

이완하중을 받는 터널라이닝의 거동분석

Analysis of Tunnel Lining Behavior under Tunnel Load

박 정 진 ¹	Park, Jung-Jin
김 도 현 ²	Kim, Do-Hyun
정 상 섭 ³	Jeong, Sang-Seom

Abstract

In this study, the tunnel loads acting on the concrete lining are analyzed by comparing three methods - Terzaghi table, Terzaghi formula and Ground-Lining Interaction (G.L.I) model. The tunnel loads are analyzed by FLAC 2D. And the G.L.I model is analyzed under various rock mass ratings, tunnel depths (20~80m) and in-situ stress ratios ($K_0=0.5\sim 2.0$). Terzaghi's method can be applied only to weathered rocks and soils, and cannot reflect the effect of various tunnel depths and in-situ stress ratio. The proposed G.L.I model can not only be applied to various ground conditions, but also relieves the tunnel loads by up to 30%.

요 지

본 연구에서는 Terzaghi 수정표, Terzaghi 이론식과 본 논문에서 제안하고자 하는 지반-라이닝 상호 작용(Ground-lining Interaction) 모델을 적용하여 다양한 암반등급, 토피고 및 측압계수(K_0)의 변화에 따라 콘크리트 라이닝에 작용하는 이완하중의 영향을 비교분석 하였다. 본 연구 결과, Terzaghi 수정표는 토피고와 측압계수의 영향을 반영할 수 없었으며 Terzaghi 이론식은 토피고와 측압계수의 영향은 적으며 연암 및 토사지반에서만 적용이 가능하였다. 지반-라이닝 상호작용(G.L.I) 모델은 다양한 암반등급에서 적용 가능할 수 있었으며 토피고와 측압계수의 영향까지도 고려할 수 있었다. 특히, G.L.I 모델은 Terzaghi 방법에 비해 풍화토 지반에서 최대 약 30% 정도의 이완하중 감소효과가 있었으며, 특히 40m이하 저토피와 측압계수 1.0이상일 경우 효과가 높았다.

Keywords : NATM, Concrete lining, Tunnel loads, Terzaghi tunnel theory, Ground-Lining Interaction model.

1. 서 론

NATM 터널에서 콘크리트 라이닝에 작용하는 하중의 산정은 터널 라이닝 설계의 주요한 요소 중의 하나이다. 일반적으로 콘크리트 라이닝 설계개념은 역학적 기능을 부가시키는 개념과 역학적 기능을 부가시키지 않

는 개념으로 분류되며, 국내에서는 터널완공 후 락볼트 및 슛크리트의 알칼리 골재반응 등으로 인한 1차 지보재의 열화 등에 의한 주지보재를 임시구조물로 고려하여 콘크리트 라이닝에 역학적인 기능을 부가하여 설계한다. 그러나 역학적 기능을 부가하여 설계 시 콘크리트 라이닝에 작용하는 외력인 터널이완하중에 대한 규명

1 정회원, (주)다산이엔지 지반설계사업부 대리 (Member, Assistant Manager, Geotechnical Dept., Dasan Engineering Co., Ltd.)
 2 정회원, 연세대학교 토목공학과 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.)
 3 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ., Tel: +82-2-2123-7489, Fax: +82-2-364-5300, soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)
 * 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

이 명확히 이루어지지 않으므로 전 토피 하중이나 재래식 터널공법(ASSM)의 이완하중 산정방법인 Terzaghi의 수정이완하중 등 과도한 이완하중이 적용된다(박정진 등, 2011).

이론적으로 굴착에 의한 지반하중은 이미 1차 지보재가 지지하고 있기 때문에 원칙적으로 2차 라이닝에는 터널이완하중이 작용하지 않는다. 2차 라이닝에 하중이 작용하기 위해서는 지반 또는 1차 지보재의 열화에 의한 평형상태가 교란되어야 한다. 크리프(creep) 거동을 보이는 점성지반을 제외하면, 지반 자체의 열화 가능성은 높지 않으나, 그라우팅과 같은 개량지반에서는 주입재의 장기적 내구성이 취약한 경우가 많기 때문에 열화가 발생할 수 있다. 따라서 2차 라이닝의 합리적인 구조계산을 위해서는 먼저 1차 지보재와 지반의 평형상태를 구현한 후 1차 지보재와 지반과의 열화를 고려할 수 있는 모델이 요구된다.

지반-라이닝 상호작용(Ground-Lining Interaction) 모델에서 2차 라이닝에 작용하는 하중은 기본적으로는 지보재의 지지력 상실에 기인하고 그라우팅 지반의 열화를 추가로 고려할 수 있다. 이러한 하중들은 터널과 지반의 평형상태를 교란시키는 추가하중이 되어 2차 라이닝과 지반은 새로운 평형조건을 찾게 된다. 이때의 2차 라이닝은 터널 지지를 위한 하중을 지반과 분담하고 지반의 추가 변형에 의해 터널의 주변지반은 새로운 응력재분배 상태에 이르게 된다(장석부 등, 2006). 실제로 지반-라이닝 간 인터페이스가 존재하지만, 본 연구에서는 좀 더 안전측인 해석으로 지반-라이닝 간 인터페이스를 고려하지 않았으며, 이때의 하중이 지반-라이닝 간 인터페이스를 고려한 이완하중보다 좀 더 크게 산정되어 보수적인 설계를 유도하였다. 본 논문에서는 다양한 암반등급, 토피고 및 측압계수의 변화에 따라 Terzaghi 수정표, Terzaghi 이론식과 G.L.I 모델을 통하여 터널이완하중을 산정하고 이를 비교 분석하고자 한다.

2. 터널이완하중 산정방법

콘크리트 라이닝은 일반적으로 터널변위가 수렴된 상태에서 타설되기 때문에 원칙적으로는 지반하중이 작용하지 않는다(한국터널공학회, 2009). 하지만 지반이 연약하거나 숏크리트의 부식 발생 등 1차 지보재가 그 능력을 상실할 경우, 변위가 수렴되지 않는 상태에서 라이닝을 타설 할 경우에는 추가로 발생하는 이완하중

을 고려해야 한다. 터널이완하중의 원인으로는 숏크리트나 락볼트와 같은 1차 지보재의 지지력 상실과 터널 주변의 근접 시공에 의한 지반의 2차 변형 등을 들 수 있다(서성호 등, 2002).

터널이완하중을 산정하는 대표적인 방법에는 Terzaghi(1946)의 암반 하중(rock load) 개념을 이용한 방법, Bierbäumer(1913)의 이론식, Barton 등(1974)의 Q-시스템에 의한 방법, Bieniawski(1973)의 RMR을 이용한 방법, Wickham(1974)의 RSR에 의한 방법, 그리고 수치해석에 의한 방법 및 발파손상 영역을 고려한 산정방법 등이 있다(도로설계편람, 2010).

2.1 Terzaghi의 이론식

식 (1)과 같이 제시된 Terzaghi(1946)의 이론식은 Janssen(1895)의 Silo 방정식을 터널의 이완하중 계산에 응용한 것으로서, 비점착성의 건조한 조립토에 Figure 1과 같은 형태의 파괴면에 대해 다음과 같이 제시되었다.

얕은 터널에 대하여 연직암반하중(P_{roof})은 식 (1), 깊은 터널에 대하여 식 (2)와 같다.

$$P_{roof} = \frac{\gamma \times B}{2 \times K \times \tan \phi} \left(1 - e^{-K \frac{2H}{B} \tan \phi} \right) \quad (1)$$

$$P_{roof} = \frac{\gamma \times B}{2 \times K \times \tan \phi} \quad (2)$$

$$B = 2 \left[\frac{b}{2} + m \times \tan \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) \right] \quad (3)$$

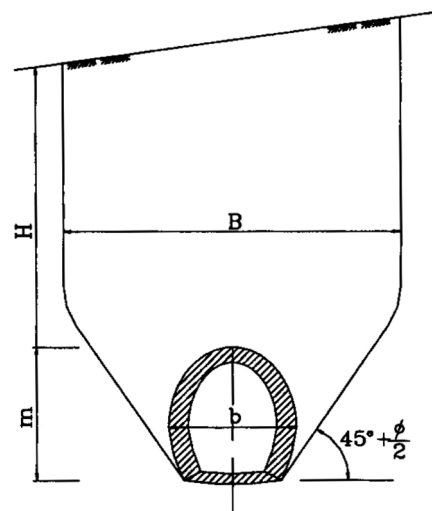


Fig. 1. Terzaghi's tunnel load

여기서, P_{roof} 는 연직이완하중(kN/m^2), γ 는 지반 단위 중량(kN/m^3), B 는 지반 이완범위(m), K 는 측압계수, ϕ 는 지반의 내부마찰각, H 는 토피(m), b 는 터널 폭(m), m 은 터널 높이(m)이다.

그러나 지하철과 같은 천층 터널 및 암질이 양호할 경우에 Terzaghi(1946)의 이론식을 그대로 적용할 경우, 연직이완하중이 크게 걸리는 경우가 발생할 수 있다(한국철도시설공단, 2010). 즉, 식 (1)에 제시된 Terzaghi 이론식은 원래 제시된 식 (4)에서 점착력(C) 부분을 삭제한 특수한 경우에 해당된다.

$$P_{roof} = \frac{\gamma \times B - 2C}{2 \times K \times \tan \phi} \left(1 - e^{-K \frac{2H}{B} \tan \phi} \right) \quad (4)$$

2.2 Terzaghi의 암반하중 분류표

Terzaghi(1946)는 강재지보에 대한 암반하중 산정방법을 제시하였는데 이 방법은 터널굴착 후 지보공을 설치하면 터널 주변지반의 아치작용에 의한 지반의 이완범위가 일정범위까지만 진행된다는 가정에 근거하고 있다. 절리상태 등에 따라 9등급으로 구분하나 너무 개

괄적이어서 암질의 객관적인 평가가 어려운 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해 Deere 등(1970)과 Rose (1982)가 RMR을 이용하여 수정된 Terzaghi 암반분류 제시하였으며 Table 1과 같이 적용하였다.

2.3 지반-라이닝 상호작용(Ground-Lining Interaction) 모델

2.3.1 지보재 및 보강지반 열화에 의한 지반거동

터널 굴착 시 주변 지반의 소성범위는 적절한 지보재 설치 및 지반보강으로 최소화 될 수 있으나, 지보재와 보강지반이 지지력을 상실하는 경우에는 과대변위를 수반하면서 소성범위가 크게 증가할 것으로 예상할 수 있다. Figure 2의 좌측은 매우 불량한 지반조건에서 슛크리트와 락볼트 설치 및 천단부 지반보강이 수반된 터널굴착을 모사한 최종 수치해석 결과로써 측벽부에 약간의 소성범위를 보이고 있다.

이때 지보재와 보강지반의 지지력이 상실된 조건을 가정하여 슛크리트와 락볼트 요소를 제거하고 천단부 보강지반의 물성을 원지반 수준으로 복원하여 수치해석을 수행하였다. 그 결과, Figure 2의 우측에서와 같이 소성범위가 지표까지 확장되며 수치해석적으로 수렴이

Table 1. Tunnel load height

Rock Grade	Rock Type	RMR	Support Pattern	Tunnel Load Height
Grade I	Very Hard Rock	81~100	PD-1	0.25B~0.5B
Grade II	Hard Rock	61~80	PD-2	(0.2~0.3)(B+Ht)
Grade III	Medium Rock	41~60	PD-3	(0.3~0.4)(B+Ht)
Grade IV	Soft Rock	21~40	PD-4	(0.4~0.5)(B+Ht)
Grade V	Very Soft Rock	<20	PD-5	(0.5~0.6)(B+Ht)
Sand	Weathered Rock	-	PD-6	(0.6~0.8)(B+Ht)
	Weathered Soil	-	PD-6-1	(0.8~1.0)(B+Ht)

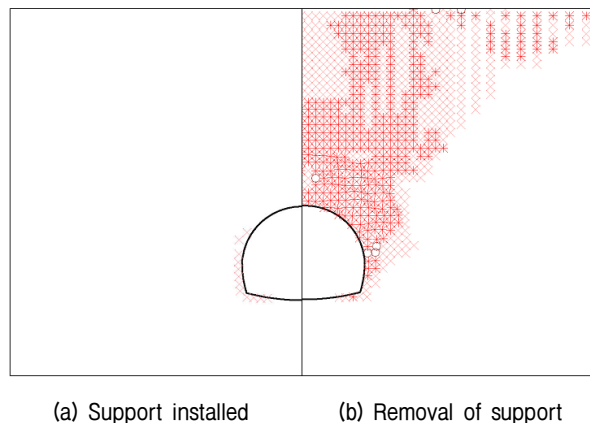


Fig. 2. Plastic region

되지 않는 결과를 나타내었다.(장석부 등, 2006).

이로부터 통상적으로 사용되는 터널 수치해석 기법으로 지보재와 보강지반의 지지력 상실에 의한 지반거동을 모사할 수 있음을 확인할 수 있었다. 이 때, 2차 라이닝이 설치되어 있다면 지반변형은 2차 라이닝에 의하여 억제되기 때문에 지보재와 보강지반이 상실한 지지력은 2차 라이닝에 하중으로 전이된다. 이와 같은 개념은 기존의 연구(서성호 등, 2002; Chang et al., 2003)에서 간단한 질량-스프링의 개념적 모델과 지반반응곡선을 이용하여 설명되었다.

2.3.2 G.L.I 모델의 지반반응곡선

G.L.I 모델의 이론적 특징을 보여주기 위해 원형공동 예제에 대한 Kirsch의 응력해와 변위해 및 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용한 결과 얻어진 지반반응곡선은 Figure 3과 같다. 계산 과정상 1차 라이닝은 굴착과 동시에 설치되고 2차 라이닝은 1차 라이닝과 지반의 평형이 이루어진 후 즉, 공사 중 변위수렴 후에 설치되는 것으로 가정하였다.

무지보 상태에서 지반변위는 초기에 탄성변형을 보이다가 점차 소성이 발생함에 따라 큰 변위가 발생하며 최종적으로는 수렴상태에 이른다. 반면에 굴착과 동시에 1차 지보재가 설치되면, 지반의 응력에 대한 지반변위에

의해 선형비례로 발생하는 수동지보압(passive support pressure)이 일치하는 지점에서 변위가 수렴하여 1차 평형상태에 이른다. 이 때, 추가로 2차 라이닝이 타설되어도 지반하중은 작용하지 않는다. 그러나, 1차 지보재가 열화되어 지지력이 상실되면, 1차 평형 상태가 교란되어 지반변위가 추가로 발생하여 수동지보재인 2차 라이닝에 하중이 작용하게 된다.

지반의 추가변위는 2차 라이닝의 지지력과 지반하중이 새로운 평형상태에 도달할 때까지 발생하게 된다. 2차 평형위치에서 2차 라이닝에 작용하는 하중은 1차 라이닝의 하중보다 작으며 이는 지반의 2차 변위로 인하여 지반하중이 일부 소산되었기 때문이다. 이러한 지반반응곡선은 수치 해석 기법으로도 모사될 수 있으며, 이론해와의 비교검증은 서성호 등(2002)에 의해 Figure 3과 같이 이루어졌다.

3. 지반-라이닝 상호작용을 이용한 수치해석

3.1 해석 조건

상용프로그램인 FLAC에 의한 2차원 유한차분해석에 의해 G.L.I. 모델을 적용하였다. 본 유한차분해석에서는 지반을 탄소성(Mohr-Coulomb)모델로, 그리고 지보재를

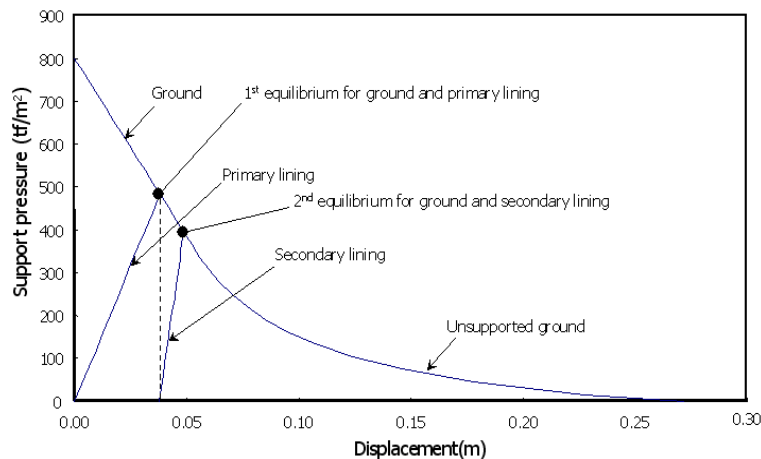


Fig. 3. Reaction curve between ground - 1st & 2nd support members (Seo et al., 2002)

Table 2. Support properties

Material	Area, A (m ²)	Modulus, E (kPa)	Yielding Strength (kN)	Stiffness (kN/m ²)	Strength (kN/m)
Soft Shotcrete	0.05~0.2	5,000	-	-	-
Hard Shotcrete	0.05~0.2	15,000	-	-	-
Rockbolt	5.07×10^{-4}	2.1×10^{-5}	177	800	1.5×10^{-7}

탄성(Linear-Elastic)모델로 적용하였다. 라이닝은 빔(beam) 요소, 락볼트는 케이블(cable) 요소를 적용하였으며, 사용된 재료정수는 Table 2와 같다.

지반물성은 그간 국내 터널공사시 조사된 자료를 분석하여 가장 일반적인 암반 물성치를 선정하였으며, 이를 바탕으로 1등급 암반부터 풍화토까지 Table 3과 같이 분류하였으며 각각 단일 지반으로 해석을 수행하였다. 단면은 수도권 고속철도 단면(폭 13.54m, 높이 10.16m)을 적용하였으며 토피고는 20~80m, 축압계수(K_0)는 0.5~2.0 사이의 변화를 주었다.

경계조건은 Figure 4와 같이 메쉬(mesh)의 좌우는 X방향, 하부는 Y방향 구속을 하였고 터널의 좌우 폭은 터널 폭(B)의 4.5B만큼 상하 폭은 상부는 터널 높이(H)의 4H, 하부는 3.6H를 두었으며 총 절점수는 6,825개이다. 지반과 터널 부근에는 두 재료간의 큰 강성 차이 및 터널이완하중으로 인한 소성 변형이 예상되므로 조밀한 메쉬를 사용하였고, 터널로부터 거리가 멀어질수록 메쉬의 밀도를 감소시켰다.

지반-라이닝 간 인터페이스는 실제로 존재하지만, 지반-라이닝 간 인터페이스를 고려하지 않고 산정된 이완하중이 실제로 라이닝에 작용하는 이완하중보다 크게

때문에 더 안전측이라 할 수 있기 때문에 그것을 고려하지 않았다.

3.2 해석 과정

지반-라이닝 상호작용으로 인한 터널이완하중 발생을 위하여, 터널 해석기법 중에서 특히 시공단계를 모사하도록 하였으며, 모든 조건을 현장에서 수행하는 NATM 터널 시공절차와 동일하게 하였다. 표준지보패턴은 수도권 고속철도 표준지보 패턴(PD-1~6)을 적용하였으며, 1차 지보재 열화로 인한 과정과 이로 인한 지보재 제거에 중점을 두었다. 해석단계는 Table 4와 같이 총 8단계로 구성되어 있으며, 각 단계는 터널 굴착으로 인한 하중분담율과 지반 안정화를 위하여 충분히 세부적인 단계로 나누었다.

터널구조물을 터널 단면방향과 진행방향으로 3차원적인 구조임을 감안한다면 설계와 안정성 검토에는 3차원 해석에 의한 실제 현장상황의 재현이 필요하다. 그러나 국내의 NATM 터널설계의 경우, 3차원 해석은 시간적, 경제적인 문제로 실무 적용에 제약을 받게 되므로 2차원 해석에 의한 검토를 실시하고 있는 실정이다(김

Table 3. Soil properties

Rock Grade	RMR	Unit Weight, γ (kN/m ³)	Cohesion, c' (kPa)	Poisson's Ratio ν	Friction Angle, ϕ (°)	Modulus, E (MPa)
Grade I	81~100	27	4,000~5,000	0.20	45	20,000~30,000
Grade II	61~80	26	2,000~3,000	0.22	40	10,000~15,000
Grade III	41~60	25	1,000~1,500	0.24	35	6,000~8,000
Grade IV	21~40	23	400~700	0.26	32	2,000~4,000
Grade V	<20	22	100~200	0.28	30	600~800
Weathered Rock	-	21	50~90	0.30	32	200~400
Weathered Soil	-	20	30~40	0.32	30	40~100

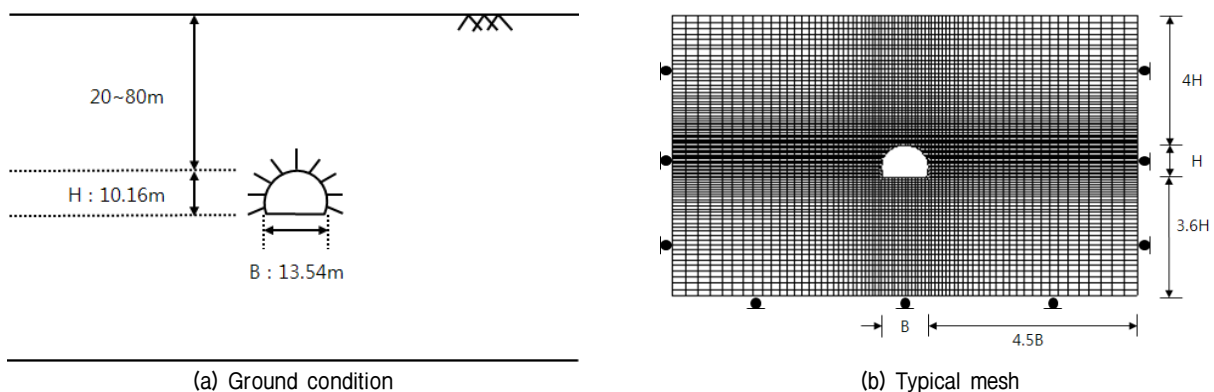


Fig. 4. Ground conditions and typical mesh

동욱 등, 2003).

하중분담율(0-0-100)을 고려한 이유는 굴착과 soft shotcrete 단계 시 지반의 변위를 허용하지 않고 모든 하중을 지반이 버티다가, hard shotcrete 단계 시 발생하는 하중을 지반에서 모두 라이닝에 작용시켜 결국 라이닝에 발생하는 하중을 최대로 발생시키기 위한 방법이다. 이는 지반반응곡선 상에서 초기 지보로 인한 하중이 최대로 발생하는 지점이다. 따라서, Figure 5에서 하중분담율(0-0-100)은 다른 하중분담율을 적용한 경우보다 이완하중이 최대로 산정되었다.

4. 지반조건에 따른 터널이완하중 산정

본 장에서는 암반등급, 토피고 및 측압계수의 영향에 의한 터널이완하중을 비교분석 하였다. 산정방법은 각각 Terzaghi의 수정표, Terzaghi의 이론식과 지반-라이닝 상호작용(G.L.I) 모델을 이용하여 산정하였으며, 특히

G.L.I 모델에서 산정된 값들은 Figure 6과 같이 17~29번 노드 사이의 터널 천단부 값들을 평균하여 산정하였다.

4.1 암반등급에 따른 이완하중

본 절에서는 다양한 암반등급에 따라 토피고는 40m, 측압계수(K_0)는 1.0으로 고정된 조건에서 터널이완하중 및 이완하중고를 비교분석하여 Table 5와 같은 결과를 얻었다. 여기서, 이완하중고는 산정된 터널이완하중에서 지반의 단위중량을 나누어 역산하였다.

Figure 7(a)에서 Terzaghi 수정표는 전 암반등급에서 일정하게 증가하는 경향을 나타내었으며, Terzaghi 이론식은 점착력(C)의 영향으로 인하여 5등급이하 연암과 토사지반에서만 적용할 수 있음을 알 수 있었다. 반면, 지반-라이닝 상호작용(G.L.I) 모델은 1~3등급 암반에서 이완하중이 작게 산정되다가 4등급 암반에서부터 급격히 증가함을 알 수 있었다.

Table 4. Analysis procedure

Analysis Procedure	Contents	Load Distribution Ratio(%)
Stage 1	Initial Stage	-
Stage 2	Upper Excavation Stage	0
Stage 3	Upper Soft Shotcrete Stage	0
Stage 4	Upper Hard Shotcrete Stage	100
Stage 5	Lower Excavation Stage	0
Stage 6	Lower Soft Shotcrete Stage	0
Stage 7	Lower Hard Shotcrete Stage	100
Stage 8	Removal of Support	0

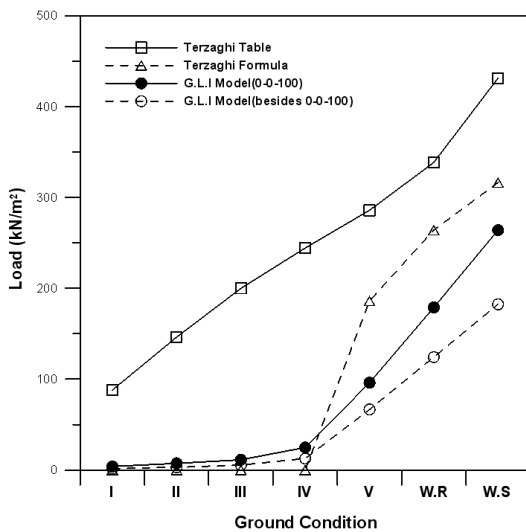


Fig. 5. Comparison of tunnel load by load distribution ratio

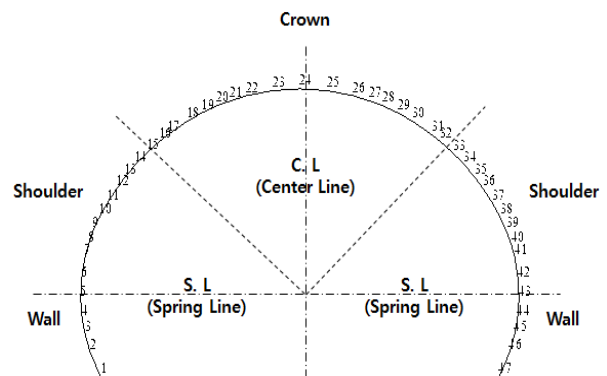


Fig. 6. Location of nodes in tunnel

Figure 7(b)에서 G.L.I 모델인 경우, 1~3등급에서의 이완하중고는 0.5m 이하로 산정되어 발파로 인한 손상영역과 거의 유사함을 알 수 있었다. 임수빈(1996)은 제어 발파를 실시하는 경우 발파공으로부터 약 0.5m 떨어진 곳까지 동적손상을 받는 것으로 확인하였으며, 이인모 등(2000)은 발파로 인한 이완영역을 2차원 수치해석을 실시한 결과 그 크기가 대략 천단부에서 약 0.5m 정도였다.

4.2 토피고에 따른 이완하중

터널은 다양한 암반조건에서 뿐만 아니라, 설계요건에 따라 다양한 심도에서도 굴착이 된다. 본 절에서는 도심지 같이 토피가 얇은 심도(20m)부터 산악구간 같이 토피가 깊은 심도(80m)까지 다양한 토피고의 변화에 따라 이완하중을 비교분석하였다.

Figure 8에서 Terzaghi 수정표는 토피고가 증가함에 따라 이완하중의 변화가 없었다. 반면, Terzaghi 이론식과 G.L.I 모델은 토피고가 증가함에 따라 이완하중이 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 특히 Figure 8(a)에서 토피고가 낮을 시 G.L.I 모델은 Terzaghi 이론식에 비해 비교적 낮은 이완하중이 산정되었지만, Figure 8(d)와 같이 토피고가 점점 증가할수록 연암 및 토사지반에서 Terzaghi 방법들과 G.L.I 모델의 결과는 거의 유사함을 알 수 있었다.

Figure 9에서 Terzaghi 방법과 G.L.I 모델을 각각 도시에 본 결과, Terzaghi 이론식과 G.L.I 모델의 결과는 암반이 불량하고 토피고가 증가할수록 Terzaghi 수정표의 결과와 거의 유사하였으며, 특히 모든 암반등급과 토피고 조건에 대해 G.L.I 모델에 의해서 이완하중의 산정이 가능함을 파악할 수 있었다.

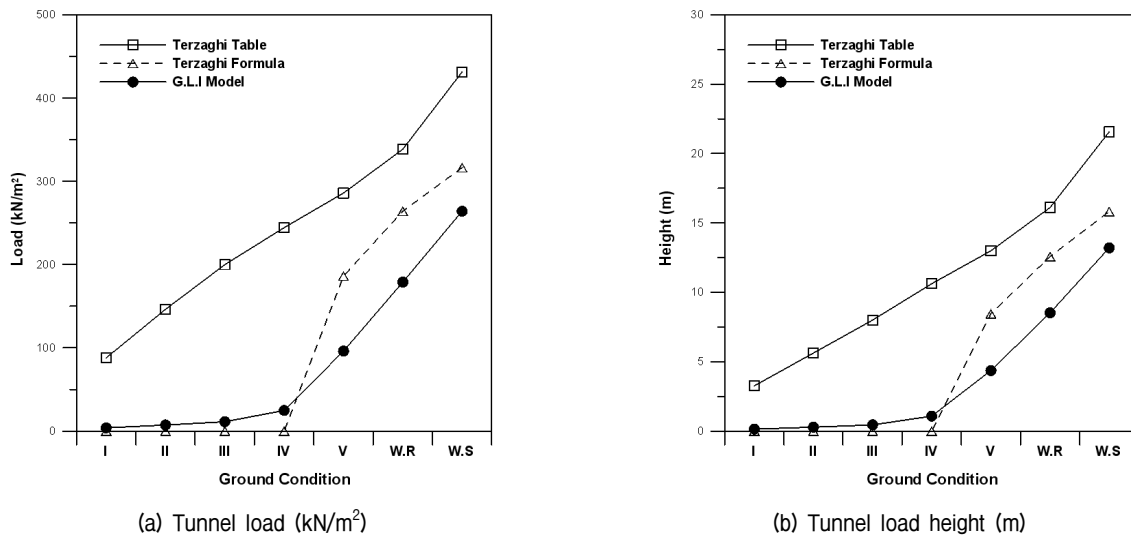
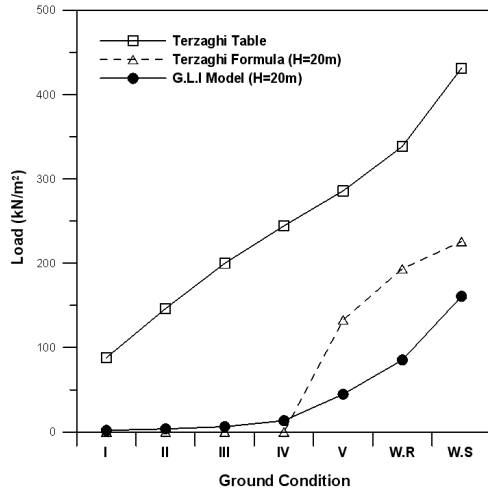


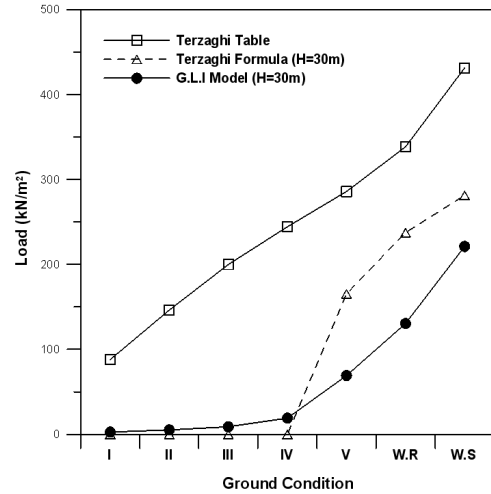
Fig. 7. Comparison of tunnel loads by rock mass ratings

Table 5. Estimation of tunnel load by rock mass grade

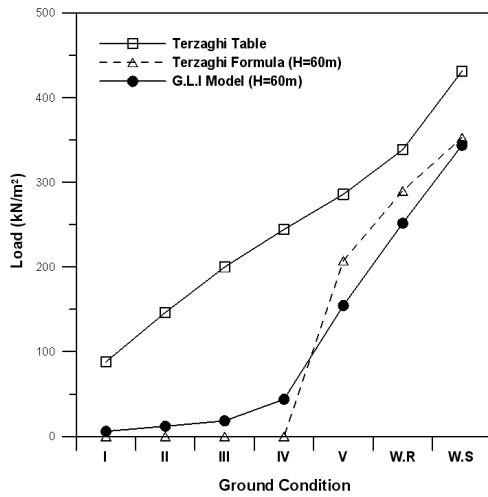
Rock Grade	RMR	Support Pattern	Tunnel Load, P_{roof} (kN/m ³)			Tunnel Load Height, H_p (m)		
			Terzaghi Table	Terzaghi Formula	G.L.I Model	Terzaghi Table	Terzaghi Formula	G.L.I Model
Grade I	81~100	PD-1	87.99	-	3.91	3.26	-	0.14
Grade II	61~80	PD-2	146.36	-	7.36	5.63	-	0.28
Grade III	41~60	PD-3	199.99	-	11.26	8.00	-	0.45
Grade IV	21~40	PD-4	244.41	-	24.83	10.63	-	1.08
Grade V	<20	PD-5	285.93	186.07	96.03	13.00	0.33	4.36
Weathered Rock	-	PD-6	338.46	264.17	178.95	16.12	0.47	8.52
Weathered Soil	-	PD-6-1	417.16	301.95	264.11	20.86	0.58	13.21



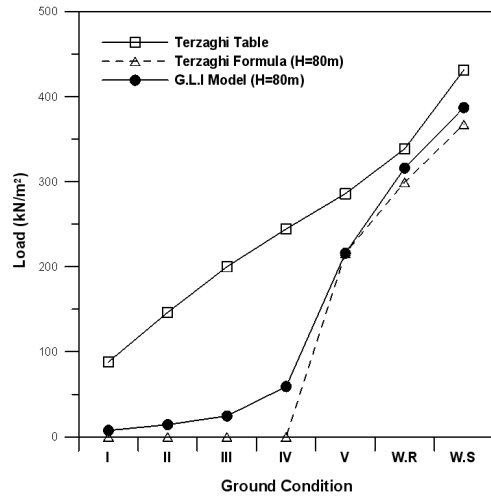
(a) H=20m



(b) H=30m

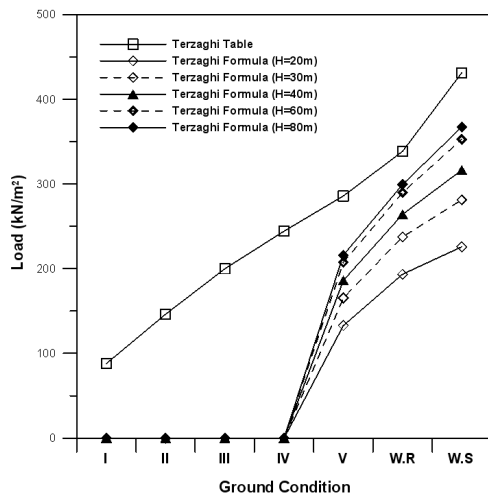


(c) H=60m

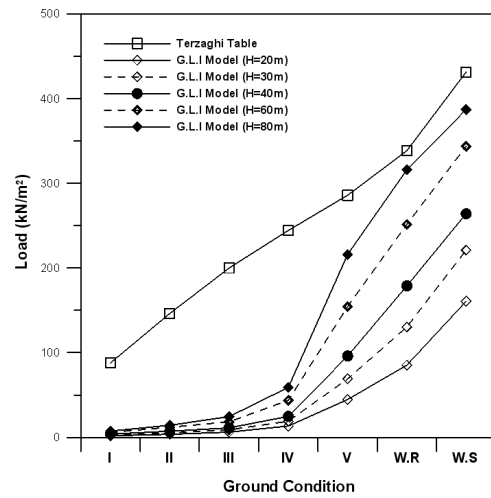


(d) H=80m

Fig. 8. Comparison of tunnel loads by tunnel depth



(a) Terzaghi's method



(b) G.L.I model

Fig. 9. Comparison of tunnel loads by analysis methods and tunnel depth

4.3 측압계수에 따른 이완하중

암반의 측압계수는 국내 측정치에 의하면 0.5~4.0의 범위에 있으며 이는 현장시험 위치에 따라 절리 및 강도 특성의 영향을 민감하게 받는다. 특히, 터널과 같이 연장이 긴 경우 각 갱구부의 현장여건이 다양하게 변화된다. 따라서, 본 절에서는 토피고 40m에서 측압계수 ($K_0=0.5\sim 2.0$)의 변화에 따라 다양한 암반조건에서 비교분석하였다.

Figure 10에서 측압계수가 0.5일 때, 즉 연직응력이 수평응력보다 2배로 클 경우 터널이완하중은 연암 및

토사 지반에서 Terzaghi 방법과 G.L.I 모델이 거의 일치하는 경향을 나타내었다. 그러나 측압계수 2.0일 때, 즉 연직응력이 수평응력의 1/2로 감소할 경우 Terzaghi 이론식과 G.L.I 모델에서의 이완하중은 급격히 감소하는 경향을 나타내었다.

Figure 11에서 각각의 방법별로 도식해 본 결과, Terzaghi 수정표는 측압계수의 영향을 고려할 수가 없었으며, Terzaghi 이론식은 연암 및 토사지반의 경우에만 적용 가능하였다. G.L.I 모델은 모든 암반등급에서 적용이 가능할 뿐만 아니라 측압계수가 감소할 경우 Terzaghi 수정표와 거의 일치함을 알 수 있었다.

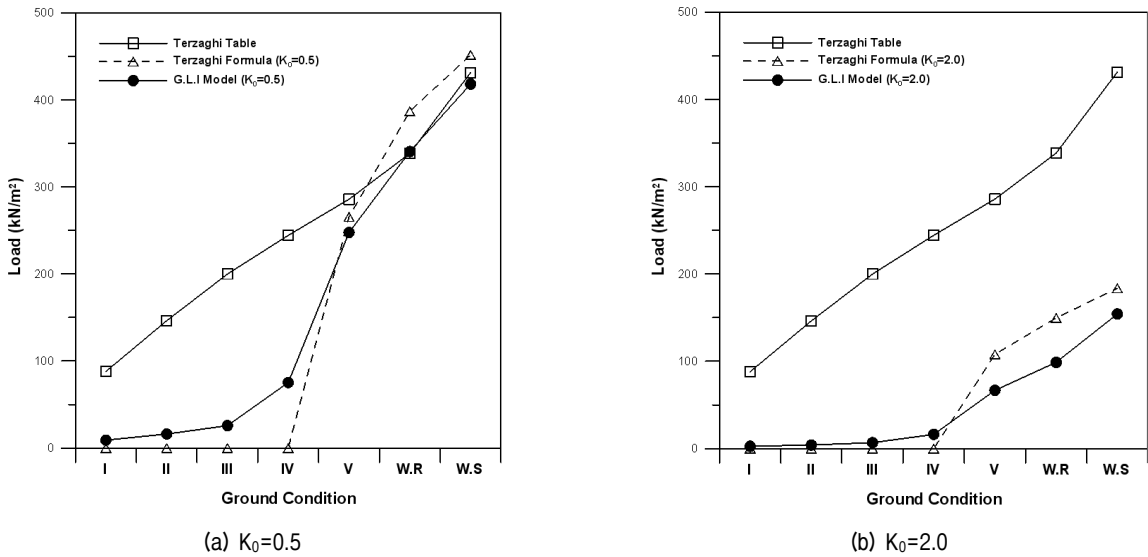


Fig. 10. Comparison of tunnel loads by in-situ stress ratio

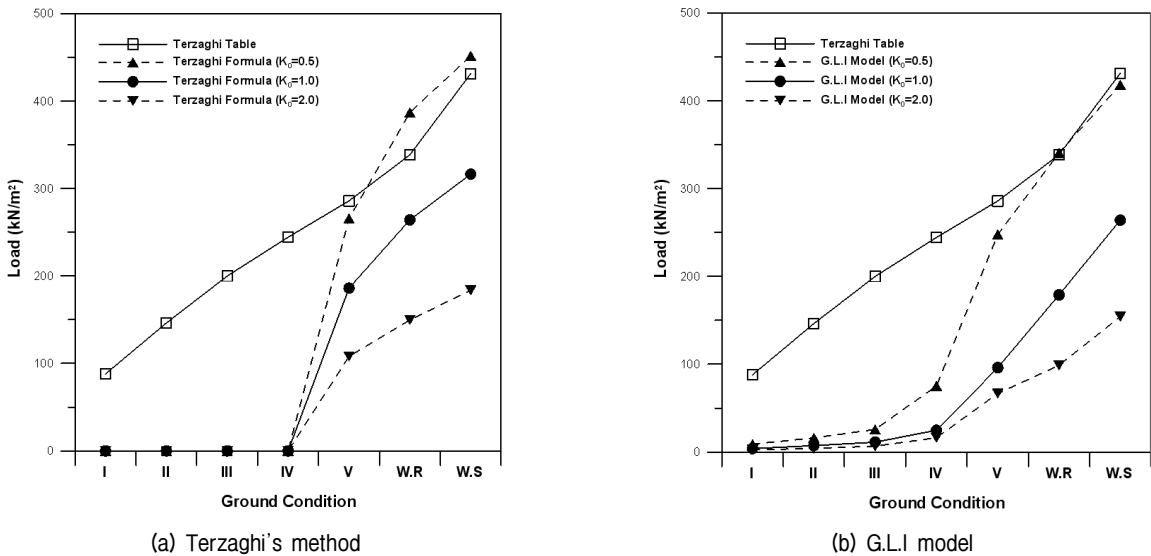


Fig. 11. Comparison of tunnel loads by analysis methods and in-situ stress ratio

5. 결 론

본 연구에서는 Terzaghi 수정표, Terzaghi 이론식과 지반-라이닝 상호작용(Ground-Lining Interaction) 모델을 적용하여 암반등급(1~5등급, 풍화암, 풍화토), 토피고(20~80m) 및 측압계수($K_0=0.5\sim 2.0$)의 영향에 따른 터널이완 하중을 비교분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) Terzaghi 수정표는 경암 및 보통암에서 이완하중을 다소 과대평가하는 경향이 있으며, Terzaghi 이론식은 연암 및 토사지반에서만 적용할 수 있었다. 지반-라이닝 상호작용(G.L.I) 모델은 다양한 암반등급에서 적용가능하며 연암 및 풍화토 지반에서 천장부 기준 최대 약 30% 정도의 이완하중 감소효과가 있음을 알 수 있었다.
- (2) Terzaghi 수정표는 토피고의 변화에 따른 이완하중 영향을 고려할 수 없었으며, Terzaghi 이론식과 G.L.I 모델은 토피고가 증가할수록 연암 및 토사지반에서 Terzaghi 수정표의 결과와 거의 유사하였다. 따라서, 40m이하의 얇은 심도에서 G.L.I 모델 적용 시 보다 효과적인 이완하중이 산정됨을 알 수 있었다.
- (3) Terzaghi 수정표는 측압계수의 영향을 고려할 수 없었으며 Terzaghi 이론식과 G.L.I 모델은 측압계수가 0.5일 경우 연암 및 토사지반에서 Terzaghi 수정표의 결과와 유사하였다. 즉, 측압계수 1.0 이상일 경우 G.L.I 모델 적용 시 보다 효과적인 이완하중을 산정할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국철도시설공단의 재원으로 한국건설기술연구원의 지원(과제번호: 2011-8-0055)과, 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No. 2011-0030842)을 받아 (주)유신이 공동연구하고 연세대학교에서 위탁시행 한 연구임.

참 고 문 헌

1. Barton, N., Lien, R. and Lunde, J. (1974), "Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support" *Rock Mechanics*, Vol.6, No.4. pp.189-236.

2. Bieniawski, Z. T. (1973), "Engineering classification of jointed rock masses" *Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng.*, Vol.15, pp.335-344.

3. Bierbäumer, A. H. (1913). "Die dimensionierung des tunnel manerwerks" *Liepzig*.

4. Chang, S. B., Heo, D. H. and Moon, H. G. (2006), "A study on secondary lining design using G.L.I model", *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, Vol.8, No.4, pp. 365-375.

5. Chang, S., Seo, S. and Lee, S. (2003), "Design of the secondary tunnel lining using a ground primary support-secondary lining interaction model" *Proc. of International Symposium on the Fusion Technology of Geosystem Engineering, Rock Engineering and Geophysical Exploration*, pp.109-114.

6. Deere, D. U., Peck, R. B., Monsees, J. E., Park, H. W. and Schmidt, B. (1970), "Design of tunnel support systems" *Highway Research Record*, No.339, pp.26-33.

7. Janssen, H. A. (1895), "Versucheüber getreidedruck in silozellen", *Zeitschrift des Vereins deutscher Ingenieure*, Band 39, No.35, pp. 045-1049.

8. Jeong, I. C., Park, J. K., Lee, J. S. and Lee, S. D. (2005), "A basic study on change aspect of displacement and stress in NATM tunnel excavation", *Proceedings of Korean Society for Railway Fall National Conference 2005*, Vol.2, pp.38-43.

9. Kim, D. W., Jeong, S. G., You, O. S. and Lee, S. (2003), "A study on load distribution factor considering plasticity of ground", *Proceedings of Korean Society for Railway Fall National Conference 2003*, Vol.2, pp.411-416.

10. Korea Rail Network Authority (2010), Seoul Metropolitan High-speed Railway(Suseo~Pyeongtaek) Design of Roadbed and Optimization of Concrete Lining.

11. Korean Tunneling and Underground Space Association (2009), *Tunnel Design Guideline*.

12. Lee, I. M., Kim, S. K., Lee, D. W., Choi, J. W., Kim, D. H. and Kim, Y. U. (2000), "Optimization of tunnel blasting design by finite element method", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.16, No.5, pp.63-74.

13. Lim, S. B. (1996), "An evaluation of dynamic damage adjacent to a blasthole in tunnel excavations", *Doctoral Dissertation*, Kyunghee University.

14. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2010), *Road-Design Guideline(The Chapter of Tunnel)*.

15. Park, J. J., Kim, Y. M., Hwang, T. J. and Jeong, S. S. (2011), "Numerical analysis of tunnel lining under loosening load", *Journal of Korean Geotechnical Society(KGS)*, Vol.27, No.7, pp. 35-45.

16. Rose, D. (1982), "Revising Terzaghi's tunnel rock load coefficients" *Proc. 23rd U.S. Symp. on Rock Mechanics*, Berkeley, CA., AIME, New York, pp.953-960.

17. Seo, S. H., Chang, S. B. and Lee, S. D. (2002), "An analysis model of the secondary tunnel lining considering ground-primary support-secondary lining interaction", *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol.12, No.2, pp.107-114.

18. Terzaghi, K. (1946), "Rock defects and loads on tunnel support : in rock tunneling with steel supports by proctor, R. V. and white, T. L." *Commercial Shearing Co*, Ohio, pp.17-99.

19. Wickham, G. E., Tiedemann, H. R. and Skinner, E. G. (1974), "Ground support prediction model-RSR concept" *Proc. of the 2nd Rapid Excavation Tunneling Conference*, AIME, New york, pp. 691-707.

(접수일자 2012. 5. 4, 심사완료일 2012. 7. 18)