

교량기초 하부에 위치한 터널의 지보방법에 따른 변위거동 Displacement Behavior of Tunnel under Bridge Abutment due to Supporting Systems

유남재¹⁾, Nam-Jae Yoo, 박병수²⁾, Byung-Soo Park, 정길수³⁾, Gil-Soo Jeong, 김승렬⁴⁾, Seung-Ryul Kim

1) 강원대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University

2) 지완테크 이사, Director, G-1 Tech Co.

3) 강원대학교 토목공학과 연구원, Researcher, Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University

4) 에스코 컨설턴트 대표이사, President, ESCO Consultant Co.

SYNOPSIS : This research is experimental paper to prepare the structural safety of the upper bridge for support type on tunnel and the effect of settlement.

Unit weight test and uni-axial compression test have been performed to simulate the physical property of foundation on the tunnel.

Tunnel model of slip form type for centrifuge model has been developed to performed the tunnel excavation while field stress is activated. And the support type of tunnel such as umbrella arch method and large diameter steel pipe reinforce method has been tested for the centrifuge model.

After the analysis of experiment, results show that internal displacement of large diameter steel pipe reinforce method is smaller than that of the umbrella arch method.

Keywords : umbrella arch method, large diameter steel pipe reinforced method, centrifuge test

1. 서론

일반적으로 구조물 하부로 터널이 통과하는 경우와 터널 상부 암반층의 두께가 터널 직경에 비해 얇은 지역을 통과하거나 절리나 파쇄대 등이 터널의 진행방향에 불리하게 분포되어 있는 경우에는 상부구조물의 손상 뿐만 아니라 터널의 붕락이 우려되며 이에 대한 보강대책이 필요하게 된다. 이러한 지역에 터널을 시공할 경우 터널의 안정성 증대와 인접구조물의 손상방지를 위하여 그라우팅공법이나 강관다단공법, Forepoling 방법 등이 이용되며 이러한 지하굴착 보조공법은 공통적으로 원지반을 강화시키는 특성을 가지고 있다.

이러한 터널굴착 보조공법들은 시공중인 터널주변 지반의 응력 및 변형상태를 변화시켜 터널시공중 안정화를 이루기 위해서 사용되며 각 공법들은 지반조건이나 지질특성, 지하수 상태에 따라 서로 다른 목적으로 사용되거나, 경제성 및 시공성을 고려하여 2개 이상의 공법을 혼용하여 사용하기도 한다. 최근 국내에서도 각종 지하철 및 도로터널, 전력구 공사를 수행하면서 터널 보조공법중 많은 시공사례를 찾아볼 수 있는 공법이 강관보강형 다단 그라우팅 공법(Umbrella Arch Method) 이다. Barisone 등(1982), Pelizza 등(1993), 최용기 등(1997)은 시공사례에 대한 분석을 통해 강관 보강형 다단그라우팅 공법이 연약한 지반이나 건물이 밀집된 도심지에서 터널의 막장 자립도를 향상시키고 지반침하를 억제하며, 지하수 유입을 차단하는 등 시공성 및 경제성 측면에서 매우 우수한 것으로 보고하였다. 한편, Bruce와 Gallavresi (1988), Pelizza 등(1994), 배규진 등(1997)은 현장계측을 통해 이 공법의 보강효과에 관련하여 연구를 수

행하였으며 이들 중 배규진 등(1997)은 본 공법을 적용할 경우, 풍화암 구간에서 타 보조공법 적용시 보다 지표침하량이 약 1/2 정도, 천단침하량은 1/3정도의 경감효과를 얻을 수 있고, 막장의 안정성을 판단할 수 있는 안정비도 증진된다는 연구 결과를 보고 하였다.

Swoboda와 Wagner(1993), Pellizza와 Peila(1993), Kotake 등(1994), 이봉렬 등(1996)은 수치해석을 통해 지반 거동경감효과 및 그라우팅 효과, 지반조건 및 각종 설계 매개변수 변화에 의한 다양한 해석 결과들을 제시하였다.

따라서 본 연구에서는 실제 교량기초 하부지반을 통과하는 터널 현장을 대상으로 터널의 지보형태를 변화시킨 원심모형실험을 통하여 상부 교량 구조물의 안정 및 터널의 변위거동에 미치는 영향을 알아보 고자 하였다.

터널의 지보형태는 강관 다단 그라우팅공법과 강관을 수평으로 보강하는 수평강관 보강공법의 두가지 경우에 대하여 원심모형실험을 실시하였고 터널 굴착과정을 재현하여 굴착과정 중 발생하는 내공변위로 부터 두 공법을 비교 분석하였다.

2. 원심모형실험

2.1 지반조건 및 기본물성실험

본 연구에서 수행하고자 하는 터널이 위치할 곳의 지반 조건과 단면을 표 1과 그림 1, 2에 나타내었다. 그림 1, 2에 나타낸 바와 같이 풍화암층에 터널이 위치하고 있으며 터널 상부구조물인 교량의 기초 말뚝이 모래지반의 충적층에 위치하고 있다. 또한 교대 하부 말뚝의 선단이 터널의 천단부근에 위치한 A-A단면과 터널의 스프링라인에 위치한 B-B 단면에 대하여 실험을 수행하였다.

표 1. 터널통과구간 지반특성치

구 분	단위중량(tf/m^3)	점착력(tf/m^2)	마찰각($^\circ$)	변형계수(tf/m^2)	포아송비	
매 립 층	1.7	1.0	30	450	0.35	
충적층(모래)	1.8	2.6	27	400	0.40	
풍 화 토	N<50	1.8	2.0	30	1,100	0.33
	N≥50	1.9	3.0	32	2,700	0.33
풍 화 암	2.1	4.0	34	20,000	0.33	
연 암	2.4	12.0	33	160,000	0.30	
보 통 암	2.5	35.0	40	550,000	0.25	
경 암	2.6	107.0	44	1,100,000	0.20	

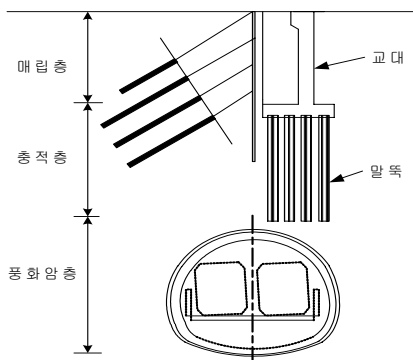


그림 1. A-A 단면

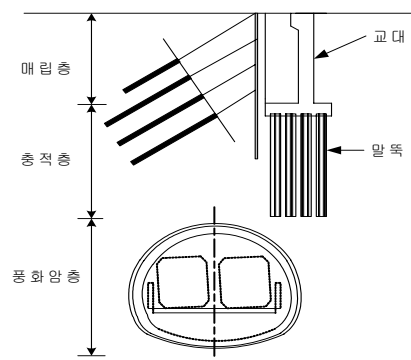


그림 2. B-B 단면

실내 모형실험시 현장의 원지반 충적층을 모사하기 위해 주문진 표준사를 이용하여 지반을 조성하였

으며 강사장치(Raining Device) 토출구의 폭과 강사 높이를 조절함으로써 현장의 층적층 단위중량으로 주문진 표준사의 단위중량을 맞출 수 있었다. 터널이 위치하고 있는 풍화암층은 주문진 표준사에 석고를 혼합 고형하여 풍화암층을 재현하였다. 풍화암층의 변형계수를 맞추기 위하여 주문진 표준사의 중량에 대해 석고를 15~30% 까지 5%씩 증가시켜 일축압축시험을 실시하였다. 현장의 경우 3축 응력 상태이나 본 실험의 경우 일축 상태로 응력조건이 상이하기는 하나 편의상 일축압축시험으로 부터 석고 혼합율에 따른 변형계수를 추정하였으며 표 2와 그림 3에 나타낸 바와 같이 혼합비가 30%일때 풍화암층의 변형계수 20,000 tf/m^2 와 유사한 값을 나타내어 혼합비 30%로 풍화암층을 모사하였다.

한편, 터널 상부의 매립층과 교대, 교대하부의 말뚝이 설치되어 있어 터널상부의 지반과 교대 말뚝에 전달되는 하중은 강봉과 납구를 이용하여 하중으로 사용하였다.

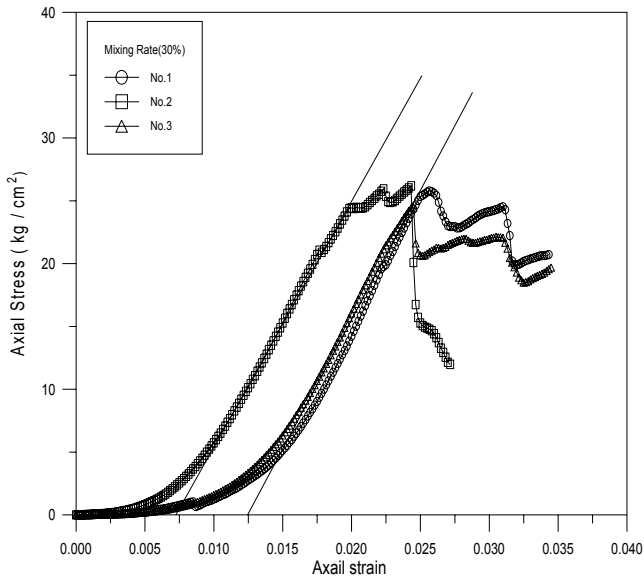


그림 3. 응력-변형률곡선(석고혼합율 30%)

표 2. 석고혼합율에 따른 탄성계수

혼합율(%)	E_{ave} (tf/m^2)
15	16,940
20	17,630
25	22,280
30	19,620

2.2 모형장치의 제작

2.2.1 모형토조 및 터널장비제작

그림 4는 현장의 주어진 하중조건 상태에서 터널굴착 상황을 원심모형시험의 비행 중에 재현하기 위하여 제작된 실험 장비로써 알루미늄 모형토조를 폭 450mm, 길이 300mm, 높이 400mm 크기로 제작하였고 실제 터널단면을 1:0.7의 비율로 축소시켜 모형터널을 제작하였다. 또한, 그림에서 볼 수 있듯이 터널 단면과 같은 크기의 Slip Form 형태로 이동용 모형터널을 토조 내에 설치하여 전동모터를 이용하여 이동용 모형터널을 후방으로 이동 시키므로써 터널 굴착 효과를 재현하였다.

2.2.2 모형지보

그림 5는 수평강관 보강공법에 대한 실험 개요를 나타낸 것으로써 터널을 수평강관으로 보강한 경우를 모사하기 위하여 직경 10mm, 길이 300mm의 알루미늄 봉을 수평강관으로 사용하였고 토조 전면판을 천공한 후 수평강관(알루미늄 봉)을 삽입 설치하였다. 실험 과정은 수평강관 지보재인 알루미늄 봉을 설치한 후 터널의 위치하는 구간은 석고 혼합물을 이용한 풍화암층을 조성하고 터널 상단은 주문진 표준사를 이용하여 층적층을 조성하였다. 지반조성이 완성되면 현장의 하중조건을 납봉을 이용하여 재현시

킨 후 중력수준을 50G로 올린 뒤 Slip Form 형태의 모형터널을 후진 이동시킴으로써 굴착에 따른 터널의 내공변위를 측정하였다. 한편, 터널 굴착시 발생하는 내부 변위를 측정하기 위하여 터널 정중앙에 LVDT를 설치하였다.

그림 6은 강관 다단 그라우팅공법에 대한 실험 개요를 도시한 것으로 본 실험에서는 콘크리트 라이닝을 모사하기 위하여 0.8mm 두께의 황동판을 사용하였고 현장에서 터널굴착시 지보재를 설치한 후 강관 다단 그라우팅을 실시하는 것을 재현하기 위하여 두께 0.8mm, 폭 10 mm의 황동띠를 콘크리트 라이닝을 모사한 황동터널 내부에 설치하였다. 또한, 황동띠의 지보와 동일한 위치에 20°경사로 강봉을 납땀하여 강관보강 다단그라우팅을 모사하였고 강봉에 그라우팅 효과를 재현하기 위해 강봉에 접착제를 도포한 뒤 주문진 표준사를 묻혀 그라우팅 효과를 모사하였다.

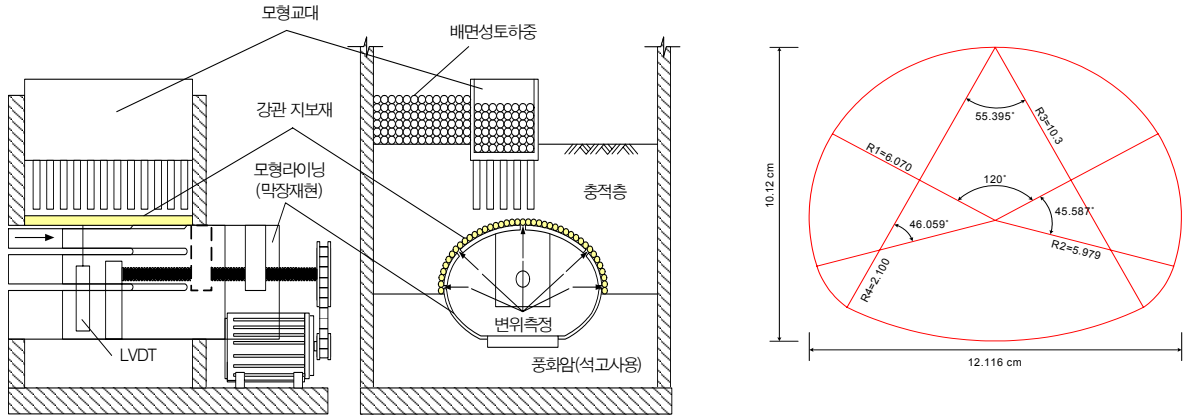


그림 4. 원심모형 실험토조 및 모형터널 단면

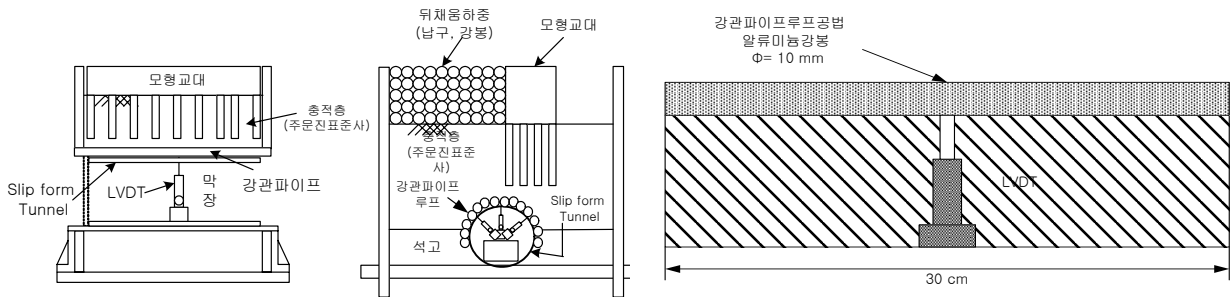


그림 5. 수평강관 보강에 의한 실험 개요

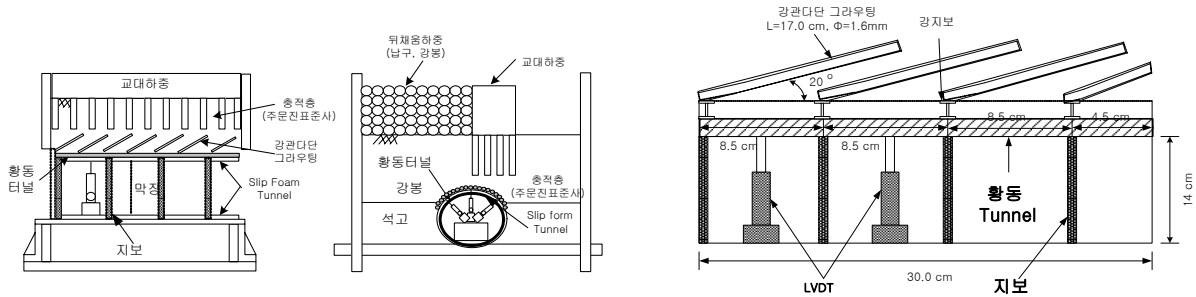


그림 6. 강관 다단 그라우팅 보강에 의한 실험 개요

3. 결과 분석

교량기초 하부 지반을 통과하는 지하 터널의 설계와 관련하여 터널의 보강형태에 따른 상부교량 구조물의 안정 및 지반침하 방지와 터널의 안정성 확보를 알아보기 위하여 수평강관 보강공법과 강관 다단 그라우팅 공법을 적용한 모형터널에 대한 원심모형실험을 실시하고 터널내의 내공변위를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

3.1 수평강관 보강공법 원심모형실험결과

터널 굴착시 수평강관 보강공법으로 보강한 경우에 대한 원심모형실험을 50G의 중력수준으로 실시하고 터널 굴착에 따른 터널중앙부의 천단(Crown ; C)과 양측 스프링라인(Left Springline ; LS, Right Springline ; RS)에서의 변위를 측정하여 그림 7, 그림 8에 나타내었다.

그림 7은 교대 하중이 터널의 천단부에 위치한 A-A단면에 대한 원심모형 실험결과로 터널의 내공변위를 터널 천단과 천단 좌, 우측 세곳을 계측하였으나 우측부분 계측기의 예러발생으로 인해 천단부(C)와 좌측 Springline (LS)의 변위만 측정되었다.

계측결과 터널의 굴착율이 증가할수록 변위가 증가하는 경향을 보이고 있으며 터널이 완전히 굴착되었을 때 터널 천단에서 0.09mm, 좌측 스프링라인에서는 0.06mm의 변위가 발생되었다. 50G의 중력수준으로 실험을 하였으므로 이를 현장값으로 환산하면 터널 천단부에서는 4mm(= 0.09mm×50G)의 변위가 터널좌측부에서는 3mm(= 0.06mm×50G)의 변위가 발생할 것으로 예상된다.

여기서, 굴착율은 터널의 이동정도를 말하는 것으로 원심모형실험에서 응력수준 50G에서 모터를 이용하여 Slip Form 터널을 모형토조의 기어박스로 이동시키는데 걸리는 시간은 5분30초가 소요된다. 이때부터 일정한 시간별(실험에서는 3초당 변위를 기록) 변위를 계측하고 변위가 계측된 시간으로부터 5분 30초를 나누어 주게 되면 굴착율을 구할 수 있다. 예를들면 Slip Form 터널이 모형토조의 기어박스로 완전히 이동되었을때 즉, 변위계측을 시작한지 5분 30초가 지나게 되면 이때가 굴착율 100%가 된다.

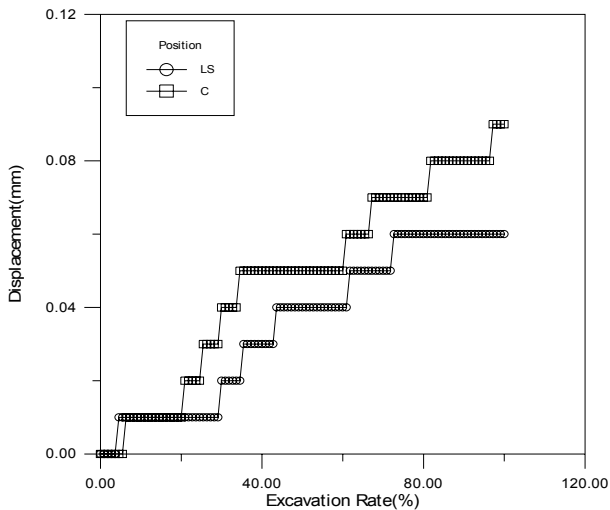


그림 7. 수평 강관보강(A-A단면) 실험결과

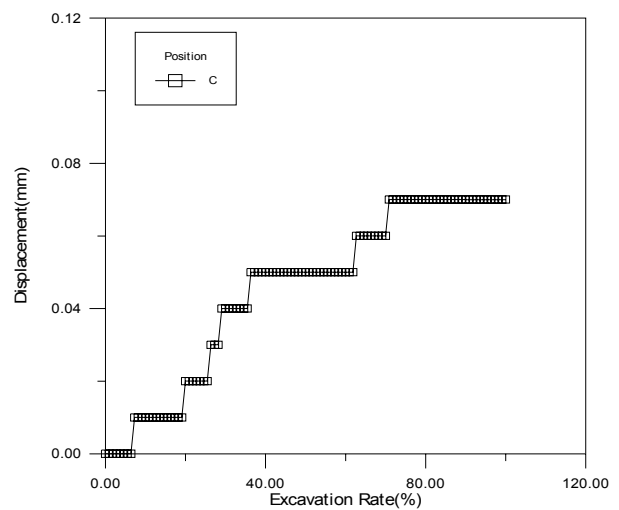


그림 8. 수평 강관보강(B-B단면) 실험결과

그림 8은 교대하중이 터널의 우측 스프링라인에 위치한 B-B단면에 대한 실험으로 내공변위는 터널중앙부에서 세곳을 계측하였으나 모형전면에서 좌, 우측부분의 스프링라인에 설치한 계측기의 예러발생으로 인해 터널의 중앙부 천단에서의 변위만 측정되었다.

전술의 실험결과와 마찬가지로 터널의 굴착율이 증가할수록 변위가 증가하는 경향을 보이고 있으며 터널 천단부에서 0.07mm의 변위(현장환산값 0.07mm×50G= 3.5mm)가 발생하였다. 따라서 교대 말뚝

선단부가 터널의 천단부에 근접하여 있는 A-A 단면의 경우 말뚝선단위치가 터널 스프링라인에 위치한 B-B단면 보다 천단부의 침하가 다소 크게 발생하는 것으로 나타났다.

3.2 강관 다단 그라우팅공법 원심모형시험결과

강관 다단 그라우팅공법에 대한 원심모형시험은 그림 9에 나타난 바와 같이 터널굴착시 터널중앙부의 천단과 양쪽스프링라인에서의 변위를 측정하여 그림 10, 그림 11과 표3에 결과를 나타내었다. 수평강관 보강공법의 경우 터널 입구에서 15cm 되는 정중앙부 변위를 측정하였으나 강관 다단 그라우팅공법의 경우 그림 9에 보인 바와 같이 터널 전면부에서 4.3cm 안쪽에 위치한 부분(B 지점)과 15cm 떨어져 설치된 정중앙부(A 지점) 두 군데에서 좌우측 스프링라인과 터널의 천단부분의 내공변위를 굴착율에 따라 측정하였다.

한편, 그림에서 A는 LVDT 중앙위치를, B는 터널입구에서 4.3cm 떨어진 부분의 변위 측정위치를 나타낸 것이고, L은 터널 전면부에서 좌측, R은 우측을 표시하고 있으면 S는 스프링라인부분의 변위, C는 중앙 천단에서의 변위를 나타낸 것이다.

그림 10의 A-A단면에서의 실험결과 터널 중앙부(A지점)의 천단부분의 변위는 굴착률 30%와 60%를 지나면서 굴착율 변위가 현저히 증가하는 경향을 보이고 있으며 좌우측 스프링 라인에서의 변위는 60%를 통과하면서 변위가 급격히 증가하였다.

한편, 터널 천단 변위는 변위계 위치 B에서 0.65mm, 변위계 위치 A(중앙)에서는 0.6mm가 발생하였고 측벽에서는 변위 위치 B에서 우측 스프링라인의 경우 0.32mm, 변위위치 A에서 우측 스프링라인은 0.2mm, 좌측 스프링라인은 0.26mm의 변위가 발생하는 것으로 조사되었고 좌측 스프링라인의 변위는 측정기의 오작동으로 인해 측정 할 수 없었다.

실험결과로 부터 터널 입구부(B지점)에서의 변위가 터널 중앙부(A지점)보다 크게 발생되었는데 이는 B지점은 두 개의 지보 가운데 위치하고 있고, A지점은 터널 입구에서 15cm 되는 부분에 위치하고 있으며 이위치는 세 번째 지보에 근접하고 있으므로 이 지보의 영향으로 인해 변위가 상대적으로 약간 작게 측정된 것으로 판단되며 그림 11에 나타난 B-B단면에 실험 결과에서도 터널 입구부(B지점)의 천단부분의 변위가 중앙부분(A지점)에 비해 크게 발생하는 것으로 나타나 유사한 결과를 나타내었다.

한편, 터널 지보 공법에 따른 터널의 천단변위는 A-A 단면에 대한 강관 다단 그라우팅공법의 경우 천단부에서의 변위는 현장 값으로 터널 전면부에서는 32.5mm, 터널 중앙부에서는 30mm의 변위가 발생하였고 수평강관 보강공법의 경우는 터널중앙부의 천단에서의 변위가 4mm가 발생하는 것으로 측정되었다. 또한 B-B 단면의 경우도 강관 다단 그라우팅 공법의 경우 천단에서의 변위는 현장값으로 터널 전면부에서는 35mm, 터널 중앙부에서는 30mm의 변위가 발생하는 것으로 측정되었으며 수평강관 보강공법의 경우는 터널중앙부의 천단에서의 변위가 3.5mm가 발생하는 것으로 측정되어 수평강관 보강공법이 강관 다단 그라우팅 공법과 비교하여 현저하게 작은 천단 변위값을 나타내었다.

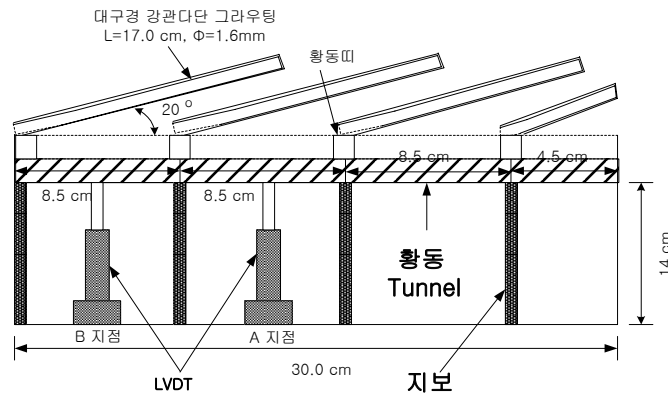


그림 9. 강관 다단 그라우팅변위 측정지점

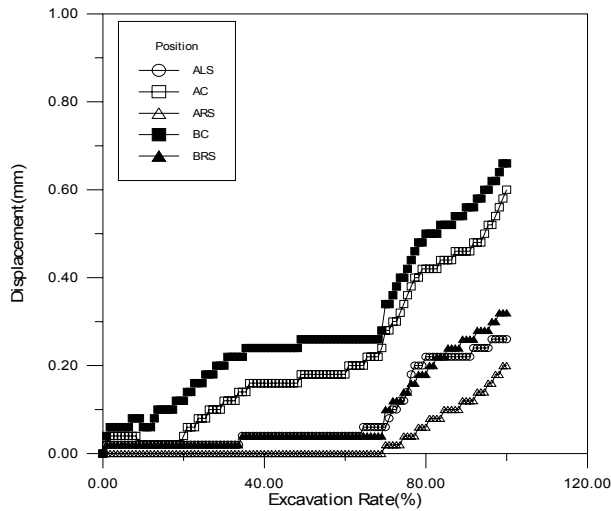


그림 10. 강관다단그라우팅(A-A단면)

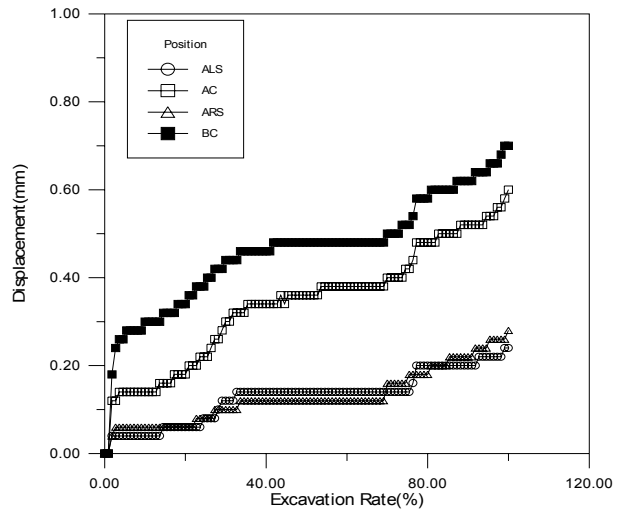


그림 11. 강관다단그라우팅(B-B단면)

표 3. 강관 다단 그라우팅공법 원심모형실험 결과

변위계위치		A-A단면		B-B단면	
		실험계측값(mm)	현장환산값(mm)	실험계측값(mm)	현장환산값(mm)
터널중양(A)	ALS	0.26	13	0.28	14
	AC	0.6	30	0.6	30
	ARS	0.2	10	0.24	12
터널전면(B)	BC	0.65	32.5	0.7	35
	BRS	0.32	16	-	-

또한 스프링라인 부분의 변위를 지보공법에 따라 비교하면 A-A 단면의 경우 강관 다단 그라우팅 공법의 경우 터널중양부의 좌우측 스프링라인에서의 변위는 현장값으로 좌측라인에서는 13mm, 우측라인에서는 10mm 가 발생하였으며, 터널 전면부 우측라인에서 16mm의 변위가 발생하는 것으로 계측되었고 수평강관 보강공법의 경우는 터널중양부의 좌측스프링라인에서 3mm가 발생하는 것으로 계측되어 스프링 라인에서도 수평강관 보강공법이 강관 다단 그라우팅공법과 비교하여 작은 변위를 나타내었다.

이와 같이 터널내부에서의 변위 발생 경향을 종합해 보면 강관 다단 그라우팅 공법의 경우 터널중양부의 좌우측 스프링라인에서의 변위는 수평강관 보강공법에 비해 천단에서의 변위가 약 8~9 배 크게 발생하였으며, 좌우측 스프링라인에서는 약 4~5 배 정도 변위가 크게는 발생하는 것으로 조사되었다.

4. 결론

교량기초 하부지반을 통과하는 터널의 설계와 관련하여 상부 교량 구조물의 안정 및 지반침하 방지와 터널의 안정성 확보를 알아보기 위하여 강관다단그라우팅 공법과 수평강관 보강공법의 모형터널에 대한 원심모형실험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 원심모형 실험에서 터널굴착효과를 재현하기 위하여 Slip Form 터널모형을 제작하여 굴착율에 따른 터널내공변위를 계측 할 수 있는 실험기법을 개발하였다.
- 2) 현장의 지반조건을 재현하기 위하여 현장지반의 변형계수를 근접하게 모사하기 위하여 상부 토사층은 주문진표준사를 사용하였으며 풍화암층은 주문진표준사와 석고를 혼합하여 고흥화시킴으로써 그의 물성을 재현하였다.

- 3) 터널 굴착률에 따른 터널 천단부에서의 내공변위를 측정한 결과 강관 다단 그라우팅공법이 수평강관 보강공법 보다 약 10배의 변위가 크게 발생되었고, 스프링 라인에서의 변위는 강관 다단 그라우팅공법이 수평강관 보강공법에 비해 약 4~5 배의 변위가 크게 발생하는 것으로 나타났다.
- 4) 상기의 실험결과로 보아 현장의 지보재의 물성 및 제원, 지보재의 구속조건 등에 따라 그의 안정성이 변화될 수 있으나 주어진 동일한 지반조건과 하중조건에서 수평강관 보강공법이 강관 다단 그라우팅공법에 비해 안정한 터널굴착공법임을 확인 할 수 있었다.

참고문헌

1. 배규진, 김창용, 문홍득, 홍성완(1997), "Umbrella Arch 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변 지반의 거동에 관한 연구", **터널과 지하공간**, 제 7권, 제 4호, pp.299~309.
2. 이봉렬, 김학문(1996), "3차원 터널해석에 의한 강관보강형 다단그라우팅의 보강효과," **한국지반공학회지**, 제 12권, 제 4호, pp.3~20.
3. 최용기, 김창용(1997), "연약지반 터널 굴착시의 지반보강 사례연구," **한국지반공학회 가을학술발표회 논문집**, pp.133~139.
4. Barisone, G., Pigorini, B., Pelizza, S.(1982), "Umbrella Arch Method for Tunneling in Difficult Conditions-Analysis of Italian Cases", Proc. 4th Cong. Inter. Assoc. of Engineering Geology, New Delhi, Vol.4, pp.15~27.
5. Bruce, D. A., Gallavresi, F.(1988), "Special Tunneling Methods for Settlement Control : Infilaggi and premilling", Proc. 2nd Inter. Conf. on Case histories in Geotechnical Eng., pp.1121~1126.
6. Kotake, No., Yamamoto, Y., Oka, Ko.(1994), "Design for Umbrella Method Based on Numerical Analyses and Field Measurement", Tunneling and Ground Condition, Abdel Salam(ed), Balkema, pp.501~508.
7. Pelizza, S., Peila, D.(1993), "Soil and Rock Reinforcements in Tunneling", Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.8, No.3, pp.357~372.
8. Pelizza, S., Corona, G., Grasso, F., Raineri, R.(1994), "Improvement of Stability Conditions from Half to Full Face Excavation in Difficult Geotechnical Conditions", Tunneling and Ground Conditions, Abdel Salam(ed), Balkema, pp.267~271.
9. Swoboda, G., Wagner, H.(1993), "Design Based on Numerical Modelling a Requirement for an Economical Tunnel Construction", Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference, pp. 368~379.