

폐광지역을 통과하는 철도터널의 안정성 검토에 관한 연구

A Study on the Stability Analysis Technique of the Railroad Tunnel passing through the Abandoned Mining Area

신원곤*
Shin, Hyeon-Kon,

배준원**
Bae, Jun-Hyun,

김무인***
Kim, Moo-Il

이준석****
Lee, Jun-Seok

ABSTRACT

Several possibilities on the stability analysis of the railroad tunnels passing through the abandoned mining area are considered in this paper. Previous works on the influence zone due to cavities are investigated to study the effect of the safety deterioration near the cavities which are normally unknown to the engineers. Additional works on the numerical analysis of the influential zone are also performed in 3-D space. The proximity of railroad tunnel and unexpected cavities is critical to influence the stability of railroad tunnel under construction. Furthermore, the study on the influence of underground condition like joint and faults should be significantly controlled under both design and construction stage.

1. 서론

기존 석탄광 채굴작업으로 인한 지표면의 침하나 폐갱 붕락등의 현상은 이미 잘 알려진 사실이며 이에 대한 보강방안도 국내,외적으로 널리 연구된 바 있다. 그러나 석탄광 채굴작업으로 인한 지하공동의 규모는 실제 채굴량과는 다른 경우가 간혹 있으며 채굴적 도면 또한 실제상황과 상이하거나 누락된 경우도 종종 있다. 따라서 불가피하게 지하 공동 인근으로 토목 구조물을 시공하는 경우에는 세심한 주의가 필요하여 경우에 따라서는 구조적 안전성을 검토하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 석탄광 인근을 통과하여 굴착예정인 철도터널의 시공에 따른 구조적 안전성을 검토하기 위한 방안을 연구하였다. 이를 위하여 폐갱등에 의한 절도 터널의 영향권을 분석하였고 실제 수처해석 과정에서 안전점울 개념을 도입하여 터널의 안정성에 대한 정량적 분석을 시도하였다. 마지막으로 절도터널과 인접하여 임의의 폐갱이 존재하는 경우를 가정하여 이에 대한 수치해석을 실시하여 실제 현장에서 발생 가능한 상황에서의 안정성을 미리 점검하였다.

2. 이론적 고찰

기존에 존재하고 있던 폐광 및 기타 공동이 본선 터널 시공시 미치는 영향권을 설정하기 위해 파괴

* 서울산업대학교 철도전문대학원 공학석사, 정회원

** 금동건설 주식회사, 사원, 정회원

*** 서울산업대학교 교수, 정회원

**** 한국철도기술연구원 본부장, 정회원

역학을 이용한 고전적인 방법과 탄성론 및 수치해석적 방법을 이용한 응력의 변화추이를 고려하는 방법 등이 있다. 고전적인 방법은 Liu & Kemery^[1] 이 파괴역학에 기초로 하여 폐광과 주변 절리의 상호작용 및 충진 (backfill) 의 영향권을 제시하였는데 폐광으로 인해 주변 절리의 응력이 2.4배 정도 증가되었다. 또한, 탄성론에 입각한 평형방정식 및 적합방정식으로부터 적절한 경계조건을 대입하여 다음과 같은 이론식들을 유도할 수 있다. 즉,

$$\sigma_r = \frac{1}{2} P_z \left\{ (1+k)(1-2\frac{a^2}{r^2}) + (1-k)(1-4\frac{a^2}{r^2} + 3\frac{a^4}{r^4}) \cos 2\theta \right\}$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} P_z \left\{ (1+k)(1+2\frac{a^2}{r^2}) - (1-k)(1+3\frac{a^4}{r^4}) \cos 2\theta \right\}$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2} P_z \left\{ -(1-k)(1+2\frac{a^2}{r^2} - 3\frac{a^4}{r^4}) \sin 2\theta \right\}$$

여기서, σ_r , σ_θ 및 $\tau_{r\theta}$ 는 각각 임의의 지점의 반경방향, 원주방향 및 전단 응력을 의미하고 k 는 초기 수직 지압에 대한 초기 수평방향 지압의 비, 즉 토압계수를 나타낸다. Hock & Brown^[6] 에 의하면 원형 터널의 경우, 터널 중심으로부터 반경의 약 3배를 영향권으로 설정하였다. 탄성론의 경우 터널의 형상이 원형이고 외부 하중이 일정한 경우에만 적용이 가능하므로 임의의 형상 및 현실적인 초기 지압을 고려하여야 하는 경우에는 수치해석 등을 통하여 터널의 영향권을 설정하여야 한다. 또한 침하 이론을 기초로 한 경험적 방법에 의해 영향권을 설정하였는데, 폐광 채굴고의 3배를 그 영향권으로 설정하였다.

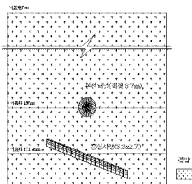
3. 수치해석

폐광의 영향을 파악하기 위하여 폐광이 영향권에 연결하고 있는 노선 중 가장 위험한 구간을 선정하고 이 구간에 대하여 3차원 수치해석을 수행하여 본선 터널에 대한 공동 또는 폐광의 영향을 분석하였다. 또 3차원 해석을 통한 폐광의 영향권을 분석하기 위하여 암반 강도/응력비를 계산할 수 있는 알고리즘을 사용하였으며 이는 3차원 FLAC 프로그램 (Itasca^[10]) 의 FISH 함수를 적용하였다.

3.1 해석모형 및 수치해석 모델링

(1) 해석 모형

대상 모형에 대한 탄소성 해석은 Itasca Consulting Group에서 개발한 유한차분해석 수치프로그램인 3차원 프로그램 FLAC-3D (3 Dimensional Fast Lagrangian Analysis of Continua)를 사용하여 그림 1. 터널의 지층도



수행하였다. 본 연구에서는 해석의 편의를 위해 직경 8.7m 원형터널을 가정하였으며, 암반 해석에 널리 사용되는 Mohr-Coulomb 광복기준을 사용하여 원지반을 모형화하였다. 또한 터널 중심부에서 지표면까지의 높이는 150m로 그림 1.의 지질도와 같이 나타내었다. 마지막으로 터널해석에 사용된 지

반응성치를 산정하였으며 이를 표 1에 나타내었다.

표 1. 해석에 사용된 지반물성치

시층	단성계수 (t/m^2)	포아송비	마찰각 ($^{\circ}$)	점착력 (t/m^2)	단위중량 (t/m^3)	죽압 계수	민중선도 (t/m^2)
점결	700,000	0.24	40	100	2.65	1.0	60

(2) 수치해석 모델링

설계 대상구조물의 굴착단계별 해석과정은 원지반의 초기 지압을 계산한다. 다음으로 중심사갱을 굴착하여 지압의 평형상태를 계산한 후 본선터널을 6m씩 굴진하는 것으로 가정하여 각각의 단계별 해석을 수행하였다. 단계별 굴착시 실제 시공 상황을 고려하는 것이 바람직하나 해석의 편의를 위하여 6m로 가정하였다.



그림2. 본선터널 및 중심사갱 모델

만일, 해석 모형의 경계부위가 중심사갱 및 본선터널의 굴착에 영향을 받지 않게 하기 위하여, 각각 지평의 3D 이상으로 확장하여 폭은 40m, 길이방향은 60m까지 경계면을 구성하였으며 높이는 수행시간을 고려하여 70m 구간으로 하고 상부압반의 하중은 초기에 반영하도록 경계면을 구성하였다. 중심사갱과 본선터널의 모델은 그림2와 같으며 앞서 시술한 바와 같이 최소 인접방향의 간격은 25.81m이고 중심사갱의 경사각은 -20° , 본선터널과의 교차각은 54° 로 실제 조건에 맞도록 모델링하였다. 경계조건은 하부면을 X, Y, Z방향으로 구속하였으며 죽압계수 1.0을 사용하여 X 및 Y방향으로 구속압을 제거하였다. 또한 실제 본선 터널에 사용되는 록볼트, 스크리드 혹은 라이닝재는 해석 단계에서 고려하지 않았다.

3.2 해석결과

제계에 의한 터널의 영향권 분석을 위하여 FLAC-3D 프로그램 분석결과를 수록하였다. 중심사갱의 굴착에 의한 초기응력의 수행도량 분석한 후 본선터널의 영향권을 검토하고, 마지막으로 본선터널의 시공단계별 제계에 의한 영향권 및 안정성에 대하여 검토하였다.

(1) 중심사갱 굴착단계

원지반에 초기지압을 가한 후 초기응력상태에서 중심사갱을 일괄적으로 굴착하여 지반응력의 수행도를 분석하였다. 본 연구에서는 FLAC 3D의 FISH 함수를 사용하여 FLAC 3D 내에서 직접 계산할 수 있도록 프로그램을 구성하였다. 이 경우, 굴착에 의해 제거된 grid 망을 제외하고 각 grid의 최대, 최소 주응력과 내부 마찰각, 점착력 및 인장 강도로부터 Mohr-Coulomb 항복함수에 상응하는 양반 강도를 계산하였다. 한편, 그림 3의 최대 주응력도를 살펴보면 중심사갱의 굴착면에서 압축응력이 초기지압 ($478t/m^2$)보다 약 $150t/m^2$ 정도 감소하는 경향을 보이며 그림 4의 최소 주응력도의 경우, 중심사갱의 굴착면에서 압축응력이 초기지압보다 약 $350t/m^2$ 의 증가를 보이고 있다.

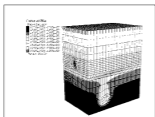


그림3. 최대 주응력

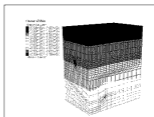


그림4. 최소 주응력

영향권을 파악하기 위하여 원지반의 강도와 중심사경 굴착에 따른 실제 응력상태와의 비 (강도/응력 비)를 계산하였다. 그 결과 비율 (Safety factor)이 전체적으로 1.0 이상이므로 중심사경의 굴착에 의한 영향권이 본선터널의 굴착전행 영역에까지 미치지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 현재 작업중에 있는 중심사경은 본선터널의 안전에 영향을 없음을 알 수 있다.

(2) 본선터널 굴착단계

본선터널은 6m씩 총 10단계에 걸쳐 60m의 연장을 굴진한 것으로 하였으며 각각의 단계별로 수치해석을 수행하였다. 굴착단계별로 강도/응력비를 계산한 결과 본선터널 굴착면에서만 1.0보다 작게 나타나고 나머지 구역에서는 모두 1.0 보다 크게 나타나고 있다. 따라서 계경에 의한 영향권 분석에 있어서 중심사경은 본선터널 굴착시 영향을 미치지 않고 있으며 사경으로 인한 피해 가능성은 미미한 것으로 파악된다. 심사경과 연리지리가 가장 근접한 부근(본 모델의 중앙부)의 본선터널 원단부에 연직시방향을 계산한 결과 3.59mm로 나타났다.

4. 영향권 내의 계경모델의 안정성 고찰

본선터널 굴착시 예기치 못한 폐암이 출현할 경우 이에 대한 대책방안을 강구하기 위하여 본선터널과 인접한 가상의 폐암을 고려하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 가상의 인접 폐암에 의한 본선터널의 영향권을 분석한 후 계경의 붕괴음으로 인한 안정성 검토를 수행하였다. 폐암의 존재는 본선터널의 중심점에서 10m 이격되어 있고 서로 90°로 통과하는 것, 본선 터널의 직경이 8.7m인 점을 고려하여 가장 근접하게 통과하는 폐경으로 가정하였다. 지반의 물성 및 본선터널의 통과깊이는 앞에서



그림5. 영향권 내의 계경 모델링

사용된 물성 및 지표면 150m 통과노선을 선정하였다. 해석모델은 40m 폭과 40m 너비의 3차원 구조체로 정하였으며 높이는 40m로 모델링을 하였다. 결구방은 9,280개의 zone과 10,122개의 grid point로 구성하였으며 이를 앞의 그림5와 같이 나타내었다. 먼저 초기 지압 상태를 설정하고 계경의 굴착에 의한 지반내 수압도를 분석하였으며, 본선터널의 굴착단계별 해석을 수행하였다. 본선터널 단

계별굴착수 굴착 및 현지 조건을 최대한 반영하기 위하여 처음에는 4m로 굴착을 하다가 폐광에 근접하여서는 2m씩 굴착하는 것으로 가정하였다.

본선터널의 3D내에 근접한 폐광의 해석결과를 그림6,7 에 나타내었다. 주응력도를 살펴보면 폐광 굴착에 의하여 본선터널 위치의 연직부까지 σ_c 영향이 미치는 것을 알 수 있다. 또한 강도/응력비를 계산하면 그림8과 같으며 전체적으로 1.0이상의 값으로 폐광의 굴착은 안전한 것으로 나타났다.

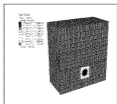
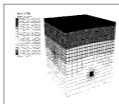
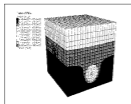


그림6.폐광굴착에 의한 최대수층량도 그림7.폐광굴착에 의한 최대수층량도 그림8.폐광굴착에 의한 강도/응력비

특히 본선터널을 환전굴착한 후의 결과에 의하면 강도/응력비가 1.0이하의 값을 나타내고 있지는 않지만 그림9와 같이 폐광과 본선터널 사이로 영향권이 교차하는 것을 알 수 있고 이로 인하여 본선터널의 안전에 영향을 미치고 있다 할 수 있다. 또한 단계별 본선터널 굴착방향으로 20m 중앙부의 크라운부의 연직변위를 보면 그림10와 같다. 그림에서 보듯이 폐광위치를 통과할 경우 가장 많은 처짐이 발생하며 최종변위는 4.134mm로 나타났다. 변위의 크기만을 검토한다면 구조물의 안전에는 지장이 없겠지만 홍심사경의 해석결과(3.59mm)보다 약 15%이상 연직처짐이 발생하고 있음을 알 수 있다.

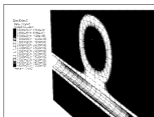


그림9. 최종굴착 후의 강도/응력비 최대도

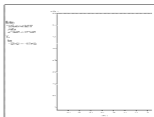


그림10. 터널 선단부의 연직처짐 발생

5. 결론

본 연구에서는 기존 폐광 주위를 통과하여 시공 예정인 철도 터널의 안정성을 검토하기 위한 목적으로 폐광에 의한 영향권을 파악하기와, 민성문, 경원적 방법 및 수치해석을 통하여 정량적인 분석을 실시하였다.

- (1) 경원적 방법에 의한 폐광의 영향권 산정법을 기초로 본선터널에 가장 큰 영향을 줄 수 있는 인자를 파악하였다.
- (2) 수치해석 결과 폐광 영향권에 인접하고 있는 노선 중 나타난 폐광과의 교차부에서는 굴착단계별 강도/응력비가 1.0이상으로 폐광은 본선터널 굴착시 영향을 미치지 않고 있는 것으로 분석

되었다.

- (3) 설계상황을 가정한 임의의 인접내 폐광의 영향권 분석에 있어서는 영향권 밖의 경우에 비하여 약 15%이상의 연직 처짐을 발생하였다. 따라서 본실험터널과 폐광의 교차부에서의 안정성 검토는 지반정수와 암반의 절리상태 및 폐광과의 인접거리에 따라 크게 달라지므로, 다각적인 검토를 요한다.

참고문헌

- [1] 석탄산업합리화사업단 (1995b), 철암지역 지반침하 보강공사 실시실례보고서.
- [2] 석탄산업합리화사업단 (1996), 고사리지역 지반안전성조사.
- [3] 석탄산업합리화사업단 (1995a), 지하채굴에 따른 지반안전성평가 및 대책 연구
- [4] 철도청 (1999), “영동선 동백산~도계간 철도이설 기본선계 기본실계보고서”.