

대심도 해저 쉴드터널 안전시공을 위한 계측관리

Monitoring management for safety construction of deep shield tunnel

유길환¹⁾ Yoo - Kil Hwan, 김영수²⁾ Kim - Young Soo, 황대영³⁾ Hwang - Dae Young,
곽정민⁴⁾ Kwag - Jung Min, 정성교⁵⁾ Chung - Sung Gyo

- | | | |
|----|---------------------|---|
| 1) | 쌍용건설 소장, 동아대학교 박사과정 | President, Ssang Yong E & C, Doctoral student |
| 2) | 쌍용건설 차장, | Vice Chip, Ssang Yong E & C, Master of engineering |
| 3) | 신안종합건설 과장, 공학석사 | Manager, Shin An Construction Co, Master of engineering |
| 4) | 동아대학교 토목공학과 계약교수 | Research Fellow, Dong A University |
| 5) | 동아대학교 토목공학과 정교수 | Professor, Dong A University |

개요(SYNOPSIS) : During the construction period of submarine shield tunnel, which is built firstly in very soft marine clay layer 40m deep in Korea, wide range problems were encountered such as safe launching against high earth pressure at shield entrance, technique of shield face pressure control when passing through complex multi-layered soils. This paper introduces successful construction practice through development of state-of-the-art construction method and field monitoring.

주요어(Key words) : Shield tunnel, Deep complex deposit, Monitoring management, Soft clay ground,

1. 서론

녹산하수처리장 방류관거의 해저터널공사는 녹산국가공단(부산광역시 강서구 신호동 소재)에서 늘차도에 이르는 해저 1600m 구간에 $\Phi 3500\text{mm}$ 의 하수도용 공동구를 쉴드터널공법으로 시공되었다. 이 구간의 지반 조건은 낙동강 하구의 연약 점성토가 광범위하게 분포하고 있는 지역이며, 발진부가 되는 녹산국가공단은 사석으로 매립되어 있는 지역으로 장기적으로 침하가 계속되고 있는 상황이다. 따라서, 발진부 터널의 위치를 매립에 의한 침하의 영향범위 밖에 설치하여야 하는 관계로 발진구의 심도가 지표면에서 47m 깊이로 설계되어 깊은 굴착과 대심도의 흠막이벽 공사를 필요로 하였고, 초기굴진 시 높은 토압으로 인한 붕괴 위험성이 대두되었다. 또한 본 쉴드터널은 사질토지반에서 연약 점성토 지반 및 암반 구간으로 진행되는 복합지반을 관통하는 공사로서 쉴드기 선정, 침하대책 및 이수압관리 등으로 많은 문제점이 발생하였지만 국내에 축적된 기술이 부족하여 외국 시공사례로부터 해결방법을 검토하였다.

본 논문에서는 먼저, 지하연속벽을 관통하는 쉴드기 발진시, 높은 토압에 대한 안전을 고려한 보조공법을 검토하여 경제적이고 안전한 시공성 확보를 위한 신공법을 개발·적용하고, 또한 쉴드기가 복합지반에서 진행할 때 지반거동에 대한 터널의 안전성을 확보하기 위해 계측토압을 이용하여 막장압 관리를 수행한 내용을 분석 정리하였다. 대심도 연약지반에서의 쉴드터널 시공 중 안전시공을 위한 현장 계측 및 분석을 실시하였던 사례를 체계적으로 분석하였다.

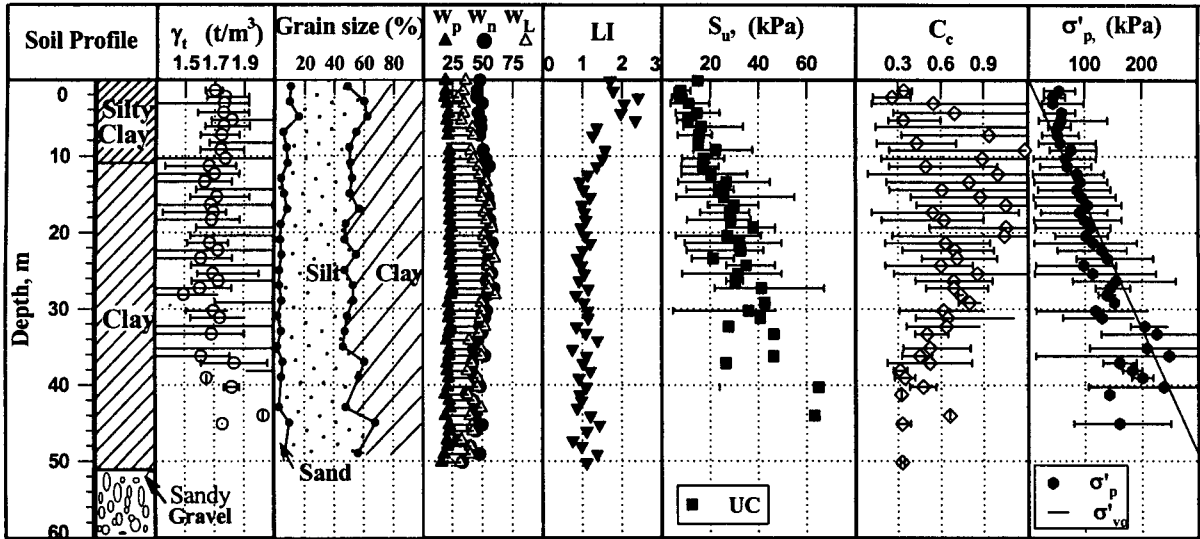


그림 1 녹산지역 데이터베이스에 나타난 토질시험 결과 (Chung and Giao, 2001)

2. 쉘드터널 구간의 토질 특성

쉘드터널 발진부의 연직구지점은 녹산 국가공단 조성시 매립한 지반으로서 녹산 지역 전역에 대한 매립전의 지반에 대한 토질 특성은 그림 1에 나타난 바와 같다. 대체적으로 상부 10m까지 Silty clay가 존재하고 그 하부에 점토층이 심도 50m까지 존재한다. 점성토구간은 자연함수비가 액성한계와 거의 같거나 약간 큰 연약한 점토층이며, 역학적 특성값이 매우 분산되어 나타나고 있는 이유는 그동안 시공한 여러 회사별 데이터를 집약하였기 때문이다.

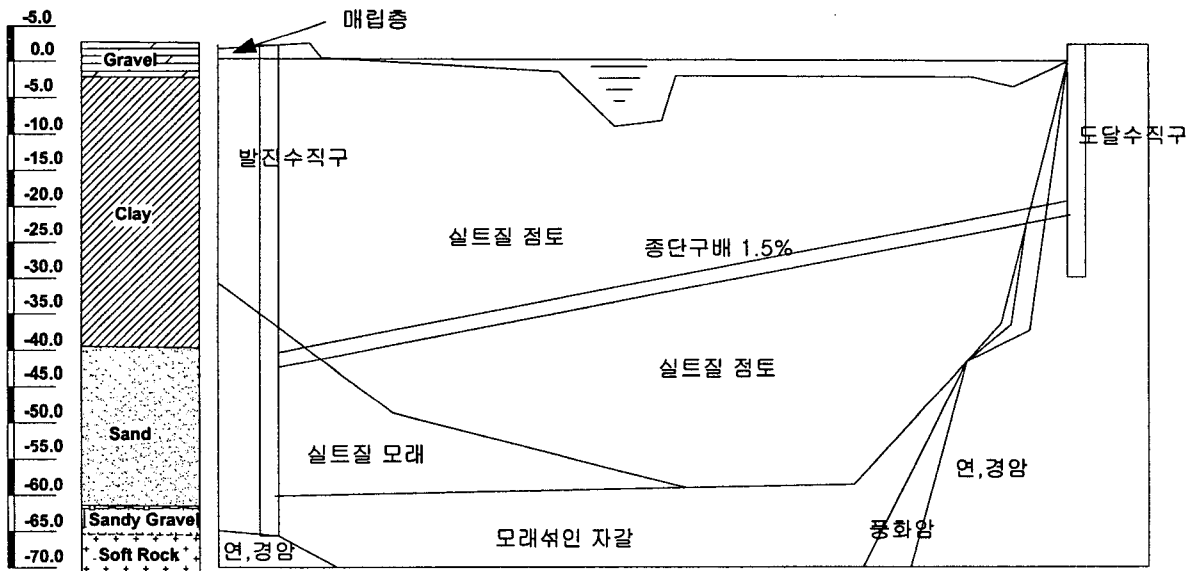
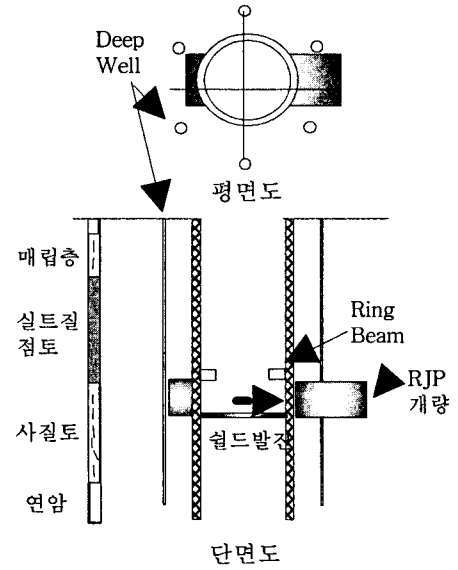


그림 2 쉘드 터널의 횡단면도와 연직구 부분의 토질주상도

그림 2는 쉴드 터널 발진부 지점의 토질 주상도와 터널구간의 개략적인 지층을 나타낸 것이다. 터널은 G.L -47m에서 발진하여 상향구배 1.5%의 선형을 유지하며 G.L -22m의 도달수직구에 관통된다. 또한 본 쉴드터널은 발진부로부터 쉴드터널 진행 방향으로 약 50m 지점은 사질토층에서 연약 점토층으로 통과하고 1500m 지점에서는 다시 암반층으로 진입하게 되어 있어 다양한 지층에 대응해야하는 공사이다. 이러한 복합지층의 굴착에 적용할 수 있고 대심도에서 5kg/cm²이상의 토압이 작용할 때 막장의 안정을 위하여 이수가압식 복합지질형 쉴드기를 주문제작 하였다.



3. 발진연직구 설계 및 시공

그림 3은 발진 연직구의 개략적인 평면도와 단면도이다. 토질조사 결과를 이용하여 대상현장의 공학적 특성에 적합한 지하연속벽을 설계하였고, 지하연속벽은 사질토지반 용기 또는 보일링에 대한 안전을 고려하여 암반층 1m를 굴삭하여 G.L -70.2m의 연속벽체를 형성하였다. 또한 쉴드기 거치 및 entrance packing 설치를 고려하여 내공단면 15m를 결정하였다. 연속벽체의 두께 1.2m는 토목구조해석용 SAP90을 사용하였으며 지하연속벽 시공이 완료된 후 내부를 굴착하였으며, 굴착 후 벽체 안정을 위해 심도 G.L -41.2m지점에 Ring Beam 1개소를 설치하였다. 보조공법으로서 연직구의 시공시 기반암과 만나는 지역의 차수성을 증대시키기 위하여 연직구벽체 바닥과 기반암 사이에 Toe-grouting을 실시하였으며 또한 쉴드기 초기 발진시 갱구에 작용하는 토압과 수압을 경감시키기 위하여 Deep Well 6개소를 설치하였다. 그리고 쉴드기 초기 굴진 시 지하연속벽체내부로 토사가 유입되는 것을 방지하기 위하여 R.J.P 40공을 실시하고 쉴드기 굴진 시 추가 반력에 대응하기 위하여 후면부 R.J.P 10공을 실시하였다. 연약지반 대심도 발진연직구 시공시 수압과 지반거동에 따른 발진수직구 구조물의 floating 및 moving 등 변화를 방지하고자 cap beam concrete를 타설 하여 발진 연직구 자중으로 인한 구조물의 부상을 방지하였고, 발진연직구를 기반암에 1m 관입시켜 수평력에 대한 저항력을 증가 시켰다.

그림 3 발진연직구 개략적 단면도

3.1. 발진 연직구 토압 계측에 따른 시공상 문제점

발진연직구에서의 설계 시 심도별 토압은 SAP2000 프로그램으로 예측하였다. 그림 4는 설계토압과 연직구 외면에 설치한 토압계에서 측정된 심도에 따른 실측 토압을 비교한 그래프이다. 설계 시 토압은 수압과 편토압을 고려하여 깊이별로 5단계로 설치하여 굴착 완료 후 약 1개월에 걸쳐 계측하였다. 그림에서 Ko는 정지토압, Ka는 주동토압계수를 나타낸다. 전반적으로 전

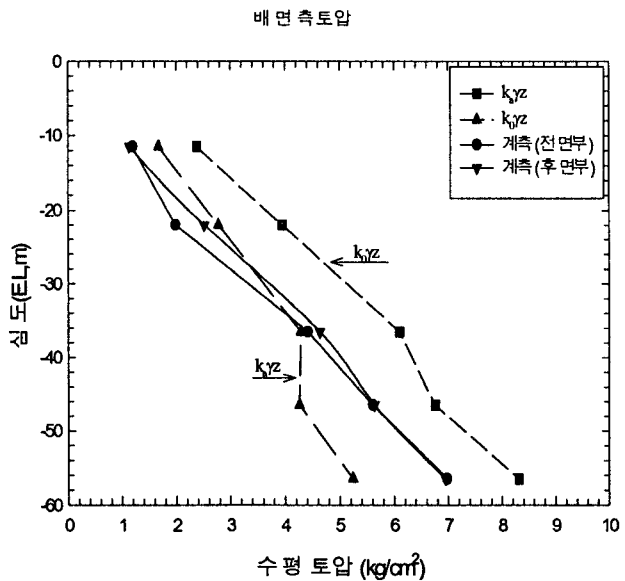


그림 4 심도에 따른 수평토압의 분포도

면부와 후면부에서 측정된 계측값이 설계값(정지토압)보다 더 작은 값으로 연직구 벽체에는 수평토압에 의해 큰 영향이 없고 안전함을 보여주고 있다. 계측값은 상부에서 중간부분까지는 주동토압값과 거의 같게 나타나고 있으며, 최종굴착부분에서는 더 크게 측정되고 있다. 본 대상현장에서 수평토압에 대한 설계값을 산정하기 위하여 편토압을 고려하였으나, 이는 너무 과대한 안전을 고려한 것으로서 수평토압의 산정에서는 편토압을 고려하지 않아도 무방할 것으로 판단된다.

발진부의 토압이 5.73kg/cm²정도에 해당되며 이는 매우 큰 압력이므로 쉘드터널 발진 시 발진부의 붕괴 위험을 초래 할 수 있기 때문에, R.J.P지반개량과 Deep Well 배수 공법을 병행하였다. 이러한 시공단계에 따른 토압경감 효과를 깊이 -11.5m, -22.0m -36.5m, -45.5m 및 -56.5m의 5개소에서 측정된 벽체에 작용하는 토압을 통하여 나타낸 것이 그림 5이다. 토압계에 의하여 측정된 초기 수평토압은 이론식으로 구한 기준값과 거의 동일하거나 약간 작게 나타났다. 연직구 내의 굴착 진행과 양수작업에 의하여 벽체에 작용하는 수평토압은 급격히 감소하였다가, Shield발진을 위한 연속벽체의 관통이 이루어진 후 양수 작업의 종료로 인한 지하수위의 상승으로 다시 수평토압이 초기의 값으로 증가함을 알 수 있다. 이는 시공과정에 따른 간극수압의 변동에 의한 영향에 기인한 것으로 판단된다.

보조공법의 효과는 수압이나 토압의 경감으로부터 알 수 있다 표 1에 나타난 바와 같이 R.J.P 시공 후 간극수압의 감소량은 0.68kg/cm²이나, 자연 토압의 감소량은 0.5kg/cm²로 0.18kg/cm²만큼 차이가 발생하였으며, 이는 R.J.P 개량체 내부가 완전 방수되지 않았고 중첩 효과 미흡으로 판단된다. deep well 양수를 통한 간극 수압도 4.00kg/cm²에서 3.45kg/cm²으로 0.55kg/cm²의 감소경향을 나타내지만, 수압의 변화가 측정되는 것으로 미루어 볼 때 R.J.P 개량 범위 내 지하수의 흐름이 완전 차단되지 못함을 의미한다. 따라서 쉘드터널 갱구부 조성 시 기존 콘크리트를 깨고 쉘드기를 설치 및 발진할 때 수압으로 인한 지반 침수가 예상되었으므로 대체 공법이 필요하였다.

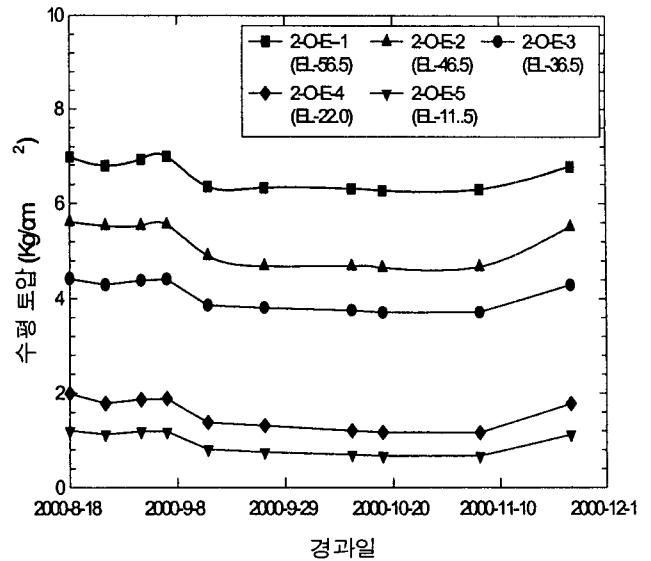


그림 5 시간에 따른 수평토압 변화

표 1 토압 및 간극수압 계측결과

공정 (2000년)		자연토압 (kg/cm ²)	간극수압 (kg/cm ²)
설계	원지반 추정	6.00	4.36
지하연속벽 시공후 (5/23)		5.73	4.68
R.J.P공 시공후 (9/6)		5.20	4.00
Deep Well 가동후(9/9)		4.76	3.45

3.2. 지하연속벽 안전 굴진 공법

대심도 쉘드터널 공사는 발진 수직구를 축조한 후 수직구 벽면에 수평 굴착용 갱구부를 조성한다. 하지만 토압 및 수압에 대응하기 위하여 대단면의 철근 콘크리트 벽체로 시공되는데 이 벽체가 초기 굴진시 장애물로써 이를 제거하기 위하여 인력에 의존한 가벽 철근콘크리트 깨기 및 철거에 많은 노력과 위험을 수반한다. 따라서 수직구 벽체를 쉘드기가 직접 굴진 가능한 재질로 설치하거나, 지반개량 및 동결공법 등을 이용하여 완벽한 차수성을 확보하여 인력 굴착에 따른 지반의 안정이 확보되어야 한다. 연

약지반 터널공사가 많은 일본에서는 주로 대심도에 동결공법을 적용하고 있으며, 최근에는 특수벽체를 적용하기도 하는데 대상 현장에서는 경제성·시공성 등을 검토하여 지하연속벽체를 쉴드기로 직접 굴진할 수 있는 일본의 NOMST공법과 유사한 신소재 벽체를 계획 시공하게 되었다. 신소재 벽체는 국내 생산되는 F.R.P부재를 지하연속벽 철근망에 결속시켜 현장타설 모르타르와 합체시킨 것으로서, 쉴드기가 직접 굴진 가능토록 하였다. 또한 종래의 고무 패킹식에 비하여 우수한 차수성을 실현시킬 수 있는 Flap식 및 특수 Tube를 적용하여 유압을 조정함으로써 쉴드기 자체 센서부에서 측정된 수압 및 토압을 분석하여 추가적인 수압의 변화에 따른 자체 유압을 증가시켜 차수성 확보를 가능하게 한 2중 유압 튜브식의 특수 entrance packing을 개발하였다. 쉴드기 선정 시 쉴드기 내부의 센서에 의한 토압을 측정할 수 있는 시스템이 구축되어 측정된 토압에 따른 entrance packing에 오일을 주입하여 대응압을 조정 관리하였으며, 지하연속벽 관통 시 수압은 6.0kg/cm²로 계획되었고, 최대 6.5kg/cm²까지 견딜 수 있는 내구성을 가지고 있다. 그리고 지하연속벽 관통직후 신속한 이토 배출을 통해 수압을 경감 시켰다. F.R.P 신소재 벽체설치와 특수 entrance packing을 거치하여 지하연속벽을 굴진한 결과 토압 및 수압에 안전하고 경제적인 시공성과를 이룰 수 있었다.

4. 쉴드터널 안전 시공 계속 관리

터널 공사에서 가장 중요한 시공관리는 막장압관리를 들 수 있고, 당 현장과 같은 대심도에서 높은 토압이 작용할 경우 적절한 세그먼트 강도가 유지되어야 한다. 심도에 따른 세그먼트 구조적 안정 검토는 쉴드터널 설계 시공지침(1983)을 참조하길 바람직하며 본 논문에서는 안전 시공을 위한 계속 관리에 대하여 언급하기로 한다.

4.1 세그먼트 변형 및 파괴관리

쉴드터널의 세그먼트 시공관리 부실은 터널의 붕괴에 직접적인 영향을 미치며 특히 변형이나 크랙 발생을 방지하여야 한다. 크랙발생의 가장 큰 원인은 쉴드기의 클리어런스가 협소하고, 쉴드기와 조립되는 세그먼트와의 방향 불일치 등이다. 크랙발생을 방지하기 위하여 쉴드기 추진관리 측량을 1일 2회 이상 실시하여 쉴드기의 예상 진로를 미리 예측하여 굴진사행이 발생되지 않도록 관리하였다.

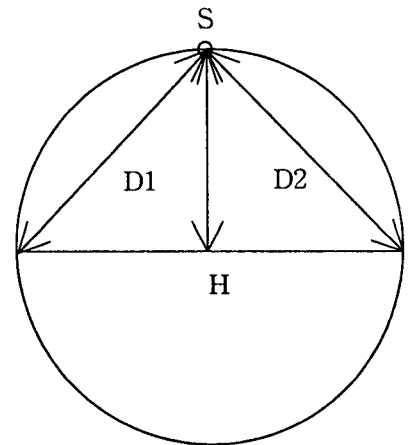
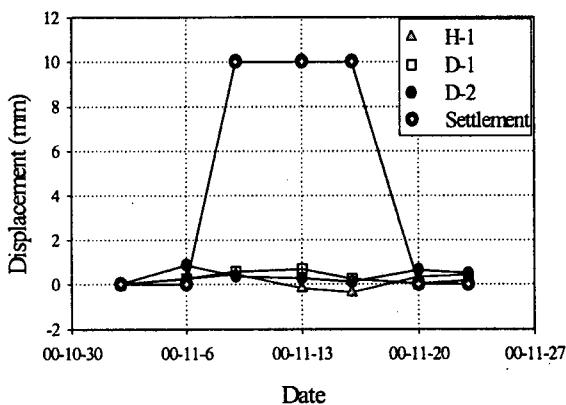
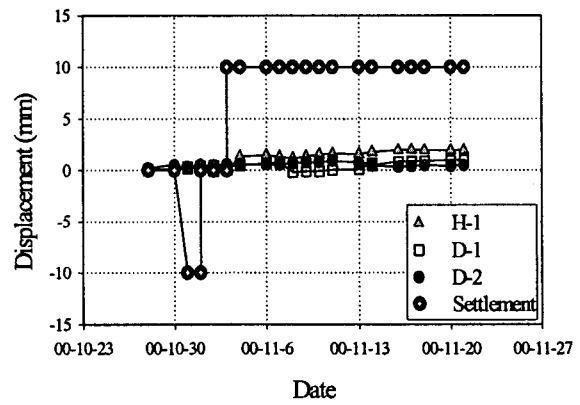


그림 6 터널의 계속 위치도



(a)



(b)

그림 7 지층변화구간의 내공변위 및 침단침하 (a)사질토-점성토, (b)점성토-암반

셴드터널은 셴드기 추진 후 세그먼트와 굴착된 지반사이에 공극이 생기며, 이 공극에서 발생된 변형은 지반거동 및 지반침하를 발생시킬 수 있다. 지반거동으로 인한 세그먼트에 미치는 영향을 알아보기 위하여 세그먼트 제작 시 외부에 토압계를 매설하여 셴드기 굴진 후 세그먼트에 미치는 토압분포를 확인하는 방법이 효과적이지만, 셴드기 내부 원통과 세그먼트 사이의 공극이 협소하여 설치가 불가능하였기 때문에 그림 6에 나타난 것과 같이 일반터널 계측에 사용되는 내공변위와 침단침하 계측을 통하여 세그먼트 변위 발생 영향을 분석하였다.

그림 7의 (a)와 (b)는 지층의 변화가 발생하는 위치의 세그먼트에서 계측된 내공변위와 침단침하를 나타낸 것으로, (a)는 사질토에서 점성토, (b)는 점성토에서 암반 변화 지점이다. 그림 7의 (a)와 (b)에서 알 수 있듯이 외부 토압변화에 의해 세그먼트 내공변위는 거의 발생되지 않았으며 침단침하도 $\pm 1\text{cm}$ 미만으로 나타난다. 당 현장의 세그먼트는 소요강도를 충족시키고 있으며 시공 상 급격한 지반거동이 발생하지 않았음을 알 수 있다.

4.2 막장압 관리

본 셴드터널 구간에서 발진구에서 도달구까지 막장에 작용하는 수압은 $4.4\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$, 토압은 $5.8\text{kg}/\text{cm}^2$ 에서 $2.8\text{kg}/\text{cm}^2$ 사이에 존재한다. 지반을 셴드기에 의해 굴삭되면 그때까지 지반이 보유하고 있었던 응력이 해방되어 해방면으로 향하여 변형 하려한다. 지반침하를 억제, 막장의 안정을 도모하기 위해서는 이 해방력에 상당하는 힘으로 막장을 되밀 필요가 있다. 이수식 셴드에서는 막장의 해방력에 대하여 이수압으로 저항하게 되는데 이수압의 결정에 대해서는 많은 이론 및 경험치가 있으며 (셴드터널 시공 지침, 1983) 당 현장에서는 셴드기 내부에서 이완토압을 직접 계측하여 이완 토압보다 $0.2\text{ kg}/\text{cm}^2 \sim 0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 추가 이수압으로 가하면서 막장압을 관리하였다.

그림 8은 굴진 초기부터 암반구간 도달 지점까지의 막장압 계측 결과를 나타낸 것이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 막장압은 수압 및 토압과 밀접한 관계가 있지만 부분적으로 증가 혹은 감소하고 있으며 이는 굴진력과 속도에 영향을 받은 것으로 판단된다. 이수압이 필요이상 증가하게 되면 그 압력은 셴드기 추진에 저항하게 되므로 과대한 추진력을 요구하게 되며 이는 세그먼트 크랙발생의 주 원인이 될 수 있으므로 이수압 관리를 철저히 수행하여야 한다.

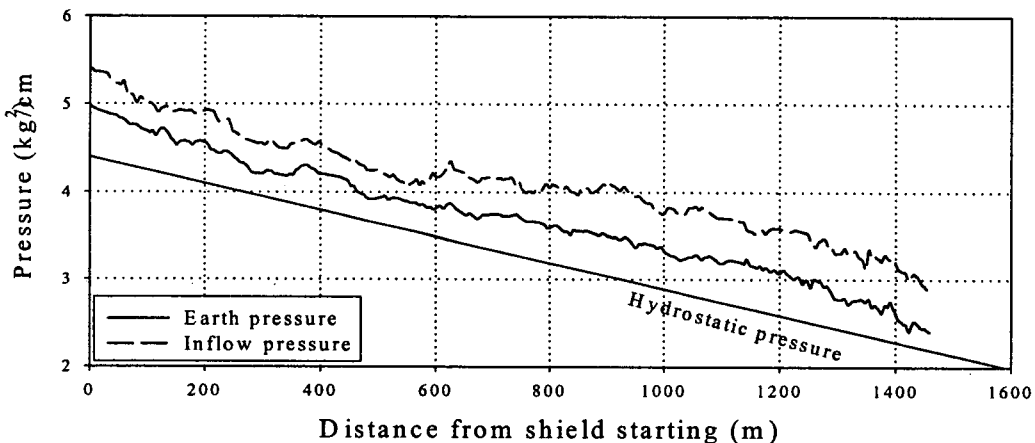


그림 8 심도별 막장압 및 이수압 관리 분포도

5. 지층경계부 굴진 및 도달부 관통

지층경계부 굴착 시 쉴드기의 부상(浮上)에 의한 선형이탈이 우려되므로 지반보강을 실시하여야 하며 본 공사에서는 해상오염과 민원 보상 및 공사 지연을 방지하기 위하여 쉴드기 내에서 직접 수평 그라우팅 보강(S.G.R)을 실시하였다. 지층경계부 지반 보강이 완료된 후 쉴드기를 지반개량구간에 진입시키고, 암반구간 굴착전 air lock을 설치 가동하였다. air lock은 발진수직구의 터널 입구에 설치하여 터널 내부 및 막장에 압력을 가압하여 외부 수압에 저항하고 막장을 자립시켜, 토사의 챔버내 유입을 방지함으로써 쉴드기 cutter 점검 및 교체작업을 안전하게 수행하기 위한 보조 system이다. 쉴드기 cutter 점검 및 교체작업 완료 후 지층경계부를 굴진하였다. 쉴드기가 암반부 진입 직전 갑작스런 수압의 증가와 다량의 모래가 막장내로 유입되었으나 굴진을 일시 중지하여 막장압을 관리하고 안정액을 투입하여 지반을 안정시킨 후 추진하였다. 지층경계부 통과 후 암반에 도달할 때 다소의 소음과 진동 발생이 있었으나 굴진 선형에 거의 영향을 미치지 않고 암반까지 진입 할 수 있었다.

도달 수직구는 쉴드기가 최종적 도달지점으로 놓차도 해안에 위치하며 제어발과공법(Smooth Blasting)을 이용하여 암반층에 수직구를 구축하였다. 도달 수직구에 쉴드기가 관통되었을 때 설계 선형에서 5cm 이내 편차로 도달되었다. 이는 쉴드기 자체의 자이로 시스템에 의한 위치확인파 외부 GPS 측량 기술의 결과로서 우수한 정밀도를 확인하였고 국내 최초의 대심도 해저 쉴드터널을 굴착하는 난공사를 당 현장의 기술진의 노력으로 안전하게 시공 완료하였다.

6 결 론

1. 연약지반 대심도 발진연직구 시공시 수압과 지반거동에 따른 발진연직구 구조물의 floating 및 moving 등 변화를 방지하고자 설치하였던 cap beam concrete 와 발진수직구 기반암에 1m 관입은 발진연직구의 구조적인 안정을 확보 할 수 있었다.
2. 토압 경감을 위한 보조공법인 R.J.P 지반개량이나 deep well 양수는 실측 토압 계측결과 당초 예상했던 만큼 지반개량 및 경감 효과를 보이지 않았으며, 대체 공법으로서 신소재 벽체와 특수 entrance packing 개발하여 경제적이며 안전한 초기 굴진이 가능하였다.
3. 쉴드터널 시공 중 계측한 세그먼트 내공변위와 천단침하량은 지층변화 구간에서도 거의 발생하기 않았으며, 막장압 관리를 실측 데이터를 이용하여 0.2 ~ 0.5kg/cm²의 추가 이수압으로 실시하였기 때문에 쉴드기 굴진에 의한 급격한 지반거동을 방지 할 수 있었다.
4. 본 공사는 국내에서 최초로 G.L-40m 이상의 복합 지반에 시공한 대심도 쉴드터널로서 설계에서 완공까지 많은 시공상의 문제점이 도출되었으나 이러한 문제점들을 신기술 개발과 정확한 계측관리로서 안전시공을 하였다.
5. 쉴드기가 지층경계부 통과시 고려되었던 수평 그라우팅 지반보강으로 장비의 부상을 억제하여 안전성을 확보 하였으며, 특히 자연환경보존 측면과 민원 예방 및 보상에 따른 추가 비용 발생을 방지 할 수 있었으며, 이는 쉴드기 제작시 현장 여건을 고려하였기 때문이다.
6. 세계적으로 터널굴착의 추세는 도시형 굴착, 대심도 및 다양한 지반에의 적용 등에 여러 가지 이점이 있는 쉴드터널 굴착으로 향하고 있으며 새로운 공법들의 개발이 성행되고 있다. 특수터널 굴착에 있어서 국내에서의 시공사례가 적기 때문에 외국의 시공사례 및 공법에 의존하고 있는 추세이다. 이러한 점으로 미루어 볼 때 본 논문을 비롯한 일련의 연구들은 쉴드터널 분야에서 훌륭한 시공사례로 남을 것으로 사료되며 합리적이고 경제적인 시공방법을 제시한 자료라고 판단된다.

참 고 문 헌

1. 대한토목학회 (1999) 토목기술강좌 토목시공·지반분야 (Ⅱ), VOL.4, NO.1, pp.7-24, 103-159
2. 도서출판 과학기술 (1998), 실무자를 위한 토류구조물 설계실무 편람, pp.11-24.
공학석사 논문
3. 도서출판 건설도서 (1997) “지하연속벽공법 설계·시공 핸드북”, p.495.
4. 부산광역시 건설본부 (1999) “녹산하수처리시설 방류관거 실시설계 보고서”.
5. 선진건설턴트(주) (2000) 녹산하수처리장 계측관리 및 분석계획서
6. 쉘드 공법자동화 시스템 편집간사회편 (1987) : 쉘드 공법의 자동화 시스템, 일본토목공학회,
7. 이인기, 이승훈 (2000). “초연약지반 매립지 통과구간에서의 쉘드터널 설계”, 제1차 터널 기계화 시공기술 심포지움 논문집. pp.177-192.
8. 이종규 (1992). “굴착 및 흙막이 공법”, 한국지반공학회, 지반공학시리즈3, pp.360-361.
9. 일본토목학회(1983), 일본 하수도학회편 : 쉘드 터널의 설계시공지침.
10. 일본터널기술협회연구개발위원회 쉘드공법조사소위원회 (1986) : 쉘드공법의 도시터널에의 적용성에 관한 조사보고서.
11. 유길환 (2001). “연약 점성토 지반에서 대심도 연직구에 작용하는 수평토압 및 응력에 대한 연구”, 공학석사 논문
12. 정윤영, 유길환, 김영수 (2002.5). “대심도 연약지반에서의 해저 쉘드 터널 시공사례 연구” 터널학회 논문집
13. 한국지반공학회., (1996). “지반공학시리즈③ 굴착 및 흙막이 공법”, pp. 129-283.
14. 황대영 (2001). “대심도 연직구에서 쉘드터널 수평굴진을 위한 특수벽체 시공 및 차수공법에 대한 연구”
15. Das, B. M. (1985). “Principles of Geotechnical Engineering”, Book/Cole ENG. DIV. pp.348-439.
16. Peck, R. B. (1969). “Deep Excavation and Tunnelling in Soft Ground”, 7th ICSMFE, Mexico, State-of-the-Art, pp.225-290.