

대전 지하철 3-Arch Tunnel 공사

석정우*1, 신강호*2, 박두성*3, 김재권*4

1. 개요

2004년 2월 4일 대전역 지하를 가로질러 대전광역시 동구 원동과 소제동을 잇는 전장 약 237m의 지하철 터널이 관통되었다. 대전역사와 경부선 철도를 지하로 횡단하는 대전 지하철 1-5공구는 현재 건설 중인 대전 지하철 1호선 전체 공구 중에서 가장 시공이 어려운 구간으로써, 공사 개시 이후 학계 및 관련 업계로부터 많은 관심이 집중된 바 있다. 특히, 국내 최대 단면 및 최대 폭을 갖는 3-Arch 터널의 시공은 공사 성패의 가장 핵심적인 부분이기 때문에, 여러 방면에서의 기술검토 및 정밀계획, 그리고 이에 따른 효과적인 대책방안의 적용 등이 유기적으로 진행되었다. 본 기술기사에서는 대전지하철 1-5공구의 대단면 3-Arch 터널의 전반적인 시공사례에 대하여 소개하고자 한다.

2. 현장현황

대전 지하철 1-5공구의 3-Arch 터널은 대전 지하철 1호선 104정거장의 일부로서, 104정거장은 연장 78.8m의 개착부와 이와 연결된 연장 53.5m의 3-Arch 터널로 이루어져 있다(그림 1 참조). 3-Arch 터널 구조물은 지하철 정거장으로 사용되는 관계로 높이 10m에 비해 폭이 28m 정도로 매우 넓기 때문에, 수평방향으로 3-Arch 형태의 단면을 이루고 있다.

본 3-Arch 터널은 지표면으로부터 터널 천단부까지의 거리($h=22m$)에 비하여 터널 폭($w=28m$)이 더 큰 저 토피고 터널($h/w=0.82$)이며, 평면적으로는 대전역 광장과 역사 하부를 통과하는 근접시공의 특성을 가지고 있다. 또한, 터널 폭에 비해 터널 종방향 길이가 상대적으로 짧기 때문에, 터널의 전체적인 변위 거동은 갱구의 영향을 많이 받을 것으로 예상된다.

대전 지하철 1-5공구 현장의 전반적인 현황에 대하여 간략히 정리하면 표 1과 같다.

*1 삼성물산 건설부문(주), 기술연구소, 선임연구원
(jw.seok@samsung.com)

*2 삼성물산 건설부문(주), 토목기술팀, 차장

*3 삼성물산 건설부문(주), 대전지하철 1-5공구 현장소장

*4 삼성물산 건설부문(주), 토목기술팀장, 상무이사
(jkviva@yahoo.co.kr)

표 1. 대전 지하철 1-5공구 현장 현황

현장정보	총 연장	236.55m
	개착정거장	113m
	3-Arch 터널	53m
터널정보	본선 터널	53m
	총공사비	35,482백만원
공사기간	3-Arch 터널	8,920백만원
	시공기간	1999.12.27~2004.12.31 (60개월)
시공사	삼성물산 건설부문(주)	

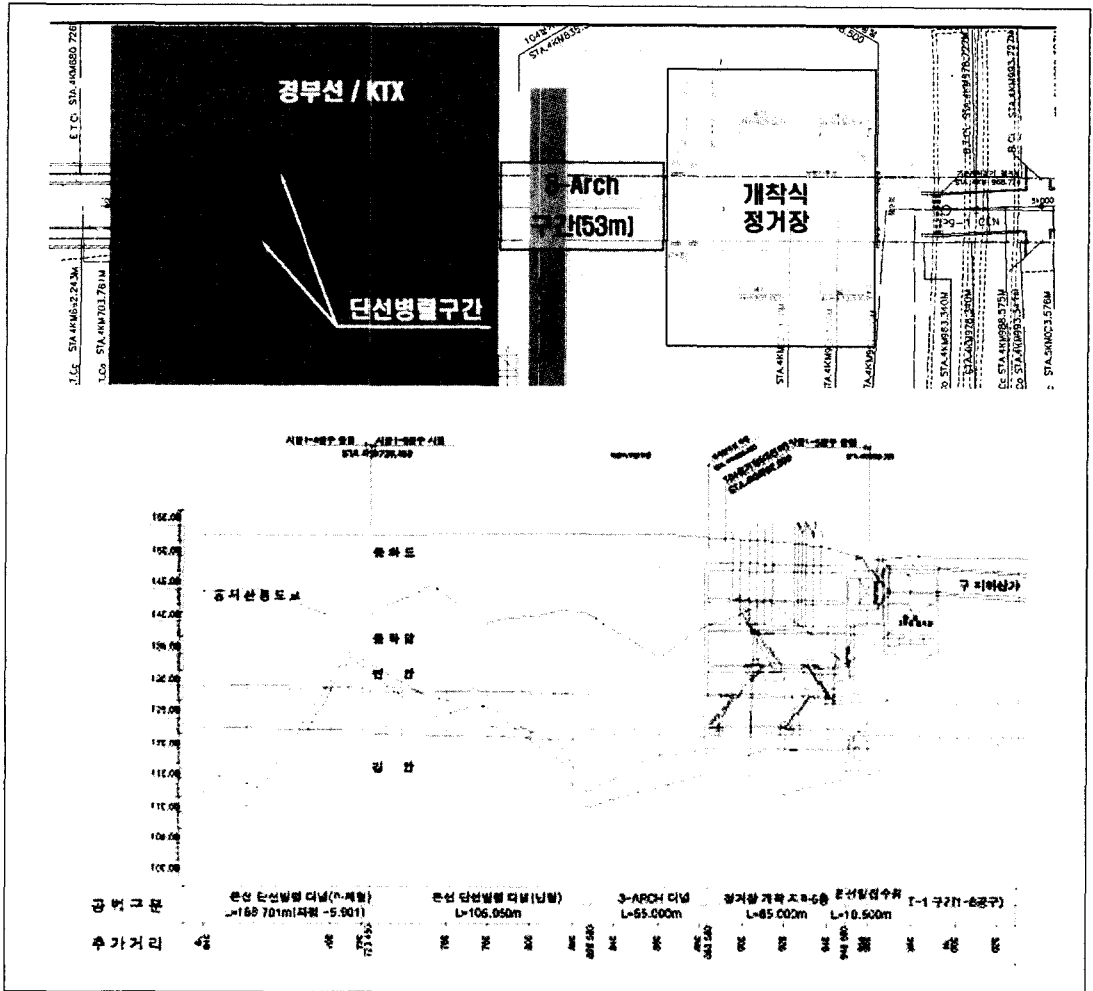


그림 1. 대전 지하철 1-5공구 현장 평면도 및 단면도



3. 3-Arch 터널 시공

원 설계에서는 대전역사 하부지반을 통과하기 위하여, 그림 2와 같은 파이프루프 강관추진공법을 채택하였으나, 반력 벽체의 안정성 미확보에 따른 가시설 붕괴 가능성과 가시설 배치에 따른 터널굴진 작업공간의 협소 등과 같은 문제점이 대두되었다. 이러한 시공상의 문제점을 해결하고 정거장 기둥간격 및 승강장 공간 확보와 터널 굴착에 따른 대전역

사 하부지반의 침하를 최소화하기 위하여 3-Arch NATM 터널공법으로 설계변경을 실시하였다.

변경설계안으로 3-Arch 터널공법을 선정할 후, 표 2에 나타낸 바와 같이 두 가지 표준단면에 대하여 비교 검토를 실시하였다. 공용 중인 대전역사와 경부선 철도 하부를 관통하여야 하는 본 현장의 특수성을 감안하여 단면 분할이 많더라도 지표 침하량이 상대적으로 작게 발생하는 제1안을 변경설계단면으로 결정하였다. 터널 굴착에 따른 침하량 예측

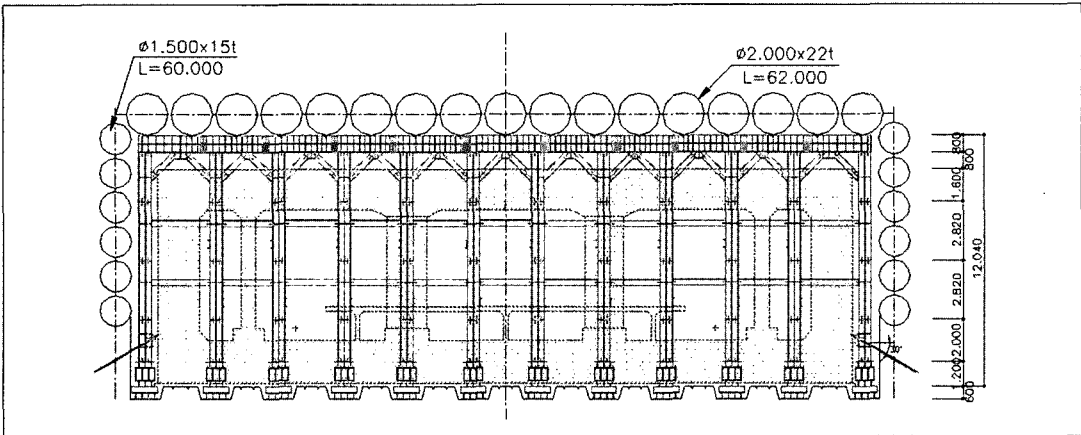


그림 2. 파이프루프 강관추진공법 단면도

표 2. 변경설계안 비교

	1안	2안
표준단면		
굴착순서		
장·단점	지표 침하량이 작음 (41.8mm/설계) 단면 분할(11)에 따른 공기 소요 다수의 접속개소에 따른 방수문제	지표 침하량이 큼 (50.2mm/설계) 단면분할(8)이 적음 접속개소가 상대적으로 적음

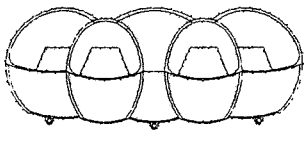
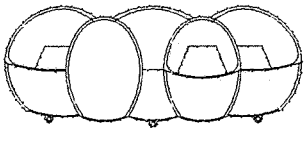
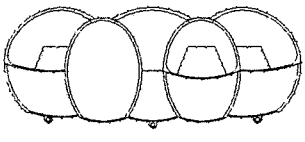
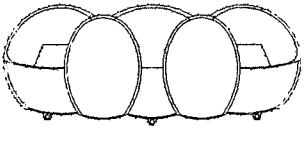
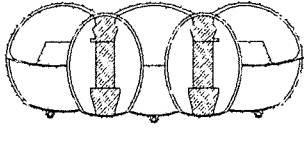
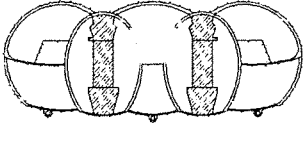
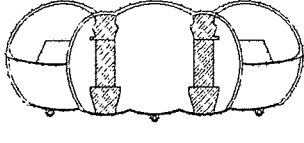
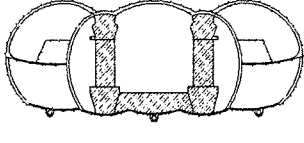
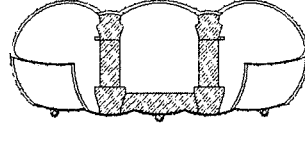
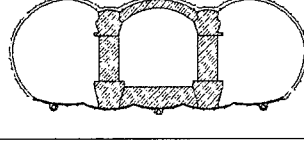
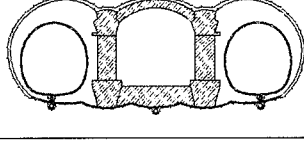
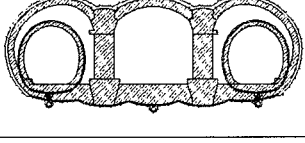
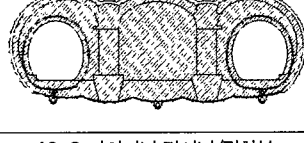
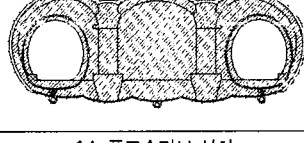
		
1. 좌측상부 링컷 굴착	2. 좌측부 하반 굴착	3. 우측부 상반 굴착
		
4. 우측부 하반 굴착	5. Pilot 터널 거더/기둥 시공	6. 중앙터널 상반 굴착
		
7. 중앙터널 하반 굴착	8. 중앙터널 바닥 시공	9. 확폭터널 상반 굴착
		
10. 확폭터널 하반굴착/라이닝	11. 본선터널 굴착	12. 본선 라이닝 시공
		
13. 3-아치터널 라이닝/접합부	14. 풍도슬라브 설치	

그림 3. 3-Arch 터널 시공 순서도

은 주로 2차원 유한차분해석(FLAC 2D)을 통하여 이루어졌으며, 터널의 단면 방향으로 평면변형을 조건을 가정하여 시공 단계별로 해석이 실시되었다.

3-Arch 터널의 굴착단면은 총 11면으로 분할되었으며, 시공 순서별로 정리하면 그림 3과 같다. 본

터널의 굴착에 앞서 중앙터널과 좌우 확폭터널의 교차 위치에 2개의 선진터널을 순차 시공하되, 각 터널들은 상하 반단면으로 분할 굴착하여 시공되었다. 그 후 2개의 선진터널 가운데 기둥 열을 시공하고 중앙터널을 굴착한 후, 좌우 확폭터널을 동시 시공



(a) Pilot 터널 기둥/거더 시공



(b) road-header 굴착



(c) breaker 굴착



(d) 확폭 터널굴착

그림 4. 시공사진

하였다. 시공 중 안정성 확보를 위하여, 3-Arch 터널의 굴착은 breaker, road-header 등 모두 기계굴착으로 시공 하였다(그림 4 참조). 터널의 지보는 주로 슛크리트와 록볼트로 하되, 굴착 폭에 비해 상대적으로 저 토피인 점 등을 감안하여 터널의 전 구간에 걸쳐 상부에 10° 경사의 강판다단그라우팅을 시공하였다. 그리고, 굴착선을 강관의 외주면에 일치시킴으로써 종단거리에 따라 굴착단면 및 슛크리트의 두께가 변하는 변단면으로 시공되었다. 한편, 선진터널 시공 중 안정성을 확보하기 위하여 2개의 좌우측 선진터널(pilot tunnel)간의 원 지반인 pillar 부에는 후행(우측)터널 굴착 시공시 선행터널과 tie-bolt로 체결하였으며, 기둥 하부에는 마이크로 파일을 시공하여 기초의 지지력 증대를 도모하였다.

4. 갱구 가시설 시공

3-Arch 터널 갱구 가시설 흠막이벽의 설계는 상용 탄소성 해석 프로그램을 이용하였으며(SUNEX), 전체적인 안정 검토를 위하여 극한평형법에 기초한 사면안정해석(TARLEN97)을 추가하였다. 각각의 해석은 최종 굴착단계까지 흠막이벽의 단면방향, 즉 터널의 종단 방향으로 평면변형을 상태를 가정하여 이루어졌다.

3-Arch 터널의 갱구부, 즉 104정거장 개착부의 흠막이 가시설 구조물은 구조용 H-형강을 이용한 엄지말뚝+토류벽과 어스앵커 및 소일네일로 구성되었다. 또한, 추가적인 안정성 확보를 위하여 소일네일의 하부위치에 갱구부 수평 사보강재를 삽입하였다(그림 5 참조).

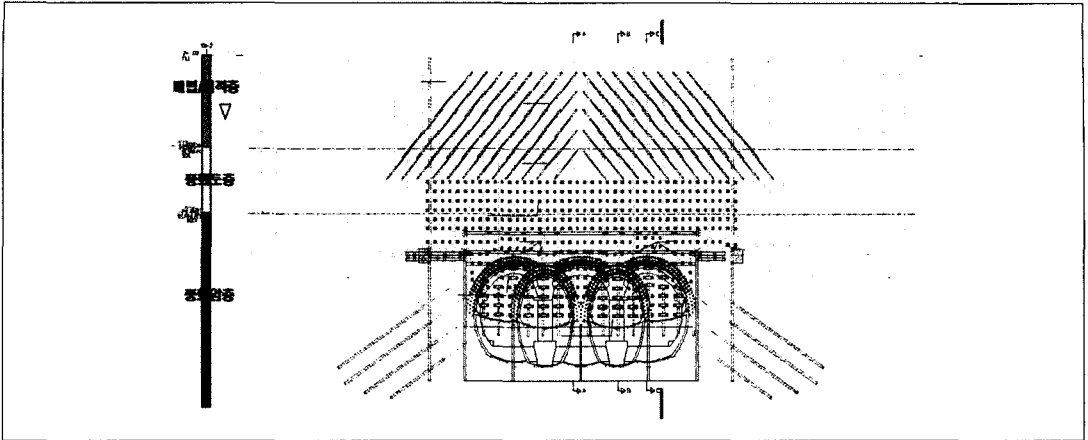


그림 5. 갱구 가시설 및 보강재 설치 단면

표 3. 터널 관통단계에서의 계속항목별 최대 측정치

항목	측정치	기준치	측정 위치	비고
확폭부 천단침하(mm)	23.6	29	880 위치 확폭터널	갱구거리에 반비례
총 지표침하(mm)	41.8	134	850 위치 중앙터널 상부	
기둥응력(kg/cm ²)	80	130	880 위치 기둥응력 평균	갱구거리에 반비례
지하수위(m)	-	GL-23m	터널주위 원지반	선진터널굴착후 일정
갱구 사보재 축력(tf)	-	110	우측 사보재 2단	

5.3-Arch 터널 계속결과

양측 확폭터널을 굴착 완료한 현재 단계에서의 최대 계속치와 각 단계별 측정결과를 요약하면 표 3과 같다.

5.1 지표 침하

최대 지표침하는 3-Arch 터널 구간과 개착구간의 경계인 STA.4K+880으로부터 30m 떨어진 STA.4K+850 위치인 터널의 중앙부분에서 발생하였다(그림 6 참조). 최대값은 최종단계인 확폭터널 단계에서 134mm로 원설계인 41.8mm에 비하여 3.2배 정도로 매우 크게 측정되었다. 이중 선진터널

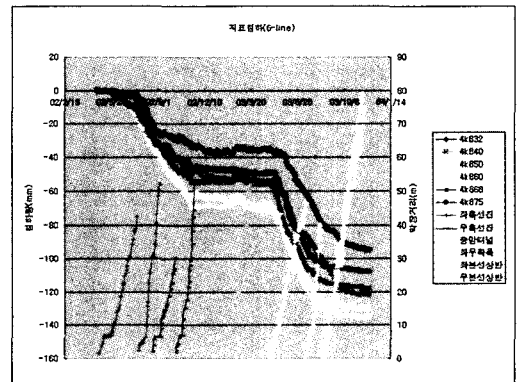


그림 6. 굴착단계에 따른 지표 침하

단계에서 지표침하량은 65mm, 중앙터널 단계에서 8mm, 확폭 터널 단계에서 61mm으로서 굴착면적이 큰 선진터널 단계와 확폭터널 단계에서의 침하량

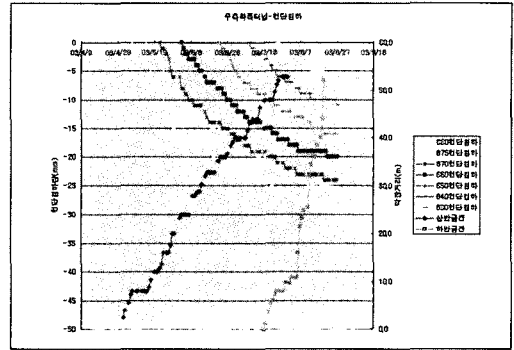
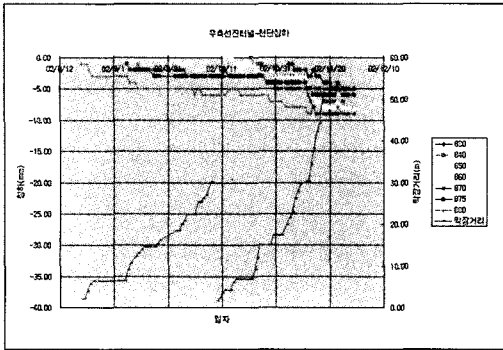


그림 7. 굴착단계에 따른 천단 침하

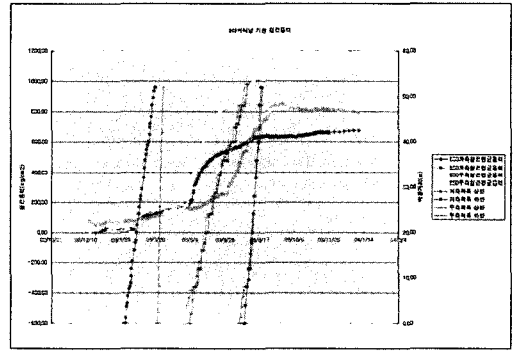
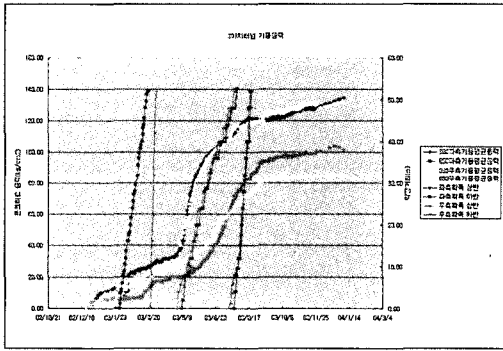


그림 8. 굴착단계에 따른 기동 응력의 변화

이 크게 나타났다.

한편, 지하수위는 3-Arch아치 터널 시공 전 정거장 개착부 굴착과 관련하여 이미 상당히 저하된 상태였으며, 선진터널 굴착 후 터널 굴착과 관련한 지하수위 저하는 크지 않았다.

5.2 천단 침하

최대 천단 침하량은 각 단계별로 선진터널 단계에서 12mm, 중앙터널 단계에서 8mm, 확폭터널 단계에서 29mm로 선진터널 단계와 중앙터널 단계에서는 비슷한 반면에 확폭터널 단계에서의 천단침하량은 비교적 크게 나타났다.

한편, 이 값들은 중앙터널 단계에서는 지표침하와 비슷한 크기이나, 선진터널 단계나 확폭터널 단계에서는 지표침하와 비교하여 상대적으로 매우 작은 수치를 알 수 있다.

선진터널 단계나 중앙 터널단계에서의 천단 침하량은 종단위치에 따른 변화경향이 분명치 않았으나, 확폭터널 단계에서의 천단침하는 전 구간에서 걸쳐 갭구로부터 거리에 반비례하여 감소하는 경향이 뚜렷하게 나타났다.

5.3 기동응력

기동은 중앙터널의 굴착에 앞서 시공된 것으로서,

중앙터널 굴착단계에서의 기둥 콘크리트 응력은 약 22kg/cm^2 정도로 그다지 크지 않았다. 이는 중앙터널 굴착단계에서의 굴착량이 비교적 작고 굴착 후 형상이 비교적 원만하여 어느 정도 아칭효과가 발생한 결과로 추정된다. 그러나, 확폭터널 단계에서는 기둥 콘크리트의 응력이 급증하여 120kg/cm^2 정도로 측정되었다. 특이한 점으로는 이 최대 응력의 발생위치는 3-Arch 터널의 종단상 STA.4K+880 위치로 갱구부에 해당하며, 터널의 중앙부에 설치된 STA.4K+850 위치의 기둥에서의 콘크리트 응력은 설계값과 유사한 크기인 73kg/cm^2 로 나타났다.

기둥 철근에 설치된 철근 응력계 측정 결과에 의하면, 터널 시공 중 기둥 철근의 응력은 기둥 콘크리트의 응력보다 약 8배 정도 크게 나타났다. 굴착 종료 이후, 기둥 철근의 응력은 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보이는 데에 반하여, 콘크리트 응력은 계속 완만하게 증가하였는데, 이는 지속하중에 의한 콘크리트의 크립 현상에 기인한 것으로 판단된다.

5.4 갱구 사보강재 축력

초기 단계인 선진터널 굴착단계까지는 갱구부 사보강재에 연결된 띠장의 끝단이 개착부 정거장 구조물에 지지되지 않았다. 따라서, 이 시기에는 사보강재에서 유발된 축력에 의해 띠장에는 상당한 크기의 종방향 변위가 발생한 것으로 추정된다. 이에 중앙터널 굴착단계에서는 갱구 가시설을 보수하고 사보강재 띠장의 끝단을 개착부 정거장 콘크리트 구조물에 지지시킴으로써 갱구 가시설의 변위를 억제하였다(그림 9 참조). 그 결과, 이후 단계에서 가시설의 변위는 감소하였으나, 상대적으로 사보강재의 축력은 매우 증가하였다. 최종굴착 단계인 확폭터널 굴착단계에서는 갱구부 사보강재의 최대 축력은 약

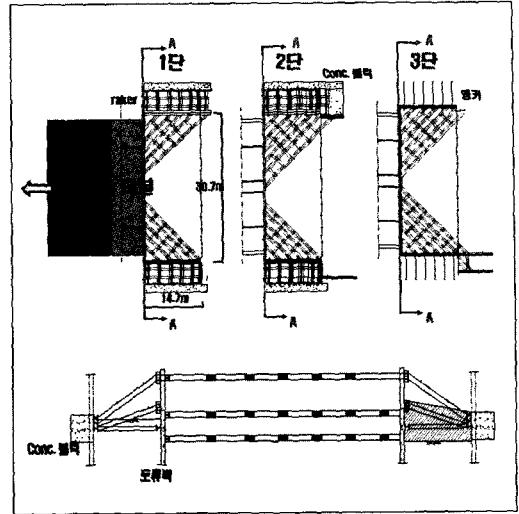


그림 9. 갱구 가시설 사보강재 개요도

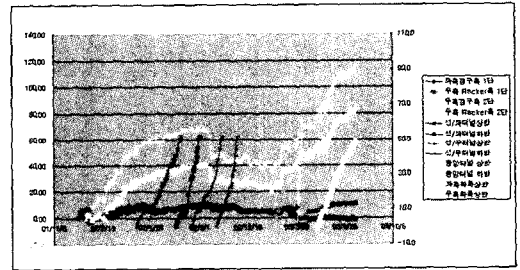


그림 10. 갱구 가시설 사보강재 축력도

110t 까지 증가하였다.

5.5 계측결과 종합

이상과 같이 계측결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 대전 지하철 1-5공구의 최종 굴착단계에서의 총 지표 침하량은 설계치와 비교하여 상당히 크게 나타났으며, 천단 침하량에 비해서도 매우 크게 측정되었다. 이와 같은 과도한 지표침



하, 특히 천단 침하량 이상으로 지표침하가 발생한 것은 일부 지하수위 저하 영향과 굴착 중 발생한 갱구 가시설의 변위에 따른 지표침하의 영향이 큰 것으로 추정된다.

2) 확폭터널 단계에서 천단침하는 갱구로부터의 거리에 반비례하여 감소하는 것으로 나타났다.

한편, 기둥의 응력은 갱구위치의 기둥응력이 일반부 위치의 기둥응력보다 크게 나타났다.

3) 본 경우와 같이 터널 폭에 비하여 길이가 짧은 터널의 경우에는 갱구부의 영향권이 매우 크며, 터널의 종단방향 거동은 무시할 수 없다고 판단된다.

GeoFrontiers 2005, Austin, Texas

January 24-26, 2005

Michael W. O'Neill Symposium

ADVANCES IN DEEP FOUNDATIONS: CONSTRUCTION, DESIGN AND TESTING

Call for Papers

Sponsors : Geoinstitute (GI), Deep Foundations Committee, DFI, ADSC and PDCA

Several sessions are planned for the GeoFrontiers 2005 on Advances in Deep Foundations to highlight the contributions of late Professor M. W. O'Neill to Deep Foundations in specific and geotechnical engineering in general. Abstracts are invited from authors on such topics as drilled shafts, augered piles, driven piles, construction and service issues related to piles, loading and integrity testing of piles and related case studies. Authors of the papers are encouraged to support/criticize or refer to O'Neill's work in their papers. Based on the review of the abstracts authors will be invited to write papers. In order to meet the deadline for publishing, papers will be due by the end of May for review. Based on the organizing committee decision, some papers will be selected for oral presentation and the others for poster presentation. All the papers will be published in the proposed GSP in memory of O'Neill with some of O'Neill's outstanding papers and a few invited papers.

Deadline : March 15, 2004 for 300-word abstract.

Contact : C. Vipulanandan (Vipu), Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston, Houston, Texas 77204-4003.

Phone: (713)743-4278; Fax (713)743-4250; email:cvipulanandan@uh.edu