

터널 열화로 인한 콘크리트 라이닝의 거동에 관한 연구

A Study on the Concrete Lining Behavior due to Tunnel Deterioration

한 영 철¹ Han, Young-Chul

정 상 섬² Jeong, Sang-Seom

Abstract

This paper studies the time-dependent behaviors of tunnel and surrounding ground due to tunnel deterioration. In the first part, the literature on deterioration characteristics of tunnels was reviewed. In the second part, a numerical analysis was performed to investigate the behavior of concrete lining on the typical section of Korean high-speed rail tunnel (weathered rock) after determination of input variables related to deterioration impact. The result shows that the settlement at the crown of tunnel and surface ground increased up to 7.0% and 30.2% of the total settlements during construction stage, respectively, and the internal convergence reduction of 9.0 mm for concrete linings was generated within 30 years after completion of tunnel construction. Also the loosening height increased up to 2.55 times of tunnel height within 50 years, which is higher than that of Terzaghi's recommendation on ultimate state. Due to this process of extending zones, it is found that additional loads were applied to concrete lining with the axial stress about 3.20~3.66 MPa, which accelerates tunnel deterioration. Finally the quantitative design approach to evaluate time-dependent behavior of lining and surrounding ground due to tunnel deterioration was proposed.

요 지

본 연구는 터널 열화 특성과 이와 관련된 각종 문헌 및 사례조사를 통하여 비교 분석하고 정량적인 해석을 위한 영향인자를 도출하여 입력변수를 결정하고 국내 고속철도 터널의 대표단면(풍화암)에 대하여 수치해석을 실시하였다. 해석 결과는 공용 후 30년 경과 시 열화로 인하여 천단침하량은 7.0%, 지표침하량은 30.2%이 증가하고 내공변위는 9.0mm가 수축 한 이후 점차 수렴되는 경향을 보였다. 또한 이완하중고는 공사 완료 후 50년 경과 시 터널고의 2.55배 까지 증가하여 극한상태에서의 Terzaghi의 제안값 보다 상당히 큰 값을 나타내었으며, 이러한 소성영역의 확장으로 인하여 터널 라이닝에 3.20~3.66MPa의 축응력이 추가로 작용하게 되는 경향을 확인하였다. 따라서 이로부터 설계에 반영할 수 있는 정량적인 예측기법을 제안하였다.

Keywords : Deterioration, Design life, Concrete lining, Creep, Hyperbolic law, Ground degradation

1 정희원, 연세대학교 토목공학과 박사 후 연구원 (Member, Ph.D. Research Associate, Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ.)

2 정희원, 연세대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-2807, Fax: +82-2-364-5300, soj9081@yonsei.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

1980년 초 국내 도입된 NATM 터널은 주변 지반과 1차 지보공(shotcrete, rockbolt, steel rib, spiles 등) 및 2차 라이닝(secondary lining)의 이중(double shell) 복합구조체로 구성되며, 2차(콘크리트) 라이닝은 지하수 차단과 1차 지보공 및 2차 라이닝의 분리를 목적으로 설치되는 방수막(waterproofing membrane)의 보호, 차량의 통행에 따른 시계 및 미관 확보 등의 목적으로 Final(concrete) lining, Permanent lining, Inner liner로도 불리우고 있다. 이러한 터널 구조물은 시간이 경과함에 따라 터널 복합구조체에 각종 열화가 진행되고 노후화 되어 내구성의 저하가 발생하며 내구수명 및 사용연한을 감소시키는 결과를 초래하게 된다. 따라서 터널은 공용 후 운영기간 동안의 열화로 인한 장기적인 역학적인 거동 분석은 매우 중요하다 할 수 있다. 이와 관련하여 국내에서는 터널 구조체의 내용연수에 대한 명확한 기준이 다소 미흡한 실정이나 외국의 기준을 준용한다면 90~150년을 기준으로 하고 있다.

각종 문헌(Seo, 2002; Choo et al., 2011; KISTEC, 1997) 및 각종 터널 안전 진단 보고서(KISTEC, 2003)에 의하면 NATM공법으로 시공된 터널이 과거 건설된 재래식(ASSM) 터널 보다 상대적으로 균열 및 변상이 많고 불량한 상태를 보이고 있으며, 특히 터널의 구조적인 안정성에 위해가 되는 종단 균열이 다수 발생하고 있는 것으로 보고되고 있다. 그 사유로서 1차 지보공의 주 지보재인 shotcrete의 도입으로 터널의 변위가 수렴된 이후에 2차 라이닝을 설치하여 라이닝의 두께를 최소화할 수 있었으나, 장기적으로는 터널의 열화에 대하여 상대적으로 취약한 상태일 것으로 추정 할 수 있다. 최근에는 1차 지보공을 일시적/임시적인 지보공(temporary support)으로 간주하고 이완하중을 전 하중으로 하여 2차 라이닝을 설계하고 있으나, 장기적인 터널 주변지반의 열화

에 대해서는 아직 반영하지 않고 있다.

현재 터널의 열화와 관련하여 2차 라이닝 및 shotcrete에 대한 연구가 주를 이루고 상당히 진척된 상태이나, 주변지반에 대한 열화 관련 연구는 미진한 상태로서 최근에 들어 국제적으로도 2차 라이닝의 내구성과 병행하여 점차 심도 있고 활발한 연구가 진행되고 있다. 한편 2차 라이닝의 경우에는 강도 저하가 큰 문제를 야기치 않으며 정기적인 보수 등 유지관리가 가능하나, 방수막 배면의 1차 지보공 및 지반에 대한 보수 및 보강은 곤란한 실정이므로 세부적인 연구가 절실한 실정에 있다. 터널의 장기적인 안정성에 대하여 주요 열화 과정의 영향을 평가하는 방안으로 지반 및 지보공의 역학적인 특성을 저하시키거나 또는 시간 의존성을 고려하는 rheological 모델을 사용한 해석이 가능하다.

본 연구에서는 터널의 열화의 특성과 이와 관련된 각종 문헌 및 사례조사를 통하여 비교 분석하고 정량적인 해석을 위한 영향인자를 도출하여 입력변수를 결정하였다. 또한 터널 주변 지반의 조건 및 지하수의 물리·화학적 특성 등은 지역적으로 각각 상이하므로 표준화하여 구분 적용하기에는 무리가 있으므로, 국내에서 적용하고 있는 수도권 고속 철도 터널 대표단면(PD-5: weathered rock)에 국한하여 수치해석을 실시하고 열화에 따른 터널의 역학적인 거동에 대한 연구를 수행하였다.

2. 터널의 내구수명 및 사용연한(Design life and serviceability)

터널 설계 기준으로서 내구수명 및 사용연한의 규정은 Table 1과 같이 국가마다 다소 차이가 있으며 국내의 경우는 합리적인 개념의 정립이 필요한 실정이다. Table 1에서 보는 바와 같이 전세계적으로 도로 및 철도 터널의 내구수명을 90년 이상으로 규정하고 있다. 단, 노르웨이의 경우에는 주로 산악터널로서 지하수의 영향이

Table 1. Recommendation of design life and serviceability

Country	Design life (years)	Code/ Regulation
France	100	French Association of Tunnels and Underground Spaces(AFRTS)
USA	100-150	The Federal Highway Administration (FHWA)
	100	California High-Speed Rail Authority (CHSRA)
U.K	120	Bureau of Transportation Statistics (BTS), BS5400
Germany	100	German Tunnelling Committee (DAUB)
Swiss	90	Swiss Tunnelling Society (STS)-SIA 197 2004
Norway	50	Norwegian Tunnelling Society (NFF)

거의 없고 비교적 균질한 암반으로 구성되어 있어 2차 라이닝을 설치하지 않고 1차 지보공으로만 시공되는 단일 라이닝(single shell) 구조를 고려하여 내구수명을 규정하였으므로 이중 복합체(double shell) 구조의 터널과는 다소 차이가 있다.

3. 터널의 열화 특성

3.1 열화에 따른 하중 전이

터널 복합구조체(지반, shotcrete 및 라이닝)의 열화가 진행함에 따라 주변지반의 거동 및 지보공에 작용하는 하중을 CCM(Convergence-confinement method)의 형식으로 지반특성곡선(Ground characteristic curve, GCC)과 지보반응선(support reaction line, SRL)으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에서 보는 바와 같이 공용 후 초기 상태인 평형상태의 점(ST_{eq})에서 시간이 경과함에 따라 터널 주변지반 및 지보공에 열화가 발생하므로 변위(δ_R)가 증가하며 지보공이 받는 하중(p_i)이 증가하여 장기 하중 단계의 점(LT_{eq})으로 하중 전이가 발생하는 것을 나타내고 있다.

3.2 터널의 열화 원인

장기적으로 터널 운영과정 중에 발생하는 터널 복합

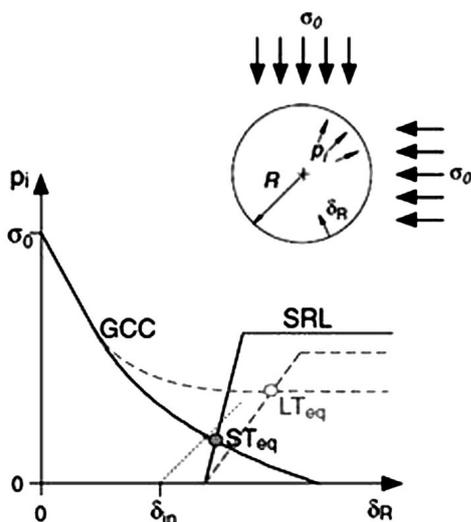


Fig. 1. Ground characteristic curve (GCC) and support reaction line (SRL) in a convergence-confinement Method (Sandrone and Labiouse, 2010)

구조체의 열화 현상에 대한 원인으로는 물리적(Physical processes), 화학적(chemical processes) 및 기타 요인(Other actions)으로 대별할 수 있다(Sandrone and Labiouse, 2010).

물리적 요인은 ageing 혹은 creep 효과와 같이 시간이 경과함에 따라 특성의 변화가 발생하는 현상이며 강성도의 저하 혹은 변형률 증가를 일으키며, 화학적 요인은 풍화(weathering)나 주변 환경(지하수, 대기오염 등)에 따른 화학적 변화로서 강도 및 역학적 특성을 감소시키며, 특히 shotcrete나 라이닝의 두께를 감소시킨다. 또한 기타 요인으로서 동결, 화재 등이 있다. 과거에는 열화가 발생하는 과정을 creep으로 간주하여 이론적인 해석 방안이 주를 이루었으나 엄밀한 의미에서 지하수 등의 주변 환경에 따른 화학적 열화과정과 다소 차이가 있으며, creep의 발생은 공사기간을 포함하여 초기에 수렴되므로 장기적으로 발생하는 추가변위는 열화에 따른 거동이라 추정할 수 있다(Jiang et al., 2007). 한편 터널 복합 구조체로서 지반, shotcrete 및 2차 라이닝에 대하여 각각 열화 원인 별로 발생하는 일련의 변화 과정은 다소 차이가 있다.

특히 German guideline DS 853(Deutsche Bahn AG, 2007)에 따르면 지하수의 침투는 터널이 지반 전체의 배수통로가 되어 주변지반에 열화가 발생한다고 규정하고 있다. 따라서 터널 주변 지반의 열화는 터널 굴착으로 인하여 주변지반에 이완(소성)영역이 발생하고 장기적으로 지하수로 인한 미립자의 이동 및 유해 화학적 물질의 침투 등 환경적인 여건에 따라 주변 지반의 역학적 특성의 변화와 강도 저하(degradation)가 발생하여 점진적으로 터널에 추가 변위가 진행된다. 이에 따라 이완 영역이 확대되어 2차 라이닝에 추가 하중이 작용하게 되어 균열이 발생하거나, 심할 경우에는 라이닝의 파괴로 인한 붕괴에까지 이르게 된다(CETu, 2011). 한편 터널 주변 지반과 지하수와의 화학적 상호작용(chemical interaction)은 지반의 강도를 감소시키며(Hagros, 2007), 특히 그라우팅으로 보강된 지반이나 shale 혹은 gypsiferous materials 등과 같은 퇴적암(sedimentary rocks)은 물에 취약하여 leaching이나 화학적 작용에 민감하다 할 수 있다.

1차 지보공(shotcrete, rockbolt, steel rib, forepoling 등) 중 주지보재인 shotcrete는 시간이 경과함에 따라 지하수 침투로 인한 영향을 받으며 화학적 성분의 변화(sulphates corrosion, calcium leaching 등)로 역학적 특성의 저하가 발생한다. 즉 shotcrete는 열화로 인하여 강도가 저하되

어 지지력을 상실하고 터널 주변의 소성영역이 확장되어 터널 라이닝에 추가 하중이 작용하게 되며, 최근의 경향은 shotcrete는 영구 지보재가 아닌 임시 지보재로 간주하고 있다.

콘크리트 라이닝의 경우는 일반 콘크리트 구조물과 같이 노출면이나 지하수면 하에서 열화가 진행되며 균열부를 통하여 열화가 확장된다(Grobbelaar, 1994). 일반적으로 콘크리트의 특성상 터널 운영 초기에는 강도가 증가하게 되나 장기적으로는 열화로 인한 노후화가 빠르게 진행된다. 지역에 따라 각각 다양한 열화 요인이 있으며, 주로 지하수의 영향이 주된 원인이라 할 수 있다. 한편 라이닝 배면의 방수막 설치 여부에 따라 열화 진행속도에 상당한 차이가 있다. 방수막이 없거나 혹은 파손 등으로 충분한 차수 효과를 기대 할 수 없는 경우에는 라이닝 내측·외측부에 열화가 발생하게 되며, 특히 외측부의 지하수로 인한 용탈(leaching)로 인하여 내부로 유출되는 침출수는 라이닝의 역학적 특성을 크게 감소시킨다. 또한 라이닝 외측에 방수막이 설치되는 경우에는 주로 내측부만이 열화가 진행되며 일반적으로 두께의 감소의 원인이 되며 주로 동상 방지용 염화칼슘에 의한 부식(de-icing salts corrosion)이나 배기가스 등으로 인한 탄산화(ordinary surface carbonation)가 원인이라 할 수 있다. 특히 방수막을 설치하는 경우에는 배수재로 지하수 침투가 집중되어 shotcrete의 열화가 더 빠르게 진행될 수 있다(Sandrone & Labiouse, 2010). 장기적인 관점에서 shotcrete와 병행하여 사용되는 각종 지보재(rock bolts, anchors, wire mesh 및 steel ribs 등)는 부식에 취약하며, 또한 시공과정 및 shotcrete의 추가변위 등으로 발생하는 균열로 인하여 완벽히 보호할 수는 없다.

4. 기존 문헌 조사 및 분석

4.1 Ageing(creep) 효과

과거에는 여러 연구자들에 의해 터널 주변 지반의 ageing 효과를 다양한 rheological(time effects) 모델을 기초로 하여 연구하였다. 이러한 효과를 고려한 터널 주변 지반의 장기적인 거동에 대한 이론은 주로 Power law 및 Hyperbolic Law를 이용하였으며(Phienweij et al., 2007), 지반의 구성 모델(constitutive model)로서는 Maxwell 및 Kelvin-Voigt (Panet, 1979), Bingham(Berest and Nguyen Minh, 1983),

Rousset(Rousset, 1990) 등이 있다(Sandrone & Labiouse, 2010). Ladanyi(1980)는 지반의 구성모델(constitutive model)로서 응력과 무관한 시간의 함수로 가정하여 non-linear viscoelastic model을 이용하여 creep 거동에 적용하였다. 이후 여러 학자들에 의해 visco-elastic와 visco-plastic behaviour에 대한 연구가 진행되었다(Cristescu, 1985, 1994; Boidy, 2002; Nguyen Minh and Pouya, 1992). 또한 elastic visco-plastic behaviour(Rousset, 1990; Fritz, 1984) 및 Elastic-plastic with strain softening(Rousset, 1990; Barla, 2000)가 소개되었다(Sandrone and Labiouse, 2010).

일반적으로 ageing은 터널 굴착 후에 시간이 경과함에 따라 발생하는 creep과 관련되며 주로 변형률에 대한 모델(Constantinescu and Cristescu, 1983)로서 축차응력의 함수이며, 변위속도 및 변형형태에 밀접한 관계가 있다. 이러한 변형률의 변화는 다양한 지반의 종류에 따라 각각의 특성을 달리한다. 이와 같이 과거 creep과 관련된 모델들은 주로 재래식 터널을 대상으로 하고 1960년대에 본격적으로 사용된 shotcrete의 특성 및 열화에 대해서는 고려하지 않고 있다.

4.2 터널 주변지반의 열화 특성

4.2.1 Hyperbolic law(Rate theory of creep)

Ladanyi(1974)에 의하면 화학적인 풍화로 인하여 주변지반의 강도 특성이 장기적으로 초기치의 30%까지 감소하며, 쌍곡선법(hyperbolic law)으로 임의 시간의 역학적 특성을 구할 수 있는 식 (1)을 제안하였다(Sandrone and Labiouse, 2010).

$$V(t) = V_{ST} - \left[(V_{ST} - V_{LT}) \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{t}{T}} \right) \right] \quad (1)$$

여기서, V_{ST} : 입력변수(friction angle ϕ and cohesion c)의 초기치

V_{LT} : 최종 단계의 입력변수로서 초기치(V_{ST})의 30%로 가정

T : 지반의 풍화 진전도와 관련된 시간 상수 (일반적으로 1.0 사용)

t : 터널 시공 완료 후 임의 시간

한편 상기 식에서 강도 특성(c, ϕ)의 지하뿐 만 아니

라 탄성계수(E)도 최종 단계로서 40%까지 저하토록 제안하였다.

4.2.2 Hypothetical creep prediction

Lenz 등(2010)은 오스트리아의 알프스를 관통하는 Bosruck 도로터널(NATM)에서 27년간 수집된 자료를 기준하여 팽창성 지반(anhydric shales)의 장기적인 역학적 특성 변화로서 시간에 따른 Creep 계수의 분포로부터 열화로 인한 지반 특성의 변화를 식 (2)와 같이 시간(t)이 경과함에 따라 감소되는 지반의 탄성계수 $E(t)$ 로 나타내었다.

$$E(t) = \frac{E_{t=0}}{1 + \varphi(t)} \quad (2)$$

여기서 $\varphi(t)$ 는 creep 계수로서 현장 측정값으로부터 역 계산(feed-back calculation)하여 식 (3)의 hypothetical creep prediction curve로부터 결정하였다.

$$\varphi(t) = \varphi_{end}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (3)$$

이로부터 Lenz 등(2010)은 Bosruck 2nd Tube(도로터널) 라이닝의 두께를 결정하는데 있어 Fig. 2와 같이 CCM에 의한 해석에 상기 식을 적용하였다. Fig. 2에서 터널 시공 완료 후($t=0$) 라이닝에 작용하는 응력이 100년 후에는 4배 이상 증가하여 라이닝의 두께를 당초 0.36m에서 1.12m로 변경한 사례를 나타내고 있다.

4.2.3 강도 열화 모델; 시간 의존성 강도 저하를 고려한 해석

Nakagawa 등(2004), Kawata 등(2005) 및 Jiang 등(2007)에 의하면 터널 굴착에 따른 주변지반의 소성영역은 시간 의존성인 지반의 열화(degradation)로 인하여 영역이 확대되고 이러한 이완영역은 라이닝에 추가 하중으로 작용하며, Sato(1984)가 제안한 파괴시간-응력비의 관계곡선(Fig. 3)으로부터 식 (4)와 같은 시간 의존성 열화로 인한 산정식을 이용하여 라이닝의 거동을 분석하였다. 단, 시간 의존성 강도 저하는 점착력(c) 만을 대상으로 하였다.

$$\frac{dc}{dt} = -\lambda R \quad (R \leq 1.0) \quad (4)$$

여기서, $R = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2c \cos \phi + \sin \phi (\sigma_1 + \sigma_3)}$: Mohr-Coulomb(MC)의 파괴포락선 접근도(응력계수)
 λ : 강도 저하 속도(경험치)

Jiang 등(2007)은 고 제3기층의 세일과 응회각력암층이 분포하고 있는 Nagasaki Tawarazaka 도로터널(재래식 터널)에서 장기간의 지반조사로부터 구한 강도정수(c)의 경시변화를 고려하고 터널 내공변위의 계측 자료에 대하여 상기 식(강도 열화 모델)과 creep 모델(viscoelastic) 이용한 수치 해석을 실시하여 Fig. 4와 같이 비교 분석하였다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 creep 모델은 초기에 큰 변위가 증가하고 이후에는 수렴 경향

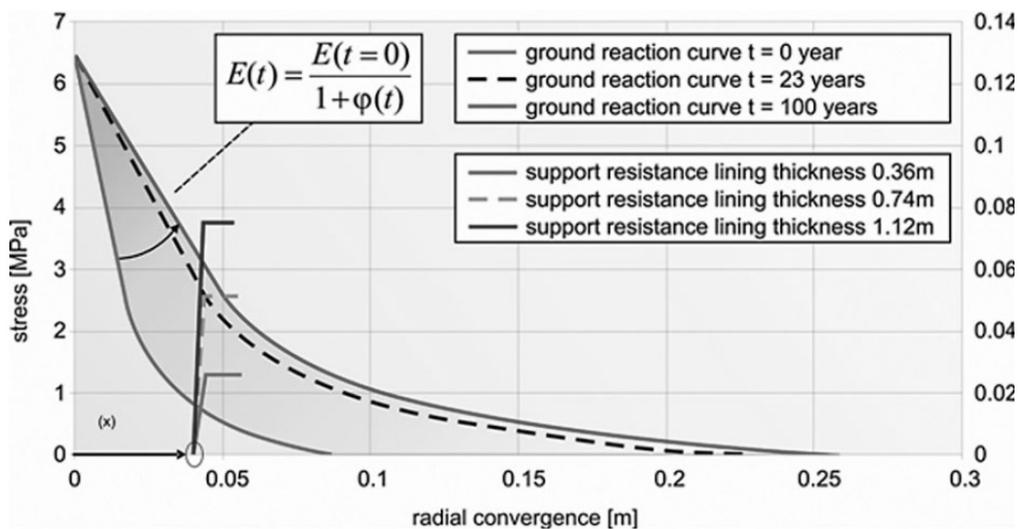


Fig. 2. Results of the convergence confinement method to illustrate stress increase due to creep strain (Lenz et al., 2010)

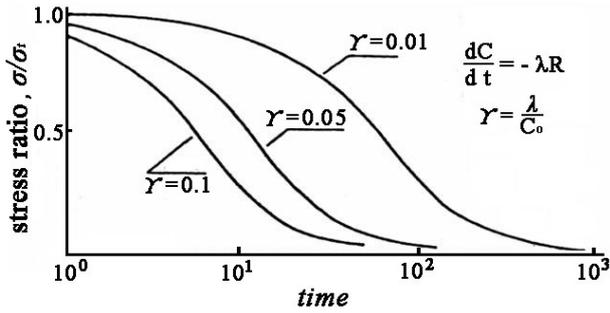


Fig. 3. Relationship between stress ratio and time (Jiang, et al., 2005)

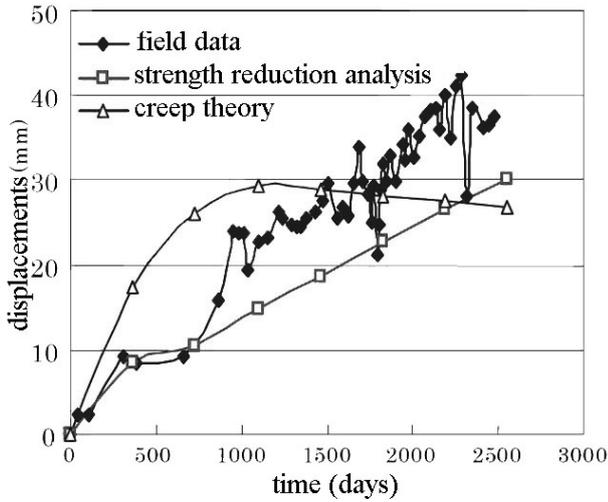


Fig. 4. Comparison of monitoring data and results of analysis (Jiang, et al., 2007)

을 나타내고 있으나, 강도 열화 모델은 실측치와 유사한 거동을 나타내고 있다. 즉, 강도 열화 모델은 시간이 지남에 따라 지반 강도가 저하해 가는 반면, creep 모델은 지반 강도는 경시적인 변화가 반영되지 않기 때문이다 (Jiang, 2005). 이후 Guan 등(2008)은 이와 유사한 방법으로 내부 마찰각(ϕ)에 대한 시간 의존성 열화 관계식을 추가한 New Burger-deterioration rheological model을 제안하여 실제 터널 현장인 Ureshino Tunnel Line I(재래식 터널)에서 측정된 계측결과와 FLAC을 이용한 수치해석으로 비교 분석하였다.

4.2.4 지반 열화 모델에 의한 열화 예측 기법; Matsunaga (2008)

Matsunaga(2008)는 MC의 항복 기준을 이용한 지반 열화모델을 사용하여 Fig. 5와 같이 초기 응력상태(peak strength)의 전단강도 정수(c_{peak}, ϕ_{peak})에서 잔류 응력상태(residual strength)의 강도 정수(c_{res}, ϕ_{res})로 감소한다는 가정 하에 탄소성모델을 사용하여 유한차분법(FDM)

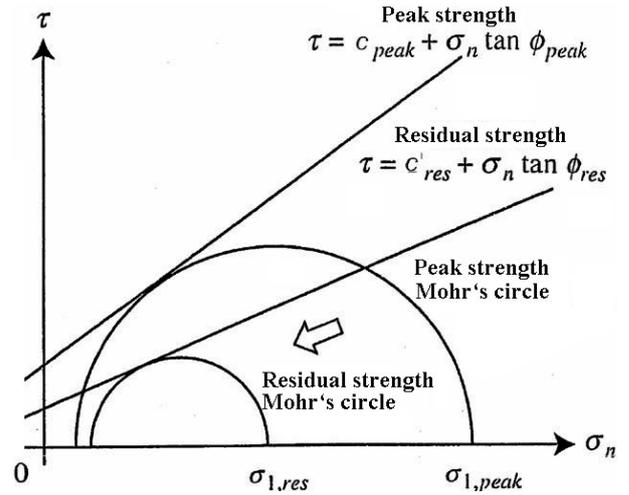


Fig. 5. Ground degradation model by Mohr's circle (Matsunaga, 2008)

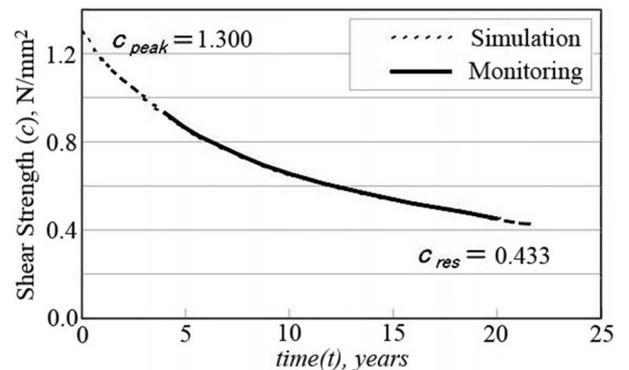


Fig. 6. Strength (c) reduction curve (Matsunaga, 2008)

으로 보강방안에 대한 검토를 수행하였다. 검토 대상은 재래식 터널인 Rokujurigoe 터널(JR Tadami line)이며 지반 상태는 신제3기 퇴적암(이암, 응회암)으로서 팽창성 광물인 Montmorillonite를 함유하고 있어 물에 상당히 취약한 지반으로 형성되고 있으며, 실제 현장에서의 측정 변위에 대하여 강도정수(c)의 경시변화로 환산하여 Fig. 6과 같이 열화에 따른 지반의 전단강도 분포를 입력치로 이용하였다. 단, 내부 마찰각(ϕ)은 변화가 없는 것으로 가정하였다.

4.2.5 지반강도 저하 모델(Ground strength reduction model)

Matsunaga(2008)와 Yashiro 등(2009)은 노후화된 A 터널(재래식 터널)에 대하여 Fig. 7과 같이 약 24년간 측정된 내공변위 계측자료와 지반조사 자료로부터 전단강도(c)와의 관계를 재현 해석하여 식 (5)와 같이 지반의 열화에 따른 전단강도($c(t)$)의 근사곡선(log함수)을

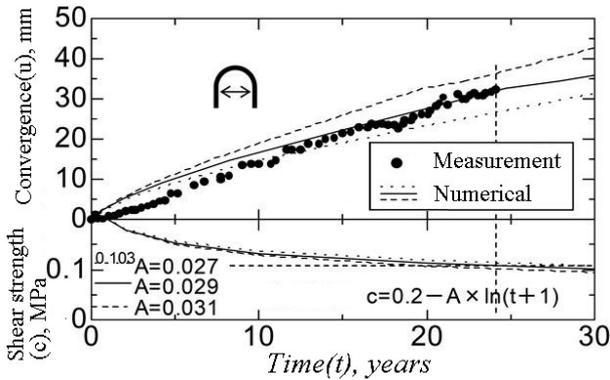


Fig. 7. Results of Feedback analysis (Matsunaga, 2008)

결정하고 탄소성모델을 사용하여 유한차분법(FDM)으로 보강방안에 대한 검토를 수행하였다. 터널의 지반조건은 유문암 내지 유문암 질 응회암으로 열수 변질을 받아 점토화되어 있어 열화에 매우 취약한 상태이다.

$$c(t) = c_0 - A \times \ln(t + 1) \quad (5)$$

여기서, c_0 ; 지반의 초기 전단강도

A ; 계수

t ; 경과시간

4.3 Shotcrete의 열화 특성

국내에 NATM 터널의 도입으로 shotcrete가 사용된지 30여년 경과된 시점에 장기적인 내구성 및 거동에 대한 연구가 다소 미진한 실정이다. 따라서 shotcrete의 열화 특성에 대하여 원인 및 효과에 대하여 명확히 파악할 필요가 있다.

지하수나 지표수의 침투가 있는 경우 물리, 화학적인

반응으로 shotcrete에 직접적인 손상이 발생하여 지지력은 점차 저하된다. 즉 고결된 조립 구조가 점차 분리되어 지지력을 잃게 되면 ground arch를 형성한 지반은 응력의 재분배가 발생하여 2차 라이닝에 추가 하중이 작용하게 된다. 특히 shotcrete와 병행하여 사용된 보조재 (rock bolts, wire mesh, ribs, spiles 등)는 부식에 충분히 보호가 될 수 없으며, 특히 공사 과정 중 혹은 완료 후 추가 발생하는 변위로 인하여 shotcrete에 균열이 발생하므로 부식을 방지 할 수는 없다.

따라서 터널의 내용연수 기간 동안에 초기의 shotcrete의 역할 및 지지력을 기대할 수는 없기 때문에 일반적으로 수치해석상에 shotcrete는 일시적/임시적인 지보공으로서 장기적으로는 단순히 자갈 등의 조립 지반으로 간주할 수 있다(Sandrone and Labiouse, 2010). 또한 shotcrete의 강성과 강도 특성을 고려하면 낮은 강도를 갖는 암반 (Gray Rock Philosophy; Hurt, 2002)으로 간주하여 탄소성체로 모델화하여 열화에 따른 거동은 탄성계수 및 압축강도를 저하시켜 수치해석을 할 수 있다.

Carde and Francois(1997) 및 Nguyen(2005)은 실내시험을 통하여 열화로 인한 역학적인 특성의 감소(ΔA_d)는 열화된 면적(A_d)과 초기 단면(A_0)의 비에 직접적으로 비례한다고 하여 식 (6)과 같이 제안하였다.

$$\Delta A_d = \frac{A_d}{A_0} \quad (6)$$

또한 Nguyen(2005)에 의하면 콘크리트 라이닝의 Young's Modulus(E) 와 압축강도(f^c)는 열화에 따라 식 (7) 및 식 (8)과 같이 저감된다고 제안하였다.

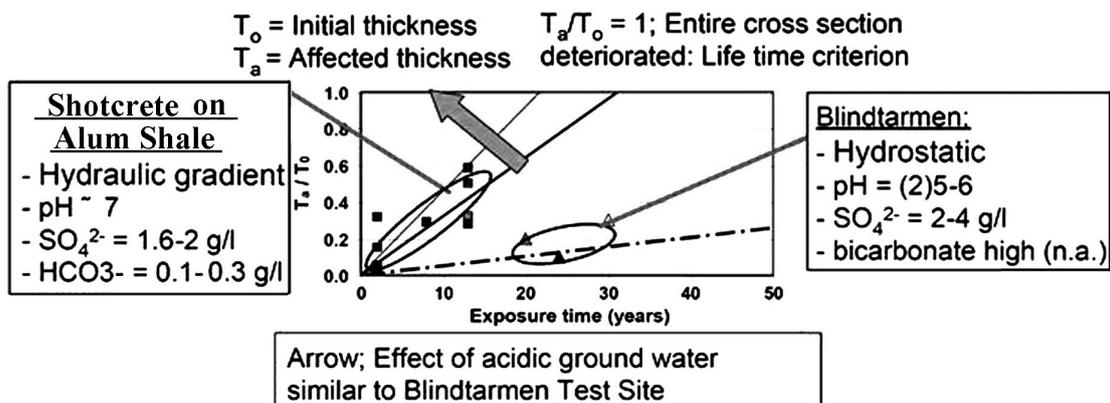


Fig. 8. Lifetime of sprayed concrete under a hydraulic gradient for 10 cm thick Blindtarmen test samples (Hagelia, 2011)

$$\frac{\delta E}{E} = \frac{E_0 - E}{E_0} = k_m \times \delta A_d \quad (7)$$

$$\frac{\delta f_c}{f_{c0}} = \frac{f_{c0} - f_c}{f_{c0}} = k_r \times \delta A_d \quad (8)$$

여기서, E_0 및 f_{c0} 는 각각 초기 Young's Modulus 및 압축강도

k_m, k_r 는 저감계수로서 각각 0.66 및 0.76의 값을 사용 (보통 콘크리트 기준)

한편 Hagelia(2011)의 연구에 의하면 black(alum) shale 지반에서 도로 사면 및 터널구간에서 장기간에 걸쳐 조사된 shotcrete의 부식(열화) 현황과 shotcrete의 화학적 열화에 대한 연구를 목적으로 Blindtarmen test site에서 장기간에 걸쳐(1952~1982) 화학적 반응에 대한 시험을 시행한 결과로부터 Fig. 8과 같이 물리적, 화학적 열화로 인한 shotcrete 부식 두께의 경시 변화는 최대 10cm/30년으로 완전 분해가 발생하는 것을 확인하였다.

4.4 라이닝의 열화 특성

콘크리트 라이닝은 장기적으로 유해한 환경조건(대기의 노출, 지하수의 영향 및 균열을 통한 침출수 유출 등)에 따라 열화가 발생하며(Grobbelaar 1994), 방수막이 설치되는 경우에는 라이닝 내측부가 열화에 대한 취약부가 된다. 그러나 방수막에 결함이 있는 경우에는 라이닝의 내·외측부가 지하수 침투로 인한 침출수에 의해 물리, 화학적 열화가 발생하여(sulphates corrosion, calcium leaching 등) 라이닝의 역학적 특성이 저하되게 된다.

황산염 침식(sulfate attack)은 시멘트 중의 소석회(Ca(OH)₂) 및 알루미늄 산 삼석회(tricalcium aluminate)와 반응하여 Ettringite(hydrous calcium aluminium sulfate mineral)를 형성하고 현저하게 팽창하여 콘크리트를 파괴한다(KISTEC, 2003).

동해방지를 위한 염화칼슘(주로 chlorides solutions, CaCl₂ 및 NaCl) 살포는 주된 Calcium leaching의 원인이자 할 수 있다. 그러나 지역적으로 혹은 살포량에 따라 장기적인 부식 두께가 상이하므로 정확히 판단하기 어렵다. 단지 공용 후 30년 경과된 Cantons of Vaud and Ticino의 터널 조사 결과로부터 측벽은 약 50mm, 천단은 30mm 정도의 두께가 영향을 받았다는 기록이 있다

(Sandrone and Labious, 2010). 또한 배기가스(CO₂)의 영향으로 탄산화가 진행되기도 하며 국내에서도 재래식 도로 터널(70년 경과)에 대한 정밀안전진단 조사 결과로부터 탄산화(Ordinary surface carbonation)로 인한 영향이 최대 59mm(Jung 등, 2007) 두께로 발생한 기록이 있다.

콘크리트의 열화는 장기간에 걸쳐 화학반응이 진행되며 그 반응 과정과 생성물은 골재 중의 알칼리량이나 염화물량, 환경조건 등에 따라 영향을 받는다. 화학반응은 실제 몇가지 원인이 복합하여 발생하며 화학반응 부산물에 의하여 콘크리트 재료가 팽창하고 공극 및 균열이 발생하게 된다. 이러한 물리적, 화학적 열화로 인하여 발생하는 손상 범위 및 두께는 shotcrete의 산정식(식 (7)~(10))과 유사하게 적용 할 수 있다. 특히 라이닝 배면에 방수막이 없거나 결함이 있을 경우에도 지하수 침투로 인한 콘크리트 라이닝의 물리, 화학적 열화에 대하여 동일하게 역학적인 특성을 나타낼 수 있다.

한편 Yokozeki 등(2004)에 의하면 34년~104년 경과된 구조물들의 상태를 관측한 결과 Calcium leaching에 의한 부식된 두께가 100년간 최대 100mm가 발생한 기록이 있으며, 스위스 Flonzaley 터널(Sandrone and Labious, 2010)에서 개통 후 30년 경과된 콘크리트 라이닝 시료를 채취하여 시험한 결과 초기 일축압축강도가 45MPa에서 39MPa로 저하된 것을 확인한 자료로부터 열화진행 두께(X_d)의 산정식(Mainguy and Coussy, 2000)을 식 (9)와 같이 제안하였다.

$$X_d = a\sqrt{t} \quad (\text{m}) \quad (9)$$

여기서, 열화 진행속도 a 는 재료의 특성 상수로서 물/시멘트비(w/c)에 따라 결정되며, $w/c=0.5$ 인 경우에 $a=5.2E-4$ ($\text{m}/\sqrt{\text{days}}$)의 값을 나타낸다.

5. 열화에 따른 터널 거동 해석

터널의 복합 구조체(지반, shotcrete 및 2차 라이닝)에 대하여 열화에 대한 예측기법은 아직도 명확한 해법이 없으나 각종 문헌 및 계측자료로부터 매개변수를 도출하고 각종 이론 및 경험식을 토대로 하여 열화에 따른 경시 변화에 대한 추이를 판단할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 수도권 고속철도 터널 표준단면(Type PD-5: weathered rock)에 대하여 국내에서 실용

적으로 사용되고 있는 유한차분법(FDM) 프로그램인 FLAC 2D(Ver. 7)를 이용하여 열화 따른 터널의 거동 해석을 수행하였으며, 지반재료의 거동은 Mohr-Coulomb

(MC) 파괴기준을 따르는 Elastic-perfectly-plastic 구성모델로 하고, shotcrete 및 2차 라이닝은 Linear elastic 구성 모델을 적용하였다.

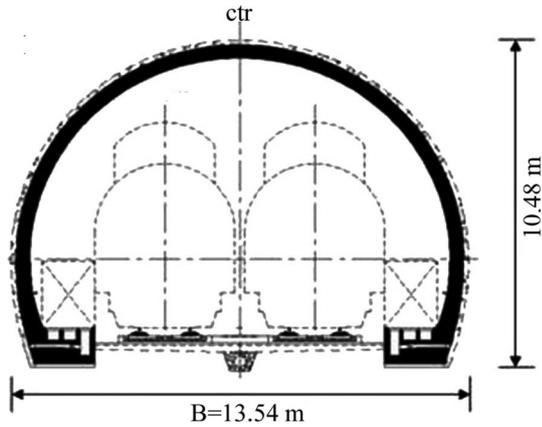


Fig. 9. Typical section of analysis

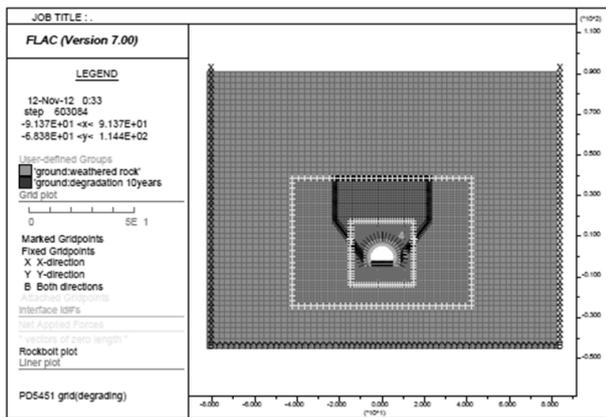


Fig. 10. Grid & Mesh Generation

5.1 해석 단면 및 초기 입력 물성치

본 연구에서 해석단면은 수도권 고속철도 터널 표준 단면(PD-5: weathered rock)의 폭 13.54m, 높이 10.16m로 하고(Fig. 9) 표준 지보패턴은 상하부 반단면 굴착 단면을 적용하였다. 지반조건은 풍화암의 단일 지반으로 하고 토피는 대심도로서 터널고의 8배로 하였다. 또한 열화가 진행되는 터널 주변지반의 영역은 소성(이완)영역의 발달과 병행하여 지하수위 및 지하수 유출로 인한 화학적 열화가 진행되므로(Jiang 등, 2007; German guideline DS 853, 2007; CETu, 2004), Terzaghi(1946)의 극한상태의 이완영역을 대상으로 하여 터널 측벽 하부에서 $\tan(\phi + 45^\circ)$ 및 터널 상부는 터널고의 3.0배로 가정하여 Fig. 10과 같이 grid & mesh를 작성하여 해석을 수행하였다. 또한 본 해석을 위한 지반 및 지보 재료에 대한 초기 입력 물성치는 “철도터널 라이닝 설계 합리화 방안 연구”(KICT, 2012)를 참조하여 Table 2~Table 4와 같이 결정하였다.

5.2 열화에 따른 해석 입력치의 결정

본 연구의 열화에 따른 터널 거동 해석을 위하여 기존 문헌 조사 및 분석(제 4장)에서 제시된 예측 기법을 종합 분석하였으며, 이로부터 열화에 따른 지반의 탄성 계수

Table 2. Input data for ground in construction stage

Type	Unit Weight	Cohesion	Internal friction	Young's modulus	Poisson ratio
	γ (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	Es, D (MPa)	ν
W.R.	21	50	32	400	0.3

Table 3. Input data for shotcrete and lining in construction stage

Materials	Type	Unit Weight	Thickness	Young's modulus	2nd Moment Inertia
		γ (kN/m ³)	thk (m)	Es, D (MPa)	EI (MPa m ² /m)
Shotcrete	Soft(green)	23	0.2	5.00E+03	4.17E-01
	Hard	23	0.2	1.50E+04	1.25E+00
Lining	Concrete	24	0.4	2.10E+04	1.12E+02

Table 4. Input data for rockbolt

Materials	Type	Young's modulus	Area	Yield Force	Bond Strength	Bond Stiffness
		Es, D (MPa)	m ²	kN/m	kN/m ²	kN/m ²
Rock bolt	D25	2.10E+05	5.07E-04	177	800	1.50E+07

(E) 및 강도 정수(c, ϕ), shotcrete 및 2차 라이닝에 대한 탄성계수(E)에 대하여 각각의 해석 입력치를 결정하였으며, 경시변화의 오차 범위가 커서 평균값을 적용하였다.

5.2.1 주변 지반의 열화

1) 변형계수(탄성계수); $E(t)$

열화에 따른 지반의 변형계수(E)의 저감 예측기법은 Sandrone and Labious(2010)이 제안한 Ladanyi(1974) 및 Sulem(1994)의 쌍곡선 법(Hyperbolic law)의 식 (1)를 적용하고 최종 단계의 변형계수(E_{LT})의 값을 40%로 하였다. 또한 A9 Bosruck Tunnel(Lenz 등, 2010) 및 Niagara water tunnel(Marcher, 2011)의 실측자료에 대하여 식 (2)과 식 (3)으로부터 시간에 따른 변형계수($E(t)$)의 저감 곡선을 구하였으며, 이들의 평균값의 분포를 Fig. 11에 나타내었다.

2) 강도 정수(점착력) : $c(t)$

열화에 따른 지반의 점착력(c)의 저감 예측기법은 Sandrone and Labious(2010)이 제안한 Ladanyi(1974)의

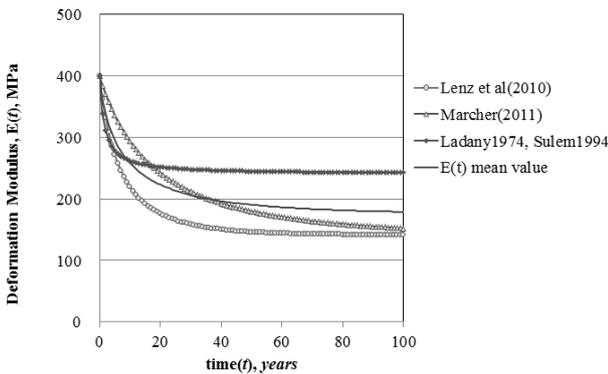


Fig. 11. Decrease of deformation modulus (E) with time due to degradation for ground

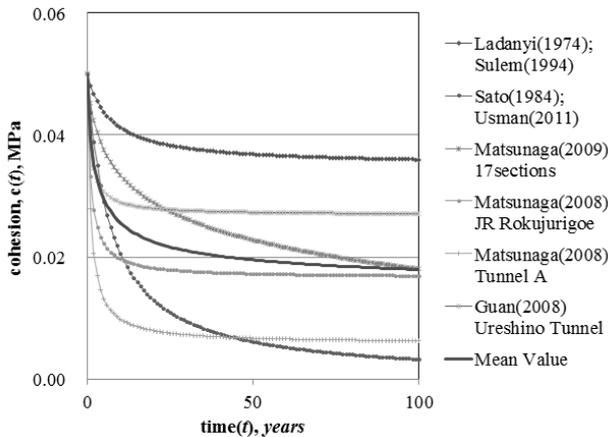


Fig. 12. Reduction curves of cohesion (c) with time for Ground

쌍곡선 법(Hyperbolic law)의 식 (1)을 적용하여 최종 단계의 점착력(c_{LT})의 값을 잔류강도(residual strength) 개념으로 30%로 하고, Sato(1984) 및 Usman(2011)이 제안한 최종 점착력(c_{LT})의 값은 0%으로 하여 각각의 저감 곡선을 구하였다. 또한 Matsunaga(2008)가 제안한 근사 곡선(logarithmic curve)의 식 (5)를 이용하여 공용 후 100년이 경과된 Tunnel A, JR Rokujurigoe tunnel, 17개 노후 터널의 계측 자료 및 Guan(2008)의 5년간의 측정 자료로부터 시간에 따른 점착력(c)의 저감 곡선을 구하여, 이들의 평균값의 분포를 Fig. 12에 나타내었다.

3) 강도정수(내부 마찰각): $\phi(t)$

열화에 따른 지반의 내부 마찰각($\phi(t)$)의 저감 예측기법은 Sandrone and Labious(2010)이 제안한 Ladanyi(1974)의 쌍곡선 법(hyperbolic law)의 식 (1)을 적용하여 최종 단계의 내부 마찰각(ϕ_{LT})의 값을 잔류강도(residual strength) 개념으로 30%로 하고, 준공 후 100년이 경과되어 노후화된 Tunnel A, 17개 노후 터널의 계측 자료 및 Guan(2008)의 5년간의 측정 자료로부터 시간에 따른 점착력($c(t)$)의 저감 곡선을 구하였으며, 이들의 평균값의 분포를 Fig. 13에 나타내었다.

5.2.2 Shotcrete의 열화

열화에 따른 Shotcrete의 탄성계수(E_s)의 저감 예측기법은 Hagelia(2011)의 연구로서 극한적인 환경에서 열화로 인한 부식 두께의 진행속도가 10cm/30년이므로 Nguyen(2005)의 식 (7)에서 경시 변화($A_d(t)$)를 0.0033t로 하여 탄성계수($E_s(t)$)의 저감 곡선을 구하여 Fig. 14에 나타내었다.

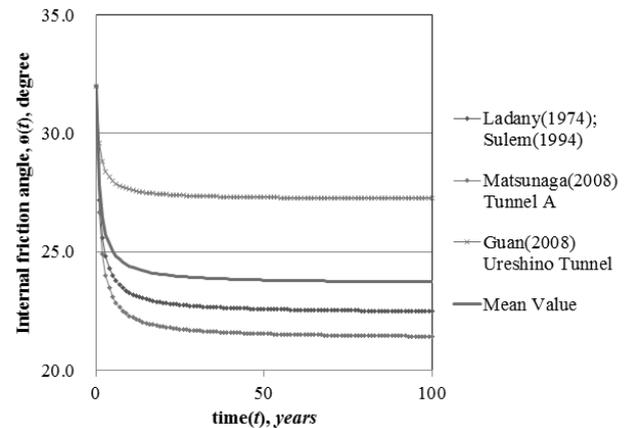


Fig. 13. Reduction curves of internal friction angle (ϕ) with time for Ground

5.2.3 콘크리트 라이닝의 열화; $E_L(t)$

2차 라이닝의 열화는 배면의 방수막 설치 여부에 따라 차이가 있으나, 본 연구에서는 방수막에 결함이 있는 상태를 기준으로 검토하였다. 따라서 열화에 따른 라이닝 콘크리트의 탄성계수(E_L)의 저감 예측은 Yokozeki 등(2004)이 제안한 100mm/100년을 기준으로 열화 면적의 경시변화($A_d(t)$)를 $0.001t$ 로 하고 shotcrete와 동일한 방법으로 탄성계수의 값 ($\delta E_L = k_m \cdot \delta A_d \cdot E_0$)을 구하고, 또한 Flonzaley tunnel(Sandrone and Labious, 2010)의 30년 경과된 시료의 일축압축강도($f'c$)가 45MPa에서 39MPa로 저하된 자료로부터 Mainguy 등(2000)이 제안한 식 (9)의 열화 두께(X_d) 및 식 (8)을 이용하여 δA_d 를

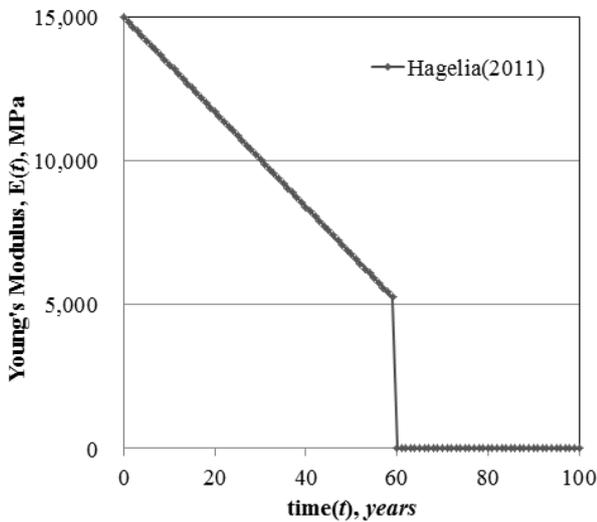


Fig. 14. Decrease of deformation modulus (E) with time due to deterioration for shotcrete

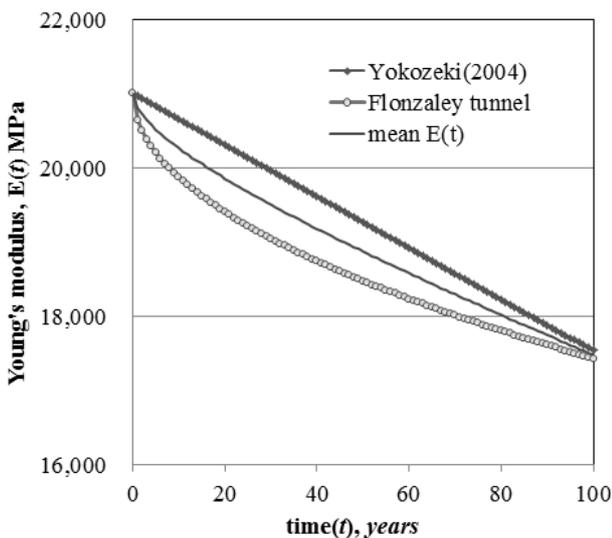


Fig. 15. Decrease of deformation modulus (E) with time due to deterioration for concrete lining

구하여 탄성계수(E_L)의 저감 곡선을 구하였으며, 이들의 평균값의 분포를 Fig. 15에 나타내었다.

5.3 해석 결과분석

터널의 열화로 인한 주변 지반의 거동 해석은 터널 구조물이 완료된 상태인 운영 과정 중에 발생하나, 터널 굴착 과정 중에 터널 주변지반에 이미 변위 및 소성영역이 발생하므로 굴착단계부터 해석 할 필요가 있다. 따라서 터널 굴착 과정은 상하부 반단면으로 굴착 후의 하중 분담율은 30%로 하고 soft(green) shotcrete 타설시 70%, hard shotcrete 타설시 100%로 하여 2차 라이닝에는 하중이 작용하지 않도록 하고 공사기간을 3년으로 가정하였다. 이후 열화로 인한 주변 지반, shotcrete 및 2차 라이닝 경시변화 곡선으로부터 단계별(10년 간격)로 저하된 각각의 물성치를 구하여 입력치를 변환하였다.

5.3.1 주변 지반의 거동

열화로 인한 년차별 터널의 천단 침하 및 지표침하량의 거동은 Fig. 16과 같다. Fig. 16에서 보는바와 같이 공용 후 30년 경과 시 열화로 인하여 천단침하량은 4.4 mm, 지표침하량은 3.8mm가 증가하고 내공변위는 9.0 mm가 수축한 이후 점차 수렴되는 경향을 보였다. 이는 아칭 효과에 따른 지반 아치가 형성되고 있음을 의미하고 있다. 이러한 거동은 시공단계인 터널 굴착 후 라이닝을 설치하지 않은 상태로서 1차 지보공 만을 설치하여 안정을 유지할 때까지의 변위량 보다 각각 7.0%, 30.2% 및 19.3%의 추가 변위량이 발생하였으므로 열화에 따라 주변지반에 크게 영향이 미치는 것을 알 수 있다.

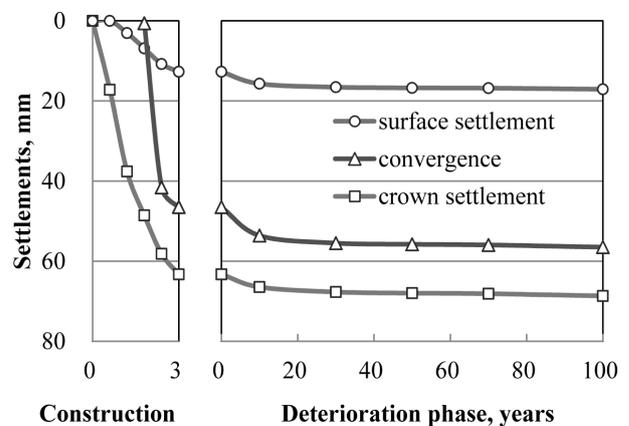


Fig. 16. Results of analysis for ground behavior around tunnel due to deterioration

5.3.2 소성 영역의 분포

열화에 따른 주변지반의 소성영역에 대한 분포는 Fig. 17과 같다. Fig. 17에서 보는 바와 같이 열화가 진행됨에 따라 전단대가 지상을 향하여 발달하고 소성 영역이 확대되는 경향을 나타내고 있다. 특히 전단대 내부의 영역은 터널 상부에 중력 하중(Akutagawa 등, 1998)으로 작용하게 되므로 Terzaghi(1946)가 제안한 이완하중고(loosening height, overburden load height) 혹은 rock load height (Osgoui 등, 2006)로 간주 할 수 있다. 이러한 이완 하중고의 경시변화는 Fig. 18과 같으며 터널고(H_0)에 대한 등가 환산 이완하중고(normalized loosening height; H_L/H_0)는 공사 완료 후의 1.08배에서 30년 경과 후에 2.43배, 50년 후 2.55배로서 열화로 인하여 주변지반에 이완 영역이 확장되어 터널 라이닝에 추가 하중이 작용하게 되는 경향을 확인 할 수 있다. 특히 Terzaghi(1946)가 제안한 심하게 파쇄된(very blocky and shattered) 암반에서의 이완하중고(overburden load height, H_p)인 $H_{pmax} = 0.6 \cdot (B + H_0) = 14.22m (H_L/H_0 = 1.4)$ 보다 상당히 크게 확장되는 것으로 분석되었다.

5.3.3 라이닝의 역학적 거동

터널 구조체 열화로 인하여 라이닝에 추가로 작용하

는 축응력(axial stress)의 경시변화는 Fig. 19와 같다. 공용 후 30년 경과 시 천단부 및 측벽부(Spring Line, SL)에서 3.55MPa 및 3.10MPa, 또한 50년 후 3.66MPa 및 3.20MPa의 축 응력의 증가가 발생하는 것으로 분석되었다. 따라서 터널 구조체의 열화에 따른 이완하중의 증가로 인하여 터널 라이닝에 추가 하중이 작용하게 되고, 이로 인해 라이닝에 균열이 발생할 수 있으며 심할 경우 파괴에 이르게 될 가능성을 확인하였다.

5.3 정량적 예측기법의 제안

본 연구에서는 수치해석 과정에서 열화와 관련된 영향인자에 대한 매개(입력)변수로서 터널 주변 지반의 탄성 계수(E) 및 강도 정수(c, ϕ), shotcrete 및 2차 라이닝의 탄성계수(E)로 하였으며 경시변화의 오차 범위가 커서 평균값을 적용하였다. 특히 지반에 대한 시간 의존성 입력 변수는 기존 자료를 근거로 하여 지하수에 취약한 shale 등의 퇴적암을 대상으로 결정하였다.

일반적으로 해저 터널의 해수 침투, 그라우팅으로 보강된 지반이나 shale 혹은 gypsiferous materials 등과 같은 퇴적암(sedimentary rocks)은 물에 취약하여 leaching이나 화학적 작용에 민감하다 할 수 있다. 그러나 터널의 주변

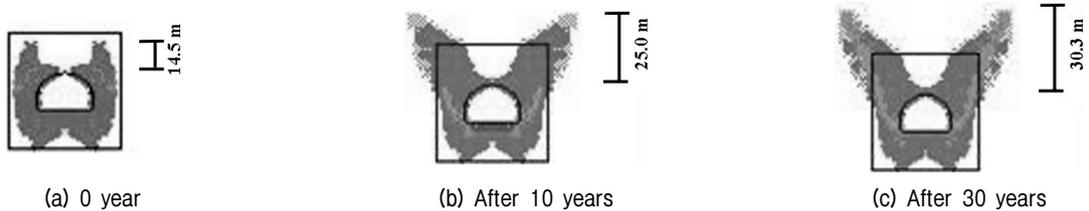


Fig. 17. Distribution of plastic zones around tunnel

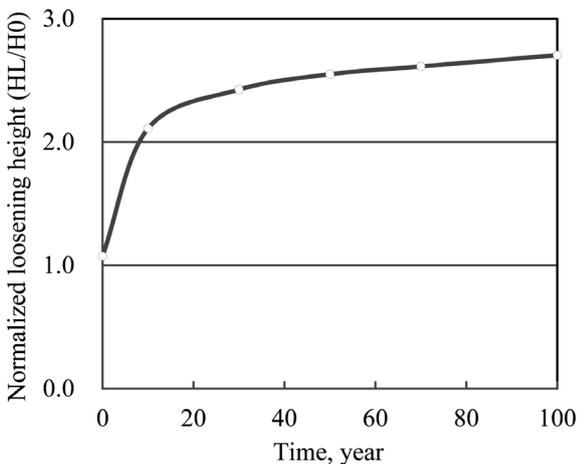


Fig. 18. Result of analysis for the loosening height with time due to deterioration

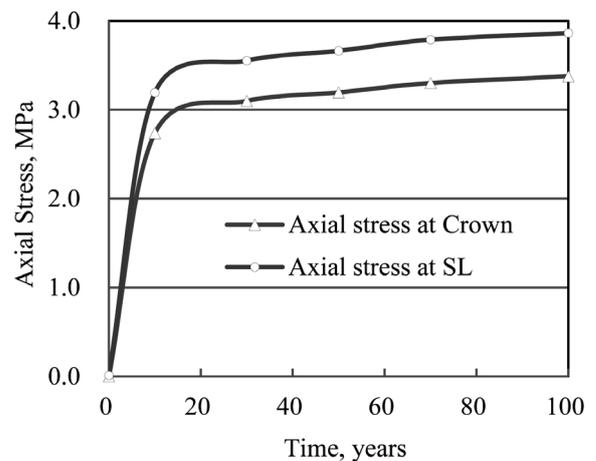


Fig. 19. Axial stresses on lining with time due to deterioration

지반의 조건 및 지하수의 물리·화학적 특성 등은 지역적으로 각각 상이하므로 특성을 표준화하여 구분 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 각각의 터널마다 정기적인 정밀조사가 필연적이며 터널 주변지반에 대하여 지상 또는 방수막이 파손된 지역인 경우 터널 내에서 공내 전단강도 시험이나, 시추조사를 통한 시료 및 지하수를 채취하여 장기적인 지반의 강도 저하 특성 및 지하수의 화학적 특성을 파악함으로써 정량적인 해석이 가능 할 것으로 판단된다. 이러한 영향인자에 대한 입력변수를 본 연구와 같은 해석 기법으로 FEM이나 FDM해석 프로그램의 입력치로 하여 터널의 장기적인 터널 주변지반 및 라이닝의 안정성에 대한 해석이 가능 할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 터널의 열화의 특성과 이와 관련된 영향인자를 도출하여 입력 변수를 결정하고 수도권 고속철도 터널 대표단면(PD-5)의 풍화암 지반에 국한하여 수치해석을 실시하고 열화에 따른 터널의 역학적인 거동에 대한 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다. 단, 지반에 대한 시간 의존성 입력 변수는 기존 자료를 근거로 하여 지하수에 취약한 shale 등의 퇴적암을 대상으로 결정하였다.

- (1) 열화로 인한 터널의 거동 특성은 개통 이후 운영 초기에 급격히 증가하여 약 30년 경과 후에 공사기간 동안 발생하는 총 변위량 보다 천단침하는 4.4mm (7% 증가) 및 지표침하량은 3.8mm(30% 증가)가 추가 발생하였으며 이후 점차 수렴되는 경향을 보였다. 또한 2차 라이닝의 내공 변위(Spring line)는 운영 초기에 급격히 증가하여 약 30년 경과 후 9.0mm (20%) 정도 추가 변위가 발생하는 것으로 분석되었다. 특히 주변지반의 소성영역에 대한 분석에 있어 열화가 진행됨에 따라 전단대가 지상을 향하여 발달하고 소성 영역이 확대되는 경향을 나타내었다.
- (2) 열화로 인하여 이완 하중고(H_L)는 공사 완료 후 터널 고(H_0)의 1.08배에서 50년 경과 후에 2.55배로 주변지반의 이완 영역이 확장되어 터널 라이닝에 추가 하중이 작용하게 되는 경향을 확인 할 수 있었다. 특히 Terzaghi(1946)가 제안한 이완 하중고($H_L/H_0=1.4$)보다 크게 확장되는 것으로 분석되었다. 이에 따라 공용 후 50년 경과 시 천단부 및 측벽부(Spring Line, SL)

- 에서 3.66MPa 및 3.20MPa의 축 응력의 증가가 발생하며. 이로 인해 라이닝에 균열이 발생할 수 있으며 심할 경우 파괴에 이르게 될 가능성을 확인하였다.
- (3) 열화 따른 터널의 안정성과 관련하여 다양한 지반(해저 터널의 해수 침투, 그라우팅 보강 지반, shale 혹은 gypsiferous materials 등과 같은 퇴적암(sedimentary rocks)등)에 대하여 열화에 따른 터널 구조체의 장기적인 특성 변화에 대한 예측기법을 제안하였으며, 터널의 장기적인 터널 주변지반 및 라이닝의 안정성에 대한 해석이 가능 할 것으로 판단되었다.
 - (4) 향후 터널 구조체의 열화에 따른 터널의 거동과 관련하여 외국 추세에 맞추어 터널 운영 중에도 장기적인 계측관리와 병행하여 다양한 지반에 대한 지속적인 조사 및 실험을 통하여 좀 더 정밀한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2011-0030040).

참고문헌 (References)

1. Akutagawa, S., Kitani, T., Abe, Y. and Sakurai, S. (1998), "A consideration on tunnel pressure derived from the Terzaghi's formula based on an equilibrium assumption in a limit state", *Proceedings of Tunnel Engineering*, JSCE, pp.95-100 (in Japanese).
2. Barla, G. (2000), "Analysis and design methods of tunnels in squeezing rock conditions", *Rivista Italiana Di Geotecnica*, 1/2000, pp.22-29.
3. Boidy, E., Bouvarda, A. and Pelletb, F. (2002), "Back analysis of time-dependent behaviour of a test gallery in claystone." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.17, Issue 4, October 2002, pp.415-424.
4. BTS/ICE (2004), "Tunnel lining design guide." *The British Tunnelling Society and The Institution of Civil Engineers*, Thomas Telford Ltd., London.
5. Carde, C. and Francois, R. (1997), "Effect of the leaching of calcium hydroxide from cement paste on mechanical and physical properties." *Cement Concrete Research*, 27(4) pp.539-550.
6. CETu (2004), "Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers." *Des désordre vers le diagnostic*, Centre d'Études des Tunnels, France.
7. CETu (2011), "Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers." *Du désordre à l'analyse, de l'analyse à la cotatio*, mai 2011, Centre d'Études des Tunnels, France.
8. Choo, J.H., Park, S.W., Kim, H.T., Jee, K.H. nad Yoon, T.G. (2011), "Analysis and cause of occurrence of lining cracks on NATM tunnel based on the precise inspection for safety and

- diagnosis - Part I", *Korean Tunelling and Underground Space Association*, Vol.13, No.3, May 2011, pp.199-214.
9. CHSRA (2010), "TECHNICAL MEMORANDUM, High-Speed Train Tunnel TM 2.4.5." *California High-Speed Train Project*, California High-Speed Rail Authority.
 10. Constantinescu, M. and Cristescu, N. (1983), "Creep of rock-like materials." *International Journal of Engineering Science*, Vol.21, Issue 1, 1983. pp.45-49.
 11. DAUB (2001), "Concrete Linings for Tunnel built by underground Construction." *Recommendations by DAUB*, Tunnel 5/2001, pp.50-66.
 12. Deutsche Bahn AG (2007), "Richtlinie 853: Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten." Frankfurt am Main.
 13. FHWA (2009), "Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels — Civil Elements." *Federal Highway Administration*, FHWA-NHI-10-034, Washington, D.C.
 14. Grobbelaar, C. (1994), "The degradation and failure of concrete linings around water conveyance tunnels" *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.9(1), pp.67-71.
 15. Guan, Z., Jiang, Y. and Tanabashi, Y. (2008), "Rheological parameter estimation for the prediction of long-term deformations in conventional tunnelling." *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.24(3), pp.250-259.
 16. Hagelia, P. (2011), "Deterioration Mechanisms and Durability of Sprayed Concrete for Rock Support in Tunnels." PhD Thesis, Delft University of Technology.
 17. Jiang, Y., Fujisaki, M., Kawata, M. and Tanabashi, Y. (2005), "Deformation Prediction and Effect of Reinforcement Method by Considering Time Dependency of Rock Strength." *NAOSITE*, Nagasaki University's Academic Output SITE, Vol.35(65), pp.95-100 (in Japanese).
 18. Jiang, Y., Tanabashi, Y. and Kawata, A. (2007), "Simulation Models for Tunnel Convergence Prediction and Appraisalment of Different Reinforcement Methods." *NAOSITE*, Nagasaki University's Academic Output SITE, Vol.37(68), pp.73-82 (in Japanese).
 19. Jung, H.S., Kim, D.K., Lee, G.P. Lee S.T. and Kim, S.S. (2007), "Deterioration Assessment and Case Study of Deteriorated ASSM Support in Tunnel." *Korea Concrete Institute*, 2007 Spring Seminar, pp.743-746.(in Korean)
 20. Kawata, A., Jiang, Y. and Tanabashi, Y. (2005), "Deformation Prediction and Effect of Reinforcing Method by Considering Strength Deterioration of Rocks." *Journal of tunnel engineering*, JSCE 15, pp.31-38 (in Japanese).
 21. KICT (2012), "A Study on the Optimized Design of Railroad Tunnel Lining." *Final Joint Research Report*, KICT/Yonsei University. 2012. 02.
 22. KISTEC (1997), "Evaluation of the cause of longitudinal cracks and the method of repairments and reinforcements for NATM tunnel," *Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation*, Research Report (in Korean).
 23. KISTEC (2003), "A study on the measurements of in-situ stresses for tunnels in Service," *Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation*, Research Report (in Korean).
 24. Ladanyi, B. (1974), "Use of the long-term strength concept in the determination of ground pressure on tunnel linings." *Proceedings of the 3rd international congress on rock mechanics*, National Academy of Sciences, Denver, pp.1150-1156.
 25. Ladanyi, B. (1980), "Direct determination of ground pressure on tunnel lining in a non-linear viscoelastic rock." *Proceedings of the 13th Canadian rock mechanics symposium*, CIM, Montreal, pp.126-132.
 26. Lenz, F., Marcher, T. and Neumayr, T. (2010), "A9 Bosruck Tunnel-design approaches for swelling rock." *Geomechanics and Tunnelling*, Vol.3, Issue 5, pp.597-608.
 27. Mainguy, M. and Coussy, O. (2000), "Propagation Fronts during Calcium Leaching and Chloride Penetration." *J. Eng. Mech.*, Vol. 126(3), pp.250-257.
 28. Marcher, T. (2011), "Tunnel Design and Construction Practice: Technical Solutions in Swelling Ground" *Workshop UPC: Tunnelling through Saline and Swelling Ground*, iLF Cosulting Engineers.
 29. Matsunaga, T. (2008), "Study on Prediction of Tunnel Deformation and Rationalization of Measures", PhD These, Kyoto University (in Japanese).
 30. Nakagawa, M., Jiang, Y., Sato, M. and Tanabashi, Y. (2004), "Deformation Simulation of Tunnel by Considering Time Dependency of Rock Strength." *Soil mechanics and foundation engineering*, JGS, 52(6), A6, pp.28-30 (in Japanese).
 31. Nguyen, V. H. (2005), "Couplage dégradation chimique-comportement en compression du béton." PhD These, Ecole des Paris Tech.
 32. Osgoui, R.R. (2006), "On the Assessment of the Effect of the Anisotropy in in-situ Stress on Support Pressure in Tunnels." *Proc. Int. Symp. In-Situ Rock Stress*, ISRM, Trondheim, Norway, pp. 307-317.
 33. Phienweij, N., Thakur, P.K. and Cording, E.J. (2007), "Time-Dependent Response of Tunnels Considering Creep Effect." *Int. J. Geomech.*, 7(4), pp.296-306.
 34. Sandrone, F. and Labiouse, V. (2010), "Analysis of the evolution of road tunnels equilibrium conditions with a convergence-confinement approach." *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.43, Issue 2, pp.201-218.
 35. Sato, M. and Kamemura, K. (1984), "A Study on Time Dependency of Rock Strength." *Japanese Geotechnical Society*, Vol.19, pp. 783-784 (in Japanese).
 36. Seo, K.C. (2002), "Present condition of crack and analysis of concrete lining of tunnels," *J. of the Korea institute for structural maintenance inspection*, v.6 no.3, pp.22-29.
 37. Terzaghi, K. (1946), "Rock Defects and Loads on Tunnel Supports: In Rock Tunneling with Steel Supports by Proctor, R. V. and White, T. L." Commercial Shearing Co., Ohio, pp.17-99.
 38. Usman, M., Volderauer, C., Gschwandtner, G. and Galler, R. (2011), "Three Dimensional Load Analysis of Tunnel Linings Including Weathering Processes of the Shotcrete." *BHM*, December 2011, Vol.156(12), pp.487-491.
 39. Yashiro, K., Shimamoto, K., Kojima, Y., Takahashi, M., Matsunaga, T. and Asakura, T. (2009), "A study on simulation analyses of deformed tunnels due to earth pressure by ground strength reduction model and it's applicability to long term prediction." *Journal of JSCE*, Divi. C, Vol.65, No.2, pp.467-479 (in Japanese).
 40. Yokozeki, K., Watanabe, K., Sakata, N. and Otsuki, N. (2004), "Modeling of leaching from cementitious materials used in underground environment." *Applied Clay Science*, Volu. 26, Issues 1-4, August 2004, pp.293-308.

Received : September 11th, 2013

Revised : October 31st, 2013

Accepted : April 10th, 2014