느슨한 풍화토 구간을 통과하는 구간의 패널공법 적용 구간 안정성에 관한 연구

Stability Study Using Numerical Analysis for the Panel Method Applied to the Weathered Rock Section below the National Highway

김지선* · 김자연** · 엄기영*** · 조국환****

Kim, Ji-Sun*, Kim, Ja-Yeon**, Eum, Ki-Young***, and Cho, KookHwan****

Abstract

In sections with poor ground conditions, it is difficult to apply the commonly used NATM tunnel method; thus, applications of the non-open cut tunneling method are increasing. This section is a tunnel crossing area under the national road in which the Panel method is to be applied to the section where a deeply buried layer and a loose weathered soil layer are distributed. Therefore, the stability of the upper road, the amount of settlement, and the stability of the tunnel structure were reviewed for each construction stage by using MIDAS GTX. Through the installation of measuring instruments in the tunnel area, the results of the numerical analysis were reviewed and the stability during and after construction was evaluated. Therefore, it is likely that the Panel method is an appropriate countermeasure in the downtown area and in areas with soft ground sections where the application of the general tunnel excavation method is difficult.

Key words : Panel Method, Non-open Cut Method, Soft Ground, Numerical Analysis, Field Instrumentation

요 지

지반조건이 불량한 구간의 경우 일반적으로 사용되는 NATM 터널공법 적용이 어려우므로, 비개착 특수공법 등의 적용사례가 증가하고 있다. 본 구간은 국도 하부 터널 횡단구간으로 깊은 매립층과 느슨한 풍화토층이 분포하고 있는 구간으로 패널공법을 적용하고자 한다. 이에 MIDAS GTX를 이용하여 시공단계별로 상부도로의 안정성 및 침하량, 터널 구조물의 안정성을 검토하였다. 통과구간에 계측기 설치를 통하여 수치해석 결과 검토 및 시공 중, 후에 대한 안정성을 평가하였다. 이에 일반적인 터널굴착공법을 적용하기 어려운 도심지. 연약지반 통과구간에 패널공법이 적절한 대응방안인 것으로 판단된다.

핵심용어 : 패널공법, 비개착 특수공법, 연약지반, 수치해석, 현장계측

1. 서 론

최근 도심지내 인구의 고밀화로 인해 도로 및 철도 노선 계획시 노선의 직선화 등 기존의 도초 및 철도 구조물등의

하부를 횡단하는 사례가 증가하고 있다. 일반적인 터널공사는 New Austrian Tunnelling Method (NATM) 공법과 Tunnel Boring Machine (TBM) 공법으로 대표되나 저토평 연약구간에는 이들 공법들이 적합하지 않아 다른 특수공법들을 개발

*정회원, 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 박사과정(E-mail: 1027jisun-kim@naver.com)

Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Railway Construction Engineering, Seoul National University of Science & Technology

**정회원, 한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 선임연구원

Member, Senior Researcher, Department of Advanced Railroad Civil Engineering, Korea Railroad Research Institute

***교신저자, 정회원, 한국철도기술연구원, 첨단궤도토목본부 수석연구원(Tel: +82-31-460-5866, Fax: +82-31-460-5000, E-mail: kyeum@krii.re.kr)

Corresponding Author, Member, Chief Researcher, Department of Advanced Railroad Civil Engineering, Korea Railroad Research Institute

****정회원, 서울과학기술대학교 철도전문대학원 철도건설공학과 교수

Member, Professor, Dept. of Railway Construction Engineering, Graduate School of Railway, Seoul National University of Science & Technology

하여 적용되고 있다(Derrick, 2001; Wood, 2002). 특히, 도심 지에서의 지하공간 개발 시 지하매설물, 교통통제에 따른 민원 및 저토포 연약구간을 통과하는 경우가 발생하게 되어 특수한 공법들이 다양하게 개발되어 사용되고 있다(Eum et al., 2015). 터널공사 중 막장 자립이 곤란한 토사구간과 터널의 기하학적 구조가 복잡하며 기존 구조물의 기초구간을 통과해야 하는 경우에는 그 복잡성이 더욱더 높아진다. 이를 대응하기 위하여 패널공법이 그 대책공법으로 각광받고 있으며, 본 논문에서는 매립층과 풍화토층이 깊은 연약지반에서 터널 굴착시 그 안정성을 검토하고자 한다.

2. 패널공법

패널공법은 아주 오래전에 개발된 Messer Shield Method를 바탕으로 한다. 여기에서 Mess는 독일어로 칼을 뜻한다. 이 공법에서는 칼모양의 강널판들을 압입하고 이를 지보재 삼아 굴착을 통하여 터널을 시공한다. 1950년도에 독일의 한 도시의 하수관 굴착과 지하철 터널에 사용된 이후에 (Lehmann and Bppler, 2010) 일본에서 아주 많은 터널현장에서 Earth Tunnel 공법으로 사용되어 왔다(Miura, 2003). 공법의 시공순서는 비교적 간단하다. 갱구부에 지보공을

Table 1. Comparison of Panel Method and MS Method (Eum et al., 2015)

Devision	Panel Method	MS Method (Messer Sheild Method)
Summary	Advance grouting > ground solidification > PLATE arrangement > Press-fitting using hydraulic jack > After excavating the ground, install a support hole in the inner hole > Installation of steel cladding between supports	Arrange the MESSER PLATE in parallel on the steel support member -> Penetrate with hydraulic jack of PLATE -> Install in contact with earth plate excavation surface -> Repeat construction method in MESSER PLATE

Ground-subsidence	<ul style="list-style-type: none"> - Preceding ground reinforcement + load jack installation + 1st lining placement - the effect of preventing ground subsidence 	<ul style="list-style-type: none"> - load jack installation + 1st lining placement - the effect of preventing ground subsidence is insignificant
Facing Stability	<ul style="list-style-type: none"> - Preceding multi-stage grouting of steel pipe -> Prevent upper arc sliding - Tunnel face barrier installation, satisfied Tunnel Face stability 	<ul style="list-style-type: none"> - Preceding multi-stage grouting of steel pipe X -> Concern about upper arc sliding - Tunnel face barrier installation X -> Unsatisfied Tunnel Facestability
Constructability	<ul style="list-style-type: none"> - Available in any soil - Available in upward & downward slope - Excellent applicability of linear change section by applying split panel - Large-scale excavation constuction performance in addition to small-scale cross section - Direct temporary support of superstructure possible 	<ul style="list-style-type: none"> - Available in any soil - Available in upward & downward slope - Disadvantages of applicability of linear change section - Inappropriate in large-section split excavation except small-scale cross-sections such as electric power spheres
Structural Stability	<ul style="list-style-type: none"> - by Sequential excavation prevention of overlapping subsidence - Adequate structural stability due to using the back side earth plate as a steel square pipe - Excellent buckling stability due to compression force due to tie-angle fastening between support members - Possible to prevent and compensate for the deflection of the upper ground according to the installation of the preceding load jack. 	<ul style="list-style-type: none"> - Overlapped settlement occurs because excavation is sequentially implemented from the lower section when excavating a large section - Inadequate structural stability due to using the back side earth plate as a wooden square pipe - Unsatisfied buckling stability due to compressive force due to tie-rod fastening of steel bars between support members - Difficult to preventing upper ground sagging and correcting
Maintainability	Appropriate for structural maintenance by applying waterproof holes to the primary lining	Appropriate for structural maintenance by applying waterproof holes to the primary lining
Minimum height	Above 2.5 m	Above 3.5 m

설치하고 지보공 바깥쪽으로 Messer Plate를 발진기지의 반력을 통하여 Fig. 1의 그림과 같이 유압으로 관입시킨다. 관입 후 터널을 굴착하고, 또 다른 지보공과 버팀목을 설치함으로써 하나의 공정을 완료하게 된다. 시공이 간단하고 작업자의 안전성이 뛰어나며 복잡한 구조물이 존재하는 도심지의 지하공간 개발에 따른 개착시공이 곤란한 경우에 많이 적용되었다.

이러한 장점들에도 불구하고, 시공 중 주변지반이 이완되는 경우가 자주 발생되며 굴삭판넬이 지반의 토압에 미치지 못하여 좌굴되는 현상 및 바닥지반 처짐 및 버팀목의 변형으로 장기침하 발생 등 여러 문제점들을 여전히 내포하고 있다. 패널공법은 이러한 단점들 즉, 굴삭판넬의 구조적인 단점과 강성을 보완하고 토류판을 강재각관으로 대체하여 구조안정성을 확보하였고, 선행강관다단그라우팅 및 지보재에 선행하중재를 설치하여 침하문제를 해결함으로써 보다 선진화된 터널기법으로 개발되어 사용되고 있다. 또한 panel 공법은 분할굴착 및 굴진이 가능하여 시공 중 터널의 방향 수정도 가능한 것으로 알려져 있다. 이상 두 공법의 비교를 Table 1에 정리하였으며 이에 대한 대표적인 적용은 Fig. 1에서 보는바와 같이 저토평 구간의 고속도로 횡단부, 지장물이 복잡하게 존재하고 주변 구조물들이 얹혀 있는 도심지 도보용 터널 건설 등을 들 수 있다.

패널공법의 시공 순서는 Messer Shield Method와 같이 비교적 간단하다. Fig. 2와 같이 복합지층구간, 연약지반에서는 소규모 분할단면으로 나누어 추진하고, 굴착하여 시공성 및 안정성 확보가 용이하다. 또한 Fig. 3과 같이 입구에 반력부를 설치하고, 패넬을 개별적으로 유압을 확용하여 압입/굴진시켜 굴착하게 된다. 이에 직각으로 변화되는 선형 구간 또는 곡선구간에서도 적용성이 우수하다. 이처럼 효과

적이며 안전한 터널링 작업으로 인하여 상부 지장물과의 이격거리가 매우 가깝거나 자갈이나 전석이 포함된 토사구간 또는 지층변화가 심한 구간에도 쉽게 적용 할 수 있다(Eum et al., 2015).

Fig. 2. Small Excavation

Fig. 1. Panel Method Applications

(a) Installation of reaction Wall

(b) Pressing-in Each Panel

Fig. 3. Panel Method

Fig. 4. Longitudinal Reinforcement Section

3. 현장 개요 및 지반조건 검토

본 구간은 Fig. 4와 같이 국도 하부 총연장 $L = 54.65$ m의 비개착 터널을 설치하는 공사로 국도와의 연직 이격 거리는 7.9 m이다. 설계시 연암구간을 통과하는 것으로 설계되었으나, 설계 당시의 지반조사 보고서와 달리 터널 시공을 위한 지반굴착시 매우 불량한 매립층과 풍화토층을 통과해야 하는 것으로 나타났다. 이에 시공 중 일반 토사구간에 비해 불량한 지반으로 시공 사이클 타임이 증가하고, 다량의 유입수 유출로 인해 상부의 국도 일부가 침하되는 사고가 발생하게 되었다.

패널공법을 설계할 당시 기존 지반조사보고서 준하여 설계를 진행하였고, 지반조건은 국도 성토구간, 풍화토, 풍화암, 연암층으로 구성된 것으로 파악하였다. 특히 토사구간은 전체굴착량 $3,489 \text{ m}^3$ 중 493 m^3 로 그 비율이 14%에 불과하여 풍화토 혹은 성토다짐층(국도통과구간) 구간일 것으로 판단하였다. 그러나 상반굴착 중 당초 예상과 달리 매우 불량한 매립층이 지속적으로 노출되었고, 이에 현장에서 추가 지반조사를 실시한 결과 매립층(0~13 m), 풍화토(13~17 m), 풍화암(17 m~)로 조사되었다. 특히 매립층 구간은 자갈 섞인 실트질 모래로 전석을 함유하고 있는 매우 불량한 지층으로 시공 중 일반 토사(풍화토)에 비해 굴착 사이클타임이 매우 증대되었고, 유입수의 다량 유출로 인해 상부의 국도 일부가 침하하는 등 난공사가 진행되었다. 또한 하반 굴착 중 풍화암, 연암이 노출되지 않고 토사(매립층, 풍화토)가 지속적으로 노출되고 있는 상황이 발생하였다. 이에 Fig. 5와 같이 터널 상부에 대구경 12 m 길이의 강관다단 그라우팅을 추가 보강하고, 터널 외각부에 2차에 걸쳐서 패널 삽입, 완료 후 내부를 굴착하고 강지보공을 설치하는 순으로 공정을 수행하였다.

지반조건이 매우 불리하고, 상부 국도의 침하가능성이 매우 높으므로, 주변지반을 보강하고, 굴착에 따른 상부 도로의 영향을 최소화할 수 있는 패널공법을 계획, 시공하였다.

Fig. 5. Reinforcement Section Around Tunnel

4. 패널공법 안정성 검토

4.1 안정성 단면 및 해석 프로그램

안정성 해석은 지반조건, 하중조건, 시공방법 및 시공순서, 지보재의 특성 등을 반영하여 굴착에 따른 실제 지반 거동을 분석하였으며, 사용프로그램은 지반해석전용 프로그램으로 터널 안정성 검토시 많이 사용되고 있는 MIDAS GTS를 사용하여 3D해석을 수행하였다. 터널 상부 및 측벽에 강관다단 보강그라우팅을 적용시에 대한 안정성을 검토하였고, Mohr-Coulomb 파괴기준에 의한 탄소성 해석을 수행하였다. 횡방향으로 구조물직경의 3.0D 이상, 하부는 3.0D 이상, 상부는 지표면까지를 해석영역으로 설정하여 가능한 실제지형과 같은 지반상태가 되도록 설정하였으며, DB24 도로하중을 적용시켜서 Fig. 6과 같이 모델링하고 해석을 수행하였다.

Fig. 6. Diagram of Panel

Fig. 7. Displacement of Panel Tunnel

Fig. 8. Bending Stress Diagram of H-Beam Bending Stress Degree

4.2 안정성 검토 결과

지반조건이 불리하르 굴진장 0.8 m당, 지반보강, 상부 패널 시공, 상반굴착 및 H빔 적용, 하반패널 적용, 하반굴착 및 H 빔 적용, 가설 H빔 제거 순으로 시공단계별로 모델링을 구성하여 안정성을 검토하였다.

국도 7호선의 전침하량, 부등침하량, 수평변위, 각변위에 대하여 안정성을 검토하였으며, 그 결과는 Figs. 7~10과 Tables 2~3에 나타내었다. 상부 도로 침하량검토시 침하량 1.22 mm로 침하기준인 13 mm의 약 1%로 나타났다.

Fig. 9. Bending Stress Diagram of Panel

Fig. 10. Shear Stress Diagram of Panel

Table 2. Allowance Management Standard of Road Displacement

Item	Standard	Result	Evaluation
Total	13.0 mm	1.220	O.K
Unequal	10.0 mm	1.781	O.K
Horizontal	15.0 mm	0.752	O.K
Angular	1/750	1/19,314	O.K

Table 3. Allowance Management Standard of Stress

Item		Standard (MPa)	Result (MPa)	Evaluation
H-beam	Bending Stress	190	119.66	O.K.
Panel	Bending stress	140	138.42	O.K.
	Shear stress	80	57.57	O.K.

터널시공 후 우각부를 제외한 최대H-beam 휨응력은 119.66 MPa으로 허용치 190 MPa보다 작아 안정한 결과를 나타낸다. 패널의 휨응력은 138.42 MPa으로 허용치 140 MPa보다 작아 안정한 결과를 나타내며, 전단응력은 57.57 MPa으로 허용치 80 MPa보다 작아 안정적인 것으로 나타났다.

패널구조물의 휨응력, 전단응력은 기준대비 62~72%로 안정적인 것으로 나타났다.

5. 국도 지표 침하량 및 안정성 검토 계측관리

상부 국도의 침하가 발생하고, 보강 후 굴착을 수행하는 구간으로 시공중, 후 안정성을 확인하기 위하여 지반침하 및 부재안정성 계측을 수행하였다. 계측기는 Figs. 11, 12와 같이 지보재(H-Beam)에 변형율계 48개소, 국도 지표에 지표 침하계 14개소, 굴착시 터널 내부에 천단 및 내공변위계 80개소를 설치하여 관리하였다. 으며, 터널굴착 영향권 6-7 m이 내 단면은 1일 2회 이상, 그 외 단면은 1주 2회 이상 계측하는 것으로 측정하여 침하 및 구조물의 안정성에 대한 영향을 평가하였다.

Fig. 11. Surface Settlement Installation Map

계측관리기준은 강재 허용응력, 지표침하량, 천단 및 내공 변위(국가철도공단, 관리요령)를 적용하여 Table 4와 같이 계측기준을 정리 하였다.

Fig. 13은 터널 내부 지보 H빔에 설치한 변형율계 계측결과이다. 터널내부 지보 변화량은 23.08 - 53.79 MPa로 1차

Fig. 12. Strain Gauge Installation View Inside the Tunnel

Table 4. Road Displacement Allowable Management Criteria (Korea National Railway, 2008)

Category	Indicators	Level of Management	
		First (Safety)	Second (Caution)
Strain Gauge	Allowable compression on foundation & Tensile stresses	$80\% \times \text{Allowable Stress}$ = 105.6 MPa	$100\% \times \text{Allowable Stress}$ = 132 MPa
Surface settlement meter	Skepmton, 1955	17 mm	25 mm
Crown Settlement & Convergence meter	Application of Korea National Railway Measurement Manual	6.4 mm	8.0 mm

Fig. 13. Crown & Convergence Settlement Measurement Results

관리기준치(105.6 MPa) 이내의 안정적인 상태를 지속적으로 유지하는 것으로 나타났다.

Fig. 14는 경과일수별로 국도의 지표침하계 계측결과를 나타낸 것이다. 지표침하계 계측결과 s-14 침하계에서 최종 변화량 88 mm로 나타났고, S-7, 10, 11, 14는 시공 초기도로 침하 이후 계측값이 복구되지 않는 것을 알 수 있다. 나머지 10개의 지표침하계는 강판단단그라우팅보강등으로 지표침하량이 복구되고, 이후 터널 굴착시에도 1, 2차 관리기준 내에서 추가변위 없이 안정적인 상태로 계측이 마무리되었다.

Fig. 15는 터널내 천단침하, 내공변위를 계측한 결과를 나타낸 것이다. 침하 및 내공변위 또한 총 누적변화량은 1-4 mm 이내로, 터널 천단 및 내공은 굴착 시공 기간 내내 1차 관리기준(6.4 mm) 이내로 안정적인 상태로 계측되었다.

따라서 느슨한 지반의 등징으로 인해 상부도로 침하가

발생되는 이벤트가 발생하였으나, 그라우팅 등 주변지반의 안정화 이후 패널공법을 이용한 굴착작업시 상부도로 및 터널 내부의 안정성이 확보되는 것으로 확인되었다.

6. 결 론

최근 지하공간 개발이 급속하게 증가하고 있으며 이에 따른 특수하고 곤란한 시공조건을 자주 마주치게 된다. 지하 지장물이 가깝게 위치하거나 기초의 하부를 통과해야하거나 저토포 구간을 횡단해야 할 경우 혹은 교통량과 발파가 곤란한 경우 등을 들 수 있다. 이러한 경우들을 위하여 다양한 특수공법들이 개발되어 적용되고 있다. 그 중 최근에 Messer Shield공법을 기초로 한 패널공법의 개발 및 적용에 대하여 수치해석과 시공현장의 계측결과를 검토하였다. 패널공법은 타 공법에 비하여 비교적 간단하고 경제적이며 작업자의

Fig. 14. Strain Gauge Measurement Result

Fig. 15. Surface Settlement Measurement Result

안정성이 뛰어난 것으로 판단된다. 특히, 갑작스러운 지하수 유출 등 지반상태에 따라 패널에 의한 분할단면 형상, 횡수 및 굴진장 조정에 따른 곡선 노선 굴착에도 매우 유리하게 적용될 수 있는 것으로 나타났다.

본 논문은 느슨한 풍화도를 가진 한 현장에 대한 설계, 시공중 계측값을 검토한 것으로 향후 추가적인 연구가 진행 되면, 본 공법은 자갈, 전석층 또는 국부적으로 연암층이 포함된 복합지반의 경우에도 패널공법의 적용성이 늘어날 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 지원(과제번호: 21S GRP-B159279-02)로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

Derrick, P. (2001). *Tunneling to the future: The story of the great subway expansion that saved New York*. New York University Press.

Eum, K.Y., Yoon, H.T., Kim, J.S., and Park, S.G. (2015). Case study on field application of dsm in sosa

underground station. *The Magazine of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 63, No. 12, pp. 71-79.

Korea National Railway. (2008). *Measure management Rules for metropolitan area headquarters*.

Lehmann, G., and Bppler, K. (2010). Development tendencies in mechanised tunnelling review and developmenttendencies for shield machines with slurry and earth pressure. *Geomechanics and Tunnelling*, Vol. 3, No. 3, pp. 245-255. doi:10.1002/geot.201000022

Miura, K. (2003). Designand construction of mountain tunnels in Japan. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 18, No. 2-3, pp. 115-126. doi:10.1016/S0886-7798(03)00038-5

Wood, A.M. (2002). *Tunnelling: Management by Design*. Taylor & Francis.

Received	■	August 25, 2021
Revised	■	August 26, 2021
Accepted	■	September 6, 2021