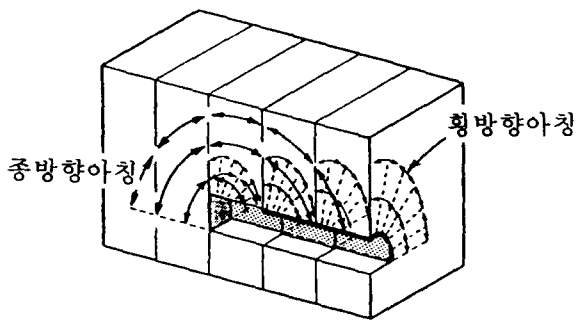


그림 2.1 터널의 3차원 아칭 효과
(Gnilsen, R (1989))

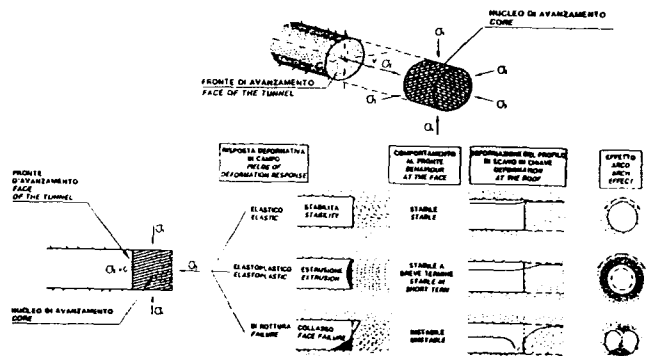


그림 2.2 터널 막장 전방(core)의 응력 상태

2.2 불연속면에서의 아칭 효과

Schubert 등(1994)은 그림 2.3과 같이 막장 전방에 파쇄대가 존재할 때 축방향 아칭 효과에 의해서 축방향 변위가 달라질 수 있음을 보여주고 있다. 즉, 균질한 암반에서의 터널 막장 전방의 응력은 축방향 아칭 효과에 의해 증가하게 되고, 이 증가된 응력에 의해 막장 전방에서 터널 안쪽으로 축방향 변위가 발생하게 된다. 그러나 막장 전방에 불연속면이 존재하면 증가된 응력이 구속을 받지 못하여 막장 내로의 응력은 작아지며, 축방향 변위도 작아진다.

터널 막장 전방에 파쇄대와 같은 연약암반대가 존재할 시에 아칭 효과에 의해서 터널 막장의 바로 앞에는 응력이 증가된다. 이로 인해서 터널의 천단부에서 수직 변위가 증가하며, 터널 막장이 연약암반대에 더욱 근접할 시에는 아칭 효과가 발생하지 않아 불연속면을 구속하는 하중이 매우 작아지게 된다. 따라서 파쇄대의 지반 특성치가 상대적으로 터널 주위의 암반보다 작아서 하중변화에 대하여 거동이 커지게 되며, 터널의 천단부에서 수직 변위가 더욱 크게 증가하게 된다(그림 2.3 참조). 이와 같은 원리로 인하여 터널 막장면의 축방향 변위로부터 연약암반대의 존재를 확인할 수 있는 강력한 수단이 될 수 있음을 보여준다.

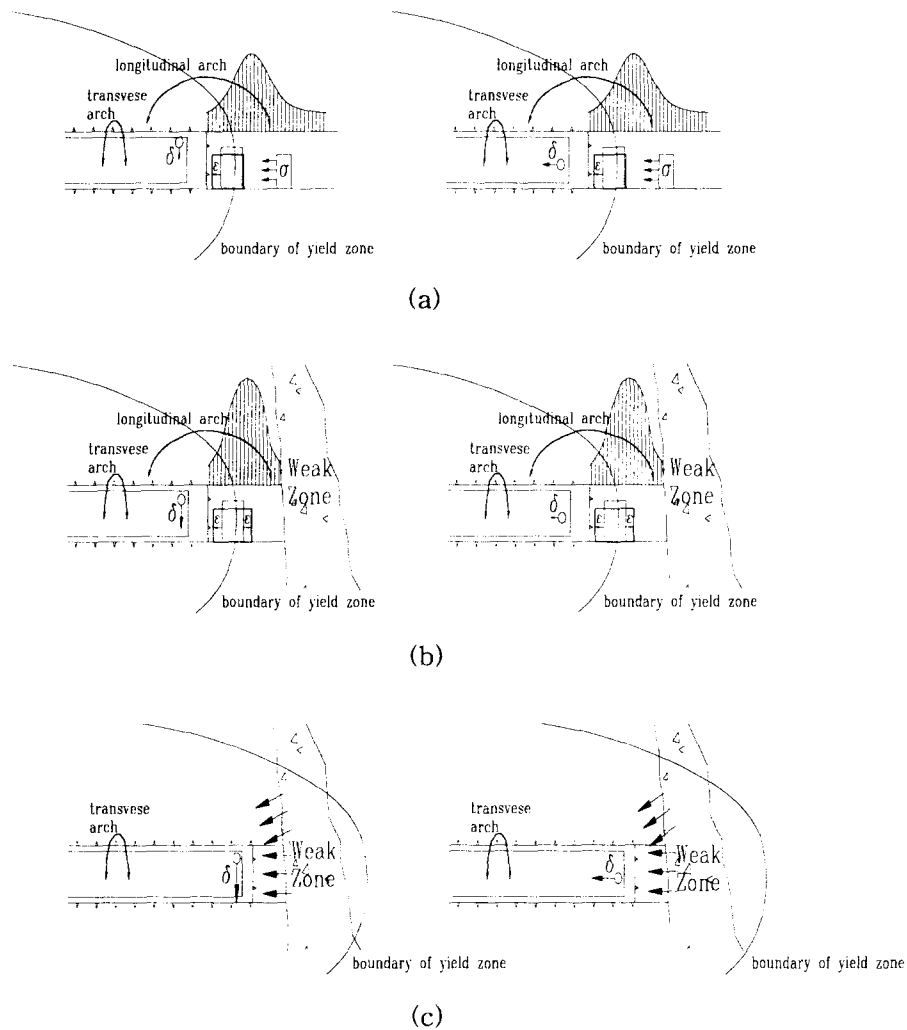


그림 2.3 불연속면에 접근시의 아칭 효과에 따른 천단부의 수직·종방향 수평 변위의 변화
 (a) 균질한 지반 (b) Weak Zone에서 멀리 떨어진 경우 (c) Weak Zone에 근접한 경우

3. 불연속면을 고려한 터널의 3차원 수치 해석

3.1 해석조건

3.1.1 해석 프로그램

본 연구에서 사용한 수치 해석 프로그램은 개별 요소 방법(DEM, Discrete Element Method)을 이용한 3DEC으로서 지반을 불연속체 모델로 가정한 것이다. 이 프로그램에서 암반의 절리면은 강성 블록(rigid block)과 변형성 블록(deformable block)으로 구분된다. 지반의 응력-변위 특성은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다.

3.1.2 해석 경계 조건

터널의 해석 단면은 원형에 근접한 팔각형(직경 $D = 10\text{ m}$) 단면으로 가정하였고, 강성이 큰 지반에서는 터널의 지보재에 의한 변위의 경향이 크게 달라지지 않음을 고려하여 지보재는 설치하지 않았다. 해석에 사용한 해석 요소망은 그림 3.1과 같으며 해석 요소망의 경계는 터널 굴착에 따른 영향을 최소화하기 위해 횡방향 해석변위는 터널 직경의 $2.5 D$, 종방향 해석 범위는 터널 직경의 $10D$ 로 하였다.

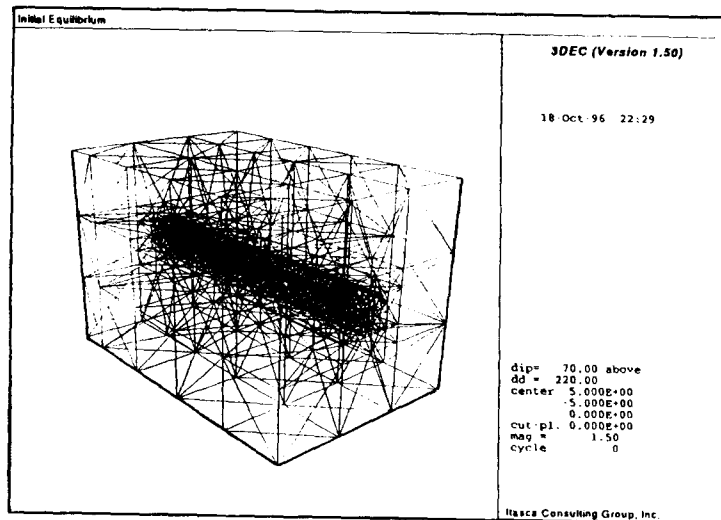


그림 3.1 3차원 수치 해석 요소망

3.1.3 불연속면의 예측모델

불연속면은 연암과 경암의 경계면으로 단순화 하였으며 연·경암의 탄성계수, 불연속면의 경사방향 및 경사각을 변화시켜 이들의 영향정도를 분석할 수 있도록 하였다. 각각의 경우에 대한 지반 특성치의 조건 변화는 표 3.1과 같다.

표 3.1 불연속면 방향의 변화 조건

경사 방향	경사각	지반 특성치의 변화
0°	45°	$E_1/E_2=2.0, K_0=1.0$ 인 경우
	90°	$E_1/E_2=10.0, 5.0, 2.0, K_0=1.0$ 인 경우
	135°	$E_1/E_2=2.0, K_0=1.0$ 인 경우
45°	90°	$E_1/E_2=10.0, 5.0, 2.0, K_0=1.0$ 인 경우

3.1.4 파쇄대 예측모델

파쇄대층의 두께는 2 m로 고정시키고, 파쇄대층의 탄성계수는 경암의 1/10배, 1/5배, 1/2배에 대하여 해석을 수행하였다. 파쇄대층의 방향이 변하는 경우에 대한 해석을 수행하기 위해, 경사 방향 = 0°, 45°, 90°, 135° 에 대하여 해석을 수행하였다. 또한 터널의 1회 굴진장은 암의 종류에 상관없이 0.2D(L = 2 m)로 하였다.

3.2 지반 특성치

본 해석에서 사용된 지반 특성치 및 절리면 특성치는 표 3.2, 표 3.3과 같다.

표 3.2 해석에 사용한 지반 특성치

	탄성계수	포아송비	단위중량	점착력	내부마찰각	인장강도
단위	E (t/m ²)	ν	γ (t/m ³)	c (t/m ²)	ϕ (°)	t (t/m ²)
soft rock(1/10배)	50,000	0.23	2.50	10	35	10
soft rock(1/5배)	100,000	0.20	2.60	15	39	15
soft rock(1/2배)	250,000	0.18	2.65	18	42	18
hard rock	500,000	0.17	2.70	20	45	20

표 3.3 해석에 사용한 절리의 특성치

	수직 강성 계수	수평 강성 계수
단위	k _n (t/m)	k _s (t/m)
soft rock(1/10배)	91743.1	22426.1
soft rock(1/5배)	183486.2	44852.2
soft rock(1/2배)	458715.5	112130.5
hard rock*	917431.0	224261.0

(* 삼성보고서 (1995))

3.3 해석 결과의 고찰

본 수치해석에서는 균질한 지반에 터널을 굴착하는 경우(Case 1), 터널이 경암에서 연암으로 진행되는 경우(case 2)와 연암에서 경암으로 진행되는 경우(case 3), 그리고 막장 전방에 파쇄대층이 존재하는 경우(case 4)로 구분하여 각각의 경우에서 지반의 강도 차이, 불연속면의 방향 등과 같은 매개 변수가 터널 거동 특성에 미치는 영향정도를 분석하였다. 각 경우에 대한 모식도가 그림 3.2에 표시되어 있다.

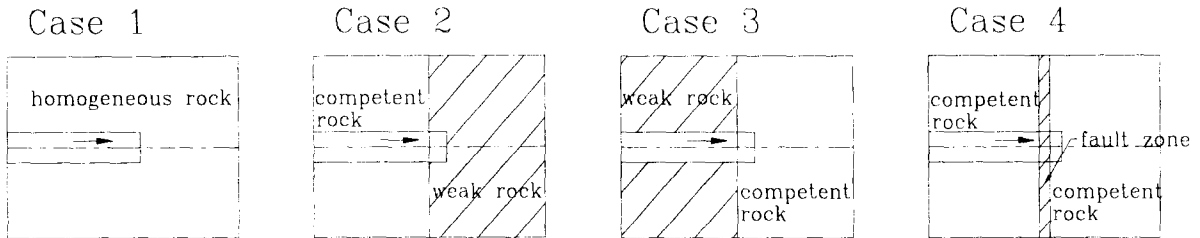


그림 3.2 해석의 경우

3.3.1 균질한 지반에 터널을 굴착하는 경우(Case 1)

균질한 지반에 터널을 굴착하는 경우에 대한 해석결과로부터 L/C비와 S/C비를 검토하였다. 여기서, L/C는 터널의 종방향 아칭 효과를 나타낸 값으로 L값은 터널 천정에서의 종방향 변위를 말하고, C값은 천정침하량(수직성분)을 의미한다. 그리고 S/C는 터널의 횡방향 아칭 효과를 나타낸 값으로 S값은 측벽부(SL)에서의 수평변위를 나타내고 C값은 수직변위를 나타낸 것이다.

그림 3.3은 균질한 지반에 터널을 굴착한 경우의 L/C 비를 나타낸 것이고, 그림 3.4는 S/C비를 나타낸 것이며, 그림 3.5는 평사투영법을 이용하여 각 측정별로 변위벡터를 나타낸 것인데 균질한 지반에서는 매 막장마다 동일한 변위가 발생하므로 일정한 값이 계산된다.

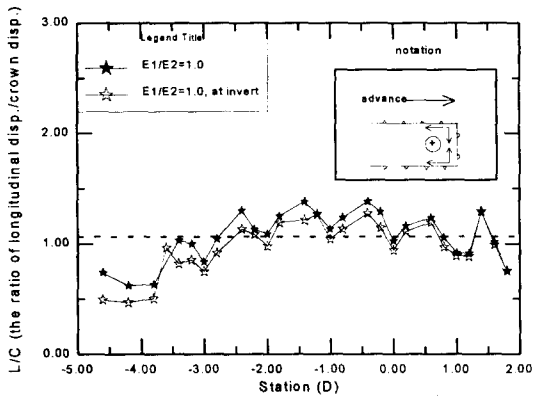


그림 3.3 균질한 지반에 터널 굴착시 L/C 비

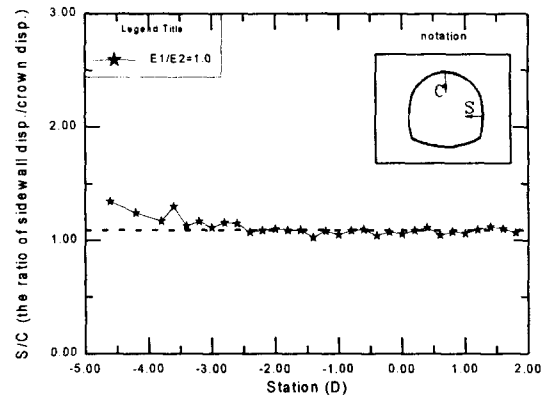


그림 3.4 균질한 지반에 터널 굴착시 S/C 비

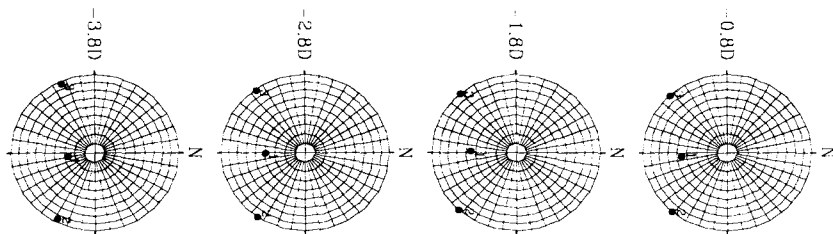


그림 3.5 균질한 지반에서 터널을 굴착한 경우의 내공 변위 평사투영도

3.3.2 터널이 불연속면을 통과하는 경우(Case 2,3)

터널이 경암층에서 연암층으로 진행하는 경우와 연암층에서 경암층으로 진행하는 경우에 대하여 경암과 연암의 강도의 차이, 경계면의 경사 방향(dip direction), 그리고 경사각(dip)이 터널의 천단 침하와 내공 변위에 미치는 영향을 검토하였다. 그러나 여기서는 불연속 경계면이 터널축과 직교하는 경우에 대해서만 살펴보기로 한다.

그림 3.6은 터널 굴착 시에 터널 막장 전방에서 경암과 연암의 경계면이 터널의 중심축에 수직으로 직교하는 경우(경사방향=0°, 경사각=90°)에 지반 강도의 차이에 따른 L/C 비를 나타낸 것으로 터널이 경암층에서 연암층으로 진행시에는 강성의 차이(E_1/E_2)가 커질수록 L/C 비는 점차 커짐을 알 수 있다. 이는 지반의 강성비가 커질수록 막장 전방의 연암층에 축방향 아칭에 의한 응력 집중이 커져서 터널 천정부의 종방향 변위(L)를 크게 유발시킨 반면 터널 천정부의 수직 방향 침하(C)에는 거의 영향을 미치지 않기 때문인 것으로 판단된다. 한편 터널 막장이 경계면으로 접근할수록 L/C 비는 커져서 경계면으로부터 약 2.0D 전방에 위치할 때 최대치를 보이다가 다시 균질한 지반에서와 동일한 값으로 줄어든 것으로 나타난다. 이 결과로부터 터널 굴착에 따른 주변지반의 영향범위는 약 2.0D 정도임이 확인된다.

반대로, 터널이 연암층에서 경암층으로 진행시에는 강성의 차이(E_1/E_2 비)가 커질수록 L/C 비는 작아짐을 알 수 있다. 이는 지반의 강성비가 커질수록 막장 전방의 경암층에 축방향 아칭 효과에 의해 응력이 집중되나, 경암층의 탄성 계수값이 크기 때문에 경암층의 변위의 발생이 연암층보다 작게 일어난다. 이에 연암층의 축방향 변위도 작아지게 되어 L/C 비가 작아지게 된다. 연암과 경암의 강성의 차이가 커지면, L/C 비는 영보다 작아질 수도 있다.

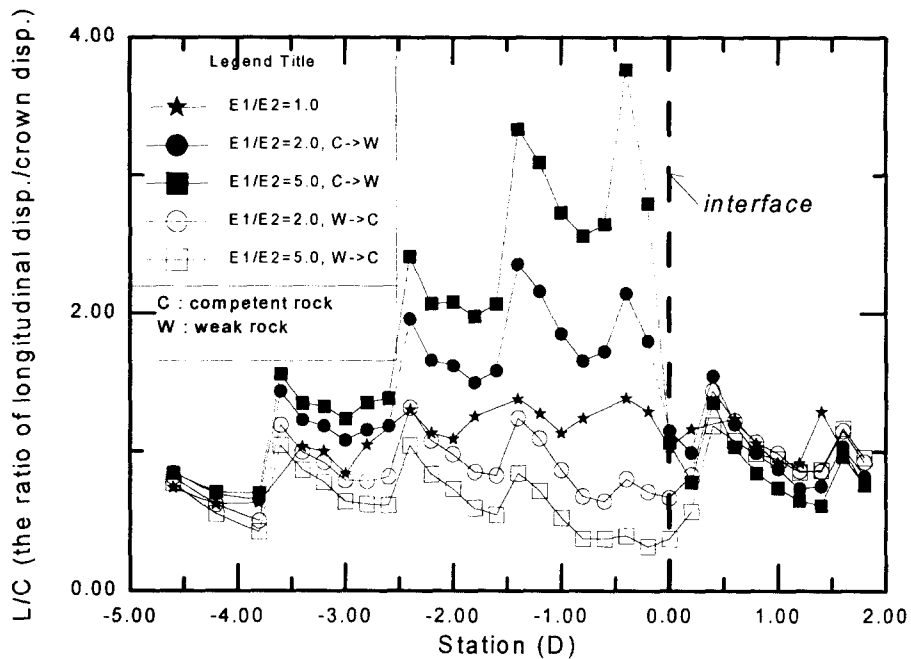


그림 3.6 지반 강도 차이에 따른 L/C 비
(경사 방향 = 0°, 경사각 = 90° 인 경우, $K_0 = 1.0$ 일 때)

표 3.4는 지반의 강성이 균질한 경우($E_1/E_2 = 1.0$)를 기준으로 하여 지반의 특성치가 변하는 경우에 대한 L/C 비와 S/C 비의 결과를 수치적으로 나타낸 것이다. 지반의 강성이 변함에 따라 L/C비는 크게 변하나 S/C에는 영향이 없는 것으로 나타났다. 이는 지반의 강성변화에 따라 종방향 아칭에는 변화가 뚜렷하게 나타나나 횡방향 아칭에는 변화가 없기 때문으로 판단된다.

표 3.4 지반 강도 차이에 따른 L/C, S/C 비
(경사 방향 = 0° , 경사각 = 90° 인 경우)

해석 조건 \ 진행 방향	L/C		S/C	
	경암→연암	연암→경암	경암→연암	연암→경암
$E_1/E_2=1.0, K_0=1.0$ 인 경우	1.000	1.000	1.000	1.000
$E_1/E_2=2.0, K_0=1.0$ 인 경우	1.584	0.730	1.067	0.980
$E_1/E_2=5.0, K_0=1.0$ 인 경우	2.410	0.444	1.083	0.922
$E_1/E_2=10.0, K_0=1.0$ 인 경우	3.037	0.325	1.098	0.865

그림 3.7은 경암층에서 연암층으로, 연암층에서 경암층으로 진행시의 경계면에서 $0.8D$ 떨어진 곳에서 측정된 변위의 3차원 벡터를 평사투영하여 나타낸 것이다. 균질한 지반에서는 중간정도의 값을 보이나 경암에서 연암으로 이동시에는 큰 값의 변화를 그리고 연암에서 경암으로 진행할 시에는 작은 값의 변화를 보인다. 경암층에서 연암층으로 진행시에는 그림 3.6에 나타난 바와 같이 강성비가 커지고 불연속면에 접근할수록 L/C비의 값이 증가한다. 이는 연암층에 집중된 종방향 하중전이 효과에 의해서 큰 변형이 터널 진행방향과 반대방향으로 발생함을 의미한다.

한편 연암층에서 경암층으로의 진행시에는 그림 3.6에서 나타난 바와 같이 강성비가 커지고 불연속면에 접근할수록 L/C의 값이 감소한다. 이는 종방향 하중전이 효과가 경암층에서 집중되나 경암층의 강성이 상대적으로 커서 종·횡방향으로 큰 변형이 발생하지 않기 때문이다.

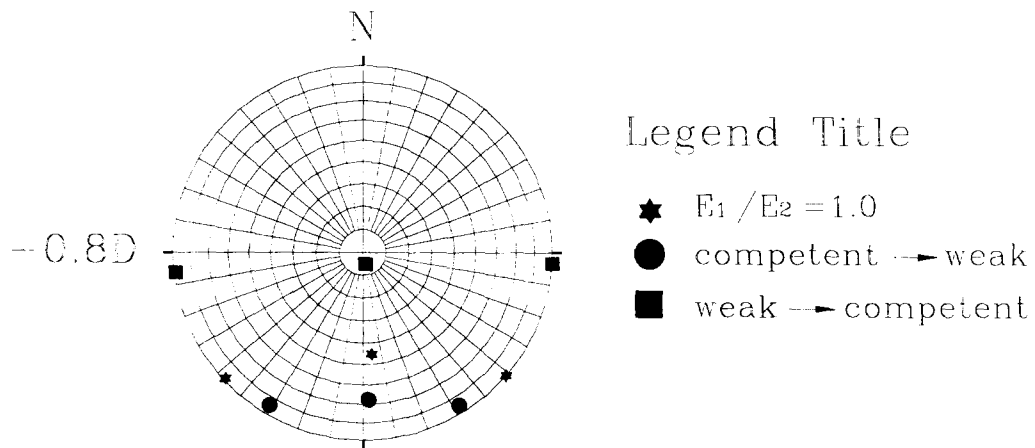


그림 3.7 지반 강도 차이에 따른 내공 변위의 평사투영도
(경사 방향 = 0° , 경사각 = 90° , $E_1/E_2 = 10.0, K_0 = 1.0$ 일 때)

3.3.3 터널이 파쇄대를 통과하는 경우(Case 4)

터널의 천단 침하량을 같은 시간에 각기 다른 측정지점에서 측정한 변위를 하나의 선으로 연결한 선을 영향선(influence line)이라고 정의하고, 영향선의 시작점에서 같은 거리만큼 떨어진 값들을 연결한 선을 경향선(trend line)이라고 정의할 때, 터널 전방에 파쇄대층이 존재하면, 터널의 막장이 파쇄대층에 접근함에 따라서 아칭 효과에 의해 터널 천단부의 수직 변위가 증가하게 되므로 영향선과 경향선으로부터 파쇄대층의 존재를 확인할 수 있다.

그림 3.8은 파쇄대층 없이 균질한 지반에 터널을 굴착하는 경우의 영향선과 경향선이다. 그림에서 보듯이 경향선의 변화가 없다. 그림 3.9는 터널 막장 전방에 파쇄대층이 존재할 경우의 영향선과 경향선으로 파쇄대층이 존재할 경우 이로부터 -2.0D 전부터 천단부에서 변위가 급격하게 증가하기 시작하여 경향선의 변화가 매우 크다.

그림 3.10과 3.11은 각각 경암층에서 연암층으로 진행한 경우와 연암층에서 경암층으로 터널이 진행한 경우에 있어서의 영향선과 경향선을 나타낸 것이다. 이 그림에서 보듯이 지반의 강성이 달라지는 불연속면이 존재할 경우에는 경계면 전방에서 경향선에 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 경계면에 접근하기 -0.2D 정도부터 경향선에 변화가 나타나기 시작하여 경암층에서 연암층으로 접근시에는 아래로, 연암층에서 경암층으로 진행시에는 위로 진행한다.

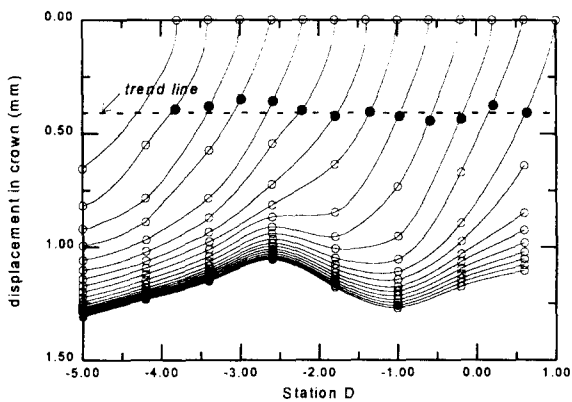


그림 3.8 균질한 지반에서의 영향선 및 경향선

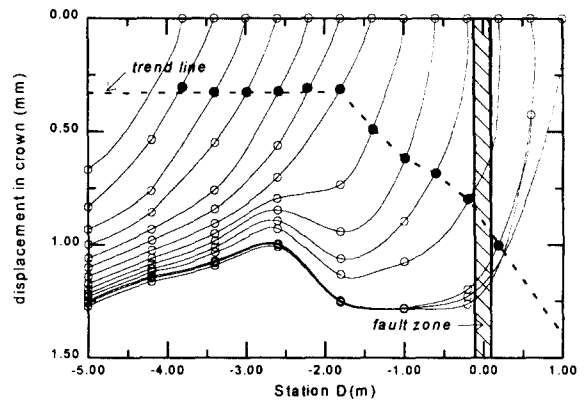


그림 3.9 파쇄대층에서의 영향선 및 경향선 (경사 방향=0°, 경사각=90°, $E_1/E_2=2.0$, $K_0=1.0$)

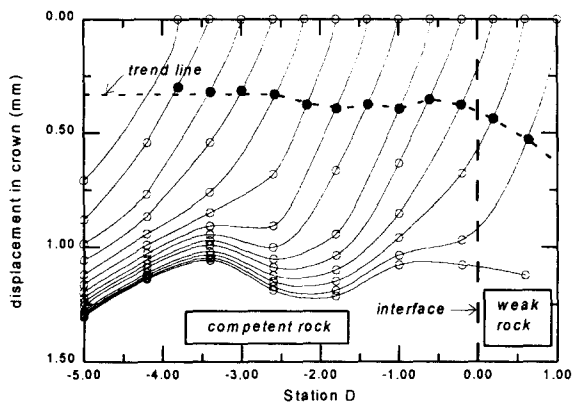


그림 3.10 경암층에서 연암층으로 진행시 영향선 및 경향선 (경사 방향=0°, 경사각=90°, $E_1/E_2=2.0$, $K_0=1.0$)

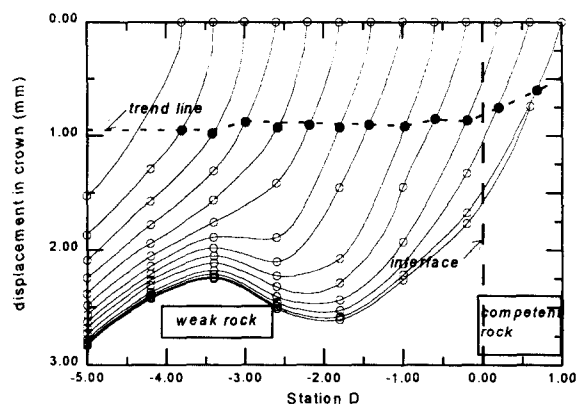


그림 3.11 연암층에서 경암층으로 진행시 영향선 및 경향선

4. 결론

터널의 3차원 해석 결과로부터 얻어지는 터널의 절대 내공 변위값을 이용하여 터널 막장 전방에 지반의 강성이 변하거나 연약한 파쇄대층이 존재하는지의 여부를 예측할 수 있는 해석 기법을 제시할 수 있었으며 이를 요약하면 다음과 같다.

- 1) L/C 비로부터 터널 막장 전방에 위치한 불연속면의 존재를 예측할 수 있다. 이 값은 경계면의 경사 방향의 영향은 적게 받는 반면, 지반 강도차이에는 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다.
- 2) S/C 비로부터는 터널의 중심축에 직각인 불연속면이나 파쇄대의 존재여부 예측은 불가능하나 비스듬히 접근하는 불연속면의 예측은 가능하다.
- 3) 영향선(influence line)과 경향선(trend line)을 통하여 막장 전방의 파쇄대의 존재여부 예측이 가능하다.
- 4) 평사투영한 3차원 내공변위로 부터, 막장 전방의 불연속면의 존재여부가 예측가능하며, 그 방향에 대한 예측도 가능할 것이다.

참고문헌

1. 삼성 건설(주) 기술연구소 (1995), " 대단면 지하공간 개발을 위한 기초연구 - 신라호텔을 중심으로 - ".
2. Gnilsen, R. (1989), " Numerical Methods ", *Underground Structures Design and Instrumentation*, Elsevier.
3. Hoek, E., Diederichs, M., (1989), *A Program for Plotting, Analysis and Presentation of Structural Geology Data Using Spherical Projection Techniques*, Version 3.0, Dips Manual.
4. Inazaki, T. (1995), " HSP: A New Tool for Detecting Fractures Ahead of Tunnel Face ", *Proceeding 8th International Congress on Rock Mechanics*, Tokyo, Vols. 2, pp 843~846, Rotterdam; Balkema.
5. Itasca Consulting Co. (1994), *3DEC(3-Dimensional Distinct Element Code)*, version 1.5, User's manual, Vols. 1, 2.
6. Lunardi, P. (1995), " Preconfinement of An Excavation in Relation to New Orientations Towards the Design and Construction of Tunnels ", *Periodico della Società Italiana Gallerie*, Anno XVII-N. 45, pp. 16~37.
7. Priest, S. D. (1993), *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*, Chapman & Hall, London, pp. 5~10.
8. Rabensteiner, K. (1996), " Advanced Tunnel Surveying and Monitoring ", *Felsbau*, vol. 14, Nr. 2.
9. Schubert, W., and Steindorfer, A. (1996), " Selective Displacement Monitoring during Tunnel Excavation ", *Felsbau*, vol. 14, Nr. 2.
10. Schubert, P., and Vavrovsky, G. M. (1994), " Interpretation of Monitoring Results ", *World Tunnelling*, November.
11. Schweiger, H., and Beer, G. (1996), " Numerical Simulation in Tunnelling — An Overview of Different Computational Models with Emphasis on Practical Applicability ", *Felsbau*, vol. 14, Nr. 2.