

암반분류와 Mohr-Coulomb 이론해를 이용한 터널 전구간 안정성 분석

정용복, 박의섭, 류동우, 천대성*

Analysis of Whole Tunnel Stability by Using Rock Mass Classification and Mohr-Coulomb Analytical Solution

Yong-Bok Jung, Eui-Seob Park, Dong-Woo Ryu, Dae-Sung Cheon*

Abstract Finite element or difference methods are applied to the analysis of the tunnel stability and they provide detailed behaviour of analyzed tunnel sections but it is rather inefficient to analyze all the section of tunnel by using these methods. In this study, the authors suggest a new stability analysis method for whole tunnel to provide an efficient and easy way to understand the behaviour of whole tunnel by using an analytical solution with the assumption of equivalent circular tunnel. The mechanical behaviour, radial strain and plastic zone radius of whole tunnel were analyzed and appropriate support pressure to maintain the displacement within the allowable limit was suggested after the application of this method to the tunnel. Consequently, it was confirmed that this method can provide quick analysis of the whole tunnel stability and the quantitative information for subsequent measures such as selection of tunnel sections for detailed numerical analysis, set up of the monitoring plan, and so on.

Key words Tunnel stability, Rock mass classification, Mohr-Coulomb failure criterion, Analytical solution, Support pressure

초 록 터널의 안정성 평가방법 중 유한요소법이나 유한차분법과 같은 수치해석을 수행하면 정밀한 지반거동을 예측할 수 있으나 터널노선 전구간에 대한 수치해석은 경제적으로 비효율적이다. 따라서 본 연구에서는 이론해를 사용하고 이를 적용할 수 있도록 터널을 등가면적의 원형으로 가정하여 터널 전구간에 대한 안정성을 분석하는 방법을 제시하였다. 이를 실제 터널에 적용하여 터널 전구간에 대해 예상되는 변형거동과 정량적인 변형을 및 소성변형을 계산하였고 이로부터 변형을 적절한 수준 이내로 제한하기 위한 지보압을 제시하였다. 적용 결과 제안된 방법은 전체 터널 구간에 대한 신속한 안정성 평가와 주요 불안정 구간에 대한 정밀 해석이나 계측설계와 같은 후속조치를 위한 정량적 자료를 제공할 수 있음을 확인하였다.

핵심어 터널 안정성, 암반분류, Mohr-Coulomb 파괴기준, 이론해, 지보압

1. 서 론

일반적으로 터널의 안정성을 평가하기 위해서 유한요

소법이나 유한차분법과 같은 수치해석을 수행하면 정밀한 지반거동을 예측할 수 있으나 터널노선 전구간에 대한 수치해석은 경제적으로 비효율적이다. 해석에 소요되는 시간과 경비뿐만 아니라 해석 결과를 어떤 식으로 정리해서 활용할 것인가 하는 측면에서도 이는 비효율적이다. 터널 구간이 짧은 경우 요즘은 컴퓨터의 발달로 인해 3차원 안정해석이 가능하나 대부분의 터널이長大화 됨에 따라 수 km에 이르는長大터널의 경우 전구간에 대한 수치해석을 수행하는 것은 바람직하지 않다. 따라서 본 연구에서는 이론해를 사용하고 이를 적용

Received: Jul. 3, 2013

Revised: Aug. 5, 2013

Accepted: Aug. 5, 2013

***Corresponding Author:** Dae-Sung Cheon

Tel) +82428683248, Fax) +82428619721

E-Mail) cds@kigam.re.kr

KIGAM, 124 Gwahang-no, Yuseong-gu, Daejeon, 305-350 Korea

할 수 있도록 터널을 등가면적의 원형으로 가정하여 터널 전구간에 대한 안정성을 분석하는 방법을 제시하였다. 이로부터 터널 전구간에 대해 예상되는 변형거동과 정량적인 변형률 및 소성반경과 변형률을 적정한 수준 이내로 제한하기 위한 지보압을 제시하고자 하였다.

2. 이론적 배경 및 적용절차

2.1 이론해

터널 주변의 변형을 신속하게 계산하기 위해서 터널을 원형으로 가정하여 이론적 해를 적용하고자 하였다. 이론해의 경우 수식으로 제공되므로 계산이 매우 용이하다. 본 연구에서는 Mohr-Coulomb 파괴기준에 근거하여 다음과 같이 계산을 수행하였으며 사용된 변수 및 형상은 Fig. 1과 같다(Duncan Fama, 1993, Hoek, 2006).

먼저 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 주응력을 사용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k\sigma_3 \quad (1)$$

암반의 일축압축강도 σ_{cm} 와 기울기 k 는 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2)$$

$$k = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (3)$$

Fig. 1과 같은 조건에서 터널 지보압이 임계압력 p_{cr} 보다 작은 경우 항복이 발생한다.

$$p_{cr} = \frac{2p_o - \sigma_{cm}}{1 + k} \quad (4)$$

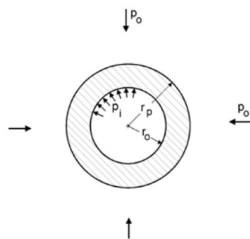


Fig. 1. Variables for calculation of strain and plastic zone radius around the circular tunnel (after Hoek, 2006, r_p = plastic zone radius, r_o = original tunnel radius, p_o = in situ stress = depth below surface x unit weight of rock mass, p_i = internal support pressure)

내부 지보압이 임계압력보다 큰 경우 항복은 발생하지 않으며 탄성거동을 한다. 이 경우 터널벽면의 반경방향 변위는 다음과 같다.

$$u_{ie} = \frac{r_o(1+\nu)}{E_m}(p_o - p_i) \quad (5)$$

지보압이 임계압력보다 작은 경우 항복이 발생하며 본 논문에서는 탄성-완전소성 거동을 가정하여 유도된 식을 사용하였다. 이 때 소성반경 r_p 는 다음과 같이 주어진다.

$$r_p = r_o \left[\frac{2(p_o(k-1) + \sigma_{cm})}{(1+k)((k-1)p_i + \sigma_{cm})} \right]^{\frac{1}{k-1}} \quad (6)$$

암반의 팽창각을 0으로 가정한 경우 소성파괴에 의한 터널벽면에서의 반경방향의 총변위는 다음과 같다.

$$u_{ip} = \frac{r_o(1+\nu)}{E_m} \left[2(1-\nu)(p_o - p_{cr}) \left(\frac{r_p}{r_o} \right)^2 - (1-2\nu)(p_o - p_i) \right] \quad (7)$$

여기서 E_m 과 ν 는 암반의 변형계수와 포아송비이다. 암반변형계수는 Serafim & Pereira(1983), 포아송비는 Tsuchiya(1984)가 제안한 식을 사용하여 계산하였다.

2.2 적용 절차

제안된 방법을 적용하기 위해서는 Fig. 2와 같이 먼저

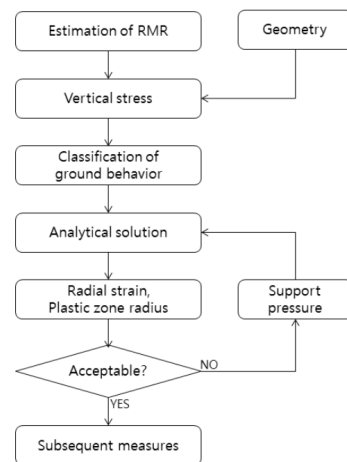


Fig. 2. Application procedure of the stability analysis of whole tunnel using analytical solution

크리킹이나 최적화 기법 중 하나인 SA(Simulated Annealing) 법 등을 사용하여 노선 전구간에 대한 심도 및 RMR 분포를 추정하여 예상 지반거동을 분류한다. SA는 전역최적화 기법의 하나이며 목적함수를 최소화(또는 최대화)하기 위해 관심변수의 일부를 교란하여 최소값에 도달하도록 한다. 다만 전역최적화를 위해 목적함수가 증가(최소화일 경우)하더라도 일정한 확률로 그 변화를 수용한다(최종근, 2007). 다음으로 연직응력을 산정하여 탄소성이론을 적용하면 터널의 예상변형률과 소성반경을 구할 수 있다. 과도한 변형이 예상되는 구간에 대하여 지보압을 고려한 재해석을 통해 적정 범위 내에서 변위가 발생하는지 검토하여 해석을 종료하고 이를 근거로 추가해석 구간을 선정하거나 계측설계를 수행하면 된다.

3. 적용 결과

2절에서 언급한 방법을 실제 터널에 적용하였다. 이 터널의 경우 해저구간에 시공되는 터널로서 연직응력 산정시 수심도 함께 고려해야 하며 본 연구에서는 전응력을 사용하였다.

3.1 수심 및 RMR 분포

본 연구에서는 크리킹기법을 사용하여 4 m 간격으로 터널 전구간에 대해 터널천단 상부 0.5D에서의 RMR을 산정하였다. 산정된 RMR과 수심 및 터널 노선은 Fig. 3과 같다. RMR은 40 ~ 80 범위로서 전 노선구간이 II-III 등급 암반에 포함된다. 수심은 최대 -34 m이며 종점 5.6 k 구간에 존재한다.

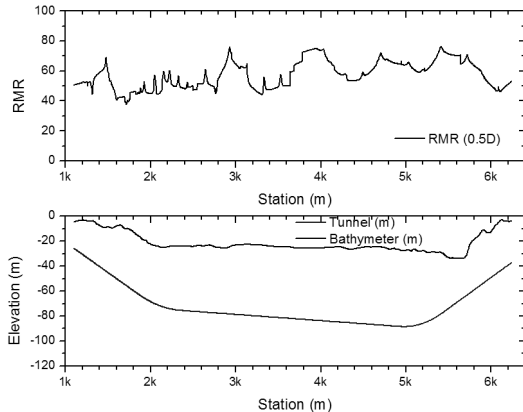


Fig. 3. RMR and bathymeter distributions along the studied tunnel. RMR was calculated by SA

3.2 예상 지반거동 분류

터널상부 피복암의 두께(H)와 수심, 그리고 등가 터널 직경(B=10.27m)과 RMR로부터 환산된 Q값을 사용하여 Singh & Goel(2006)의 제안을 사용하여 예상되는 지반거동을 분류하였다. 여기서 사용한 Q값은 SRF=1 인 경우의 Q값으로서 보통 N으로 표시한다. 본 노선의 경우 Fig. 4와 5에 표시한 것과 같이 전구간 대비 40.4%가 자립가능한 경우(Self supporting)로, 59.6%가 변형은 발생하지만 압축(squeezing) 현상은 발생하지 않는 경우 “Non squeezing”에 해당되는 것으로 나타났다. 이는 수심과 피복암의 두께가 비교적 작아서 초기지압이 상대적으로 작기 때문에 이러한 거동으로 분류된 것이다. 그러나 현재 자료는 일부 조사자료를 활용한 최적화기법에 의한 것이므로 “Non squeezing” 으로 분류되는 구간에 대해서는 주의할 필요가 있으며 지반보강을 고려해야 한다.

3.3 무지보시 총변형률 및 소성반경비 분포

식 (6)과 (7)에서 $p_i = 0$ 인 경우 무지보에 해당한다. 이 경우 소성반경비와 변형률을 계산하여 전체 노선에

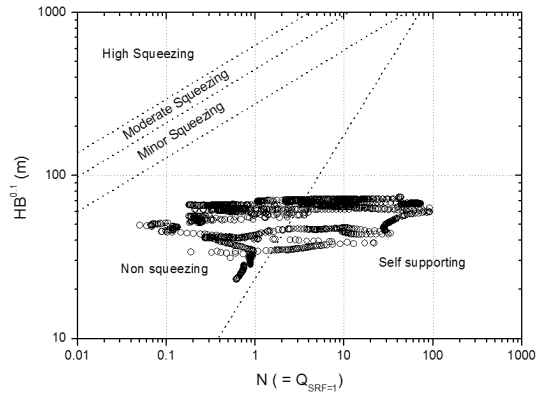


Fig. 4. Classification of expected ground behavior of studied tunnel (after Singh & Goel, 2006)

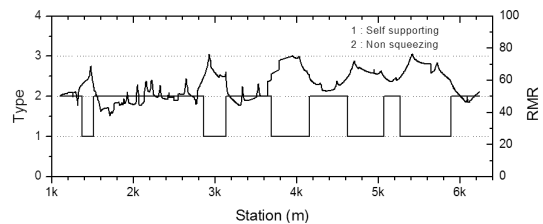


Fig. 5. Distribution of ground behavior type along the tunnel route (type = 1: Self supporting, type = 2: Non squeezing)

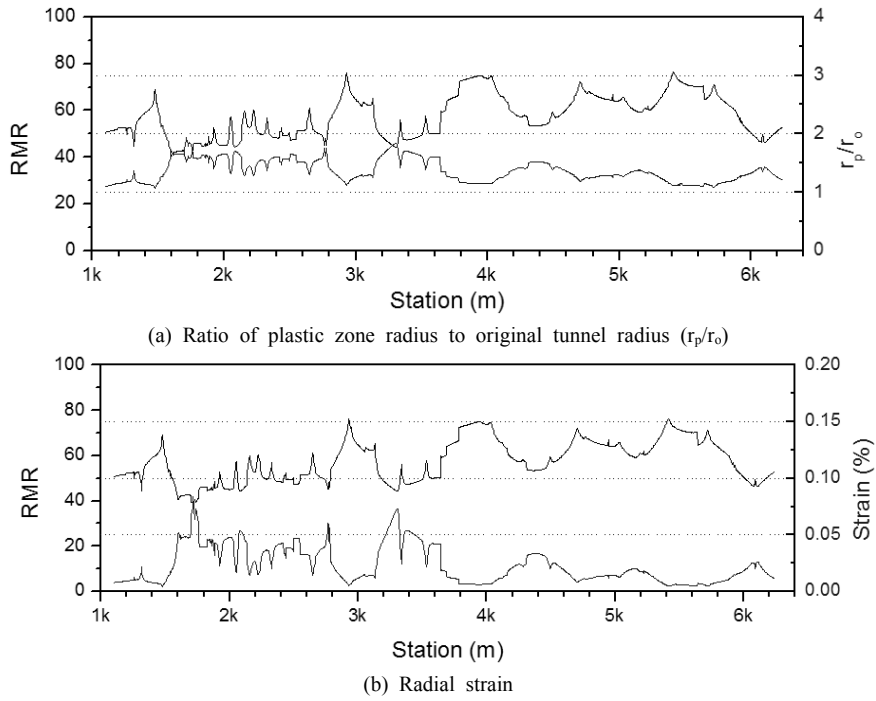


Fig. 6. Distribution of (a) ratio of plastic zone radius to original tunnel radius and (b) radial strain along the tunnel without any support

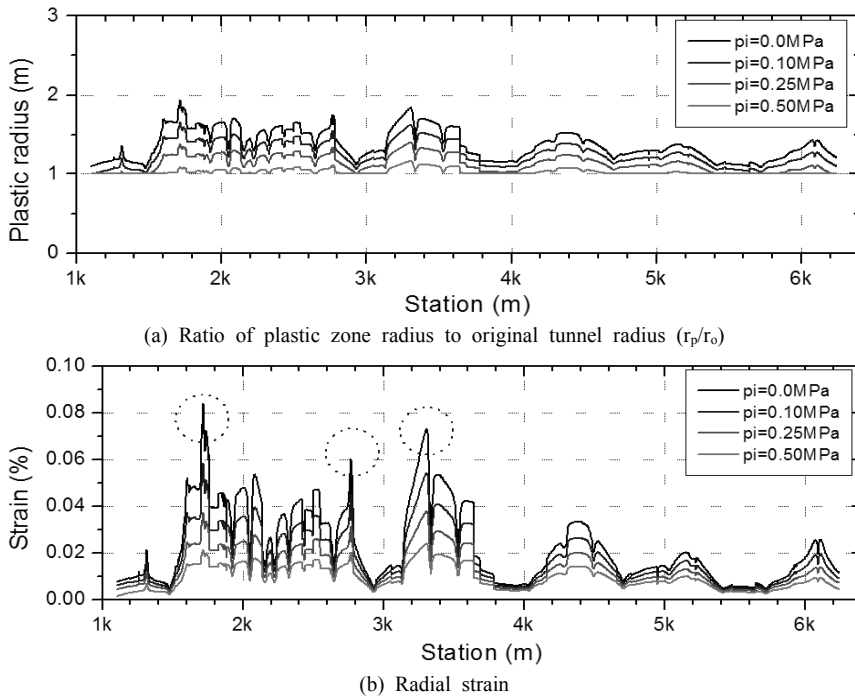


Fig. 7. Distribution of (a) ratio of plastic zone radius to original tunnel radius and (b) radial strain distribution according to the different support pressures

대하여 RMR과 같이 표시하면 Fig. 6과 같다. 소성반경비의 경우 1 ~ 2 범위이므로 터널 벽면에서 약 0 ~ 5 m 안쪽으로 소성/탄성 경계부가 형성됨을 알 수 있다. 변형률의 경우 대부분의 구간에서 0.1% 이하로 나타났다. 전 구간에서 변형률 0.05%를 초과하는 구간은 전체 터널구간의 6.1%로 나타났다. 변형률 0.05% 초과 구간은 각각 1.6 k ~ 1.8 k, 2.6 k ~ 2.8 k, 그리고 3.2 k ~ 3.4 k 이다. 이 구간은 나머지 구간에 비하여 상대적으로 큰 변형이 예상되므로 추가적인 안정 및 지보 해석을 통해 적절한 지보대책을 마련하는 것이 바람직하다.

대부분의 변수들이 RMR에 근거하여 계산되는 특성상 소성반경이나 반경방향 변형률의 형태가 RMR에 반비례하는 형태로 나타났다. 다만 1 k ~ 1.3 k 구간은 RMR이 소폭 증가하나 심도증가에 따른 초기응력 증가로 소성반경이나 변위가 함께 증가하는 형태를 보이고 있다.

3.4 지보압에 따른 총변형률 및 소성반경비 분포

총변형률을 0.05% (변위환산시 2.6 mm) 이내로 제한하기 위한 지보압을 산정하기 위해서 지보압이 각각 0.10 MPa, 0.25 MPa, 그리고 0.50 MPa일 때의 변형률과 소성반경비를 다시 계산하였다.

각 지보압에 대한 계산 결과는 Fig. 7과 같이 0.25 MPa 이상의 지보압이 작용하는 경우 전 터널구간에서 소성반경비는 1.5 이내, 변형률은 0.05% 이내로 감소하였다. 특히, 무지보시 예상변형률이 0.05%를 초과하는 구간에서 지보압의 증가에 따라 감소폭이 확연하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이상의 결과를 참조할 때 본 터널 노선의 경우 기준지보압은 0.25 MPa 정도가 되어야 한다. 터널의 직경이 10.27 m일 때 0.25 MPa의 지보압은 Fig. 8과 같이 철재지보나 래티스거더, 34 mm 록볼트, 50 mm 두께 이상의 슛크리트나 라이닝의 개별 지보 또는 조합으로 구성이 가능하다(Hoek, 2006). 다만 위의 지보압 추정은 정수압상태의 원형터널에만 적용되는 것으로서 휨력이 작용하거나 지보재가 폐합되지 않은 경우 지보압은 제안된 것보다 감소하게 됨을 유의해야 한다.

3.5 임계변형률 분포

본 터널 구간에 대한 암반강도와 변형률 분포를 사용하여 Sakurai(1993)가 제안한임계변형률 분석을 수행하였다(Sakurai et al., 1993, 1994, 1998, Chern et al., 1998). 무지보 및 지보압에 따른 변형률 분포는 Fig. 9와 같으며 대부분 경고수준 I 이하로 나타나 비교적 안정할 것으로 추정된다.

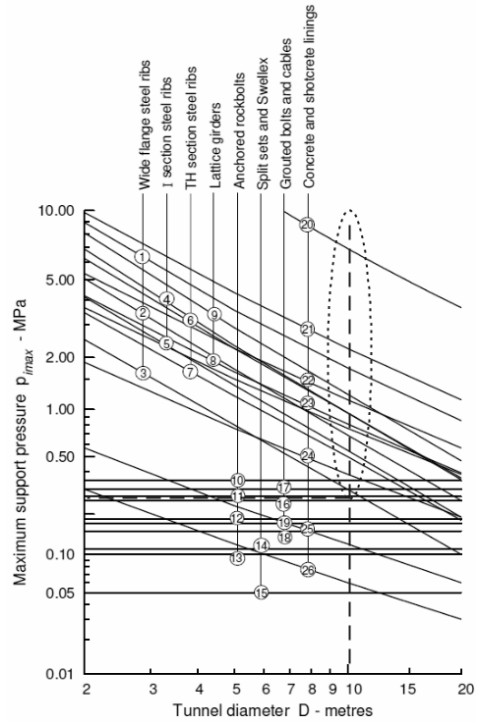


Fig. 8. Approximate maximum capacities for different support systems installed in circular tunnels (after Hoek, 2006).

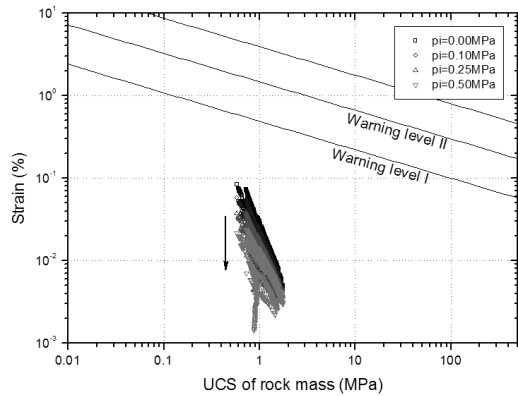


Fig. 9. Distribution of critical strains of the whole tunnel according to the different support pressures.

3.6 해석결과 기반 주요 모니터링 항목 및 구간 선정

정보화 시공 또는 OS(Observation System)에서 제시한 OS 설계 절차는 다음과 같다(Olsson, 2002).

- 보호하고자 하는 기능 식별

- 보호 기능에 대한 손상기구 및 한계값 식별과 적절한 대처방법 모색
- 손상기구와 관련되어 있으며 관측/측정 가능한 지시자 확인 및 한계값 결정
- 기능을 교란시키는 시공단계 확인 및 작업과 관련된 대처방법 결정
- 시공단계에 대한 예상 거동형태를 포함한 암반의 거동 예측
- 대처방법과 요구시간을 고려한 사전경보값 결정
- OS의 세부 설계 수행
- 구현, 관측 및 업데이트, 필요시 수정

이러한 내용에 근거할 때 본 연구에서 제안한 방법은 예상되는 거동과 손상기구 및 한계값 설정에 필요한 항목들을 제공할 있다.

본 터널 구간의 경우 해저터널로서 육상터널과 비교할 때 대규모 출수 가능성이 존재하므로 앞의 분석에 따른 변형측정과 더불어 수심과 피복압 두께에 따른 유입수 모니터링이 필요하다. 대부분의 노선은 일반적인 계측을 수행하고 Fig. 10과 같이 1.6 k ~ 1.8 k, 2.6 k ~ 2.8 k, 3.2 k ~ 3.4 k 구간은 다른 구간에 비하여 변형이 크게 발생할 가능성이 있으므로 측정 간격 및 측정수를 늘려야 한다.

5.6 k ~ 5.8 k 구간은 피복암이 얇아지면서 상대적으로 수심이 깊어지는 구간이므로 타 구간에 비하여 해수의 터널내 유입 가능성이 크다. 따라서 해당구간 전방에서부터 출수량 모니터링과 그에 따른 적절한 차수/지수 작업과 보강작업이 진행되어야 한다.

다만 모니터링 경계값을 결정하기 위해서는 기존 문헌에 제시된 값이나 주요 불안정 영역에 대한 추가적인 정밀 해석 및 평가를 통해 결정하는 것이 바람직하다.

기존 문헌과 본 해석에 의하면 반경방향 변형률 1% 또는 0.5%가 변형률 모니터링의 경계 기준이 될 수 있으며 출수량의 경우 노르웨이 해저터널 시공사례를 근거할 때 1차 경고기준은 100 l/min/km가 될 수 있으며 최대 300 l/min/km는 초과하지 않아야 한다(Melbye & Øvsteadal, 2001, Blindheim & Øvsteadal, 2002). 이 기준은 출수시 필요한 그라우팅 비용과 배수비용을 고려하여 최적화된 값이므로 국내에서도 사용가능할 것으로 판단된다.

4. 토 의

본 연구에서는 이론해를 이용하여 터널 전구간의 안정성을 분석하는 방법을 제시하였으며 이를 실제 터널에 적용하여 결과를 분석하였다. 분석결과 설계단계에서 신속하고 유용하게 터널 전구간에 대해 예상지반거동이나 변형률, 소성변경 등을 평가할 수 있음을 확인하였다. 다만 다음의 사항에 대한 추가적인 검토 및 연구를 수행할 경우 신뢰도를 더 향상시킬 수 있을 것이다.

4.1 자료의 불확실성

이 방법에서 터널의 안정성은 RMR이나 Q 또는 GSI 같은 암반분류결과에 영향을 가장 많이 받으며 터널에 작용하는 연직응력 계산에 사용되는 암반밀도와 상부 피복암 두께가 중요한 변수이다.

이런 변수들은 당연히 불확실성을 내포하며 특히 암반분류등급은 터널의 일부구간에서 시추코어를 기반으로 구한 결과를 크리깅이나 기타 최적화 방법을 사용하여 터널 전구간에 대한 추정값을 계산하므로 불확실성이 크다. 따라서 암반분류결과와 분산을 고려한 신뢰성 분석이 추가될 경우 결과의 신뢰성을 좀 더 확보할 수

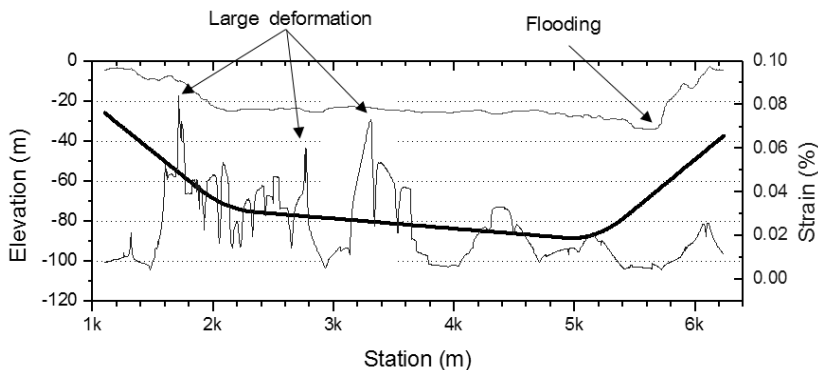


Fig. 10. Selection of intensive monitoring points and items for the studied tunnel

있을 것으로 판단한다. 다만 각 구간 암반분류값의 분산을 정량적으로 결정하기 위해서는 추정값의 오차를 계산할 수 있는 크리깅 방법(최종근, 2007)을 사용하는 것이 하나의 방법이 될 수 있다. 이 경우 분산을 고려한 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행한다면 변형률기준값을 근거로 한 파괴확률과 신뢰도지수 등을 구할 수 있게 된다.

제안된 방법은 이론해를 사용하기 때문에 자료의 분산에 대한 근거자료가 주어질 경우 불확실성을 고려한 해석기법의 확장은 쉽게 이루어질 수 있다.

4.2 다른 이론해의 적용

본 연구에서는 계산의 용이성 때문에 탄성-완전소성 거동과 팽창각을 0으로 가정하여 구해진 Mohr-Coulomb 파괴기준식을 사용하였다. 약간의 프로그래밍을 수행해야 하지만 Mohr-Coulomb 모델에서 비교적 신속하게 변형율연화 거동이나 취성거동을 계산할 수 있는 방법이 제시되어 추후 이를 적용할 예정이다(이연규, 2006). 또한 최근에는 Hoek-Brown 파괴기준식을 적용하여 원형공동 내 응력 및 변위에 대한 이론해(Carranza-Torres & Fairhurst, 1999, Sharan, 2003, Carranza-Torres, 2004)를 제시하고 있으므로 이를 적용하여 동일한 분석을 수행할 수 있다. Hoek-Brown 파괴기준은 파괴포락선이 비선형이므로 좀 더 현실적인 결과를 제공할 수 있을 것으로 예상된다. 다만 Hoek-Brown 파괴기준식을 사용할 경우 암석의 강도(σ_c)가 추가적으로 확보되어야 하므로 본 연구에서는 제외하였다.

4.3 현장결과와의 비교

본 논문에서 사용된 식은 암반을 탄성-완전소성체로, 팽창각을 0으로 가정하여 구한 것이므로 실제 변형을 과소평가할 가능성이 있다(Duncan, 1993). 따라서 전반적인 거동을 평가하는 용도로 사용하는 것이 바람직하다.

제안된 방법을 적용한 터널의 경우 현 단계에서는 시공이 이루어지지 않았으므로 실제 굴착에 따른 터널의 거동과 직접적인 비교를 수행할 수 없다. 그러나 매 굴진마다 막장에 대한 매핑 및 암반분류와 주요단면에 대한 계측을 일반적으로 수행하고 있으므로 이 자료를 다시 입력하여 분석을 수행할 수 있고 이를 예상결과와 비교 할 수 있다. 따라서 추후 본 터널뿐만 아니라 다양한 현장과의 공조를 통해 검증 작업이 수행된다면 설계 및 시공단계에서 사용할 수 있는 유용한 안정성 평가방법으로 자리매김할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서 내압이 작용하는 정수압 조건의 원형터널에 대한 응력과 변위에 대한 Mohr-Coulomb 이론해를 사용하여 터널 전구간에 대한 안정성을 신속하게 분석하는 방법을 제시하였다. 이를 실제 터널에 적용하여 터널 전구간에 대해 예상되는 변형거동과 정량적인 변형률 및 소성반경을 계산하였고 이로부터 변형을 적정한 수준 이내로 제한하기 위한 지보압에 대한 분석을 수행하였다. 적용 결과 제안된 방법은 전체 터널 구간에 대한 신속한 안정성 평가와 주요 불안정 구간에 대한 정밀 해석이나 계측설계와 같은 후속조치를 위한 정량적 자료를 제공할 수 있음을 확인하였다. 그러나 본 방법이 설계 및 시공단계에서까지 실제적으로 사용할 수 있는 도구가 되기 위해서는 실제 시공시 획득한 자료와의 비교가 필수적이다.

끝으로, 제시한 방법은 Mohr-Coulomb 파괴기준 외의 다른 이론해를 적용해서 동일하게 수행할 수 있으며 또한 완전취성이나 변형율연화와 같은 거동을 고려하는 알려진 많은 이론식들을 사용해서 분석을 수행할 수 있다. 추후 이에 대한 비교 연구를 수행할 예정이다.

사 사

본 연구는 한국지질자원연구원의 기본연구사업인 ‘지하암반내 열에너지 저장을 위한 핵심기술 개발(과제코드 GP2012-001)’의 일환으로 수행되었습니다.

Reference

1. Blindheim, O. T. and Øvstedal E., 2002, Design principles and construction methods for water control in subsea road tunnels in rock, Water control in Norwegian Tunnelling, Vol. 12, No. 6, 43-49.
2. Carranza-Torres, C., 2004, Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion, Int J Rock Mech Min Sci., Vol. 41, 480-481.
3. Carranza-Torres, C. and Fairhurst, C., 1999, The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion, Int J Rock Mech Min Sci, Vol. 36, 777-809.
4. Chern, J.C., Shiao F.Y. and Yu, C.W. 1998, An empirical safety criterion for tunnel construction, Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, Taiwan, 325-330.
5. Choe, J. G., 2007, Geostatistics, Sigmapress, 386.
6. Duncan Fama, M.E., 1993, Numerical modelling of yield zones in weak rocks, In: Comprehensive rock engine-

ering, (Ed. J.A. Hudson), Vol. 2, 49-75, Pergamon.

7. Hoek, E., 2006, Practical Rock Engineering. Course note.
8. Lee, Y. K., 2006, Strain-Softening Behavior of Circular Tunnel Excavated in Mohr-Coulomb Rock Mass, Tunnel & underground space, Vol. 16, No. 6, 495-505.
9. Melbye, K. and Øvstedal, E., 2001, Subsea tunnels in Norway, 4th Symposium on Strait Crossings, Bergen, Norway, 6p.
10. Olsson, L., 2002, Observation systems with alarm thresholds and their use in designing underground facilities, SKB R-02-45, SKB.
11. Sakurai, S., Kawashima, I. and Otani, T. 1993, A criterion for assessing the stability of tunnels, EUROCK '93, Lisboa, 969-973.
12. Sakurai, S., Kawashima, I. and Otani, T. 1994, Environmental effects on critical strain of rocks, Proc. Symp. Development in Geotechnical Engineering, Bangkok, 359-363.
13. Sakurai, S., Hiraoka, A. and Hori, K. 1998, Strain-induced damage of rocks, Proc. 3 Intl. Conf. on Mechanics of Jointed and Faulted Rock(MJFR-3), Vienna, Austria, 21-28.
14. Serafim, L.J. and Pereira P.J., 1983, Consideration on the geomechanical classification of Bieniawski, Proc. of the Int. Symp. on Engineering Geology and Underground Construction, Vol. 2, 33-42.
15. Sharan, S.K., 2003, Elastic-brittle-plastic analysis of circular openings in Hoek-Brown media, Int J Rock Mech Min Sci, Vol. 40, 817-824.
16. Singh B. and Goel R. K., 2006, Tunnelling in Weak Rocks, Elsevier, p. 489.
17. Tsuchiya, T., 1984, A design program for a tunnelling method using bolts and shotcrete, Proc. of ISRM Symp., Cambridge, UK, 120-130.

정용복



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1996년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학석사
 2000년 서울대학교 공과대학 지구환경시스템공학부 박사

Tel: 042-868-3097
 E-mail: ybjung@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 심지층활용연구센터 지하공간연구팀 선임연구원

류동우



1994년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1996년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2000년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3099
 E-mail: dwryu@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 심지층활용연구센터 지하공간연구팀 책임연구원

박의섭



1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3098
 E-mail: espark@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 심지층활용연구센터 지하공간연구팀 책임연구원

천대성



1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사
 1999년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사
 2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템공학부 공학박사

Tel: 042-868-3248
 E-mail: cds@kigam.re.kr
 현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 심지층활용연구센터 지하공간연구팀 선임연구원