

3차원 수치해석을 이용한 RPS 공법의 적용성 평가

Estimation of RPS Method Using 3-Dimensional Numerical Analysis

신은철* · 노정민*

Eun-Chul Shin · Jeong-Min Roh

Abstract

Recently, the crossing tunnel has been constructed frequently to connect the separated area by highway and railroad. The construction of crossing tunnel must be progressed while maintaining the existing traffic of the highway as well as railroad. 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 methods are needed a little volume of concrete and easy to change the direction of cutting shoe during the construction of pipe roof. The 3-dimensional numerical analysis of RPS to consider the arching effect 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(횡단터널), Numerical Analysis(수치해석), RPS Method(RPS 공법)

1. 서론

최근 성토하여 시공한 도로나 철도 등의 교통시설은 주위 환경과의 단절을 유발하기 때문에 이러한 곳에서 교통을 용이하게 하기 위하여 횡단터널의 시공이 증가하고 있다. 철도, 도로, 제방 등과 같은 시설의 지하를 굴착하여 횡단터널을 시공하는 것은 교통의 흐름 등 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 보완한 공법으로서 측면을 Panel로 시공하여 불필요한 콘크리트 타설량을 줄이고, 간편한 기계설비와 플랜트로 다른 공법에 비해 작업공간이 적게 소요된다. 또한, Roof 시공 시 선단슈를 통한 방향전환이 가능한 공법으로 개발되었다. 그리고, 기존의 Messer Shield 공법보다 지보간격이 넓어 경제성 및 시공성이 우수하다. 일반 철도의 성토단면을 횡단하는 터널에

RPS(Roof Panel Shield) 공법을 적용하고자 RPS 공법의 시공을 Panel의 관입, 굴착, 지보의 3단계로 묘사하여 3차원 수치해석을 실시하였다. RPS 공법에 대한 기존의 연구는 2차원 수치해석을 통하여 이루어진 것으로 Roof에 의한 종방향 아칭효과를 고려하기가 곤란하였다[6,7]. 본 연구에서는 3차원 수치해석을 통하여 실제와 유사한 시공단계를 묘사하여 해석을 수행함으로써 Roof에 의한 종방향 아칭효과와 RPS 공법의 시공 시 발생하는 토압의 분포와 지표의 침하량, 단면의 변위를 해석하여 정량적인 시공효과와 안전성을 평가하였다.

2. 수치해석

2.1 RPS 공법의 시공 과정

Roof의 추진 작업은 토질조건에 따라서 RPS Roof 공법, 퍼쿠션 공법, 소구경 EPB 공법을 적용하여 추진한다. 기존의 파이프 압입공법은 강관을 주로 사용하고 있으나 RPS Roof 공법은 스크린과 슈가 달린 선통부를 추진하면서 시공되므로 강관과 콘크리트관 모두 적용이 가능하며 선통내부에 장착된 굴착장비로 굴착 후 관을 압입 시공함으로써

* 책임저자 : 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수
* 정회원, 인천대학교 토목환경시스템공학과 대학원, (주)오주엔지니어링
E-mail : jjeong97@magin.com
TEL : (032)770-4383 FAX : (032)765-6551

기존의 파이프 압입공법에서 불가능하였던 장거리 굴착이 가능한 공법이다.

RPS Roof 공법은 기존의 파이프 압입공법에 비해 추진관 압입 시 발생하는 관주변의 마찰저항력이 작으므로 강관 파이프의 두께를 줄일 수 있다. 굴착작업 중 방향조정(상하좌우로 30mm/m 정도)이 가능하며 레이저 측정기 부착 등으로 굴착작업의 정밀도를 높일 수 있다. 그림 1은 특수 강관의 단면도를 나타낸 것으로서 강관상호간에 연결부를 만들어 결속력을 강화하였다. Front Jacking 공법 등의 타공법에서는 직경이 1.5m~3m인 강관을 사용하지만 RPS 공법에서는 토질조건에 따라서 직경이 600mm~1,500mm인 강관을 사용하여 경제성을 도모하였다. Roof의 시공을 완료한 후 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. 그 후 Panel을 단계적으로 추진하여 굴착하고, 지보와 PC토류판을 설치하며 썰기를 이용하여 밀착시킨다. 그림 2와 같이 Panel 추진기는 유압을 이용하여 추진하고 분리가 될 수 있도록 제작되었으며, 꼬리부분에는 PC토류판을 끼울 수 있도록 만들어 추진한 길이로 꼬리부분의 공간을 조절하여 지보간격을 조정할 수 있다. PC토류판을 밀착시킨 후 굴착, 지보공, Panel추진, PC토류판의 설치과정을 반복하여 굴착을 완

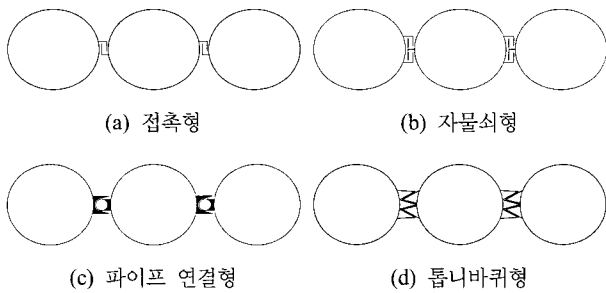


그림 1. RPS Roof에 사용되는 특수 강관 단면

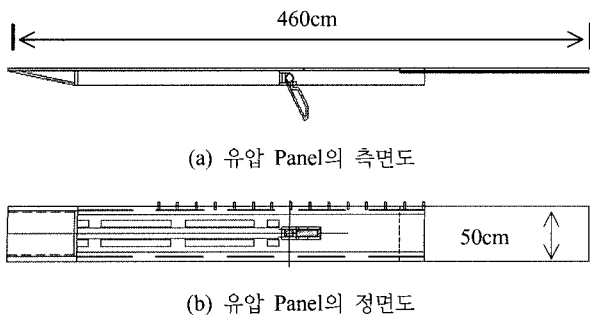


그림 2. Panel 추진기의 단면도

료한다.

2.2 수치해석의 개요

본 수치 해석의 적용지반은 깊이가 30m, 굴착진행 방향의 횡방향으로 80m, 종방향으로 24m로 모델링하였다. 해석 지반의 상태는 풍화토층이 0~15m, 풍화암층이 15~25m, 연암층이 25m~30m로 구성된 지반(그림 3)으로 가정하였으며 토피고는 3m로 해석하였다. 해석 단계는 원지반 응력상태를 재현하기 위한 초기화단계, 단면을 좌측 상단부터 8단면(그림 4)으로 나누어 굴착하였고, 굴착과정은 시공순서에 따라 Panel의 압입과 굴착단계, H형강 지보, 토류판 시공의 순서로 굴착하는 것으로 해석을 실시하였다. 본 연구의 수치해석은 시공 단계별로 토압의 분포 및 변위를 분석하기 위하여 유한요소해석을 수행하였으며, 유한요소해석 프로그램인 MIDAS/GTS Version 1.1.0을 사용하였다. 수치해석 검토에서 적용한 지반재료의 기본 물성치는 지반조사 보고서 및 논문을 참고로 하여 풍화토, 풍화암, 연암의 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 $5.0t/m^2$ 의 면하중을 해석 모델 상부의 지표면에 상재하중으로 적용하였고, 다음의 식을 이용하여 계산하였다(철도설계기준(노반편), 2004).

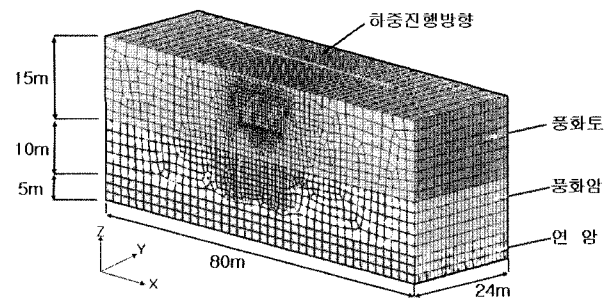


그림 3. 해석에 사용된 모델

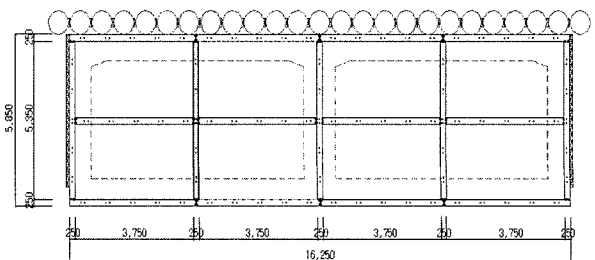


그림 4. 해석에 사용된 RPS 공법의 굴착단면

표 1. 해석에 사용된 토질정수

토질정수	토질종류	풍화토	풍화암	연암
$\gamma_t(t/m^3)$		1.9	2.1	2.4
ν		0.32	0.3	0.28
$E_s(t/m^2)$		10,000	30,000	200,000
$\phi(^{\circ})$		35	38	40
$c(t/m^3)$		1	3	10

표 2. 지보와 Panel의 물성치

	H-250×250×14	Panel
$E(t/m^2)$	20,000,000	20,000,000
단면적(m^2)	9.218e-3	1.200e-1
단면2차모멘트(m^4)	1.08e-4	1.44e-4

$H_e \geq 0.5m$ 일 때,

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

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

W_L = 활하중(t/m^2)

P = 축중량

a = 동륜의 축간거리(m)

b = 침목의 길이(m)

c = 복선선로 중심간격(m)

d = 침목하면의 도상두께(m)

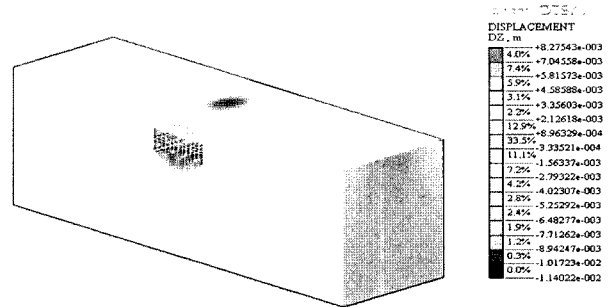
해석에 사용된 모델의 요소수는 약 53,000개이며, 경계조건은 각각의 축에 수직인 면에 대하여 그 축방향 변위를 고정하였다. 본 연구의 RPS 공법 해석과정에는 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 굴착은 좌우측 상부의 단면을 굴착한 후 하부를 굴착하고 중심부의 상부와 하부를 굴착하는 것으로 해석하였다.

3. 수치해석 결과

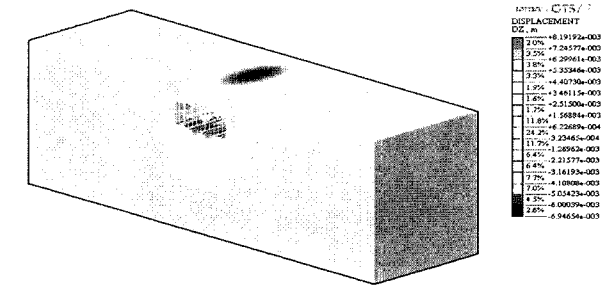
철도 단면에 대하여 강관의 직경은 600mm, 지보의 간격은 1m로 적용하였을 경우, 최종단계에서 최대변위는 지표에서 -10.25mm, 굴착저면에서 +8.27mm, 좌측면에서 +3.11mm, 우측면에서 -2.98mm로 발생하였다. 이 경우 침하량은 10.25mm로 선로보수기준인 7mm와 철도기술연구원에서 정하고 있는 침하량 10mm보다 약간 초과되어 나타났다. 강관의 직경을 1,000mm, 지보의 간격은 1m로 적용하였을 경우, 최종단계에

표 3. 굴착 완료단계에서의 변위

강관의 직경(mm)	600	1,000
지보의 간격(m)	1	1
지표최대변위(mm)	-10.25	-6.31
천단최대변위(mm)	-8.57	-6.90
저면최대변위(mm)	+8.27	+8.19
좌측면최대변위(mm)	+3.11	+2.44
우측면최대변위(mm)	-2.98	-2.51



(a) 지보간격 1m와 강관직경 600mm

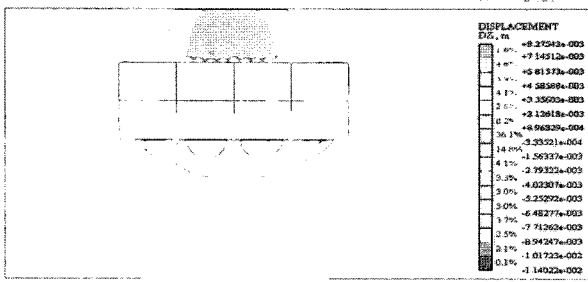


(b) 지보간격 1m와 강관직경 1,000mm

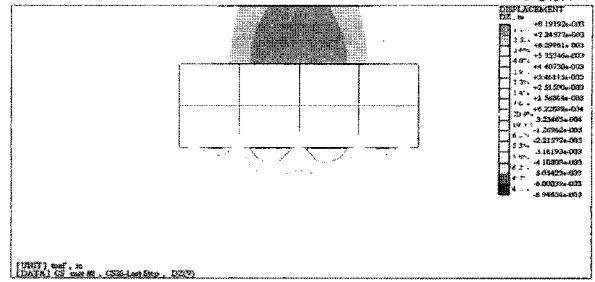
그림 5. 최종단계의 수직 변위(m)

서 최대변위는 지표에서 -6.31mm, 굴착저면에서 +8.19mm, 좌측면에서 +2.44mm, 우측면에서 -2.51mm 로 발생하였다. 지보의 간격을 1m로하고, 강관의 직경을 1,000mm로 하였을 경우에는 선로보수기준과 철도기술연구원의 기준을 만족하는 것으로 해석되었다. 표 3은 해석결과를 정리하여 나타낸 것이다.

그림 5는 최종단계에서의 수직변위의 분포를 나타낸 것이고, 그림 6과 그림 7은 최종단계에서의 수직변위를 굴착방향에 대하여 중심점을 기준으로 횡방향과 종방향으로 자른 단면을 나타낸 것이다. 그림 8은 최종단계에서 일정한 변위가 발생한 형상을 면으로 나타낸 것으로 최대 변위는 루프의 상부 중심에서 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 9는 최종단계에서의 횡방향 변위와 토압을 나타낸 것으로 굴착단면

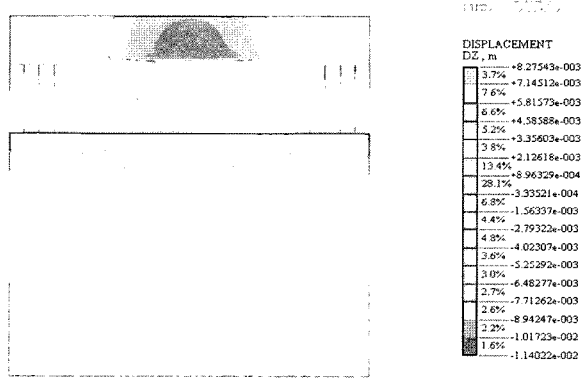


(a) 지보간격 1m와 강관직경 600mm

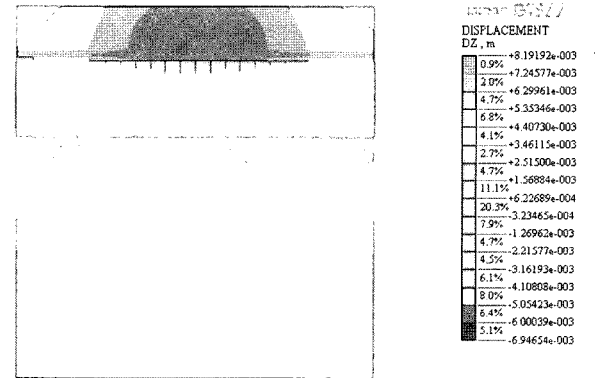


(b) 지보간격 1m와 강관직경 1,000mm

그림 6. 최종단계에서 굴착방향의 횡방향 단면 수직 변위(m)

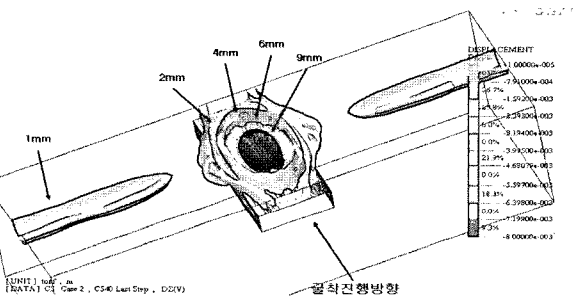


(a) 지보간격 1m와 강관직경 600mm

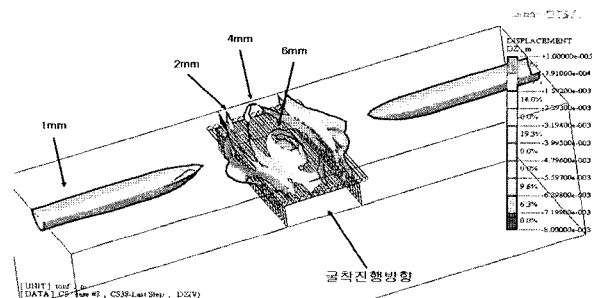


(b) 지보간격 1m와 강관직경 1,000mm

그림 7. 최종단계에서 굴착방향의 종방향 단면 수직변위(m)

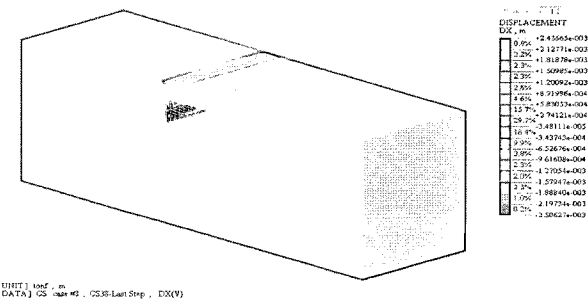


(a) 지보간격 1m, 강관직경 600mm

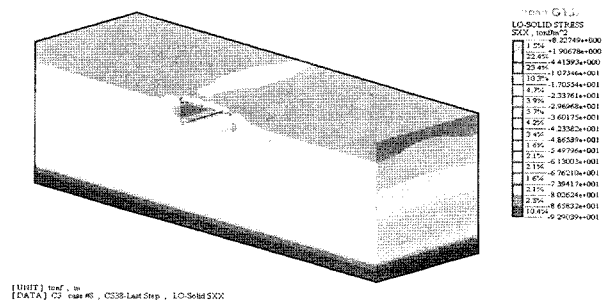


(a) 지보간격 1m, 강관직경 1,000mm

그림 8. 최종단계에서의 수직변위 Iso-Surface



(a) 수평 변위(m)



(b) 수평 토압(t/m^2)

그림 9. 최종단계에서의 수평방향 변위와 응력(지보간격 1m, 강관직경 1,000mm)

의 측면변위는 2.13mm~3.48mm 범위로 미소한 것으로 나타났다. 측압은 횡토압은 $2t/m^2 \sim 10t/m^2$ 의 범위로 전체 단면의 측면 중심부에 집중되는 현상을 나타내었다. 그림 10은 최종단계의 단면 중앙절점에서 시공단계별 지표의 침하를 나타낸 것으로 1단계와 3단계(루프 형성의 단계)에서 전체 침하의 약 1/3정도가 발생하고 단면의 굴착시 나머지 침하가 발생하는 것으로 나타났다.

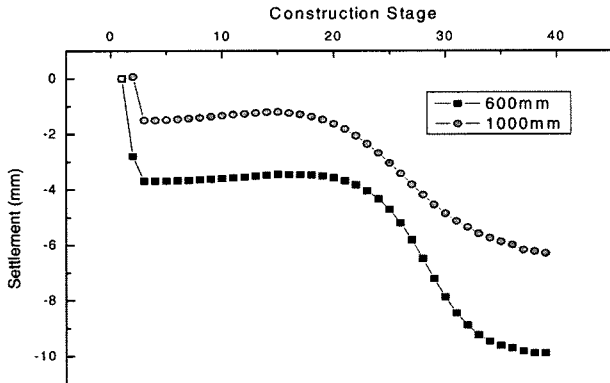


그림 10. 최종단계 중앙지표절점에서 시공단계별 침하(mm)

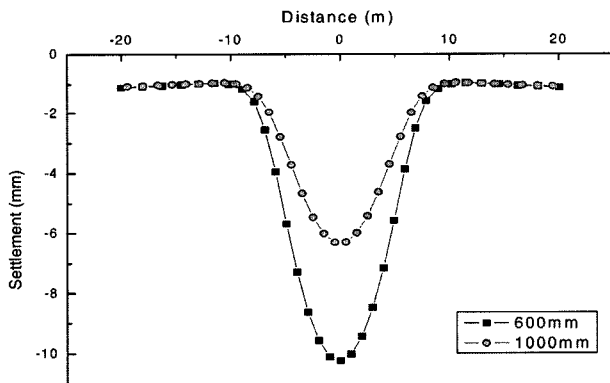


그림 11. 최종단계에서 굴착진행방향의 횡방향 침하(mm)

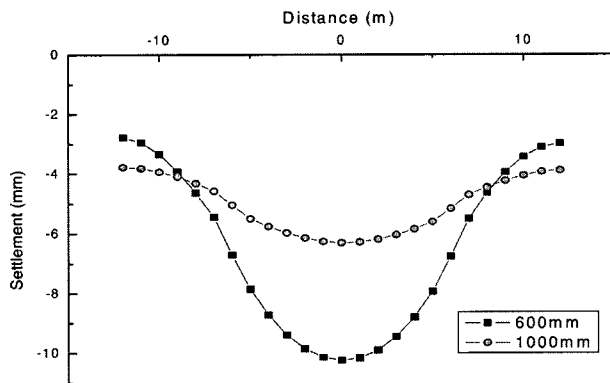


그림 12. 최종단계에서 굴착진행방향의 종방향 침하(지보간격1m, mm)

그림 11과 그림 12는 굴착단면 진행방향의 횡방향과 종방향의 거리에 따른 침하량으로 중심부에서 많은 침하가 발생하는 것으로 나타났다. 지표의 수직변위는 우측단면보다 좌측단면으로 약간 치우친 것으로 나타났다. 이것을 좌측단면을 굴착한 후 우측단면을 굴착하였기 때문에 좌측단면에서 침하가 조금 더 발생한 것으로 판단된다. 지보간격을 1m로 하고, 강관의 직경을 600mm에서 1,000mm로 증가 시켰을 경우에는 굴착시점과 종점부의 침하는 다소 증가한다. 하지만 전반적인 침하는 감소하는 것으로 나타났다.

5. 결론

철도하중에 대하여 지하횡단 단면의 검토에서는 철도선로 보수기준인 7mm와 철도기술연구원의 침하기준인 10mm를 만족하도록 지보간격을 1m로 하고, 강관의 직경을 600mm 이상으로 시공하는 것이 타당하다고 판단된다.

철도하중에 대하여 굴착면 측면에 작용하는 횡토압과 측면 벽체와 지보의 변위를 살펴보면 특별한 경우를 제외하고는 기존의 횡단터널 공법처럼 측면을 과다하게 보강할 필요가 없을 것으로 판단된다. 또한, RPS공법에서 측면의 지보와 토류판 보강은 일시적인 것이기 때문에 횡토압에 대한 지지력과 변위에 대한 저항에 문제가 없는 것으로 판단된다.

수직변위는 중앙부에서 집중되어 발생하는 경향을 나타낸다. 또한, 최대수직변위는 루프의 상부와 지표면 사이에서 발생한다. 이러한 수직변위는 굴착시 굴착면 상부의 응력이 불평형을 이루기 때문에 평형을 이루기 위하여 상부의 응력을 재분배하기 때문이고, 이러한 응력의 재분배를 위하여 토체가 루프의 상부에서부터 변위를 발생하여 평형을 이루려하기 때문인 것으로 판단된다.

RPS공법에 적용되는 강관 직경의 직경이 클수록 굴착진행방향을 따라 부등침하를 줄이고, 상부의 하중을 지보에 고르게 분배하여 균등하게 침하를 발생시키는 것으로 판단된다.

상부단면의 경우 루프 강관에 의하여 종방향으로 대부분의 하중을 분담하는 것으로 나타났으며, 상부와 하부의 양 끝단면에서는 중앙부 단면과 달리 횡방향으로 하중을 분담하기 때문에 변위가 상대적으로 적게 나타나고, 특히 상부의 양 끝단면은 측면 토체와 각 루프의 결속력으로 인한 횡방향 하중분담에 의하여 변위가 가장 적게 발생하는 것으로 판단된다.

본 연구는 이상적인 토질조건을 적용하여 해석한 결과를 바탕으로 판단한 것이기 때문에 추후 실험형 실험이나 실제

시공의 계측을 토대로 보다 안정적인 공법으로 발전시켜야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 마이더스 아이티의 학위논문 지원과 강릉건설 주식회사의 자료협조에 의하여 이루어졌으며, 연구를 진행할 수 있도록 지원해주신 마이더스아이티, 강릉건설주식회사의 김중희 사장님, 정병철 부사장님, 박영권 부장님에게 감사의 뜻을 전합니다.

참고 문헌

1. 건설교통부 (2004), 철도설계기준(노반편), 대한토목학회, pp. 157-219.
2. 마이더스 아이티 (2005), MIDAS/GTS Analysis Reference.
3. 마이더스 아이티 (2005), MIDAS/GTS Basic & Advanced Tutorials.
4. 마이더스 아이티 (2005), 검증예제, Cylindrical Hole in an Infinite Mohr-Coulomb Medium.
5. 마이더스 아이티 (2005), 실무적용사례, 지하철타널분야 CAM 터널.
6. 신은철, 김중희, 정병철, 노정민, Roof Panel Shield 공법을 이용한 철도지하횡단터널 굴착의 수치해석 연구, 한국철도학회 2005년 춘계학술대회 논문집, pp.154.
7. 신은철, 노정민, 이은수, 김경모, 김중희, 정병철, RPS공법을 이용한 철도횡단터널의 2차원수치해석, 2005년도 지반공학회 공동학술발표회 논문집, pp.591-600.
8. 엄기영, 민경주, 신민호, 양재성, 황선근, 이준석, 이성혁, 이일화, 방춘석, 최일윤, 엄주환, 최준규, 고태훈 (1999), 철도지하 횡단공사 공법선정 기준에 관한 연구, 철도청.
9. 엄기영, 신민호, 김지훈 (2001), 철도지하횡단공사시 현장계측을 통한 지반거동 분석, 한국철도학회01 추계학술대회 논문집, pp. 546-551.
10. 엄기영, 신민호, 최성규, 정홍채, 유원희, 이준석, 윤희택, 이성혁, 이진욱, 고태훈, 이일화, 문형석, 김지훈, 박명준 (2002), 철도지하횡단공사 JES공법의 현장적용 방안 제시에 관한 연구, 한국철도기술연구원.
11. 이송, 안태훈 (2003), 지반응답곡선에 의한 터널특성 연구, 대한토목학회논문집, 23권 1C호, pp.59-70.
12. 이인모 (2004), 터널의 지반공학적 원리, 도서출판새론, pp.78-119.
13. Chandakant S. Desai, Hema J. Siriwardane (1984), Constitutive Laws for Engineering Materials with Emphasis on Geologic Materials, Prentice-Hall, Inc., pp.35-52, pp.204-343.
14. Karl Terzaghi, Ralph B. Peck, Gholamreza Mesri (1996), Soil Mechanics in Engineering Practice, Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., pp.134-171.