

운영 중인 2-Arch 터널의 피난연결통로 신설을 위한 중앙벽체 굴착에 관한 연구

A Study on the Excavation of the Center Wall for the Evacuation Passageway in the Operating 2-Arch Tunnel

이중현*

Jong-Hyun Lee*

Master's Graduation, Department of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Republic of Korea

*Corresponding author: Jong-Hyun Lee, hyuny2315@naver.com

ABSTRACT

Purpose: There is a need to construct an evacuation passageway for the 2-Arch tunnel, which has been constructed and is in operation. Therefore, it aims to analyze tunnel and center wall behaviour and stability due to excavation of the center wall. **Method:** We describe the theoretical background of 2-Arch tunnel and evacuation passageway, and focused on analyzing the behaviour of tunnel and wall using 3-dimensional finite element analysis. Parametric analysis according to rock rating was performed with various ground conditions, and the displacement and stress of the center wall were intensively analyzed. **Result:** With the center wall excavation, the largest amount of settlement was shown in the center of the opening, and the stress was greatest during the first excavation. In addition, it was shown that stress concentration occurred at the top of both openings, and stability reviews considering the concept of allowable stress showed that it exceeded the allowable stress. **Conclusion:** Although the displacement of the tunnel has secured stability within the allowable standard, the generated stress is found to exceed the allowable standard, so it is necessary to prevent sudden stress release by applying appropriate reinforcement methods during construction.

Keywords: 2-Arch Tunnel, Excavation Passageway, Center Wall, Finite Element Analysis, Allowable Stress

요약

연구목적: 기시공되어 현재 운영 중인 2-Arch 터널에 대하여 피난연결통로 신설의 필요성이 대두되고 있다. 이에 본 연구는 중앙벽체 굴착에 따른 터널 및 벽체 거동 분석과 안정성 분석에 목적을 두고 있다. **연구방법:** 2-Arch 터널과 피난연결통로의 이론적 배경을 설명하고, 3차원의 유한요소 수치해석을 통하여 터널 및 벽체의 거동을 집중적으로 분석하였다. 다양한 지반 조건을 변수로 하여 암반 등급에 따른 매개변수 해석을 수행하였으며, 중앙벽체의 변위와 응력을 집중적으로 분석하였다. **연구결과:** 중앙벽체 굴착 시 개구부 중앙에서 가장 큰 침하량을 보였으며, 응력은 첫 번째 굴착 시 가장 크게 발생하였다. 또한 개구부 양 상단에서 응력집중 현상이 발생함을 알 수 있었으며, 허용응력 개념을 고려한 안정성 검토 결과 허용응력을 초과하는 것으로 나타났다. **결론:** 터널의 천단변위는 허용기준치 내로 안정성을 확보하였지만, 발생응력은 허용기준치를 초과하는 것으로 나타나 시공 시 적절한 보강공법을 적용하여 갑작스런 응력 해방에 대한 방지가 필요할 것으로 사료된다.

핵심용어: 2-Arch 터널, 피난연결통로, 중앙벽체, 유한요소해석, 허용응력

Received | 21 May, 2021

Revised | 5 July, 2021

Accepted | 9 July, 2021

 OPEN ACCESS

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

서론

현대 사회에 접어들어 산업 발전과 함께 도시 집중화가 계속되고 그에 따른 사회 기반시설 확충의 필요성이 점차 증가하고 있다. 따라서 이러한 요구에 발맞추어 지역 간 원활하고 유동적인 이동을 위하여 사회 기반시설은 다양한 형태로 발전되어 왔으며, 이와 함께 국내의 토목 기술도 점진적으로 발전을 이루어 왔다. 특히, 터널의 경우는 지하공간의 효율적인 활용을 통하여 도시 집중화와 지상 토지의 가용 영역 부족의 문제점을 해결할 수 있는 좋은 해결책이라고 할 수 있다. 현재 국내에서는 GTX(수도권 광역급행철도), 동부간선도로 지하화 사업 등을 통해 지하공간을 효율적으로 활용하고 있으며, Yoo et al.(2009)는 미국 보스톤에서 진행된 도심재생사업 Big-Dig 프로젝트를 이러한 지하공간 활용의 좋은 해외 사례로서 소개하였다.

이처럼 지하 공간 개발의 요구가 늘어나듯이 산악지역, 도심지역, 연약지반 등과 같은 다양한 지반 조건에 직면한 공사가 필요할 수 있고 이에 따른 대처는 필수적이다. 특히, 지반조건이 불량하거나 굴착 단면이 클 경우 터널 사이의 중앙벽체가 기둥의 역할을 하여 터널에 작용하는 하중을 분담해 안정성을 확보할 수 있는 2-Arch 터널이 적용된다.

한편, 안전에 대한 국민 의식 수준 향상과 토목 기술의 발전과 함께 안전시설, 대피시설 등의 공사도 필수적으로 고려하게 되었다. 이에 우리나라는 시설물의 안전 및 유지관리에 관한 특별법 등 관련 제도를 마련하여 재난에 대한 막대한 피해를 최소화하기 위해 대응하고 있다. 터널의 경우, 새롭게 건설되는 터널에 대해 피난대피시설, 비상주차대 등 갑작스런 재난에 대비한 시설물을 의무적으로 설치하도록 규정하고 있다. 하지만 기사공되어 약 20년 이상 운행 중인 터널의 경우 이러한 피난대피시설의 설치가 매우 미비한 실정이다.

2-Arch 터널에 대한 연구는 지속적으로 수행되어 왔으며, 현재에도 다양한 방법으로 연구가 진행되고 있다. Kong et al.(2018)은 근거리 사진계측 및 이미지프로세싱 기법과 수치해석을 이용하여 2-Arch 터널과 Box 형태의 터널 굴착에 따른 지반거동에 대해 연구하였으며, Yoo et al.(2009)는 3D 수치해석을 통해 2-Arch 터널 시공에 따른 상호터널의 영향 및 중앙벽체의 거동을 중점적으로 고찰하였다. Oh et al.(2007)는 2-Arch 터널에서 중앙벽체의 설계가 매우 중요함에도 불구하고 이에 대한 뚜렷한 설계 방법이 없고 Matsuda et al.(1998)가 제안한 식에 의존하여 작용하중을 산정하고 지보패턴을 결정한다고 하였으며, 수치해석을 통하여 암반등급별 해석에 따라 하중을 산정하고 이를 Matsuda의 제안식으로 산정된 하중에 의한 단면력을 비교하였다. 나아가, 중앙벽체에 작용하는 하중을 합리적으로 평가하고 시공 시 경제성을 높이기 위해 지반 등급에 적절한 하중감소계수 α 값을 산정하여 적정성을 검토하였다. 마지막으로, Choi et al.(2012)는 2-Arch 변단면 터널의 설계와 시공사례를 소개하고 중앙벽체부 누수로 인한 유지관리 문제 등의 해결책으로 적절한 보강방안을 제시하였다. 또한, 이를 고려한 경제성 분석을 통해 경제적인 절감 효과를 제시하였다.

이와 같이 지반 굴착에 따른 2-Arch 터널의 거동 메커니즘 등 관련된 연구는 활발하게 수행되어 왔다. 하지만, 현대 사회에서 안전관리에 대한 제도가 구체적이고 세분화되었음에도 불구하고 이에 따른 기사공된 터널에 대한 피난대피시설의 신설을 위한 연구는 매우 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 피난연결통로 신설에 관한 기초연구로서, 터널 내 존재하는 중앙벽체를 개통하여 터널과 터널 사이에 피난연결통로를 설치하는 경우에 대해 연구를 수행하였다. 연구 내용으로는 중앙벽체 굴착으로 인한 2-Arch 터널의 거동 메커니즘에 대해 분석하였다. 즉, 대상 터널을 모델링하고 3차원 수치해석을 통해 다양한 지반 조건을 고려하여 중앙벽체 굴착에 따른 벽체 및 터널의 거동 변화 양상을 분석하였으며, 이를 일반적인 허용기준과 비교하여 결론을 도출하였다.

이론적 배경

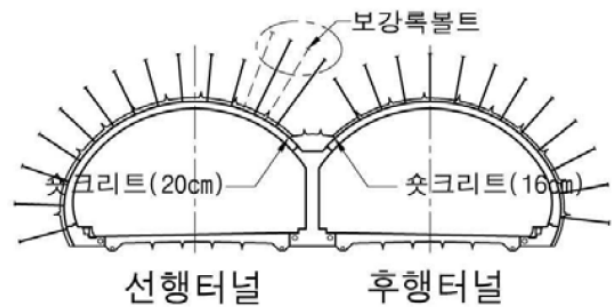
2-Arch 터널

2-Arch 터널은 중앙벽체가 기둥의 역할을 하여 터널에 작용하는 하중을 분담해 구조적 안정성을 확보할 수 있는 터널을 말하며, 용지 확보와 자연을 침범하는 면적이 작아 친환경적인 장점이 있다. 국내, 외의 도로에서 운영 중인 일반적인 2-Arch 터널의 모습은 Fig. 1(a)와 같으며, Fig. 1(b)는 2-Arch 터널 설계에 적용된 지보패턴도의 한 예를 보여주고 있다.

시공 순서를 살펴보면, 시공 중 발생하는 응력변화를 최대한 억제하고 이를 적절하게 분배하면서 시공하여야 안정성을 유지할 수 있으므로 터널 시공은 통상 응력이 집중되는 중앙부 터널을 시공한 후 좌·우측 터널을 시공하고 마지막으로 라이닝을 타설하게 된다. 굴착방법은 지반이 극히 불량할 경우를 제외하고는 중앙 터널은 전단면으로, 좌·우측터널은 상, 하 반단면 분할굴착으로 시공하고 시공순서는 중앙터널 굴착, 중앙벽체 설치, 본선터널 굴착, 콘크리트라이닝 설치의 4단계로 이루어진다. 또한, 2-Arch 터널의 특성상 선행터널이 후행터널의 굴착에 영향을 받으나 이에 대한 정량적 평가가 현실적으로 곤란한 실정으로 이에 대한 검토는 시공 중 계측을 통한 연구가 필요하다(Chun et al., 2008).



(a) General 2-Arch tunnel



(b) Example of 2-Arch tunnel design (Oh, 2007)

Fig. 1. 2-Arch tunnel

다음으로, 콘크리트 라이닝 및 중앙벽체는 터널 주변의 지반 상태, 환경 조건 등을 고려하여 구조체로서 역학적 기능, 내구성을 확보하고 각종 하중에 견디도록 설계하여야 한다. 재료는 일반적으로 현장타설 콘크리트를 사용하며, 역할에 따라 철근 콘크리트 또는 무근 콘크리트로 적용된다.

피난연결통로

피난연결통로는 터널 내에서 예상치 못한 사고 발생 시 신속하게 대피하기 위한 시설로서 상대터널을 연결하는 통로, 본선터널과 피난대피터널을 연결하는 통로, 격벽분리형 피난대피통로와 본선터널을 연결하기 위한 통로(또는 문) 등을 말한다. 또한 크게 대인용과 차량용으로 구분하며, 이에 대한 최소 규격 기준과 설치 간격을 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Table 1. Design criteria of evacuation passageway (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2010)

Classification	Width (m)	Height (m)	Installation distance (m)
Personal	2.5	2.5	250 below
Vehicle	4.7	3.5	750 below

Fig. 2(a)는 도로터널에서 적용되는 일반적인 피난연결통로를 보여주고 있고 2-Arch 터널에 적용되는 일반적인 피난연결 통로는 Fig. 2(b)와 같으며, 문의 형태는 대부분 비상 상황 발생 시 신속하게 반대 방향으로 이동할 수 있도록 미닫이문의 형태로 되어있다. 또한, 화재의 확산을 막기 위해 불연성의 특성을 가지고 있다.



(a) General evacuation passageway in road tunnel



(b) Evacuation passageway in 2-arch tunnel

Fig. 2. Example of evacuation passageway

피난연결통로는 상위 개념상 방재시설에 속하며, 터널 방재시설은 터널 등급에 따라 구분하여 설치한다. 이를 Table 2에 나타내었으며, 피난연결통로의 경우 1, 2, 3 등급 터널에 대해 필수적으로 설치하여야 한다. 터널 등급은 단순히 터널의 연장을 기준으로 하는 연장기준등급과 교통량 등 터널의 제반 위험인자를 고려한 위험도지수 기준등급으로 구분하며, 터널연장 등급과 위험도 지수는 Table 3에서 정한 바를 따른다.

Table 2. Disaster prevention facilities installation by tunnel rating (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2010)

Tunnel rating	1	2	3	4
Evacuation passageway	○	○	○	

Table 3. Tunnel length (L) and risk index (X) by the tunnel rating (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2010)

Rating	Tunnel length (L)	Risk index (X)
1	$L \geq 3,000\text{m}$	$X > 29$
2	$1,000 \leq L < 3,000\text{m}$	$19 < X \leq 29$
3	$500 \leq L < 1,000\text{m}$	$14 < X \leq 19$
4	$L < 500\text{m}$	$X \leq 14$

특히 감사원의 ‘대도시권 지하차도 안전관리 실태 점검, (2019)’ 감사 보고서에 따르면, 터널등급이 3등급 이상인 지하차도를 대상으로 조사한 결과, 피난연결통로가 설치되어있지 않은 곳이 발견되었고 연장등급이 4등급인 터널 중 터널연장 250m 이상인 터널에서 화재가 발생할 경우 화재지점으로부터 250m 이내에 적절한 피난연결통로 등 대피시설이 없으면 대피하던 중 유독가스에 질식될 수 있다고 발표하였다. 이에 연장등급이 4등급인 터널 중 터널연장 250m 이상인 터널에 대하여 필요한 경우 피난연결통로를 설치하도록 하는 것이 타당하다고 결론지었다. 이에 본 연구에서는 현재 피난연결통로 없이 운행 중인 터널에 대해서도 피난연결통로 신설이 필요하다고 판단하였으며, ○○터널을 채택하여 연구를 수행하였다.

수치해석

수치해석 개요

본 장에서는 전술한 중앙벽체 굴착에 따른 거동 분석을 위해 수행된 유한요소 수치해석(FEA)에 대해 설명한다. 본 수치해석은 다양한 지반 조건에 따른 매개변수 연구로서, 시공 전 터널과 주변 지반의 변형 및 침하의 예측, 구조체의 영향을 분석하여 향후 구조물의 설계 요소를 결정하는 기초 연구의 목적이 있다. 이에 터널이 위치한 지반의 조건을 I~V등급의 5가지 Case로 나누어 해석을 수행하였다.

프로그램은 지반공학 분야의 범용 프로그램인 MIDAS GTS NX(Ver. 290)를 이용하였으며, 본 연구에 적용되는 해석은 근본적으로 2차원 해석에서는 실제의 응력 분포를 재현하기에 한계가 있고 중, 횡방향의 실제적인 거동을 파악하기 위하여 3차원 해석이 필수적이다. Fig. 3은 본 연구에서 채택한 ○○터널의 3차원 모델링의 종단면과 해석에 적용된 횡단면을 보여주고 있다. 종방향 길이는 100m로 설정하였고 횡단면상 해석영역은 좌, 우 3D, 하부 3H, 그리고 터널 상부는 실제 지층을 모사하였다. 암반층의 상부는 매립층과 풍화토로 구성되어 있다. 터널의 높이(H)는 7.7m이고 최대 직경(D)은 21.0m이다. 한편, Yoo et al.(2009)를 참고하여 일반적으로 숏크리트와 록볼트가 지보재로 사용되나 해석의 편의상 록볼트는 모델링하지 않았다.

해석에 적용된 피난연결통로는 안전측 설계를 위하여 차량용 피난연결통로를 채택하였으며, 실제 시공 시 작업공간을 고려하여 벽체의 굴착 영역을 5×4m(폭×높이)로 적용하였다. Fig. 4(a)는 본 연구에 채택된 ○○터널의 중앙벽체를 실제로 촬영한 것이며, 피난연결통로의 예상 굴착 영역과 제원을 함께 나타내었다. Fig. 4(b)에는 예상 피난연결통로의 평면도를 나타내었다.

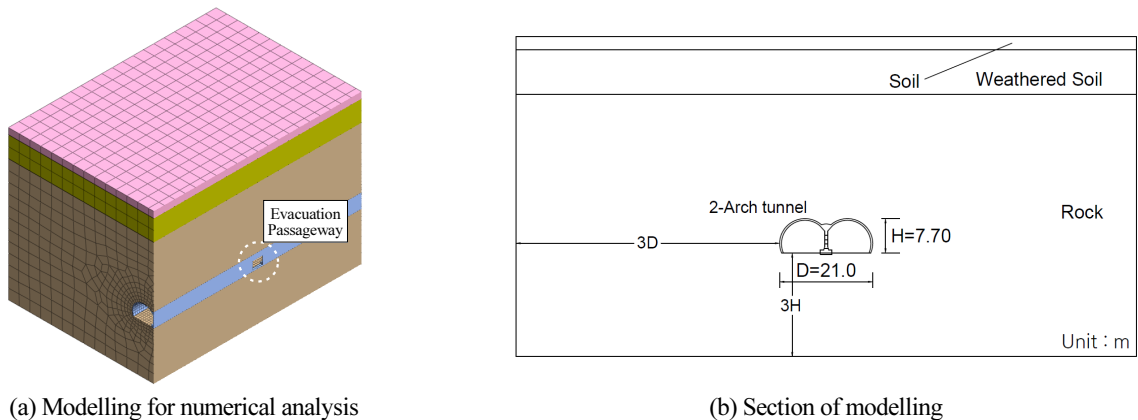


Fig. 3. Modelling of tunnel and ground in numerical analysis

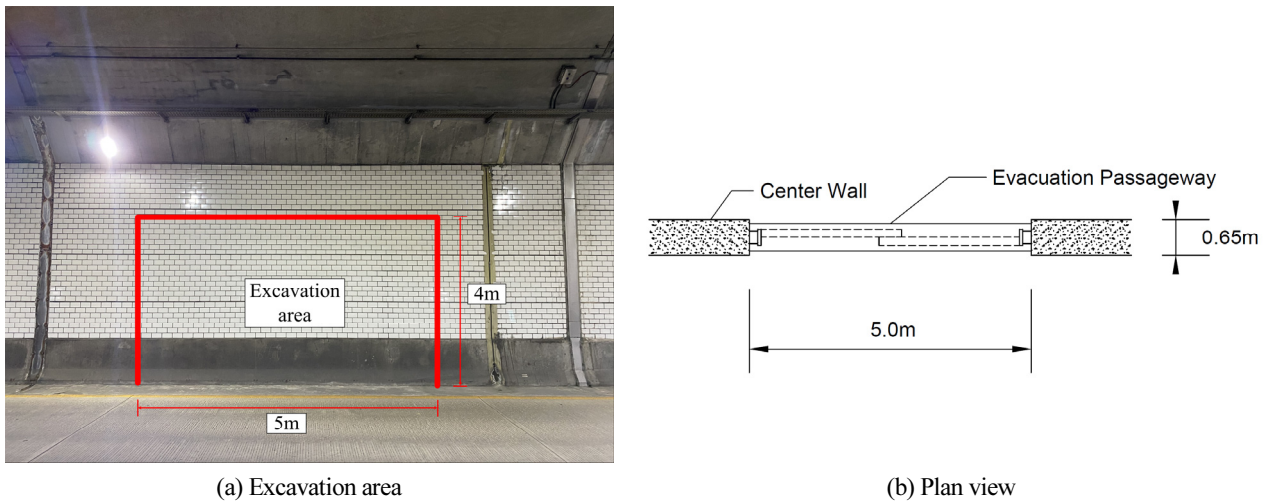


Fig. 4. Excavation area and plan view of evacuation passageway

수치해석에 적용되는 물성치는 크게 지반과 콘크리트 라이닝으로 나뉜다. 우선, 지반의 구성모델은 파괴상태의 메커니즘을 강력하게 확인할 수 있는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며, 라이닝의 물성치는 Elastic 모델을 적용하였다. 지반과 라이닝 및 숏크리트의 경우, 실제 설계 보고서를 참고하여 물성치를 부여하였다. 이를 Table 4, 5에 요약하여 나타내었다.

Table 4. Properties of soil in numerical analysis

Type	Unit weight γ (kN/m ³)	Cohesion c (kPa)	Friction angle ϕ (°)	Modulus of elasticity E (MPa)	Poisson's ratio ν
Fill (Soil)	19.0	13	25	17	0.33
Weathered soil	20.0	25	30	40	0.32
V	22.0	50	33	600	0.30
IV	26.0	800	35	1,500	0.28
III	26.5	1,500	38	6,000	0.25
II	27.0	2,000	42	10,000	0.23
I	27.5	3,000	45	24,000	0.21

Table 5. Properties of shotcrete and lining in numerical analysis

Type	Constitutive model	Unit weight γ (kN/m ³)	Modulus of elasticity E (kPa)	Poisson's ratio ν
Shotcrete	Elastic	24.0	15,000	0.167
Lining	Elastic	25.0	26,000	0.167

시공단계는 실제 운행 중인 터널을 고려하여 지반과 터널을 모델링 한 후, 중앙벽체를 굴착하는 것으로 결정하였으며, 중앙벽체는 도로 지면으로부터 최종 굴착까지 1m씩 단계굴착을 수행하였다. 수치해석을 통해 시공 단계별 중앙벽체의 침하량

과 터널 라이닝의 응력을 중점적으로 검토하였으며, 중앙벽체의 종방향의 수직변위를 분석하여 굴착이 터널에 미치는 영향 범위를 분석하였다. 한편, 실제로 지반의 상태나 시공조건 등이 다르기 때문에 엄밀한 관리 기준치를 제시하기는 어렵지만 일반적으로 추정할 수 있는 기준치로서 프랑스 공업성 제시되었던 기준치와 비교하여 안정성 검토 또한 수행하였다.

수치해석 결과

각 시공 단계별 중앙 개구부 상단에서의 벽체의 침하량을 분석하였다. 그 결과, 지면으로부터 중앙 벽체 굴착 시 침하량은 증가하였으며, 암반등급 V로 갈수록 침하량이 크게 발생하였다. 벽체의 중앙에서 가장 큰 변위가 발생함을 알 수 있었고 최종 굴착 시 V등급은 -3.38mm, I 등급은 -0.59mm의 침하량을 보였다. 이를 그래프로 정리하여 Fig. 5에 나타내었다. 또한, 시공단계별 터널의 천단변위를 분석하였다. 발생 경향은 벽체와 비슷한 양상을 보였으며, 그 값은 벽체에 비하여 상대적으로 적게 나타났다. 최종 굴착 시 터널의 천단변위는 V등급에서 -0.05mm의 침하량을 보였으며, 이는 벽체의 침하량보다 98.52% 적게 발생하였다(Fig. 6). 한편, Korea National Railway(2017)는 터널 천단변위의 허용치를 Table 6과 같이 프랑스 공업성의 기준을 설계 시 참조할 수 있는 값으로 제시하고 있다. 이를 고려하여 분석한 결과, 터널의 천단변위는 모두 허용 침하량의 기준 내로 안정성을 만족하는 것으로 검토되었으며, 이를 Table 7에 요약하여 정리하였다.

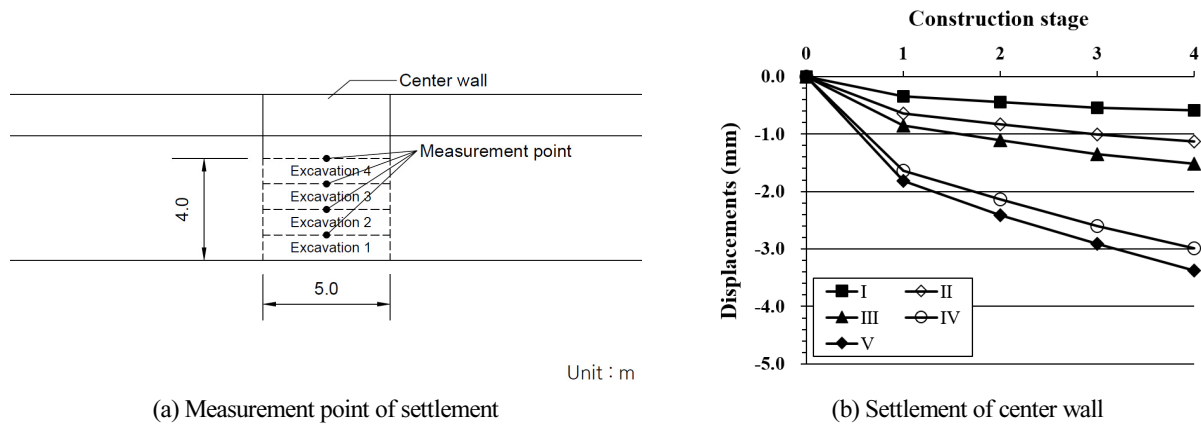


Fig. 5. Settlement of center wall according to construction stage

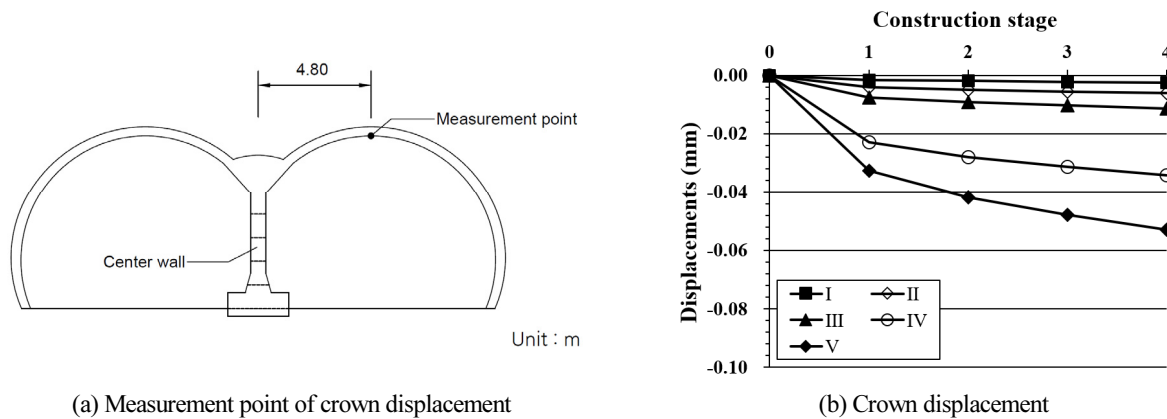


Fig. 6. Crown displacement according to construction stage

Table 6. Management criteria of France ministry of industry

Ground depth (m)	Maximum allowable crown displacement (mm)	
	Rock ground	Plasticity ground
10 ~ 50	10 ~ 20	20 ~ 50
50 ~ 100	20 ~ 60	100 ~ 200
100 over	60 ~ 120	200 ~ 400

Table 7. Result of tunnel crown displacement

Rating	Crown displacement (mm)	Allowable displacement (mm)	Result
V	-0.05		O.K
IV	-0.03		O.K
III	-0.01	-(10 ~ 20)	O.K
II	-0.01		O.K
I	-0.00		O.K

추가적으로, Fig. 7에 지반 조건에 따른 변위 경향을 직관적으로 확인하기 위하여 암반등급 I, III, V에서의 최종 굴착 시 벽체의 수직 변위 경향을 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, V등급으로 갈수록 변위가 가장 크게 나타나며, 벽체 중앙에서 가장 큰 변위가 발생함을 알 수 있다. 또한 상대적으로 벽체의 변위가 터널 천단부보다 크게 발생함을 알 수 있다.

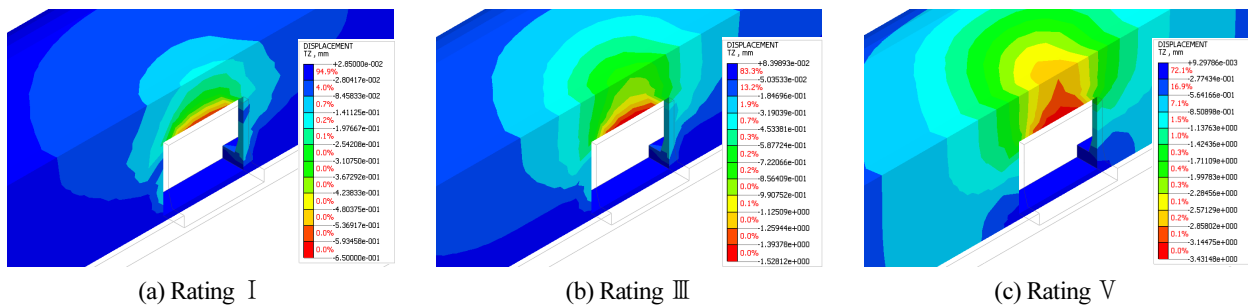


Fig. 7. Vertical displacements by numerical analysis

다음으로, 벽체의 굴착에 따른 라이닝 응력을 검토하였다. 일반적으로 터널의 라이닝 안정성 검토는 허용응력 개념을 도입하여 검토하고 있으며, 허용 휨응력은 다음과 같이 나타낸다.

$$f_{ca} = 0.4f_{ck} \tag{1}$$

여기서, f_{ca} = 허용 휨 압축응력(MPa)

f_{ck} = 재령 28일 콘크리트의 설계기준 압축강도(MPa)

즉, 허용응력 설계법을 기본으로 하여 사용하중에 대한 응력검토를 수행하였으며, 콘크리트의 f_{ck} 는 24.0MPa이고, 허용휨 응력은 9.6MPa이다.

라이닝의 응력 검토는 주변지반의 상태와 단층파쇄대 등 불연속면의 존재를 고려한 초기응력 상태에서 응력을 검토하였으며, 이를 Fig. 8에 정리하여 나타내었다. 전체적인 경향을 나타내기 위하여 변위 경향과 같은 방법으로 I, III, V 등급에 대해 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 상대적으로 색이 진하게 나타나는 벽체 개구부 양상단에서 최대 응력이 발생함을 알 수 있었으며, 이곳에서 굴착으로 인한 응력집중 현상이 나타난다고 사료된다. 응력 검토 결과, 최대 발생 응력은 5가지 등급 모두 첫 번째 굴착에서 가장 크게 발생하였으며, V 등급에서 40.75MPa, I 등급에서 12.84MPa로 68.49% 적게 발생함을 보였다(Fig. 9). 이후 응력은 감소하다가 최종 굴착 시 소폭 상승하는 경향이 나타남을 알 수 있었다. 이는 초기상태에서 굴착에 따른 응력해방으로 인한 부재력의 상승 때문이라고 사료된다. 추가적으로, 최대 발생응력을 기준으로 안정성 검토를 수행하

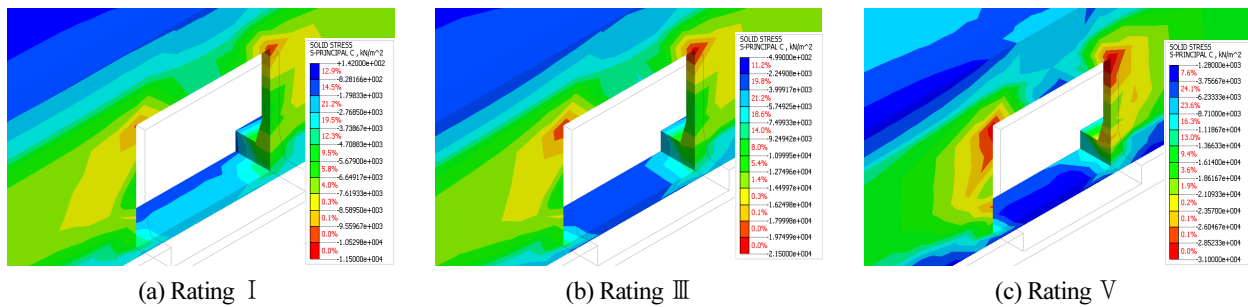


Fig. 8. Stress of center wall by numerical analysis

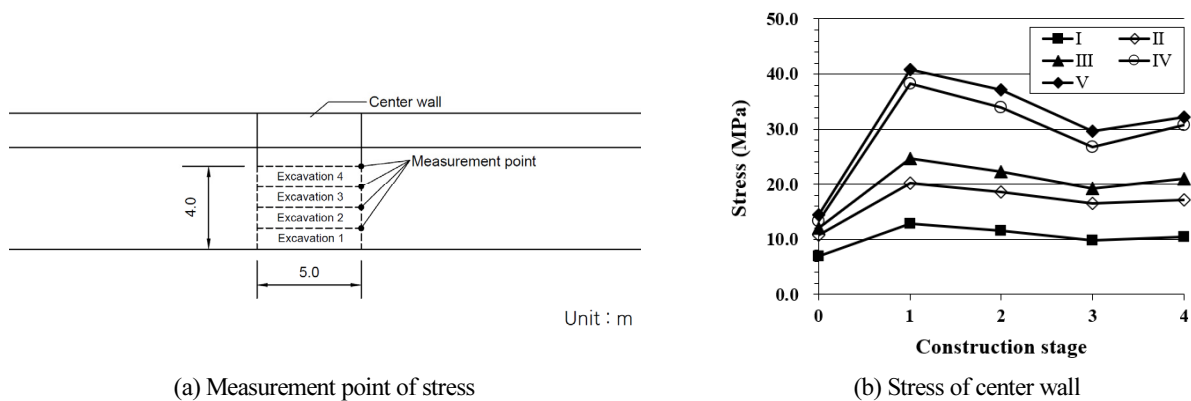


Fig. 9. Stress of center wall according to construction stage

Table 8. Result of center wall stress

Rating	Compressive stress (MPa)	Allowable stress (MPa)	Result
V	40.75		N.G
IV	38.25		N.G
III	24.64	9.6	N.G
II	20.14		N.G
I	12.84		N.G

였으며, 이를 Table 8에 정리하여 나타내었다.

허용응력 검토결과, 5가지 등급에서 모두 허용응력을 초과하는 것으로 검토되었다. 따라서 시공 시 굴착과 응력 해방으로 인한 부재력 상승을 방지하기 위한 적절한 보강이 필요하다고 판단된다.

마지막으로, 중앙벽체 굴착으로 인한 영향범위를 검토하기 위해 개구부 중앙으로부터 종방향 2m 간격으로 약 20m까지 지점별 침하량을 검토하였다. 이를 Fig. 10에 나타내었으며, C.L.(Center line)은 벽체 개구부 중앙이 되며, 그래프는 축대칭(Axial symmetry)을 이루고 있다. 그래프에서 볼 수 있듯이 5가지 등급에서 모두 벽체 개구부 중앙에서 가장 큰 침하량을 보였다. 또한, 침하 양상은 가우시안 분포곡선의 트라프(Gaussian trough)의 형태를 나타내고 있으며, 0~5m 구간에서 가장 큰 침하량의 변화를 보였고, 약 5m 지점부터 0으로 급격히 수렴하는 경향을 보였다. 한편, 5m 지점에서의 암반 등급별 벽체의 침하량을 분석해보면, I 등급은 -0.17mm, II 등급은 -0.36mm, III 등급은 -0.53mm, IV 등급은 -1.25mm, V 등급은 -1.61mm로 I 등급이 V 등급보다 약 -89.44% 침하량이 적게 발생하는 것으로 검토되었다. 이를 통해, 시공 시 다양한 조건들을 고려함과 동시에 종방향으로도 적절한 보강공법을 선정하여 굴착으로 인한 부재력의 증가를 방지해야 한다고 사료된다.

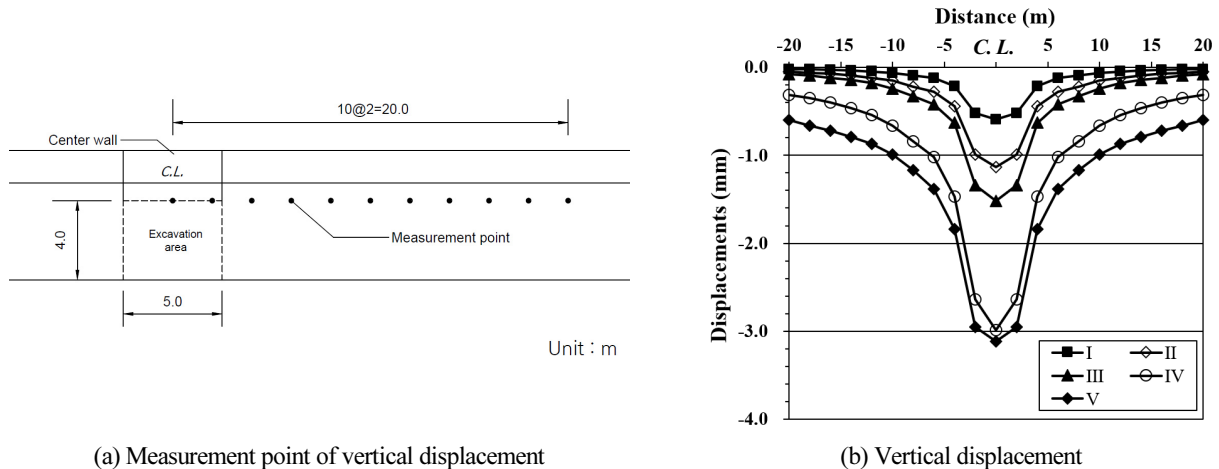


Fig. 10. Vertical displacement of center wall for distance

결론

본 연구에서는 3차원의 유한요소 수치해석을 이용하여 현재 운행 중인 2-Arch 터널에서 피난연결통로 신설을 위해 기존 중앙벽체 굴착 시 그에 따른 벽체 및 터널의 거동을 집중적으로 분석하였다. 연구에 적용된 피난연결통로의 제원은 차량용으로 적용하였고 암반 등급별 매개변수 해석을 수행하였으며, 해석 결과를 바탕으로 일반적인 관리 기준치와 비교하여 안정성 검토를 수행하였다. 본 연구에서 수행한 일련의 수치해석의 결과에 의해 얻어진 결론은 다음과 같다.

피난연결통로를 최종 굴착 시 암반등급이 V 등급으로 갈수록 중앙벽체의 침하량이 크게 발생하였으며, 5가지 등급 모두 개구부 중앙의 위치에서 가장 큰 변위를 나타내었다. 또한, V 등급에서 침하량은 -3.38mm, I 등급은 -0.59mm으로 I 등급이 V 등급보다 약 82.54% 감소함을 보였다.

터널의 천단변위는 V 등급은 -0.05mm, I 등급은 -0.002mm의 침하량을 보였으며, 이는 벽체의 침하량보다 각각 98.52%,

99.66% 적게 발생하였다. 이를 허용기준치와 비교한 결과, 모두 기준 내로 안정성을 만족하는 것으로 검토되었다.

라이닝 응력 검토 결과, 벽체 개구부 양상단에서 최대 응력이 발생하였으며, 이곳에서 응력집중 현상이 나타난다. 최대 발생 응력의 크기는 5가지 등급 모두 첫 번째 굴착에서 가장 크게 발생하였으며, V등급에서 40.75MPa, I 등급에서 12.84MPa로 68.49% 감소함을 보였다. 또한 허용응력 개념을 바탕으로 안정성 검토를 한 결과, 발생 응력이 모두 허용응력보다 초과하는 것으로 나타났다. 이는 초기상태에서 굴착으로 인한 갑작스런 응력해방 때문이라고 판단된다. 따라서 시공 시 적절한 보강공법을 적용하여 굴착으로 인한 응력 해방시 부재력 상승의 방지가 필요하다고 사료된다.

마지막으로 중앙벽체 굴착으로 인한 영향범위를 검토하였다. 이를 위해 개구부 중앙으로부터 종방향 2m 간격으로 약 20m까지 지점별 침하량을 검토하였다. 약 5m 지점부터 0으로 급격히 수렴하는 경향을 보였으며, 전체적인 침하 형태는 종방향으로 가우시안 분포곡선의 트라프(Gaussian trough)의 형태로서 개구부로부터 멀어질수록 점차 수렴하는 경향을 보였다.

본 연구의 결과를 종합적으로 고려해볼 때, 중앙 벽체 굴착으로 인한 터널 천단변위는 허용기준치 내로 안정성을 확보하였으나, 응력은 모든 암반 등급 조건에서 보강이 필요하다고 검토되었다. 따라서 향후 운행 중인 터널에 대하여 피난연결통로를 위해 중앙벽체를 굴착할 경우, 안정성을 확보하기 위하여 적절한 보강공법의 적용과 동시에 올바른 시공이 동반되어야 한다고 판단된다.

References

- [1] Choi, J.-J., Park, Y.-J., Kim, S.-K., Park, J.-H. (2012). "A case study on the design and construction of a 2-arch tunnel with varying section." *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, Vol. 22, No. 5, pp. 310-320.
- [2] Chun, B.-S., Choi, K.-B., Kim, H.-Y. (2008). "A evaluation of standard support pattern for two-arch road tunnel." *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 9, No. 7, pp. 25-35.
- [3] Kong, S.-M., Oh, D.-W., Lee, J.-H., Lee, Y.-J. (2018). "Investigation of soil behaviour due to excavation below the grouped pile according to shape of tunnel station." *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, Vol. 20, No. 1, pp. 83-97.
- [4] Korea National Railway (2017). Instrumentation, KR C-02050. Korea National Railway, Daejeon, Republic of Korea.
- [5] Matsuda, T., Terada, K., Igarashi, M., Miura, K. (1998). "Ground behavior and settlement control of twin tunnels in soil ground." *Tunnels and Metropolises*, Vol. 2, pp. 1193-1198.
- [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2010). Road design handbook. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Sejong, Republic of Korea.
- [7] Oh, G.-C. (2007). A study on the evaluation of the loads acting on the pillar in two-arch tunnel. M.E. Dissertation, Hanyang University.
- [8] The Board of Audit and Inspection of Korea (2019). Inspection of safety management of underground roads in metropolitan areas. 2246, Seoul, Republic of Korea.
- [9] Yoo, C.-S., Kim, J.-M., Kim, H.-C. (2009). "Numerical investigation on 3D behavior of 2-arch tunnel." *Journal of Korean Tunneling and Underground Space Association*, Vol. 11, No. 3, pp. 255-264.