철도터널 파쇄대 절리 방향과 붕괴유형 상관성 분석

Analysis on the relationship of joint directions of fracture zone and collapse type in the railway tunnel

신효철*, 신민호**, 조국환†

Hyo-Chul Shin*, Min-Ho Shin**, Kook-Hwan Cho†

Abstract If there is a fracture zone such as poor rock tunneling, many difficulties were encountered in the tunnel reinforcement and construction. Thus, reinforced and sub method of construction is continuously developed. But, collapse accidents during construction still are often occured by various reasons. In this paper, Assuming the direction of the fracture zone change and side wall of tunnel collapse type, the destruction types of the tunnel are derived through the verification of collapse patterns when incurred direction of the fracture zone is 49 degrees, 30 degrees, 45 degrees, 60 degrees, 75 degrees each other. As a result, there is suggested that a relationship between the fracture angle and zone, the maximum fracture depth and direction. According to this study, it is expected that measures to establish from the existence of fracture zone.

Keywords **:** Tunnel excavation, Fracture zone, Collapse type, Fracture angle, Destruction type

초 록 터널굴착 시 단층파쇄대와 같이 불량한 암반이 존재할 경우 터널보강 및 시공에 많은 어려움이 있고, 이에 따른 보강, 보조공법이 나날이 발전되어가고는 있지만 아직까지 여러가지 이유로 인해 공사 중 붕괴 사고가 종종 발생되고 있다. 본 논문은 철도터널 시공 중 파쇄대 지역의 붕락 중 측벽부 붕락에 대하여 설계 적용된 일반 물성치하에서 존재된 파쇄대 방향 변화가 터널붕락 유형과 어떠한 상관성이 있는지, 실제 발생한 파쇄대 방향 49도 일 때 붕괴양상의 검정을 통하여, 30도 45도 60도 75도 일 때 파쇄대 방향변화를 통하여 터널의 파괴 유형을 도출하였다. 연구결과, 파쇄대 각도와 파괴영역과의 상관관계, 최대 파괴 깊이 및 방향을 제시하였으며 연구결과를 바탕으로 파쇄대의 존재에 따른 대책수립이 가능할 것으로 판단된다.

주요어 : 터널굴착, 파쇄대, 붕괴양상, 파쇄각, 파괴유형

1. 서 론

환경에 대한 관심이 산업발전에 주요 이슈로 등장함에 따라 녹색 및 친환경 교통수단인 철도 산업이 미래 교통수단으로 전세계가 철도사업을 확충하고 있다. 철도건설시 자연환경보존 및 생태계 파괴를 최소화하고 양호한 선형을 확보하기 위하여 터널의 설치는 증가하고 이에 비례하여 부정확한 전방지질을 굴착하는 터널공사는 항상 예기치 못한 사고의 위험이 존재하

† 교신저자: 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수
(khcho@seoultech.ac.kr)
* 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 석사과정
** 한국철도기술연구원 첨단인프라연구단 수석연구원

고 있다. 따라서, 본 연구에서는 철도터널 시공 중 파쇄대 지역의 측벽부 붕락에 대한 상태를 파악하고자 유한요소 해석 프로그램인 Phase2(V6.0)를 사용하여 붕락 재현 검토를 확인하였다.

2. 이론적 고찰

2.1 주변형(Principal Strain)

물체 속의 가상 절단면의 변형의 분포는 그 절단 방향에 따라 다르다. 서로 90° 의 각을이루며 전단 변형이 0으로 되는 방향이 존재하는데 그 방향에 대한 수직 변형을 주변형이라고 하며, 임의의 직교 좌표계에 있어서 주변형의 방향 Θ는 $\tan 2\theta = (\gamma_{xy})/(\varepsilon_x - \varepsilon_y)$이다. 여기서 x, y는 각각 x축, y축 방향의 수직 변형, γ_{xy}는 x방향 또는 y방향의 전단 변형이다. 마찬가지로 전단응력이 0으로 되는 방향을 주응력의 방향, 그 방향에 대한 수직 응력을 주응력이라 한다. 주응력의 방향은 $\tan 2\theta = 2\tau_{xy}/\sigma_x - \sigma_y$이다.

2.2 암석과 암반의 파괴 기준

암반구조물로 인하여 응력에 변화가 있었을 때, 이제까지의 여러 암석강도 이론 및 실험에 근거하여, 응력변화 이후의 응력이 파괴에 이르렀는지 아닌지를 판단할 수 있는 파괴기준을 설정하여야 한다. 파괴기준은 일반적으로 전단강도 크기로 결정하는 방법과 주응력의 차에 의하여 결정하는 방법으로 나뉜다.

전단강도(Shear Strength)의 크기로 결정하는 방법은 파괴가능면을 먼저 가정하고, 그 면에서의 전단응력(τ)과 전단강도(τ_f)를 비교하여 결정하는 방법이다. 여기서, 전단강도는 Mohr-Coilomb의 파괴기준에 따라 ($\tau_f = c+\sigma_n \tan\varphi$)로서 최대로 버틸 수 있는 저항력을 나타낸다.

주응력의 차에 의한 결정은 지중입자에 작용되는 최대주응력 및 최소주응력을 구하여 축차응력 $\Delta\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$ 가 기준강도를 초과하는 지의 여부로 결정하는 방법으로 Griffith의 파괴기준과 Hoek-Brown의 파괴기준이 이용된다.[3]

3. 수치해석을 통한 파쇄대 방향과 영향력 검토

3.1 수치해석 모델

철도 터널 시공 중 파쇄대 지역의 측벽부 붕락(파쇄대 절리 방향이 49도)에 대한 상태를 지반의 절리 등을 적용하기 적합한 유한요소 해석 프로그램인 Phase2(V6.0)를 사용하여 붕락 재현 검토 수치해석을 수행하였으며 이를 통해 주변지반응력을 확인하고자 하였다. 또한, Fig. 1에서와 같이 파쇄대 폭을 12.8m로 가정하였으며, 설계 적용된 동일한 물성치하에서 파쇄대 절리 방향이 30도, 45도, 49도, 60도, 75도 일 때를 검토하여 파쇄대 방향 변화가 터널붕락 유형과 어떠한 상관성이 있는지 조사, 분석하였다. 수치해석에 사용된 물성치는 Table 1과 같다.

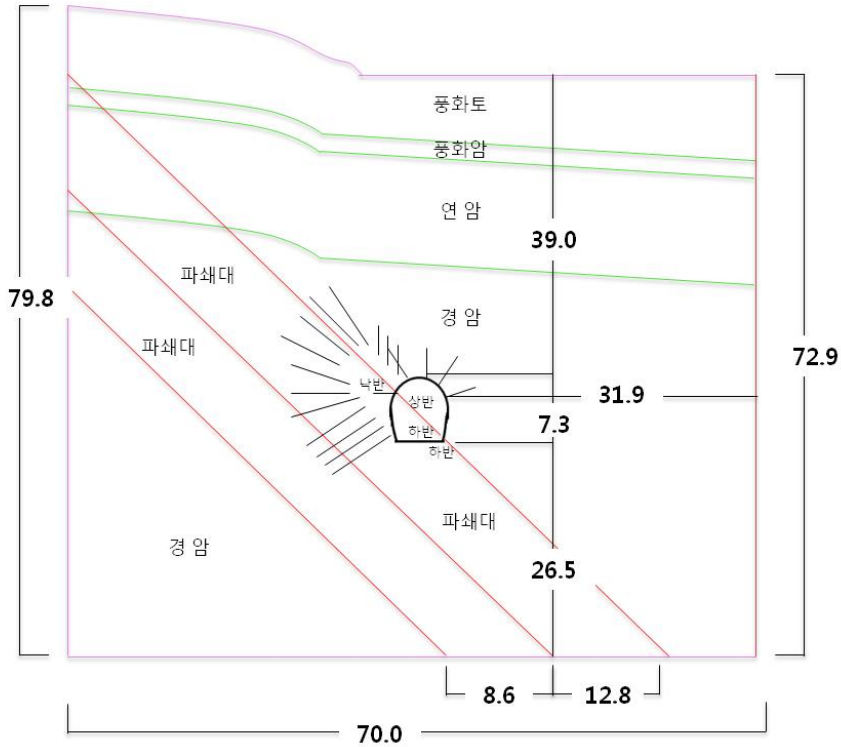


Fig. 1 The representation of numerical analysis model

Table 1 Soil properties of numerical analysis

구 분	E(MPa)	ν	Φ(˚)	C(KPa)	γ(kN/m^3)
매립토	20	0.35	26	0	18
풍화토	50	0.33	30	15	19
단층대	70	0.30	30	38	20
단층파쇄대	300	0.25	33	50	22
풍화암	300	0.25	33	50	22
연 암	1,000	0.21	35	360	25
경 암	3,000	0.18	37	1,300	27

3.2 파쇄대 방향에 따른 영향력 해석(Maximum Shear Strain)

Fig. 1 ~ 5는 각 파쇄대 절리 방향에 따른 영향력 범위를 나타내며 해석결과 파쇄대 방향이 급할수록 영향력의 면적은 감소하였으며, 주변장 역시 줄어드는 것을 알 수 있었다.

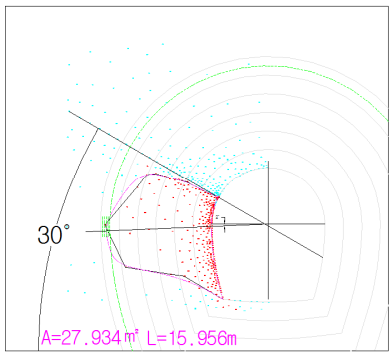


Fig. 2 Maximum shear strain theta 30

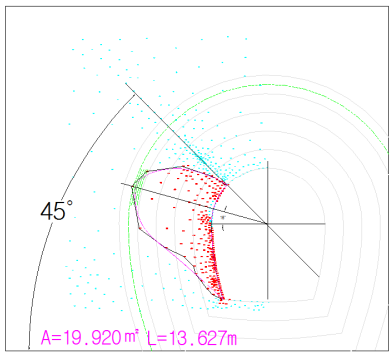


Fig. 3 Maximum shear strain theta 45

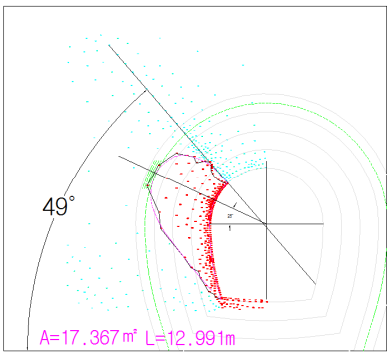


Fig. 4 Maximum shear strain theta 49

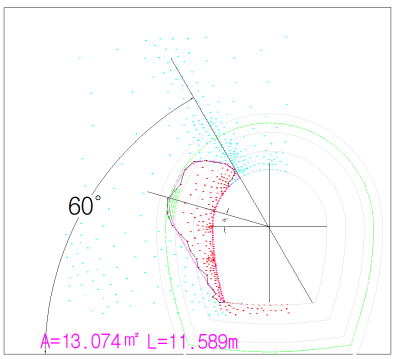


Fig. 5 Maximum shear strain theta 60

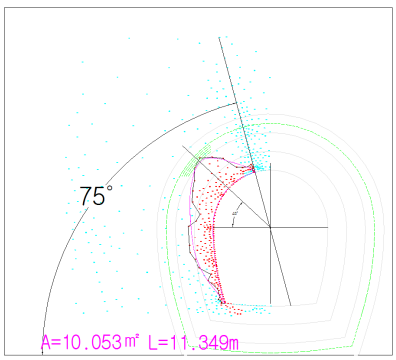


Fig. 6 Maximum shear strain theta 75

Table 2 Effect scale with direction of fracture zone

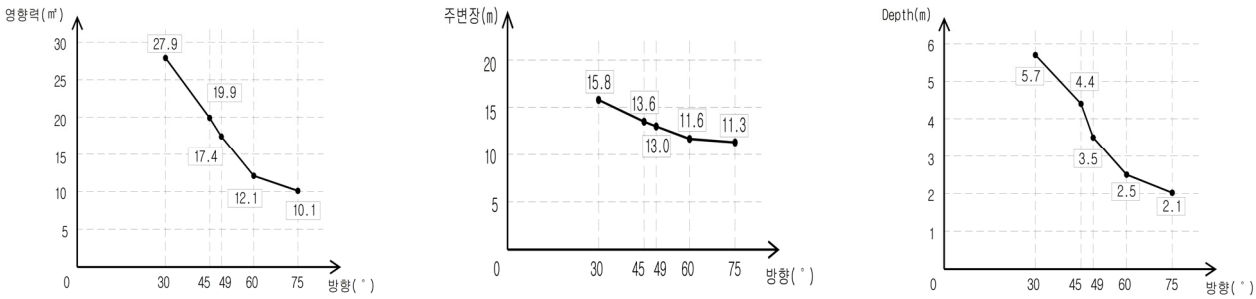
구분	영향력 단위면적(m^2) : (A)	단위주변장 면적(m^2) : (B)	A/B	상관관계	비 고
30°	27.9	15.9	1.75	위험	
45°	19.9	13.6	1.46	파괴 or 위험	
49°	17.4	13	1.34	파괴	발생
60°	13.1	11.6	1.13	파괴	
75°	10.1	11.3	0.89	파괴	

파쇄대 방향에 따른 영향력의 단위 면적과 단위주변장의 관련성에 대해서는 영향력 면적을 단위 주변장으로 나누었을 때 그 값이 1.34이하의 경우 파괴, 그 이상에서는 파괴 또는 위험군으로 유추할 수 있다.

Table 3 Effect near field with direction of fracture zone

구분	영향력 면적(m^2)	Max depth(m) : (A)	49°(붕괴)면적환산 : (B)	Max depth(A) / 환산비(B)	비 고
45°	19.9	4.4	1.14	3.9	
49°	17.4	3.5	1	3.5	붕괴기준
60°	13.1	2.5	0.75	3.3	
75°	10.1	2.1	0.58	3.6	

파쇄대의 방향에 따른 영향력의 Max Depth 와의 관련성은 각각의 영향력의 범위를 붕괴 발생값으로 환산하여 Max Depth 에 적용시켰을 때 거의 동일한 값(3.3~3.9) 즉, 붕괴 깊이의 상수(K)를 유추할 수 있었다.



(a) Effect scale diagram **(b) Effect near field diagram** **(c) Max depth diagram**

Fig. 6 Correlation diagram with direction of fracture zone

수치해석을 통한 결과 파쇄대의 방향에 따른 붕괴 영향은 각도가 적을수록 넓은 면적에 깊은 깊이까지 영향을 주었으며, 이는 각도가 급할수록 적은 면적의 얕은 깊이에 영향을 주어 사면파괴와 비슷한 붕괴유형이 나타날 것으로 판단된다.

4. 결 론

(1) 상기 연구 결과를 통하여 터널파괴(붕락,붕괴)등은 파쇄대의 방향 보다는 파괴의 특성(암질물성, 절리면, 충진물, 지하수등)에 의해서 좌우되지만 파쇄대 절리면 각도에 따라 보강깊이는 다른 것으로 판단된다. (상기 분석 결과에 따르면 영향 면적, 영향면적, 주변장은 각도가 낮을수록 깊은 영향을 미쳤다) 따라서 보강은 파쇄대 절리면이 급할수록 얕은 깊이의 보강이 필요하고, 완만한 절리면은 급한 절리면보다 붕락의 위험성은 낮고 작지만 실제 보강이 필요한 경우 (암질의 물성,지역적 특성,구조물특성에 따라 위험지수가 달라짐) 더 깊은 보강이 필요할 것으로 판단 된다.

(2) 영향 면적, 영향깊이는 절리 방향에 따라 달라지며 파쇄대 방향과 Max Depth 관계에서 깊이의 상수값 K(3.5± 0.4)을 통하여 절리면 각도를 알 수 있는 경우 상수를 통하여 붕괴깊이를 추정할 수 있다. 또한 보강 깊이는 이와 같이 추정된 깊이보다 깊게 보강하여야 한다.

(3) 향후 추가 연구 과제로서는 다양한 물성치와 파쇄대 방향과의 붕괴 현상을 반복적으로 Data를 축적하면 터널의 물성치와 절리면만으로도 터널의 위험성을 예측하고 보강깊이등 대책 수립이 가능할 것으로 판단된다.

참고문헌

[1] (사)한국터널공학회(2010) 터널붕괴 사례집, pp.31-32.

[2] 조선규(2003) 절리발달 암반 터널의 불연속체 해석과 연속체 해석에 관한 고찰,석사학위, 서울산업대 P4.

[3] 이인모(1999) *암박역학의 원리,* 새론, p102~103

[4] 한국철도시설공단(2011) 철도설계기준 (노반편), p 12-43~45.

[5] 김낙영,박영호,심재원,박용석(2009) 풍화파쇄대에서발생하는터널붕락 유형연구,한국지반환경공학회 논문집(특별논문집 제2호),pp55-61.