

RPS공법을 이용한 철도횡단터널의 2차원수치해석 2-Dimensional Numerical Analysis of Crossing Tunnel under Railroad using Roof Panel Shield Method

신은철¹⁾, Shin, Eun-Chul, 노정민²⁾, Roh, Jeong-Min, 이은수³⁾, Lee, Eun-Soo,
김경모⁴⁾, Kim, Kyeong-Mo, 김중희⁵⁾, Kim, Jung-Hyi, 정병철⁶⁾, Jung, Byung-Chul

- 1) 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental System Engineering, University of Incheon.
- 2) 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental System Engineering, University of Incheon.
- 3) 보강기술(주) 기술고문, Technical Adviser, E&S Engineering Co. Ltd.
- 4) 보강기술(주) 기술연구소 선임연구원, Senior Researcher, E&S Engineering Co. Ltd.
- 5) 강릉건설주식회사 대표이사, President, Kang Nung Construction Co. Ltd.
- 6) 강릉건설주식회사 부사장, Vice-president, Kang Nung Construction Co. Ltd.

SYNOPSIS : There are many cross tunnelling methods such as NTR, TRCM, Messer Shield, Front Jacking, and Pipe Roof Method. The advantages of adopting RPS(roof panel shield) method in crossing tunnel construction with comparing other existing cross tunnelling method are needed a little space and easy to change the direction of cutting shoe during the construction of pipe roof. The numerical analysis of RPS was performed for the application in the crossing tunnel under railroad. The earth pressure distribution and settlement were predicted when the RPS method was applied during the excavation for crossing railroad tunnel construction.

Keywords : crossing tunnel, numerical analysis, RPS(roof panel shield)

1. 서론

최근 도로나 철도 등의 교통시설로 인하여 주위 환경과 단절된 곳에서 이동을 용이하게 하기 위하여 횡단터널의 시공이 증가 하고 있다. 도로, 철도, 제방 등과 같은 시설의 지하를 굴착하여 횡단터널을 시공하는 것은 기존시설의 기능을 저해하지 않고 시공이 이루어져야 한다. 이러한 목적으로 기존에 개발되고 시공된 공법들 중에는 NTR공법, TRCM공법, Pipe Roof공법, Front Jacking공법, Messer Shield공법 등이 있다. RPS 공법은 기존공법들의 단점을 보완하여 불필요한 콘크리트 타설량을 줄이고, 간편한 기계설비와 플랜트로 다른 공법에 비해 작업공간이 적게 소요되고, Roof 시공 시 선단슈를 통한 방향전환이 가능한 공법으로 개발되었다. 그리고, 기존의 Messer Shield 공법보다 지보간격이 넓어 경제성 및 시공성이 우수하다. 일반 철도의 단면을 횡단하는 터널에 RPS 공법을 적용하고자 RPS 공법의 시공을 모사하여 수치해석을 실시하였다. 본 연구에서는 수치해석을 통하여 RPS 공법의 시공 시 발생하는 토압분포와 침하량, 변위를 예측하여 정량적인 시공효과와 안전성을 평가하였다.

2. Roof Panel Shield 공법

2.1 공법의 개요

상부에 교통의 흐름이 있는 장소에 지하구조물을 구축하기 위해서는 상부 교통흐름 등에 지장을 주지 않도록 굴착공간을 최소로 해야 하며, 지상 구조물 및 교통의 흐름에 피해가 가지 않도록 침하를 방지하여야 한다. RPS 공법은 구조물 예정상단부에 강관을 압입하면서 오거로 굴착하거나 소구경 쉘드를 이용하여 Roof를 설치함으로써 침하를 방지하고, 측벽은 Panel을 이용하여 굴착함으로써 여굴의 최소화 및 곡선부 시공을 용이하게 하였다. Roof 하부 측면에 유압 Panel로서 선추진 한 후 측벽 토압을 강지보와 토류관이 지지하고 인력이 아닌 장비로 전체 한 단면을 굴착한 후 굴착면 끝부분에 강지보재를 설치하면서 강지보재 사이에 토류관 및 1차 콘크리트를 타설하여 상부 및 측벽의 하중을 받도록 하였다. 이 작업을 계속 반복하면서 전체 굴착이 끝나면 철근 콘크리트로 구조물 본체를 형성하는 공법이다.

2.2 시공과정

2.2.1 Roof의 추진

Roof의 추진 작업은 토질조건에 따라서 RPS Roof 공법, 퍼쿠 선공법, 소구경 EPB 공법을 적용하여 추진한다. 일반적인 토사구간에서는 RPS Roof 공법을, 사석구간에서는 퍼쿠선 공법을, 풍화암층에서는 EPB 공법을 적용한다. RPS Roof 공법은 기존 파이프 압입공법에서 거의 불가능했던 방향수정 및 장거리 굴착(100m이상)을 가능하도록 연구 개발된 공법이다. 기존의 파이프 압입공법은 강관을 주로 사용하고 있으나 RPS Roof 공법은 스크린과 슈가 달린 선통부를 추진하면서 시공되므로 강관과 콘크리트관 모두 적용이 가능하며 선통내부에 장착된 굴착장비로 굴착한 후 관을 압입 시공함으로써 기존의 파이프 압입공법에서 불가능하였던 장거리 굴착이 가능한 공법이다.

RPS Roof 공법은 기존의 파이프 압입공법에 비해 추진관 압입시 발생하는 관주변의 마찰저항력이 작으므로 강관 파이프의 두께를 줄일 수 있다. 현장여건에 맞게 RPS Roof 장비를 맞춤 제작함으로써 추진관의 형상이 사각형, 아치형 및 원형 등 형상에 관계없이 시공이 가능하다. 굴착작업 중 방향조정(상하좌우로 30mm/m정도)이 가능하며 레이저 측정기 부착 등으로 굴착작업의 정밀도를 높일 수 있다. 토사지반에서는 토사굴착에 적합하게 제작된 장대 스크류를 이용하여 굴착하고, 암반에서는 비트 부착 장대 스크류와 Road Header나 Beaker를 유연하게 이용하여 EPB 공법으로 굴착함으로써 변화가 심한 국내지반조건에 대처할 수 있으며, 인력굴착과 기계굴착을 병용함으로써 국내의 시공여건과 작업의 효율을 극대화 시킬 수 있다. 압입할 추진관의 직경이 클 경우에도 유압잭을 4방향에서 가압함으로써 편심이 발생하지 않으며, 버력처리를 콘베이어 시스템에 의해 자동화함으로써 버력처리의 효율성을 향상 시켰다. 그림 1은 특수 강관을 나타낸 그림으로 강관상호간에 연결부를 만들어 결속력을 강화하였다. 그림 2는 RPS Roof 공법에서 강관 추진 장비의 개략적인 구성을 나타낸 모식도이다. Front Jacking 공법 등의 타공법에서는 직경이 700mm이상인 강관을 사용하지만 RPS 공법에서는 토질조건에 따라서 직경이 300mm~600mm인 강관을 사용하여 경제성을 도모하였다.

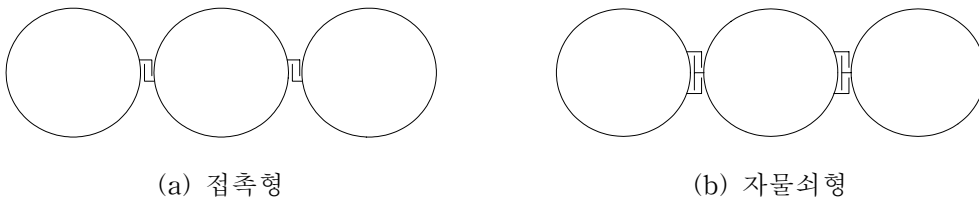
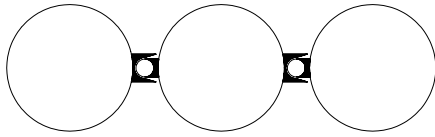
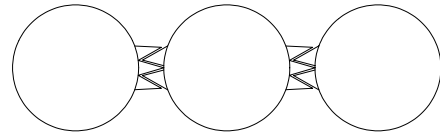


그림 1. RPS Roof에 사용되는 특수 강관 단면



(c) Pipe 연결형



(d) 톱니바퀴형

그림 1. RPS Roof에 사용되는 특수 강관 단면(계속)

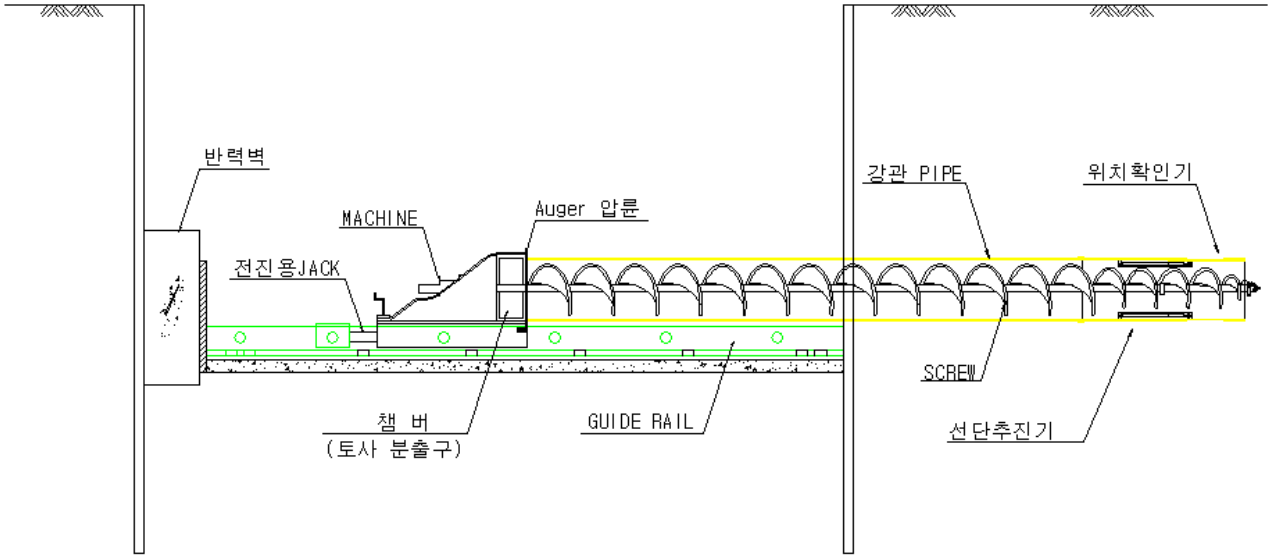


그림 2. RPS Roof의 추진장비

2.2.2 Grouting 및 Roof 강관내 몰탈 타설

그림 3은 강관사이를 그라우팅하고 강관의 내부를 몰탈로 채운 것을 나타내는 그림이다. 강관 상호간 거동의 일체화, 결속력의 증대, 상부 지반으로 부터의 용수누출을 방지하여 지반의 침하를 최소화하기 위하여 강관사이를 Grouting하고 내부를 몰탈로 채운다. 그림 4는 성토단면에서 강관의 추진을 위해 강관 추진 작업구를 굴착하고 Roof를 시공한 것을 나타내는 그림이다.

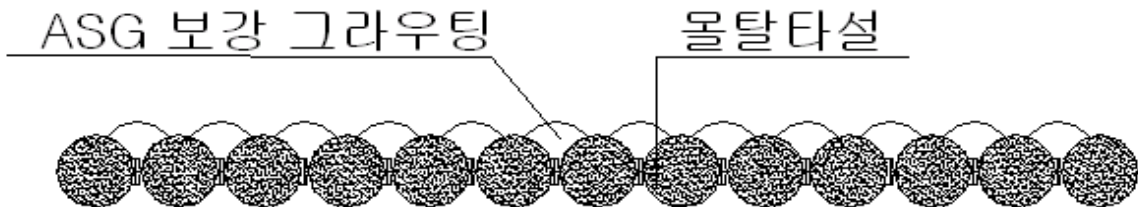


그림 3. Roof의 내부 몰탈타설과 ASG 보강 그라우팅

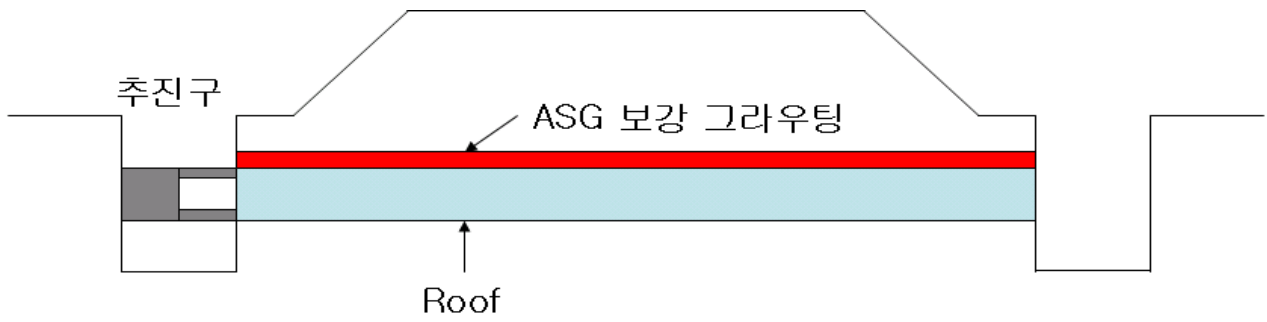


그림 4. Roof의 추진

2.2.3 단면의 굴착

굴착하고자 하는 터널 단면에 Panel이 추진할 수 있는 발진구 가시설작업을 진행한다. 가시설 작업이 완료되면 굴착하고자 하는 터널 단면에 맞추어서 지보공을 실시한 후 광폭의 유압식 Panel 추진기를 측면에 설치한다(그림 5). 그 후 Panel을 단계적으로 추진하여 PC토류관을 설치하고 췌기를 이용하여 밀착시킨다. 그림 6은 반력벽을 설치하고 Panel을 추진하는 것을 측면도로 나타낸 것이다. 그림 7과 같이 Panel 추진기는 유압을 이용하여 추진하고 분리가 될 수 있도록 제작되었으며 꼬리부분에는 PC토류관을 끼울 수 있도록 만들어 추진한 길이로 꼬리부분의 공간을 조절하여 지보간격을 조정할 수 있다. 그림 6과 같이 상부에 하중이 있을 때는 지보의 간격을 줄여서 상부하중에 견딜수 있도록 조정할 수 있다. PC토류관을 밀착시킨 후 굴착, 지보공, Panel추진, PC토류관의 설치과정을 반복하여 굴착을 완료한다.

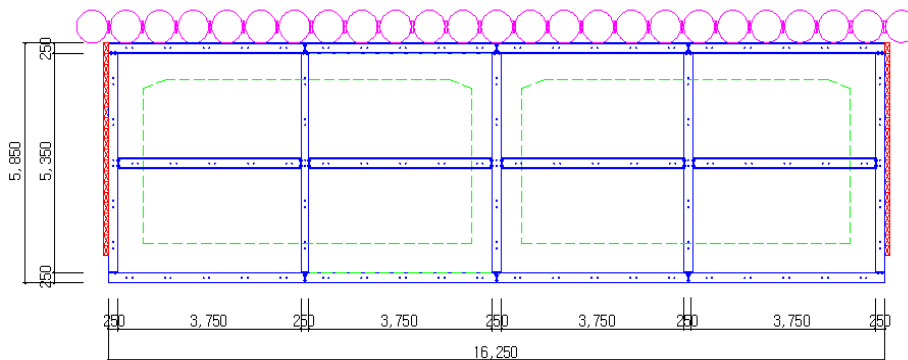


그림 5. RPS 터널 굴진 단면

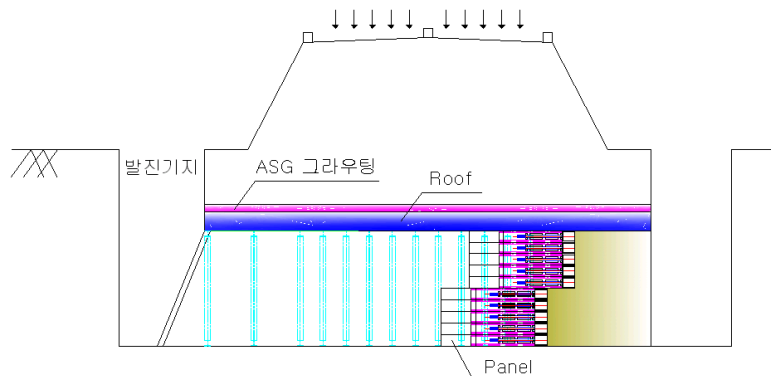


그림 6. Panel 굴진의 측면도

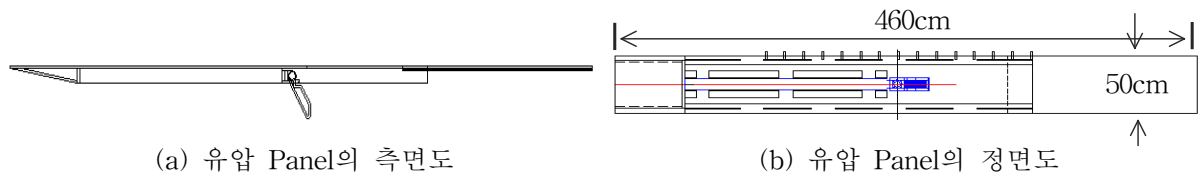


그림 7. Panel 추진기의 단면도

2.2.4 터널단면의 완성

위와 같은 과정을 통하여 굴착을 완료한 후 1차 라이닝을 실시한다(그림 8). 그 후 중단 형강 및 사보 강재를 해체한 다음 방수 및 본체 콘크리트를 타설하여 시공을 완료한다(그림 9). 본체 콘크리트의 타설은 바닥면과 측면을 타설한 후 단면의 상부를 타설한다.

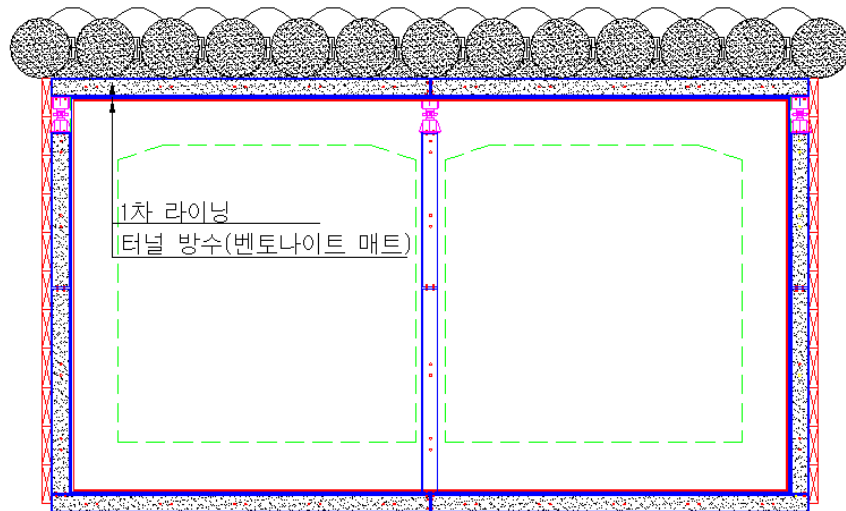


그림 8. 굴착완료 후 1차 라이닝의 타설

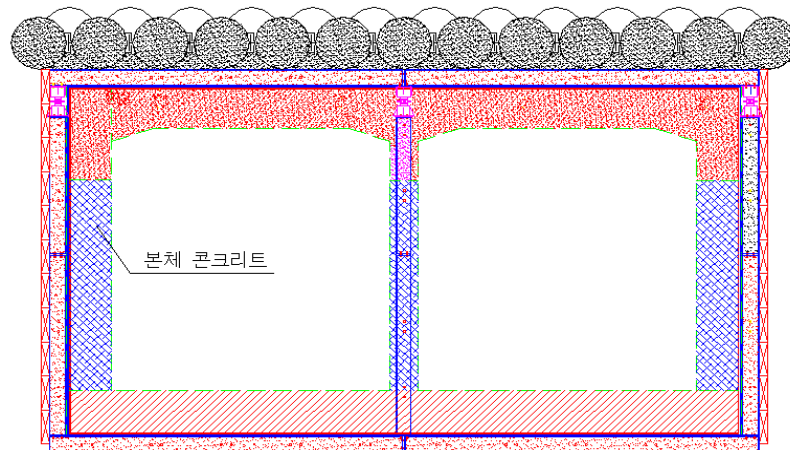


그림 9. 본체 콘크리트의 타설

3. 수치해석

3.1 개요

본 수치 해석의 적용지반은 토피고가 3m, 일반 토층이 0~3m, 풍화토층이 3~9m로 구성된 지반을 가정하여 해석하였다. 해석 단계는 원지반 응력상태를 재현하기 위한 초기화단계, 좌측 Panel의 압입과 굴착단계, H형강 지보, 우측 Panel의 압입과 굴착단계, H형강 지보의 순서로 해석을 실시하였다. 본 연구의 수치해석은 시공 단계별로 토압의 분포 및 변위를 분석하기 위하여 유한차분해석을 수행하였다. 사용된 프로그램은 범용 지반해석 프로그램인 유한차분해석 프로그램 FLAC 2D Version 4.0을 사용하였다.

3.2 입력자료

본 수치해석 검토에서 적용한 지반재료의 기본 물성치는 지반조사 보고서 및 논문을 참고로 하여 일반토층, 풍화토, 풍화암의 토질정수 값을 산정하였다. 다음 표 1과 2는 지반 및 굴착에 사용된 토질정수와 기본 물성치 값을 나타낸 것이다. 지반 상부의 열차하중은 LS-22를 사용하였으며 사하중 및 활하중을 고려하여 단위폭당 50 kN/m^2 의 면하중을 상부 지표면에 상재하중으로 적용하였다. 그림 10은 지반과 RPS 공법의 단면을 모사한 메쉬를 나타낸 것이다. 열차의 활하중계산은 다음과 같다.

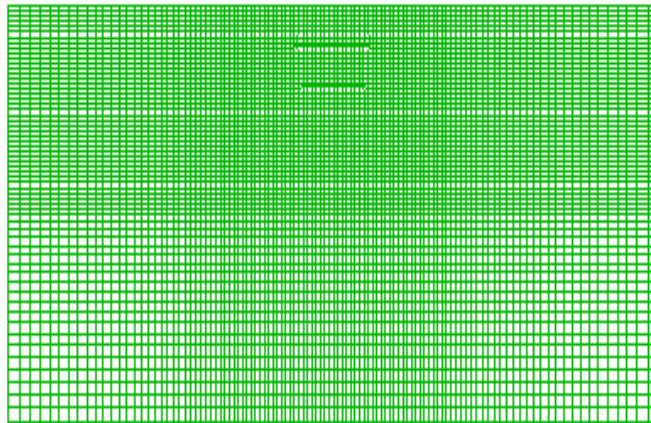


그림 10. 해석 메쉬

$H_e \geq 0.5\text{m}$ 일 때,

$$W_L = \frac{2P}{d[c+b+2(d+H_e)]}$$

여기서, H_e = F.L(Formation Level)에서의 토피고(m)

W_L = 활하중(kN/m^2)

P = 축중량(kN)

a = 동륜의 축간거리(m)

b = 침목의 길이(m)

c = 복선선로 중심간격(m)

d = 침목하면의 도상두께(m)

따라서, 축중량은 LS-22하중을 사용함으로 220 kN을 적용하고, 축간거리는 1.5m, 침목의 길이는 2.5m, 복선선로 중심간격은 4m, 침목하면의 도상두께는 0.3m, F.L에서의 토피고는 0.5m를 적용하여 36.2 kN/m²의 하중을 계산하였으며 여유를 두어 50 kN/m²의 하중을 적용하였다.

표 1. 지반의 토질정수

| 토질정수 토질종류 | γ_i (kN/m ³) | ν | E_s (kN/m ²) | ϕ (°) | c (kN/m ²) |
|--------------|------------------------------------|-------|-------------------------------|---------------|-----------------------------|
| 일반토사 | 18 | 0.35 | 10,000 | 30 | - |
| 풍화토 | 19 | 0.35 | 100,000 | 35 | 10 |
| 풍화암 | 21 | 0.35 | 140,000 | 35 | 30 |

표 2. Panel과 지보의 물성치

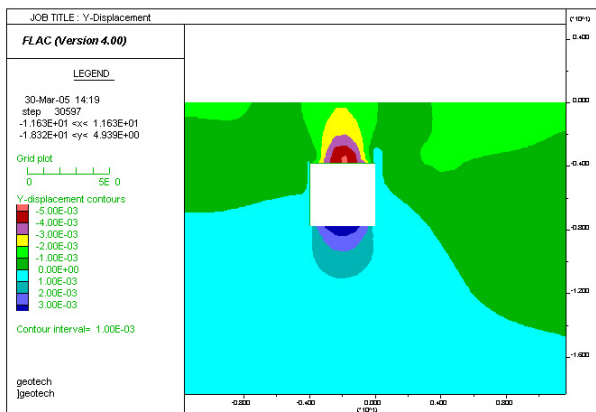
| | 탄성계수(kN/m ²) | 단면적(m ²) | 단면이차모멘트(m ⁴) |
|--------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|
| H-250×250×14 | 200,000,000 | 9.218e-3 | 1.08e-4 |
| Panel | 200,000,000 | 1.200e-1 | 1.44e-4 |

3.3 수치해석 결과

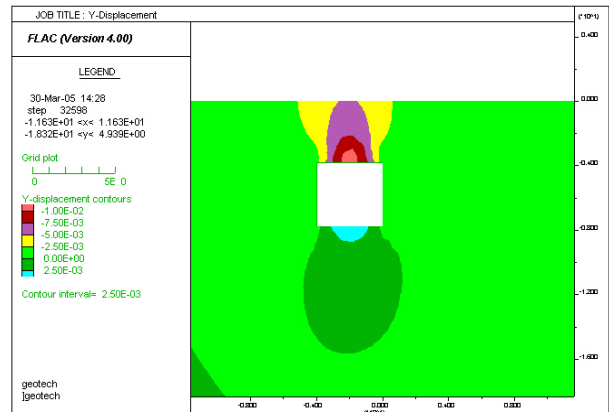
최중변위는 좌측굴착면 지표에서 -4.496 mm, 천단에서 -1.002mm, 저면에서 +5.029mm가 발생하였고, 우측굴착면 지표에서 -6.303mm, 천단에서 -1.203mm, 저면에서 +5.168mm로 발생되었다. 표 3은 변위를 표로 나타낸 것으로 침하량은 10mm 이내로 안정된 값을 나타내었다. 그림 11의 수직변위를 시공단계별로 살펴보면 좌측단면보다 우측단면으로 치우친 경향을 나타내었다. 이것을 그림 12의 X축 변위도와 그림 13의 변위벡터에서 알 수 있듯이 좌측단면을 굴착한 후 우측단면을 굴착하였기 때문에 좌측단면의 하중이 우측단면으로 전이되어 발생한 것으로 판단된다. 그림 14는 시공 완료 후 지표면의 침하를 단면 중심에서의 거리에 대하여 나타낸 것으로 좌측의 굴착단면보다 우측의 굴착단면에서 침하가 조금 더 발생한 것을 볼 수 있고, 최대침하의 발생지점은 중심에서 약간 우측에서 발생한 것을 알 수 있다.

표 3. 굴착면 주위의 변위

| 위치 | 좌측단면 | | | | 우측단면 | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 지표 | 천단 | 저면 | 좌측면 | 지표 | 천단 | 저면 | 우측면 |
| 변위 (mm) | -4.496 | -1.002 | +5.029 | +5.288 | -6.303 | -1.203 | +5.168 | -5.087 |

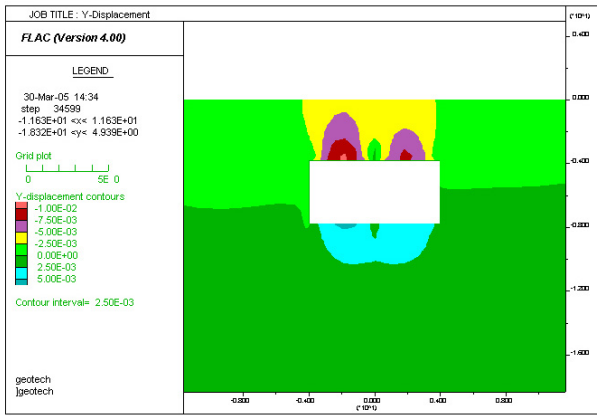


(a) 좌측단면 굴착시 Y방향 변위도

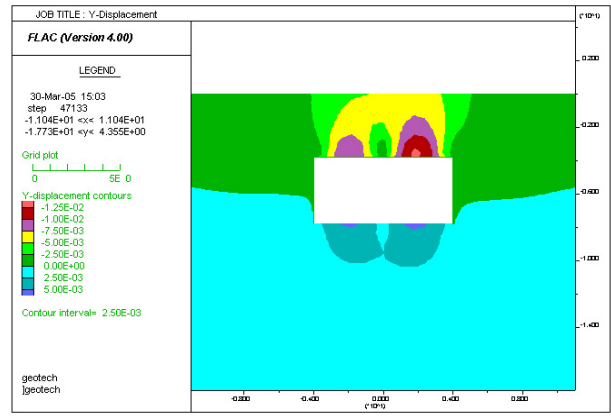


(b) 좌측단면 빔보강시 Y방향 변위도

그림 11. 시공단계별 Y방향 변위도

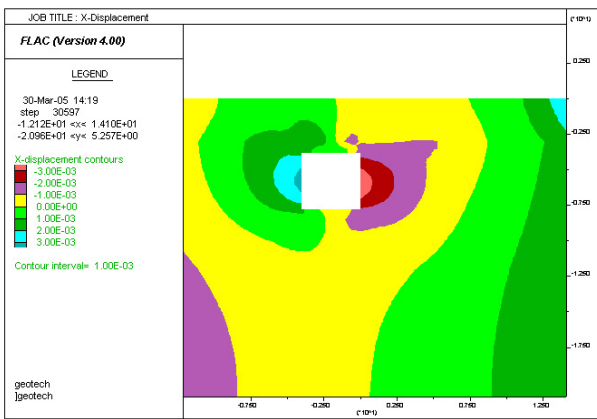


(c) 우측단면 굴착시 Y방향 변위도

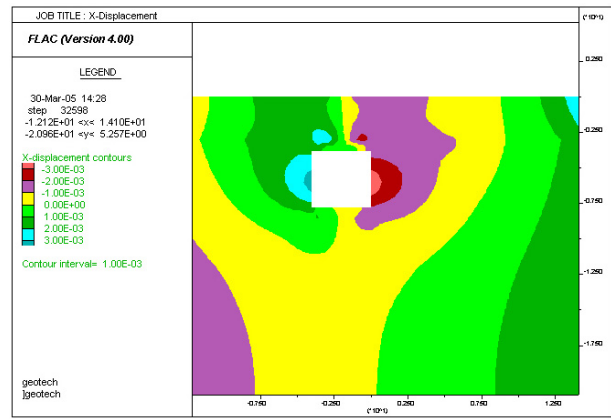


(d) 우측단면 빔보강시 Y방향 변위도

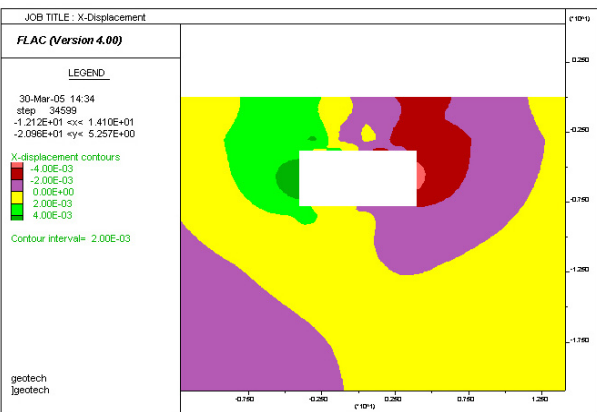
그림 11. 시공단계별 Y방향 변위도(계속)



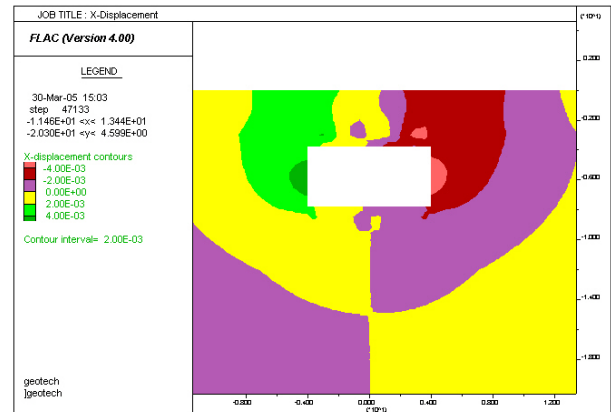
(a) 좌측단면 굴착시 X방향 변위도



(b) 좌측단면 빔보강시 X방향 변위도

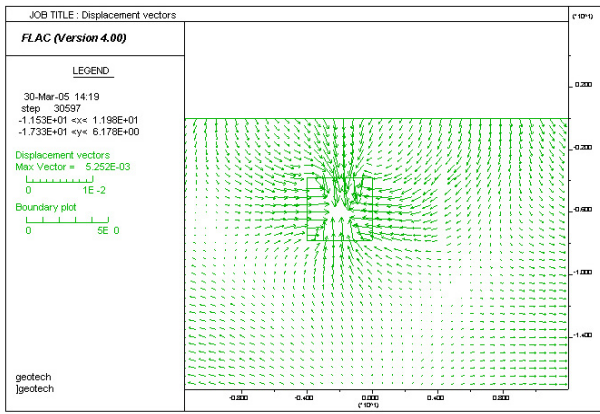


(c) 우측단면 굴착시 X방향 변위도

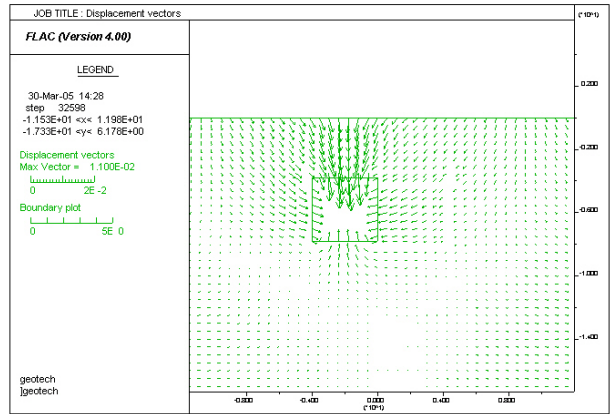


(d) 우측단면 빔보강시 X방향 변위도

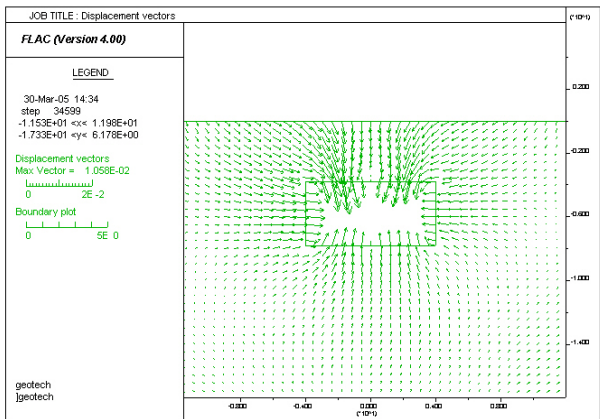
그림 12. 시공단계별 X방향 변위도



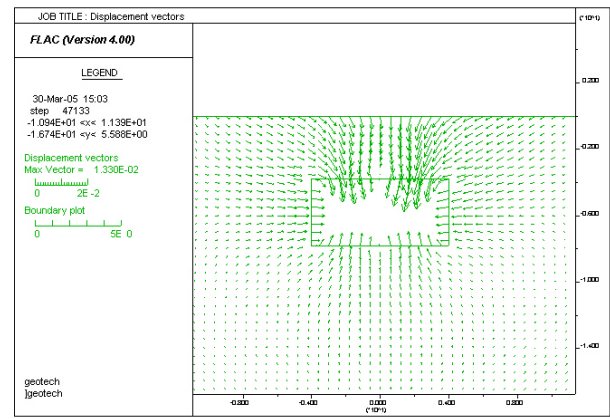
(a) 좌측단면 굴착시 변위 벡터



(b) 좌측단면 빔보강시 변위 벡터



(c) 우측단면 굴착시 변위 벡터



(d) 우측단면 빔보강시 변위 벡터

그림 13. 시공단계별 변위 벡터

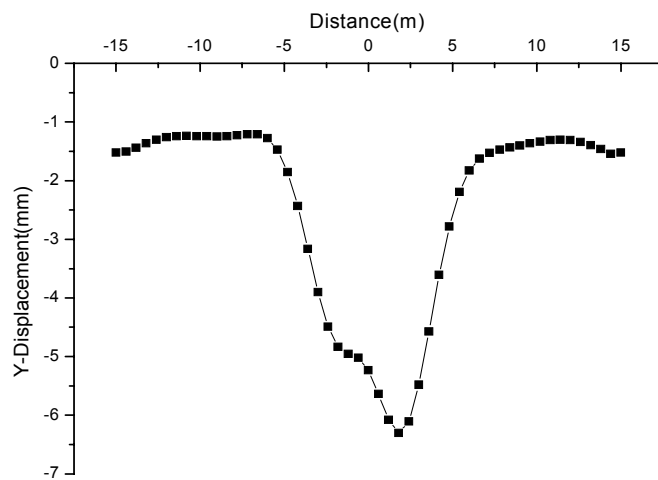


그림 14. 중심 거리에 따른 지표의 침하량

4. 결 론

본 연구에서는 철도지반의 지하를 횡단하는 Roof Panel Shield공법에 대하여 수치해석을 실시하였고, 변위량과 응력분포를 산정하였다. 이를 통하여 Roof Panel Shield 공법의 현장 적용성을 판단하였다.

1. 지표의 침하는 좌측부에서 -4.496mm , 우측부에서 -6.303mm 로 나타났고, 최대 -6.303mm 로 나타났다. 굴착 저면의 용기는 좌측부에서 -5.029mm , 우측부에서 -5.168mm 로 나타났다. RPS 공법의 시공으로 인한 상부에 대한 영향은 최대 지표 침하량이 6.303mm 로 국철의 선로보수기준인 7mm 이하로 영향이 거의 없는 것으로 판단된다.
2. Y축에 대한 변위는 변위도와 변위벡터도를 살펴보면, 좌측 단면과 우측 단면의 지보 중간 부분에서 각각 최대 침하가 발생하기 때문에 급격한 굴착진행시 지표의 변형을 일으킬 가능성이 있다. 선굴착 단면을 굴착한 후 후굴착 단면을 굴착할 때 변위벡터가 후굴착면으로 약간 치우치는 경향을 보임으로 후굴착면을 굴착할 때 보다 세심한 주의가 필요하다.
4. RPS 공법은 지표의 침하량이 허용치 이내로 산정되었고, 타공법에 비하여 측면의 여굴 및 con'c의 타설량이 적어 공사비가 저렴하며 적은 지상작업구 공간을 필요로함으로 앞으로 많은 활용이 기대된다.

참고문헌

1. 건설교통부, "철도설계기준(노반편)", 대한토목학회, pp. 157~219, 2004.
2. 문상호, 문현구, "합리적인 축압계수 결정을 위한 인공신경 전문가 시스템의 개발", 한국지반공학회 논문집 15권 1호, pp. 99~112, 1999.
3. 백승한, 문현구, "터널링에 의한 암반-지보 반응거동에 관한 연구", 한국암반공학회, 터널과지하공간, Vol. 8, pp. 321~331, 1998.
4. (사)한국터널공학회, "N.T.R(NEW TUB ULAR ROOF)공법의 국내 적용성 연구", (주)한국엔티에스, 2002.
5. 엄기영, 민경주, 신민호, 양재성, 황선근, 이준석, 이성혁, 이일화, 방춘석, 최일윤, 엄주환, 최준규, 고태훈, "철도지하 횡단공사 공법선정 기준에 관한 연구", 철도청, 1999.
6. 엄기영, "PCR/URT/JES/TRM공법특성분석", 한국지반공학회지, 제 16권, 제 9호, pp. 36~43, 2000.
7. 엄기영, 신민호, 김지훈, "철도지하횡단공사시 현장계측을 통한 지반거동 분석", 한국철도학회01 추계 학술대회 논문집, pp. 546~551, 2001.
8. 엄기영, 신민호, 최성규, 정홍채, 유원희, 이준석, 윤희택, 이성혁, 이진욱, 고태훈, 이일화, 문형석, 김지훈, 박명준, "철도지하횡단공사 JES공법의 현장적용 방안 제시에 관한 연구", 한국철도기술연구원, 2002.
9. 이인모, 터널의 지반공학적 원리, 도서출판새론, pp. 78~119, 2004.
10. 이송, 안성학, 안태훈, "터널 설계를 위한 지반응답곡선", 한국구조물진단학회 제 7권 제 1호, pp.181~190, 2003.