

파쇄대가 과대분포한 암반지역에서 터널의 거동특성에 관한 연구

박재원¹ · 이승호^{2*}

¹정회원, (주) 대한콘설탄트 지반공학부 상무이사

²정회원, 상지대학교 건설시스템공학과 교수

Analysis on the tunnel behavior characteristic in the excessive fractured zone distribution of rock area

Jae-Weon Park¹, Seung-Ho Lee^{2*}

¹Dae Han Consultants Co., LTD. Dept of Geotechnical & Tunnel, Managing Director

²Sang Ji University, Dept. of Civil Engineering, Professor

ABSTRACT: This article is to apply the tunnel support system selected after comparatively analyzing of RMR and tunnel instrumentation between the tunnel behavior characteristic predicted through geotechnical investigations and the numerical analysis at the design stage and the properties deformation occurred at the construction stage. This attempt results from the behavior characteristic of the tunnel excavation ground shown differently in accordance with the ground quality and reinforcement method. This, therefore, provide the data and results analysed the actual decision RMR-crown settlement & convergence and reduction of material property of ground as parameters. Also, it's shown that the tunnel designer is able to predict tunnel behavior characteristic when designing in bedrock areas excessively distributed faults and fractured zones.

Keywords: Fault zone, Fractured zone, RMR, Tunnel behavior, Tunnel instrumentation

초 록: 본 논문은 설계단계에서 지반조사와 수치해석을 통해 예측된 터널의 거동특성과 실제 시공단계에서 어떠한 변형특성을 보이고 있는지 RMR 및 계측데이터의 비교분석을 통해 선정된 터널지보시스템의 선택적 적용을 보여준다. 이는 파쇄대가 과대분포한 암반지역에 터널을 설치할 경우, 터널굴착지반의 거동은 지반의 특성과 보강공법 등의 영향에 따라 상이한 거동특성 때문이다. 그러므로, 본 연구에서는 지반설계자가 단층대 및 파쇄대가 과대 분포한 암반지역의 터널 설계시, RMR-계측 데이터 분석과 지반물성치 저감에 따른 매개변수 분석을 비교하여, 지반 설계자가 향후 유사한 파쇄대가 과대분포한 지역의 터널거동특성을 예측할 수 있도록 하고자 한다.

주요어: 단층대, 파쇄대, RMR, 터널거동특성, 터널계측

1. 서 론

파쇄대가 발달한 지역에 터널을 설치할 경우 터널이 설치되는 암반은 대체적으로 절리가 발달하고 단층 및 층리 등의 불연속면을 포함하여, 균질성과 등방성의 활동보다는 이방성의 거동특성을 나타내게 된다.

파쇄대지역에서의 암반은 다양한 불연속면을 포함하고 있어서 터널을 굴착할 경우 굴착단계별로 거동특성을 달리하게 되며, 이러한 변형은 터널의 단면유지에 영향을 미치게 되고, 터널의 안정성에 매우 큰 영향인자로 작용하게 된다. 터널 굴착지반의 거동은 터널이 설치되는 지반의 특성과 보강공법 등의 영향에 따라 거동특성을 달리하게 되며, 설계단계에서 예측된 터널의 거동특성이 실제 시공단계에서 어떠한 변형특성을 보이고 있는지 계측을 통해 확인하고 그에 따른 터널지보시스템을 선정하여 최적의 안정된

*Corresponding author: Jae-Weon Park
E-mail: geo3001@hanmail.net

Received July 1, 2016; Revised July 12, 2016;

Accepted July 15, 2016

공법을 선택하게 된다.

일반적으로 터널의 지보패턴은 설계단계에서 암반 상태를 조사한 후 터널이 설치되는 지점의 암반의 공학적 특성을 고려하여 선택하며, 시공 중에는 굴착 중에 터널막장상태를 정밀하게 조사하고, 설계시 예측한 암반상태와 비교하여 적정한지 평가한 다음 시공할 지보패턴을 선정하게 된다. 터널 굴착 중에 계측을 통하여 시공된 터널의 거동특성을 측정하고 계측 관리 기준치 내에서 안정된 상태를 보이는지 지속적으로 평가하게 된다. 굴착 중에 터널 변형의 관리기준치를 상회하여 터널이 이상거동을 할 경우에는 이상 원인을 파악한 후 보강공법을 신속하게 적용하여 터널의 안정화를 이루어야 한다.

본 연구의 대상지역은 지반조사결과 터널 굴착시 조우될 것으로 예상되는 안산암 및 화강암의 단층대 파쇄대 규모는 단층폭이 50~100 m이며, 통과 단층대는 총 49개조로(안산암구간 2,230 m에 최대 단층폭 90~100 m인 2개 단층대 및 파쇄대 17개조, N18~24 E, 화강암구간 5,970 m에 최대단층폭 30 m, 3개 단층대 및 파쇄대 32개조, N10~22 E, N77~86 W의 주향으로 분포) 조사되어 파쇄대가 과대분포한 암반지역으로 정의한다.

본 연구는 파쇄대가 과대분포한 암반지역의 터널거동특성을 수치해석에 의한 매개변수를 분석하고 현장 RMR (Bieniawski, 1989)-계측변위를 분석하여 파쇄대가 과대 분포한 지역에서의 터널 굴착시 발생변위 예측하고자 한다.

2. 지질개요 및 주요 단층대 현황

본 연구지역은 백악기의 경상분지와 제3기의 연일 분지가 형성된 한반도의 동남부에 위치하고 있다. 광역적으로 터널을 중심으로 하는 경상분지 동부에는 경상누층군 중 하양층군의 상부에 해당되는 퇴적암층과 이를 관입, 분출한 유천층군의 화산암류가 분포하고 있으며, 화산암류는 백악기말~제3기 초에 화강암이 관입하고 있고 안산암은 퇴적암과 화강암 사이에

위치하고 있다.

경상분지의 중동부에는 NNE-SSW 방향의 대규모 단층이 다수 발달하고 있으며 일광단층, 동래단층, 양산단층, 모량단층, 밀양단층 등이 위치하고 본 터널의 경우 울산단층, 외동단층 및 연일구조대 영향을 미치는 단층으로 조사되었다.

본 연구대상인 터널에 영향을 미치는 연일구조대는 울산단층에서 약 5 km 동쪽에 수십m의 연속적인 단층 파쇄대를 갖는 구조대가 보고되었는데, 이는 연일구조선(YTL, Yeonil Tectonic Line)이라 명명(Kim et al., 1997; Moon et al., 2000; Son et al., 2013)하고 있다.

연일구조선은 약 50 m 이상의 단층각력 및 비지대가 연속적으로 관찰되며, 지층의 분포 및 지질구조를 규제하고 있는 바 연일구조선의 운동은 17 Ma (Miocene, 마이오세)에 시작하였는데, 한반도 동남부에서 마이오세의 지각변형은 이 연일구조선을 포함한 북북서-남남동 방향의 주 변위대들의 우수향 주향의 이동단층 운동에 의해 주도된 것으로 조사되었다(Son et al., 2013).

3. 파쇄대에서의 터널변형 특성

터널굴착 주변 지반에 연약대가 존재 할 경우 그 위치에 따라 터널의 거동이 매우 상이하게 나타나고, 연약대나 파쇄대 등이 존재할 경우 패턴화된 설계로는 상이한 지반거동에 적절히 대처하기 힘들며, 터널의 불안정성과 심지어 붕괴 및 붕락과 같은 극한 상황을 야기할 수도 있다. 이러한 불안정성에 대처하기 위한 추가적인 지보와 보조공법 등의 적용으로 인해 공사비의 증가 및 공기의 지연이 예상되며, 굴착후 터널 단면의 축소는 이러한 변형을 잘 나타내는 요인이며, 굴착 안정성의 가장 중요한 요소이다. 또한 2%이상의 터널 내공변형률이 발생한 경우 특수한 지보설계가 필요하게 되며, 보다 큰 변형률이 발생한 경우 터널 단면을 축소시켜 추가 굴착등으로 인한 공기 지연과 공사비의 엄청난 증가를 야기시킨다(Kim et al., 2006).

파쇄대의 경사각 및 주향에 따라 터널의 변위 및 지보재 부재력에서 큰 차이를 보였으며 전반적으로 터널의 심도가 깊어질수록 그리고 초기측압계수가 클수록 파쇄대의 공간적 분포 특성에 따른 터널 거동의 차이가 더 심화되는 것으로 나타나 대심도 터널의 경우가 저심도 터널에 비해 파쇄대의 영향이 가중될 수 있는 것으로 검토되었다. 또한, 터널굴착 중에는 갱내선진 시추를 통한 전방 탐사가 매우 중요한 역할을 하며, 터널 굴착 시 터널의 안정성 및 지보패턴 적정성을 검토하는 측면에서 터널 변위 계측은 매우 중요하다(Yoo et al., 2013).

Kim et al. (2004), Kim et al. (2006), Yoo et al. (2013)은 수치해석을 통해 터널에 있어서의 파쇄대층의 영향을 분석하였으며, Cho et al. (2015)는 실내모형실험을 통해 파쇄대의 공간적 분포가 터널 거동에 미치는 영향분석을 통해 지반내의 파쇄대가 터널을 관통하는 경우 터널 및 지반거동에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다고 하였다.

파쇄대에서의 터널굴착시 안정성 평가방법으로는 영국터널협회(BTS, 2004)의 Tunnel lining design guide에서 한계변형율(Critical strain)을 도입하였고, 이에 앞서서는 Sakurai는 한계변형율(ϵ)은 터널시공 현장에서 채취된 일축압축강도와 초기접선탄성계수의 비로서 표시하고 이를 터널의 안정성 판단을 하는데 한계변형율(식 (1))을 제시하였다(Sakurai, 1993).

$$\epsilon = 1.4214 \sigma_c^{-0.3353} \quad (1)$$

Hoek and Marinos (2000)는 지하대심도 터널에서의 스퀴징(squeezing) 발생을 예측하는데 초기현장응력(in situ stress)과 암반강도에 따른 터널의 변위를 비교하여 판단할 수 있도록 무지보 터널(no support)의 변형율($\epsilon = \text{percentage strain} = \text{tunnel closure} / \text{tunnel diameter} \times 100 = 0.2 \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_o} \right)^{-2}$, 여기서, σ_{cm} = rock mass strength, p_o = in situ stress)이 5%를 초과할 경우 터널 막장의 안정성이 터널전체의 안정성을 지배하므로

막장의 보강이 필요하다고 하였다. 스퀴징(squeezing)이란 터널을 굴착할 때 시간이 경과하면서 내공변위가 크게 증가하는 것을 의미하며 스퀴징현상은 굴착으로 유도되는 응력이 암반의 한계강도보다 크게 작용할 때 발생하는 것으로 알려졌다으며, 스퀴징은 토피가 높고 암반강도가 약한 경우 굴착으로 유도되는 응력이 주변암반의 한계강도를 초과하여 내공변위가 크게 발생하는 소성변형 현상을 말한다. 이후 Hoek, E. and Guevara, R.(2009)는 무지보인 Yacambú-Quibor 터널의 squeezing 극복사례에서 터널암반의 응력변화와 터널직경(D)에 따른 터널변형율 $\epsilon = \text{percentage strain} = \text{tunnel closure} / \text{tunnel diameter}$ 과의 관계에서 변형률이 1% 이하에서는 약간의 지보문제만 있으며 (Few support problems), 1~2.5%에서는 약간의 squeezing 문제점(Minor squeezing problems)이 발생하지만, 변형률이 2.5~5% 일때는 심각한 squeezing문제점(Severe squeezing problems)이 발생하며, 변형율이 5~10% 일때는 매우 심각한 squeezing문제점(Very severe squeezing problems)에 이르고, 변형률이 10% 이상일 때 극심한 squeezing문제점(Extreme squeezing problems)이 발생한다고 하였다(Fig. 1).

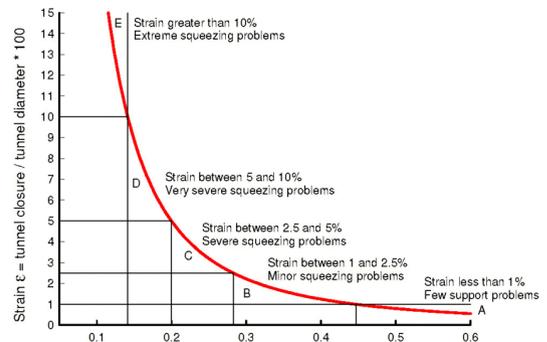


Fig. 1. Approximate relationship between strain and the degree of difficulty associated with tunnelling through squeezing rock (Hoek and Marinos, 2000)

4. 터널계측관리 및 수렴조건

계측관리의 주된 목적은 공사 중 관찰된 거동과

이론적 해석에 의한 예측 치와의 차이를 규명함으로써 공사의 합리성을 판단하여 위험요소를 제거하고 전반적인 시공 수준을 향상시키고 경비절감효과를 이루는데 있다. 이러한 기술적 경험을 축적하여 체계화시킴으로써 차후 설계 시 이를 반영하여 보다 합리적이고 경제적인 설계를 추구하는 데 있다고 볼 수 있다.

본 연구 대상지역의 계측 빈도는 막장의 진행속도와 지반 및 지보재의 거동 등의 주변여건과 계측항목별 특성과 목적을 충분히 고려하여 지반 거동 감시에 만전을 기하도록 선정하였다. 일반적으로 암반변위의 변화 양상은 굴착면이 접근해 옴에 따라 굴착에 의한 영향권 내에서 굴착 전에 변위가 발생하여 서서히 증가하다가 굴착 직후 급격히 증가한다. 그러나 암반 자체의 점탄성적 변형특성과 막장면의 지지효과, Shotcrete, Rock Bolt, Steel Rib 등 가축성 1차 지보의 시간 의존적 변형특성에 의하여 굴착 후 단기간에 변위가 수렴하지 않으며, 시간의 경과 혹은 막장의 전진에 따라 변위의 증가속도가 점차 둔화되며 일정한 값으로 수렴하여 구조적 안정이 이루어진다. 이러한 현지 암반의 변형특성을 고려하여 상주계측을 원칙으로 하여, 굴착 후 가능한 빠른 시기에 막장면에 근접하여 기기를 설치하고 계측을 시작하여 향후 계측의 기준치가 될 초기치를 측정하도록 하였다.

또한 계측빈도는 현장의 지반조건과 시공여건에 따라 적절히 변경하였으며, 이는 NATM 공법의 원리상 대단히 중요한 점이다. 본 연구에서 검토한 천단침하 및 내공변위 계측은 평균적으로 10 m간격으로 상반과 하반으로 구분하여 설치하였으며 총 8,200 m구간에 천단침하는 709개소 내공변위는 1,138개소를 측정하였다. 계측빈도는 막장면에서 5D이내는 1일 1회, 막장면에서 5D~10D사이에는 2일 1회씩 측정하였으나 이상장후 발견시에는 1일에 수회씩 측정하였다. 계측치의 수렴조건은 1) 매주 변위량이 1 mm/주 이하일 경우, 2) 계측기설치 후 60일 이상경과 되었을 경우, 3) 계측 지점과 막장거리가 10 D 이상 이격

되었을 경우, 4) 1)~3)의 경우를 모두 만족시켰을 경우 수렴으로 간주하였다.

5. 터널발생변위 매개변수 분석

5.1 개요

본 연구지역은 터널 굴착시 설계단계에서 예측한 RMR분류, 지보패턴 및 해석변위와는 상이하게 천단 및 내공변위가 많이 발생하고 있으며, 설계단계에서 예측한 RMR분류 및 지보패턴은 파쇄대의 특성이 미고려된 획일적인 적용으로, 시공단계에서는 현장특성이 고려된 매 막장별 현장 암판정과 RMR 분류 후 지보 및 보강패턴을 판단하여 적용하였다.

따라서 본 연구는 파쇄대가 과대 분포한 지역의 단층파쇄대에 터널 굴착시 고려된 매 막장별 현장 암판정과 RMR 분류와 터널 천단 및 내공변위 발생에 관하여 비교 분석하고 울산지역에서의 단층대를 통과하는 터널의 설계 및 시공시 발생할 변위를 미리 예측하고, 현행 NATM 설계 및 시공시 적용되는 획일적인 RMR분류 적용과의 관계와 이상변위를 예측할 수 있도록 제시하고자 한다.

5.2 지층현황

본 연구대상 지층현황은 안산암 파쇄대(IV등급암) 및 화강암의 파쇄대(V등급암) 분포대로서, 터널 천단에서부터의 토피고는 96.76~95.78 m이며 적용지층현황 및 적용 지보패턴은 다음 Fig. 2, Table 1과 같다.

실제시공 단계에서의 RMR산정과 계측변위는 설계단계에서 지반조사로 예측한 RMR 및 해석변위와는 상이한 양상을 보였으며, 변위가 급격히 증가되는 이상변위대가 발생하였다.

계측결과 이상변위대는 85km160, 85km370 구간으로 확인되었으며, 시공단계에서의 RMR 산정, 발생 변위 및 적용 지보패턴은 다음 Table 1과 같다.

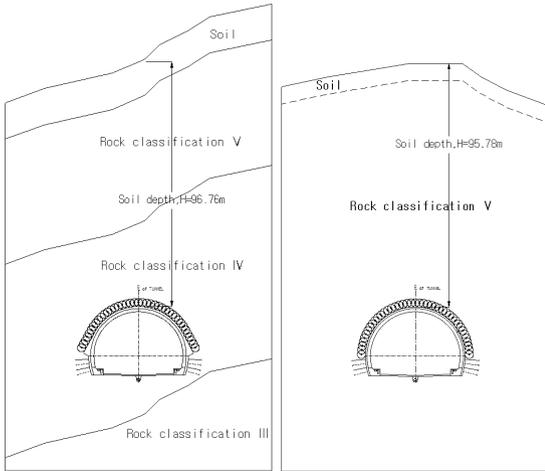


Fig. 2. Underground tunnel condition (Rock classification & support type)

발생한 이상변위대는 일반적인 터널시공 현장에서 준용되는 계측관리 기준치 중 보강기준으로 삼는 3차 관리기준치(천단변형율기준: 0.12%D, 내공변형율기준: 0.16%D)를 매우 상회하는 결과를 보이므로 이상 변위대 발생은 단층대 및 파쇄대를 통과하는 것으로 예측되며, 보강공법적용 및 지보재를 적용후의 결과로 각각 최대 천단변형율은 0.67%D, 1.35%D로 측정되었으며, 최대내공변형율은 1.57%D, 2.59%D의 결과를 나타냈다(터널직경(D)은 최대직경 = 12.16 m를

적용).

따라서 본 연구의 목적은 RMR-천단변위, RMR-내공변위의 상관관계와 시공단계를 고려한 2차원 터널 안정성 해석결과의 천단 및 내공변위가 시공중 계측 결과의 변위가 유사하게 발생하도록 시행착오법(Trial & error)을 이용한 역해석을 수행하고, 계측과 유사변위 발생 매개변수로 예측되는 물성인 지반의 변형계수 및 점착력의 저감, 대구경강관다단그라우팅 보강 영역의 변형계수 및 점착력의 저감, 그리고 각각의 측압계수 변화에 따른 터널 천단 및 내공 변위의 상관관계를 비교 분석 하고자 한다.

5.3 RMR과 천단 및 내공변위 상관관계

5.3.1 안산암 지역

암판정에 의한 RMR 분류와 천단 및 상하부내공변위 측정 데이터 중 분석대상을 안산암 지역의 총 57개의 지보패턴 PD-5,6 TYPE의 계측 데이터로 분류하였으며, 암판정 RMR과 터널직경(D)에 따른 각각의 천단, 상부내공 및 하부내공의 변형률 상관관계를 비교 분석하였다.

안산암 지역에서는 단층파쇄대 구간중 RMR 14이하에서 천단변형률 및 내공변형률이 증가(Fig. 3)하고

Table 1. Alteration tunnel support pattern in construction

Rock classification IV (Andesite)			Rock classification V (Granite)		
RMR	16	Support type : PD-5a-6-b4	RMR	11	Support type : PD-5b-4-b4
Measuring Strain ratio, δ (%) (D: Tunnel width)					
Crown Settlements	Bench exc. convergence	Invert exc. convergence	Crown Settlements	Bench exc. convergence	Invert exc. convergence
0.67%D	1.57%D	1.09%D	1.35%D	2.59%D	0.68%D

천단변형률은 0.02~1.12%D (Fig. 4), 내공변형률은 상반굴착시 0.12~2.29%D (Fig. 5), 하반굴착시 추가적으로 0.02~1.06%D (Fig. 6)까지 발생하고 있다(D: 터널직경 = 12.16 m).

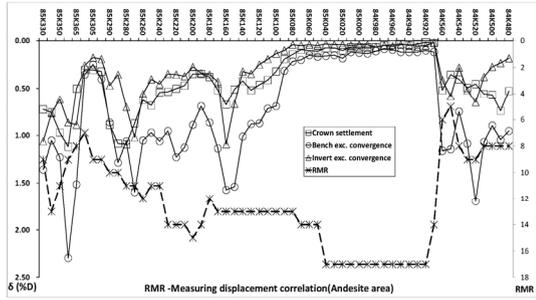


Fig. 3. RMR-Measuring displacement correlation (Andesite area)

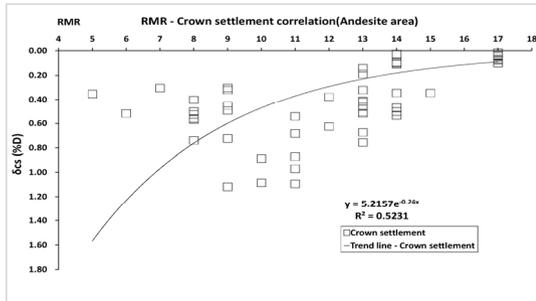


Fig. 4. RMR-Crown settlement correlation (Andesite area)

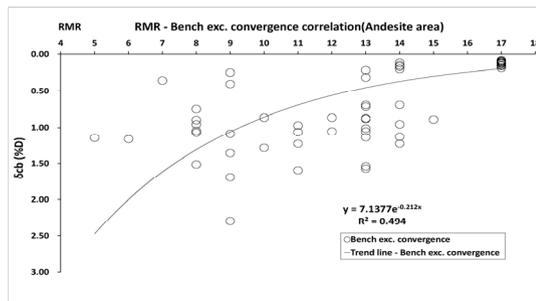


Fig. 5. RMR-Bench exc. convergence correlation (Andesite area)

5.3.2 화강암 지역

암관정에 의한 RMR 분류와 천단 및 상하부내공변위 측정 데이터 중 분석대상을 화강암 지역의 총 63개의 지보패턴 PD-5,6 TYPE의 계측 데이터로 분류하였

으며, 암관정 RMR과 터널직경(D)에 따른 각각의 천단, 상부내공, 하부내공의 변형률의 상관관계를 비교 분석하였다.

화강암 지역에서는 단층과쇄대 구간중 RMR 12이하에서 천단변형률 및 내공변형률이 증가(Fig. 7)하고, 천단변형률은 0.05~1.35%D (Fig. 8), 내공변형률은 상반굴착시 0.15~2.59%D (Fig. 9), 하반굴착시 추가적으로 0.02~1.23%D (Fig. 10)까지 발생하고 있다(D: 터널직경 = 12.16 m).

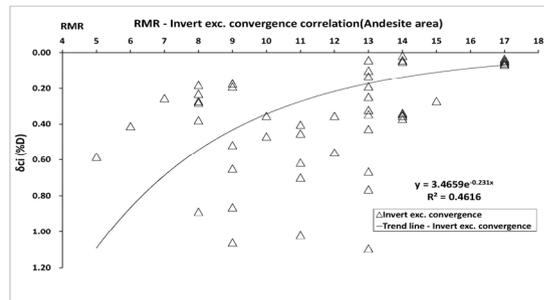


Fig. 6. RMR-Invert exc. convergence correlation (Andesite area)

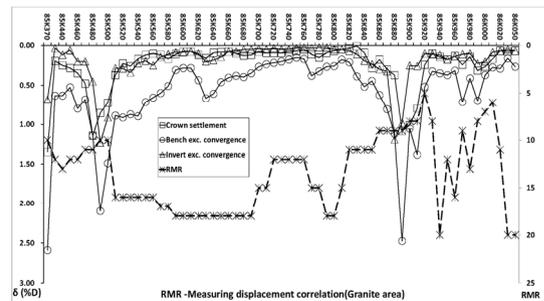


Fig. 7. RMR-Measuring displacement correlation (Granite area)

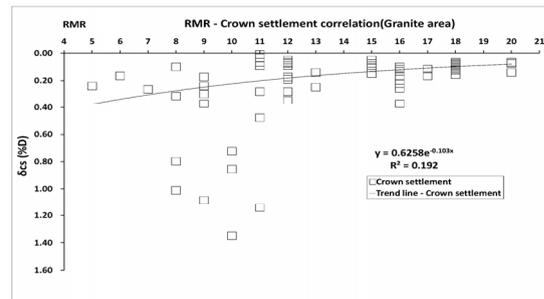


Fig. 8. RMR-Crown settlement correlation (Granite area)

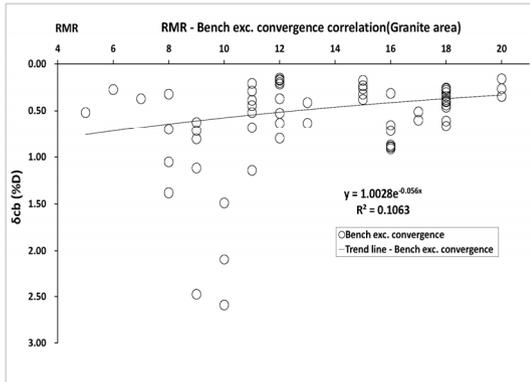


Fig. 9. RMR-Bench exc. convergence correlation (Granite area)

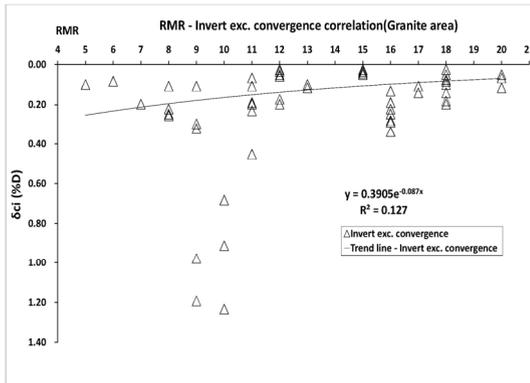


Fig. 10. RMR-Invert exc. convergence correlation (Granite area)

5.4 터널안정성 해석

5.4.1 해석프로그램

해석은 유한요소법(FEM)을 이용한 지반의 연속체 및 비균질성, 비등방성, 시간 의존성 등 복잡한 구성 법칙을 비교적 간단하게 해결할 수 있으며, 터널굴착 등 단계시공이 이루어지는 토목구조물의 시공단계해석이 가능한 수치해석 프로그램인 MIDAS사의 GTS NX를 사용하여 유한요소해석을 수행하였다.

5.4.2 해석범위 및 해석단면

본 연구의 해석범위는 굴착으로 인한 영향이 미미한 터널 중심에서 4.0D (D=터널직경) 영역으로 적용하여, 2차원 유한요소해석을 수행하였다(Table 2, 3).

Table 2. TYPE-1,2 Parameter analysis modeling

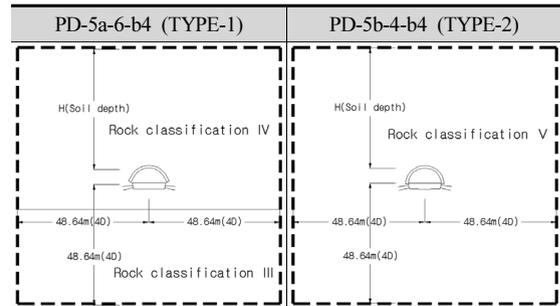


Table 3. Underground material & load division ratio for parameter analysis

Lateral stress coefficient, K_0		1.0	1.5	
Under Ground	Young' modulus, E (MPa)	Rock classification IV		
	Cohesion, c (MPa)	1,000	200	
MSGTLDSP equivalent	Young' modulus, E (MPa)	500	150	
	Cohesion, c (MPa)	1,900	1,190	
Steel rib / Shotcrete equivalent		523.54	196.06	
Softening s/c + Steel rib		1,900	1,190	
Modulus of elasticity (MPa)		8,826	19,080	
Moment of inertia (m^4)		1.16E-03	1.16E-03	
Support section		Shotcrete	Rock bolts	Steel rib
Modulus of elasticity, E (MPa)	Softening	5,000	210,000	210,000
	Hardening	15,000		
Poisson'ratio, ν		0.2	0.3	0.3

5.4.3 터널지보 및 보강영역

본 매개변수 해석은 굴착에 따른 지보재 및 보강영역을 고려하였으며, 굴착전 보강인 대구경강관다단그라우팅(Multi stage grouting through large diameter steel pipe: 이하 MSGTLDSP표기)과 굴착후 임시지보재인 강지보로 구분하여 시공단계별로 적용하였다.

강지보재는 합성부재로 가정하여 슛크리트와 강지보를 하나의 합성부재로 적용하였으며, MSGTLDSP 보강영역은 강관과 그라우팅 물성을 상호 고려한 복합지반으로 모사하여 구근 형성 부분의 유효면적과 각 재료의 탄성계수를 이용한 등가 탄성계수 및 점착력을 산정하여 적용하였다(Table 3, 5, 6).

5.4.4 하중분담율

2차원 해석시 막장의 종방향 아칭효과에 의해 3차원적인 지반거동을 모사하기 위하여 지반조건에 따른

지보패턴 및 굴착조건을 고려한 3차원 지보패턴 해석 결과와 경험식을 비교 검토하여 2차원 해석에 적용할 분담율을 산정하였으며, 굴착단계 40%, 슛크리트(경화전)와 록볼트 시공시 30%, 슛크리트 경화 시 30%로 적용하였다(Table 4).

5.4.5 시공단계해석

Type-1, 2의 매개변수 해석 수행시 시공단계를 고려하였으며, 굴착을 고려한 해석 단계는 Table 4와 같다.

5.4.6 매개변수 해석케이스

단층 및 파쇄대가 존재하는 암반의 불연속성, 이방성 등을 고려하기 위해 암반의 변형계수와 점착력에 대하여 물성저감율(0~95%)을 적용하여 매개변수 역해석을 수행하였다.

1) 물성저감율이 고려된 암반의 변형계수와 점차

Table 4. Construction condition case in analysis (Type-1, 2)

STEP	Construction condition step	Load division ratio
0	Soil stress implementation	-
1	Multi stage grouting through large diameter steel pipe installation	-
2	First half unsupported excavation + First half steel rib installation + Elephant foot (Type-1)	40%
3	First half shotcrete placement (softening)	30%
4	First half shotcrete placement (hardening)	30%
5	Lower half unsupported excavation + First half steel rib installation	40%
6	Lower half shotcrete placement (softening) Rock bolts installation	30%
7	Lower half shotcrete placement (hardening)	30%

Table 5. Parameter analysis Case-1, 2

CASE-1, 2	Young' modulus, E (MPa)				Material reduction Ratio (%)		Cohesion, c (MPa)				Lateral stress coefficient, K0	
	Under ground		MSGTLDSP				Under ground		MSGTLDSP			
	Type-1	Type-2	Type-1	Type-2	Type-1	Type-2	Type-1	Type-2	Type-1	Type-2	Type-1	Type-2
1	1,000	200	1,900	1,190	0		0.500	0.150	0.523	0.196	Case-1 : 1.0 Case-2 : 1.5	
2	800	160	1,730	1,160	20							
3	500	100	1,470	1,110	50							
4	300	60	1,280	1,070	70							
5	250	50	1,240	1,060	75							
6	100	20	1,100	1,040	90							
7	50	10	1,060	1,030	95							

력, 보강재의 변형계수와 점착력을 산정한 결과 및 해석케이스는 다음 Table 5, 6과 같다.

- 2) 해석모델 Type-1의 대상 암종은 IV등급-안산암이며, 해석모델Type-2의 대상 암종은 V등급-화강암이다.
- 3) 해석케이스 1, 2는 지반변형계수 및 MSGTLDSP 보강영역의 변형계수를 저감시키며 각각 축압계수 $K_0=1.0, 1.5$ 일때를 비교 분석하였다.
- 4) 해석케이스 3, 4는 지반의 변형계수와 점착력 및 MSGTLDSP 보강영역의 변형계수와 점착력을 저감시키며 각각 축압계수 $K_0=1.0, 1.5$ 일때를 비교 분석하였다.

5.4.7 해석결과 분석

(1) Type - 1 (IV등급-안산암)

- Type-1의 지반변형계수 저감($K_0=1.0, 1.5$)에 따른 터널 발생 변형률과 시공중 예측치의 변형률의 상관관계를 분석한 결과는 다음과 같다(Table 7).
- 축압계수 $K_0=1.0, 1.5$ 일 때 모두, 물성 저감을 75%일 때 변형률이 급격하게 증가되는 경향을 나타내며, 지반변형계수 저감에 따라 천단 및 내공

변형률 모두 증가하는 경향을 나타낸다(Fig. 11~16).

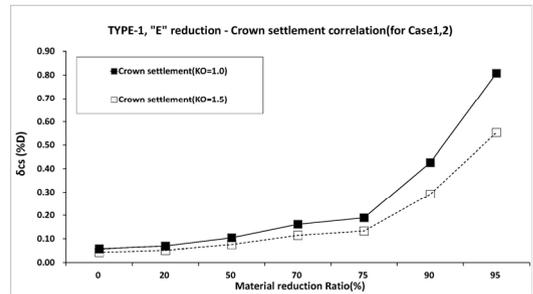


Fig. 11. TYPE-1 "E" reduction - Crown settlement correlation (for Case 1, 2)

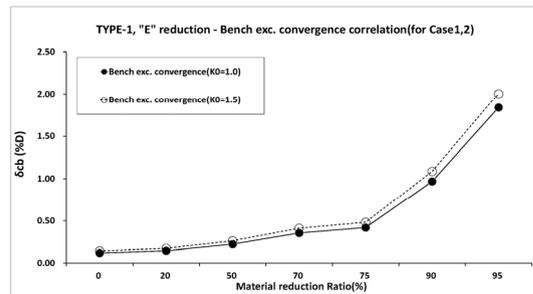


Fig. 12. TYPE-1 "E" reduction - Bench exc. convergence correlation (for Case 1, 2)

Table 6. Parameter analysis Case-3, 4

CASE-3, 4	Young' modulus, E (MPa)				Material reduction Ratio (%)		Cohesion, c (MPa)				Lateral stress coefficient, K0	
	Under ground		MSGTLDSP				Under ground		MSGTLDSP			
	Type-1	Type-2	Type-1	Type-2	Type-1	Type-2	Type-1	Type-2	Type-1	Type-2		
1	1,000	200	1,900	1,190	0		0.500	0.150	0.523	0.196	Case-3 : 1.0 Case-4 : 1.5	
2	800	160	1,730	1,160	20		0.400	0.120	0.418	0.156		
3	500	100	1,470	1,110	50		0.250	0.075	0.261	0.098		
4	300	60	1,280	1,070	70		0.150	0.045	0.157	0.058		
5	250	50	1,240	1,060	75		0.125	0.037	0.130	0.049		
6	100	20	1,100	1,040	90		0.050	0.015	0.052	0.019		
7	50	10	1,060	1,030	95		0.025	0.007	0.026	0.009		

Table 7. Analysis result of Type-1 (case-1, 3)

CASE	Material reduction Ratio (%)	Analysis displacement (mm)			Measuring displacement (mm)		
		Crown settlements	Convergence due to bench excavation	Convergence due to invert excavation	Crown settlements	Convergence due to bench excavation	Convergence due to invert excavation
1	95	$\delta_{cs}=0.81\%D$	$\delta_{cb}=1.84\%D$	$\delta_{ci}=0.96\%D$	$\delta_{cs}=0.67\%D$	$\delta_{cb}=1.57\%D$	$\delta_{ci}=1.09\%D$
3	90	$\delta_{cs}=0.39\%D$	$\delta_{cb}=1.30\%D$	$\delta_{ci}=1.83\%D$	Strain ratio (δ) = (Displacement / D)×100% (D: Tunnel width= 12.16 m)		

- 축압계수 증가시 터널의 천단 변형률은 감소하며 상부내공변형률은 증가하는 경향을 나타낸다 (Fig. 11~13).
- 지반변형계수 및 점착력 저감시 하부내공 변위는 상부내공변위 보다 큰 폭으로 증가되는 경향을 나타낸다(Fig. 14~16).
- CASE-1 조건의 물성저감율이 95%일 때 발생변형률은 천단부($\delta_{cs}=0.81\%D$), 상부내공부($\delta_{cb}=1.84\%D$), 하부내공부($\delta_{ci}=0.96\%D$)로 예측치 발생변형률인 천단부($\delta_{cs}=0.67\%D$), 상부내공부($\delta_{cb}=1.57\%D$), 하부내공부($\delta_{ci}=1.09\%D$)와 비슷한 경향을 나타낸다(Fig. 11~13).
- CASE-3 조건의 물성저감율이 90%일 때 발생변형률은 천단부($\delta_{cs}=0.39\%D$), 상부내공부($\delta_{cb}=1.30\%D$), 하부내공부($\delta_{ci}=1.83\%D$)로 예측치 발생변형률

인 천단부($\delta_{cs}=0.67\%D$), 상부내공부($\delta_{cb}=1.57\%D$), 하부내공부($\delta_{ci}=1.09\%D$)중 상부내공부와 비슷한 경향을 나타낸다(Fig. 14~16).

- 안산암의 경우, 천단변형율이 0.19% D 이상, 내공 변형율이 0.48% D 이상부터 터널의 변위가 급격히 증가하고 있어 특수한 지보설계가 필요하게 되며, 천단변형율이 0.43% D 이상, 내공변형율이 1.09% D 이상, 큰 변형률이 발생할 경우 터널 단면을 축소시켜, 추가 굴착등으로 인한 공기 지연과 공사비의 엄청난 증가를 야기시키게 되어 변형이 발생되기전 터널의 보강공법을 충분하게 강구 하여야 할 필요성이 있다.

(2) Type - 2 (V등급-화강암)

- Type-2의 지반변형계수 저감($K_0=1.0, 1.5$)에 따

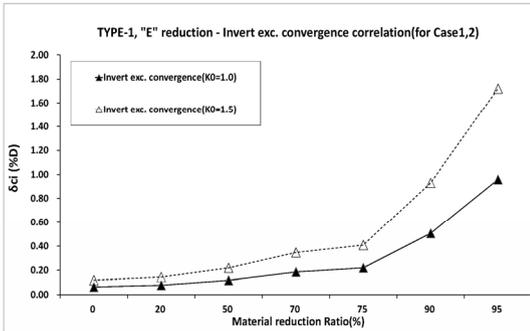


Fig. 13. TYPE-1 "E" reduction - Invert exc. convergence correlation (for Case 1, 2)

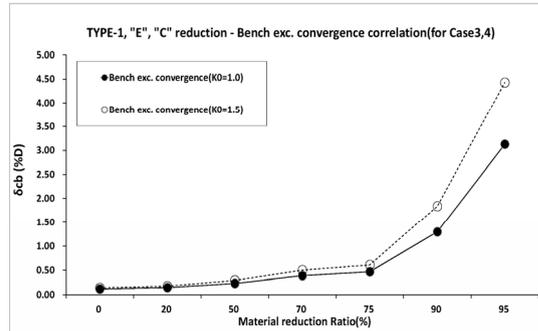


Fig. 15. TYPE-1 "E", "C" reduction - Bench exc. convergence correlation (for Case 3, 4)

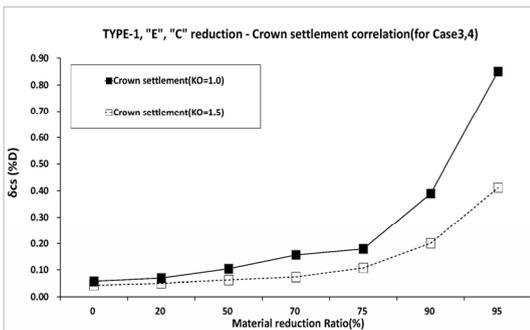


Fig. 14. TYPE-1 "E", "C" reduction - Crown settlement correlation (for Case 3, 4)

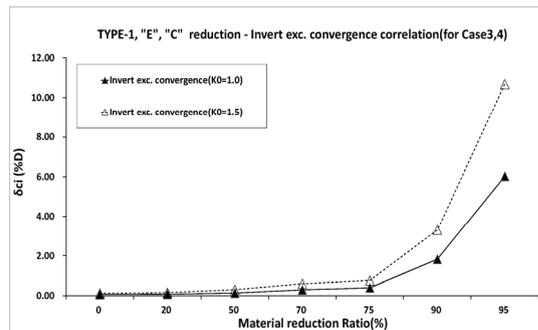


Fig. 16. TYPE-1 "E", "C" reduction - Invert exc. convergence correlation (for Case 3, 4)

Table 8. Analysis result of Type-2 (case-1, 3)

CASE	Material reduction Ratio (%)	Analysis displacement (mm)			Measuring displacement (mm)		
		Crown settlements	Convergence due to bench excavation	Convergence due to invert excavation	Crown settlements	Convergence due to bench excavation	Convergence due to invert excavation
1	75	$\delta_{cs}=0.96\%D$	$\delta_{cb}=1.61\%D$	$\delta_{ci}=0.78\%D$	$\delta_{cs}=1.35\%D$	$\delta_{cb}=2.59\%D$	$\delta_{ci}=0.68\%D$
3	75	$\delta_{cs}=0.70\%D$	$\delta_{cb}=2.78\%D$	$\delta_{ci}=5.36\%D$	Strain ratio (δ) = (Displacement / D)×100% (D: Tunnel width= 12.16m)		

큰 터널 발생 변형률과 시공중 계측치의 변형률의 상관관계를 분석한 결과는 다음과 같다(Table 8).

- 축압계수 $K_0=1.0, 1.5$ 일 때 모두, 물성 저감을 75%일 때 변형률이 급격하게 증가되는 경향을 나타내며, 지반변형계수 및 점착력 저감에 따라 천단 및 내공 변형률 모두 증가하는 경향을 나타낸다(Fig. 17~22).
- 축압계수 증가시 터널의 천단 변형률은 감소하며

하부내공변형률은 증가하는 경향을 나타낸다(Fig. 17, 19, 20, 22).

- 지반변형계수 및 점착력 저감시 하부내공 변형률은 상부내공변형률 보다 큰 폭으로 증가되는 경향을 나타낸다(Fig. 18, 19, 21, 22).
- CASE-1조건인 물성저감이 75%일 때 발생변형률은 천단부($\delta_{cs}=0.96\%D$), 상부내공부($\delta_{cb}=1.61\%D$), 하부내공부($\delta_{ci}=0.78\%D$)로 계측치 발생변형률

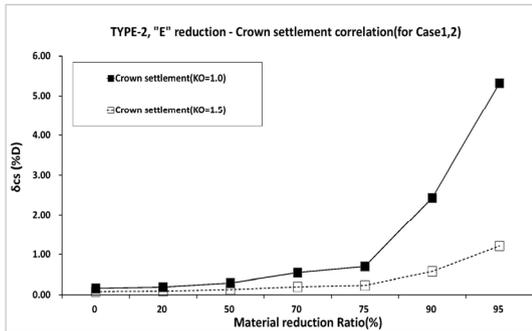


Fig. 17. TYPE-2 "E" reduction - Crown settlement correlation (for case-1, 2)

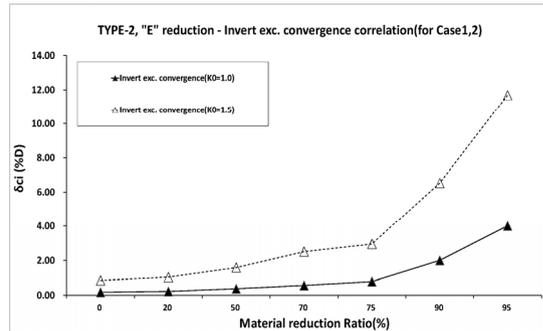


Fig. 19. TYPE-2 "E" reduction - Invert exc. convergence correlation (for Case-1, 2)

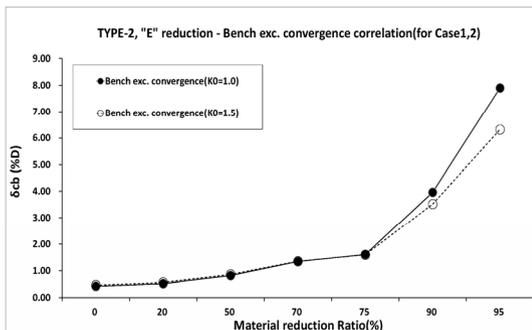


Fig. 18. TYPE-2 "E" reduction - Bench exc. convergence correlation (for Case-1, 2)

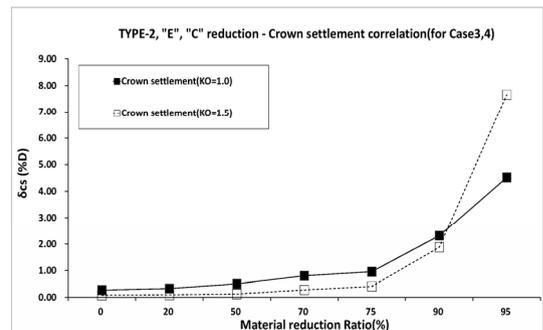


Fig. 20. TYPE-2 "E", "C" reduction - Crown settlement correlation (for Case-3, 4)

인 천단부($\delta_{cs}=1.35\%D$), 상부내공부($\delta_{cb}=2.59\%D$), 하부내공부($\delta_{ci}=0.68\%D$)와 비슷한 경향을 나타낸다(Fig. 17~19).

- CASE-3조건의 물성저감율이 75%일 때 발생변형률은 천단부($\delta_{cs}=0.70\%D$), 상부내공부($\delta_{cb}=2.78\%D$), 하부내공부($\delta_{ci}=5.36\%D$)로 예측치 발생변형률인 천단부($\delta_{cs}=1.35\%D$), 상부내공부($\delta_{cb}=2.59\%D$), 하부내공부($\delta_{ci}=0.68\%D$) 중 상부내공부 와 비슷한 경향을 나타낸다(Fig. 20~22).
- 화강암의 경우, 천단변형율이 0.7%D이상, 내공 변형율이 1.6%D 이상부터 터널의 변위가 급격히 증가하고 있어, 특수한 지보설계가 필요하게 되며, 천단변형율이 2.43%D이상, 내공변형율이 3.96%D 이상의 큰 변형률이 발생한 경우 터널 단면을 축소시켜, 추가 굴착 등으로 인한 공기 지연과

공사비의 엄청난 증가를 야기시키게 되어 변형이 발생되기전 터널의 보강공법을 충분히 강구 하여야 할 필요성이 있다.

6. 결론

파쇄대가 발달한 암반지역에 터널을 설치할 경우 암반은 대체적으로 절리가 발달하고 단층 및 층리 등의 불연속면을 포함하여, 균질성과 등방성의 활동보다는 이방성의 거동특성인 이상변위발생을 나타내게 된다.

본 연구는 파쇄대가 과대 분포한 안산암과 화강암 지역에서의 터널거동특성을 고려하여 물성저감율이 적용된 매개변수 수치해석의 변위거동특성과, 현장 RMR-계측 발생변위를 비교 분석하여 파쇄대가 과대 분포한 지역에서의 터널 설계 및 굴착시 발생변위 예측하고자 하였으며, 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

1. 본 연구지역은 백악기의 경상분지와 제3기의 연일 분지가 형성된 한반도의 동남부에 위치하고 있다. 광역적으로 터널을 중심으로 하는 경상분지 동부에는 경상누층군 중 하양층군의 상부에 해당되는 퇴적암층과 이를 관입, 분출한 유천층군의 화산암류가 분포하고 있으며, 화산암류는 백악기말~제3기 초에 화강암이 관입하고 있으며, 안산암은 퇴적암과 화강암 사이에 위치하고 있다.
2. 경상분지의 중동부에는 NNE-SSW 방향의 대규모 단층이 다수 발달하고 있으며 본 터널의 경우 울산 단층, 외동단층 및 연일구조대(Yeonil Tectonic Line) 영향을 미치는 단층으로 조사되었는바, 본 터널에 영향을 미치는 연일구조대는 울산단층에서 약 5 km 동쪽에 수십 m의 연속적인 단층 파쇄대를 갖는 구조대를 가지고 있다.
3. 본 터널과 조우될 것으로 예상되는 안산암과 화강암의 단층파쇄대는 총 49개조일 것으로 예상되며, 조사된 단층폭은 최소 5.0 m에서 최대 100 m로

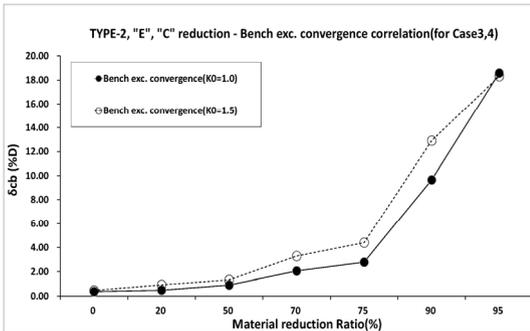


Fig. 21. TYPE-2 "E", "C" reduction - Bench exc. convergence correlation (for Case-3, 4)

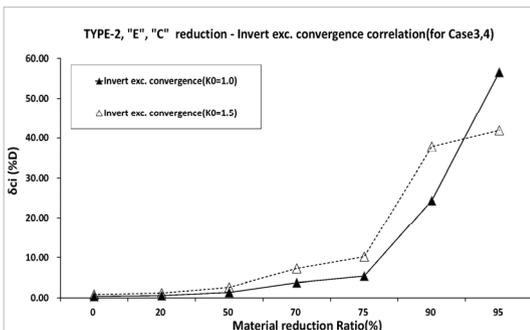


Fig. 22. TYPE-2 "E", "C" reduction - Invert exc. convergence correlation (for Case-3, 4)

조사되었으며, 안산암구간 2,230 m에 최대 단층폭 90~100 m, 2개 단층대, 파쇄대 17개조, N18~24E, 화강암구간 5,970 m에 최대단층폭 30 m, 3개 단층대, 파쇄대 32개조, N10~22E, N77~86W의 주향으로 분포하는 것으로 조사되었다.

4. 파쇄대에서의 암반의 거동특성을 확인하고자 안산암과 화강암지역에 설치된 천단침하 709개소, 내공변위 1,138개소의 계측치와 219개의 암판정시 RMR분류를 비교하였으며, RMR-천단침하-내공변위의 상관관계를 비교 분석 하였다.
5. 터널굴착 대상주변에 연약대나 파쇄대 등이 존재할 경우, 굴착후 터널 단면의 축소와 변형을 잘 나타내는 요인이며, 터널직경(D)과 변형과의 관계에서 터널천단변형율은 안산암의 경우 0.19%D, 화강암의 경우 0.7%D 이상부터 터널의 변위가 급격히 증가하고 있고, 터널 내공변형률은 안산암의 경우 1.09%D, 화강암의 경우 1.6%D 이상부터 터널의 변위가 급격히 증가하고 있어, 특수한 지보설계가 필요하게 되며 보다 큰 변형률이 발생한 경우는 터널 단면을 축소시켜 추가 굴착등으로 인한 공기 지연과 공사비의 엄청난 증가를 야기시킨다.
6. 안산암 지역 단층파쇄대의 RMR-변형률 상관관계는 RMR 14이하에서 천단변형률 및 내공변형률이 증가하고, 변형률은 천단부(0.02~1.12%D), 상부내공부(0.12~2.29%D), 하부내공부(0.02~1.06%D)로 나타났으며, 화강암 지역 단층파쇄대의 RMR-변형률 상관관계는 RMR 12이하에서 천단변형률 및 내공변형률이 증가하고, 변형률은 천단부(0.05~1.35%D), 상부내공부(0.15~2.59%D), 하부내공부(0.02~1.23%D)로 나타났다(D=터널직경).
7. 실제측치에 의한 발생 변형률과 파쇄대를 고려한 (물성저감율적용)매개변수 해석 변형률을 분석한 결과, 안산암 지역의 단층파쇄대의 상관관계는 지반 물성(변형계수) 저감율이 95%일때 천단부($\delta_{cs}=0.81\%D$), 상부내공부($\delta_{cb}=1.84\%D$), 하부내공부

- ($\delta_{ci}=0.96\%D$)로 계측치 발생변형률인 천단부($\delta_{cs}=0.67\%D$), 상부내공부($\delta_{cb}=1.57\%D$), 하부내공부($\delta_{ci}=1.09\%D$)와 비슷한 경향이 나타났으며, 화강암 지역의 단층파쇄대의 상관관계는 지반물성(변형계수) 저감율이 75% 일때, 천단부($\delta_{cs}=0.96\%D$), 상부내공부($\delta_{cb}=1.61\%D$), 하부내공부($\delta_{ci}=0.78\%D$)로 계측치 발생변형률인 천단부($\delta_{cs}=1.35\%D$), 상부내공부($\delta_{cb}=2.59\%D$), 하부내공부($\delta_{ci}=0.68\%D$)와 비슷한 경향이 나타났다(D=터널직경).
8. 본 연구는 지반설계자가 단층대 및 파쇄대가 과대분포한 암반지역의 터널 설계시, RMR-계측 데이터 분석과 지반물성치 저감에 따른 매개변수 분석을 비교하여, 향후 유사한 파쇄대가 과대분포한 지역의 터널거동특성을 예측할 수 있도록 하고자 한다.

References

1. Bieniawski, Z.T. (1989), "Engineering rock mass classification", Wiley-Interscience, New York.
2. Cho, Y.G., Shin, S.M., Chung, E.M., Choi, J. H., Yoo, C. (2015), "Effect of orientation of fracture zone on tunnel behavior during construction using model test", Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 17, No. 3, pp. 189-204.
3. Hoek, E., Marinos, P. (2000), "Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses", Tunnels and Tunnelling International, Part 1 - November 2000, Part 2 - December 2000, pp. 20
4. Hoek, E., Guevara, R. (2009), "Overcoming squeezing in the Yacambú-Quibor tunnel, Venezuela", Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 42, No. 2, pp. 389-418.
5. Kim, I.S., Son, M., Jung, H.J., Lee, J.D., Kim, J.J., Beak, I.S. (1997), "Geological Characteristics of Kyongju-Ulsan Area : Palaeomagnetism and Magnetic Susceptibility of the Granitic Rocks in the Ulsan Fault Area", Economic and environmental geology, Vol. 31, No. 1, pp. 31-43.

6. Kim, C.Y., Hong, S.W., Kim, K.Y., Baek, S.H. (2004), "Numerical analysis of the convergence behavior of the tunnel", *Tunnel & Underground Space*, Vol. 6, No. 3, pp. 183-197.
7. Kim, C.Y., Kim, K.Y., Baek, S.H., Moon, H.K., Lee, S.D. (2006), "Numerical analysis on the effect of fractured zone on the displacement - behavior of tunnel", *Tunnel & Underground Space*, Vol. 16, No. 3, pp. 218-231.
8. Kim, G.J., Moon, H.K., (2001), "A Theoretical and Numerical Study on the Effects of Prereinforcement of Tunnel Face", *Tunnel and underground space*, Vol. 11, No. 4, pp. 328-338.
9. Kim, I.S., Son, M., Jung, H.J., Lee, J.D., Kim, J.J., Beak, I.S. (1997), "Geological Characteristics of Kyongju-Ulsan Area : Palaeomagnetism and Magnetic Susceptibility of the Granitic Rocks in the Ulsan Fault Area", *Economic and environmental geology*, Vol. 31, No. 1, pp. 31-43.
10. Moon, T.H., Son, M., Jang, T.W., Kim, I.S. (2000), "Paleostress reconstruction in the tertiary basin areas in Southeasten Korea", *Journal of the Korean Earth Science Society*, Vol. 21, No. 3, pp. 230-249.
11. Park, S.H., Shin, Y.S., Bae, G.J. (2008), "A study on the engineering meanings of the critical strain concept in tunnelling", *Tunnel and underground space*, Vol. 10, No. 2, pp. 129-137.
12. Sakurai (1993), "The assessment of tunnel stability on the basis of field measurement", XVIII AGI Congress.
13. Son, M., Song, C.W., Kim, M.C., Cheon, Y.B., Jung, S.H., Cho, H.S., Kim, H.G., Kim, J.S., Sohn, Y.K. (2013), "Miocene Crustal Deformation, Basin Development, and Tectonic Implication in the Southeastern Korean Peninsula", *Journal of the Geological Society of Korea*, Vol. 49, No. 1, pp. 93-118.
14. Yoo, C., Cho, Y.G., Park, J.G. (2013), "Effect of orientation of facture zone on tunnel behavior - numerical investigation", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 15, No. 3, pp. 253-270.
15. Yoo, C., Park, J.G. (2014), "Deformation behavior of tunnels crossing weak zone during excavation-numerical investigation", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 16, No. 4, pp. 373-385.